



HÖGSKOLAN I BORÅS

INSTITUTIONEN INGENJÖRSHÖGSKOLAN

Vattenavvisande impregnering av betong

Framställning och undersökning
av vattenavvisande betongytor

Hydrophobic impregnation of concrete

Preparation and study of
water-repellent concrete surfaces

Basir Nasiri
Alexander Oliva Rivera

Vattenavvisande impregnering av betong

Hydrophobic impregnation of concrete

Alexander Oliva Rivera

0706-033617

alexander.oliva_rivera@hotmail.com

Basir Nasiri

0762-920725

baseer420@hotmail.com

Kandidatuppsats examensarbete

Ämneskategori: Teknik

Högskolan i Borås

Institutionen Ingenjörshögskolan

501 90 BORÅS

Telefon 033-435 4640

Examinator: Staffan Svensson, Professor

Handledare

Högskola: Agnes Nagy, Universitetslektor

Adress: Högskolan i Borås, Allégatan 1, 501 90 Borås

Handledare

CBI: Katarina Malaga, VD

Adress: CBI Betonginstitutet, Brinellgatan 4, 504 62 Borås

Uppdragsgivare: CBI Betonginstitutet

Datum: 2015-05-25

Nyckelord: betong, hydrofob, superhydrofob, impregnering, kontaktvinkel, roll-off, tekniska textilier, silikonformar, ytskydd, ultrahögpresterande, CBI, vattenavvisande, examensarbete, ytmodifiering, SP

Förord

Examensarbetet har utförts tillsammans med CBI Betonginstitutet i Borås och är ett avgränsat område i ett EU-projekt där CBI koordinerar.

Arbetsfördelningen har varit jämn, där vi, Alexander och Basir, har jobbat tillsammans under hela arbetets gång. Laboratorierna har utförts tillsammans utan någon större uppdelning. När det kommer till rapportskrivandet har det utförts främst tillsammans på högskolans bibliotek. Detta anser vi att teoridelarna blev enklare att tolka och diskutera parallellt mellan teori och experiment.

Vi är nöjda med de resultat vi uppnått för att det här kan bidra till vidare forskning om utveckling av hydrofoba och superhydrofoba betongytor. Arbetet hade aldrig uppnått de resultat som det gjort utan hjälp av flertal individer. Först och främst vill vi tacka våra handledare Adj. Professor Katarina Malaga på CBI Betonginstitutet och universitetslektor Agnes Nagy på Högskolan i Borås som bidragit mycket till utformningen av rapporten. Ett stort tack till Oskar Malaga som har varit delaktig under arbetets gång och bidragit vid de experimentella utföranden samt svarat på frågor gällande vår ämneskategori byggt teknik. Sist men inte minst vill vi även rikta ett stort tack till universitetslektor Mats Johansson som bidragit oss med textilier och postdoktor Junchun Yu som gjort det möjligt för oss att utföra kontaktvinkelmätning på Textilhögskolan i Borås. Tack till övriga personer som hjälpt oss på ett eller annat sätt att genomföra arbetet.

Borås, våren 2015

TACK!

Basir Nasiri & Alexander Oliva Rivera

Abstract

The focus of this study was to develop and evaluate hydrophobic surfaces of concrete. The idea was based on an assumption that nano-modification of concrete surface, in combination with a hydrophobic impregnation, can result in superhydrophobic concrete. The work was performed in cooperation with the CBI Betonginstitutet in Borås, where the laboratory tests of ultra-high performance concrete, and the effects of two different hydrophobic agents, StoCryl HG200 and SILRES®BS1001, on water repellency, were investigated. In order to produce a textured surface, different techniques were used: to cast concrete in the textile forms and to produce new forms of silicone with textile patterns. For the production process, different types of textile were selected. The results indicated that different textiles, of different surface structure, can influence the hydrophobicity level of the concrete surface. Silicone form has proven to be most efficient in the texturing of the concrete surface, and in combination with impregnation, several superhydrophobic surfaces were achieved. Silicone can be re-used, thus contributing to a sustainable and repeatable technique. The tests used for the examination of hydrophobicity were: roll-off and contact angle. The durability of the hydrophobicity level of the surfaces against freeze was tested. The test did not follow a standard method but was based to the regular climatic conditions that occur in Sweden,.

The use of ultra-high performance concrete with super hydrophobic surfaces can protect the façade and the insulation against penetrating damp. The façade thickness of 10 mm could successfully exchange thick façade element with steel reinforcement. In conclusion, the concrete surface is easy to clean, and due to its long life spans, it is economically favorable.

Sammanfattning

Syftet med projektet var att utveckla och utvärdera vattenavvisande betongytor. Idén grundades på ett antagande om att nano-modifiering av betongytan i kombination med en hydrofob impregnering kan resultera i superhydrofob betong. Detta arbete genomfördes i samarbete med CBI Betonginstitutet i Borås, där laboratorietester av ultrahögpresterande betong och effekterna av två olika hydrofoba medel, StoCryl HG200 och SILRES®BS1001, gällande vattenavstötning, undersöktes. För att framställa en textilmönstrad yta, har olika tekniker använts: att gjuta betong på textilytan och att framställa nya silikonformar med textilavtryck. Under tillverkningsprocessen valdes olika typer av textilier. Resultaten indikerade att olika textilier, med olika ytstruktur, kan påverka hydrofobicitet nivån hos betongytan. Silikonformen har visats sig vara mest effektiv i strukturen av betongytan och i kombination med impregnering, har flera superhydrofoba ytor uppnåtts. Silikon kan återanvändas och därmed bidrar till en hållbar och repeterbar teknik. De tester som använts för undersökning av hydrofobicitet var: roll-off och kontaktvinkeln. Hållbarheten på absorptionsförmågan av ytorna mot frost testades. Provningsen följde ingen standardmetod men var anpassad till de vanliga klimatförhållanden som råder i Sverige.

Användningen av ultrahögpresterande betong med superhydrofoba ytor kan skydda fasaden och isoleringen mot inträngning av fukt. Fasadskivans tjocklek på 10 mm kan med fördel ersätta ett tjockt fasadelement med stålarmring. Sammanfattningsvis är betongytan lättrengörande och på grund av dess långa livslängd, är det ekonomiskt fördelaktigt.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Frågeställning	2
1.3 Syfte & Mål	2
1.4 Avgränsningar	2
2. Teori.....	3
2.1 Allmän ytskydd/impregnering	3
2.2 Hydrofoba ytskydd/impregnering	4
2.3 Högpresterande betong.....	6
3. Material och Metod	14
3.1 Betongblandning	15
3.2 Gjutformar i textil och silikon.....	18
3.3 Avrinningsvinkel – roll-off vinkel	19
3.4 Vattnets avrinningsbenägenhet – kontaktvinkel metoden.....	20
3.5 Provning av impregnerad betong mot frost.....	21
4. Resultat.....	23
4.1 Hydrofobtest.....	25
4.2 Roll-off vinkel	29
4.3 Kontaktvinkelmätning.....	32
4.4 Frostpåverkan av impregnerad betong mot absorptionsförmågan	35
4.5 Tryckhållfastheten och E-modulen	37
5. Diskussion	39
6. Slutsatser	42
Referenser	44

Bilaga 1	Alla textilier och de modifierade betongytor
Bilaga 2	Textil, silikon och modifierade betongytor på T1,T4 och T6
Bilaga 3	Resultat från kontaktvinkelmätning för 5,5 µl vattendroppe

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Betong är den mest mångsidiga och använda byggnadsmaterial inom vår tid. Det finns ännu betongbyggnader från romarriket idag som man kan beskåda och förstå den långa livslängden hos till exempel Pantheon i Rom. Den moderna betongen har använts i ca 130 år, dess sammansättning har varierat och har under åren förändrats samt anpassats till olika tillämpningar. Idag beräknas betong ha en livslängd på minst 100 år (Svensk Betong u.å.). Genom användning av högpresterande betong kan man även ha en längre livslängd med hög hållfasthet och bibehållen god beständighet. I teorin har betong en mycket lång livslängd, upp till flera tusen år. Faktorer som frost, karbonatisering, nötning, kloridinträngning med efterföljande armeringskorrosion m.fl. kan minska livslängden på betongen. Genom att behandla betongytan med impregneringsmedel och använda textila material för modifiering av yttopografi kan man ytterligare utöka livslängden och minska underhållskostnader.

Detta examensarbete fokuserar på tillverkning och undersökning av superhydrofoba (extremt vattenavvisande) betongytor av ultrahögpresterande betong, med en hållfasthetsklass på omkring 180-200 MPa, jämfört med standard betong som har en hållfasthet på omkring 30-60 MPa. Inom projektet jämför vi hur olika impregneringsmedel och olika textilier påverkar ytegenskaperna hos betong. Impregneringen appliceras i betongblandningen. Gjutningen utförs i en form som beläggs med en textil och resulterar i ett ytmönster. Kombinationen mellan en mönstrad yta och impregnering skall resultera i en superhydrofobisk yta där t.ex. regn-vattnet rullar av. Detta fenomen är inspirerat från naturens mest kända superhydrofob, lotusblommans blad som ser till att regndropparna enkelt rinner av utan att ytan blir fuktig och smutsig (Feng och Jiang 2000).

Tidigare forskning har gjorts om tekniska textilier (textilier till tillämpad forskning och utveckling) i betong där vår handledare, Katarina Malaga, sedan 2009 koordinerat tre projekt (Tekocrete I, Tekocrete II och H-House). Två av dessa är fokuserade på att modifiera betongytor med textilier för att uppnå en självrenande eller lättrengörande effekt på ytan, vilket har bidragit som utgångspunkt i detta examensarbete. Genom att använda sig av ultrahögpresterande betong kan tjockleken minskas på fasadelementen avsevärt, ett mått på 10 mm kan bli tillräckligt istället för 70 mm för en standard fasadbeton eftersom ingen stålarmering och därmed inget täckskikt behövs. Behandlar man en betongyta med vattenavvisande impregneringsmedel skyddar man underliggande lager som t.ex. isoleringen mot inträngning av fukt vilket resulterar i förbättrad isolering, minskad risk för biologisk påväxt samt materialskador. Syftet har varit att utveckla en teknik för mekanisk och kemisk modifiering av ytor som blir beständiga och lätta att underhålla.

1.2 Frågeställning

- Kan en betongyta bli hydrofob och vilka krav ställs på en sådan yta?
- Vilken teknik finns idag och i framtiden som kan bli lämplig för att åstadkomma sådana ytor?
- Vilka betongegenskaper påverkas av olika kemiska ytbehandlingar som appliceras på ytan eller betongblandningen?
- Varför är det viktigt att åstadkomma hydrofoba ytor? Ekonomisk, miljö- och estetisk nytta.

1.3 Syfte & Mål

Det primära syftet med examensarbetet är att undersöka möjligheter för utveckling av vattenavvisande betongytor med hjälp av textilier och hydrofoba (vattenavvisande) impregneringar.

Ett annat syfte är att utföra en litteraturstudie om betongens ytor, impregneringar och hur textilier, med dess struktur, påverkar ytor för att förstå vilka parametrar som påverkar den vattenavvisande effekten. Vidare kommer informationen, för resultat delen, att användas som utgångspunkt till framtida projekt om impregneringar och olika modifieringar av betongytor med hjälp av textilier.

Målet med arbetet är att framställa superhydrofoba betongytor med god beständighet till avsedda miljöer och för vidare forskning.

1.4 Avgränsningar

Detta examensarbete har avgränsats på vad som händer i betongens yta vid modifiering av textilier och hydrofoba impregneringsmedel vilket inte har undersökts tidigare. Arbetet kommer att omfatta mätningar av kontaktvinkel och roll-off. Undersökning av frostbeständighet av de ytmodifierade ytorna ingår i arbetet. Resultaten för mekaniska tester hämtas från två EU projekt som CBI Betonginstitutet (CBI) koordinerar (SESBE och H-House) där samma betongblandning för ultrahögpresterande betong används. Allt eftersom otillräcklig information om ultrahögpresterande betong finns, har vi utgått till högpressterande betong som vår litteraturstudie. Inga mekaniska tester rörande tryckhållfasthet utförs i detta arbete men information finns hämtad från SESBE och redovisas i resultatdelen. Textilier och silikon används för att skapa ett mönster på betongytan men inga fördjupande studier utförs på de materialen. Teflon och plast används inte för modifiering av betongytan. Endast hydrofoba impregneringar används i detta arbete, ingen annan teknik som polymermodifierad betong eller andra typer av impregneringar som epoxi har använts. Inga etiska aspekter har berört detta examensarbete.

2. Teori

2.1 Allmän ytskydd/impregnering

Ytskydd har sedan länge varit en viktig faktor för vissa typer av betongkonstruktioner, trots betongens goda egenskaper behövs i vissa fall någon form av ytskydd. Detta i syfte att öka livslängden på betongkonstruktioner som ekonomiskt gynnas genom att skydda mot t.ex. fuktgenomträngning som kan minska livslängden.

Inom åren har nya typer av ytskydd ökat i stor mängd för olika användningsområden, alla med olika ändamål och för olika typer av konstruktioner. Vattenavstötande ytskydd är ett exempel som används utomhus på t.ex. fasader där det tunna ytskyddet i regel är polymerbaserade och effektiva (Johansson 1992).

Ytskydd som används specifikt mot aggressiva vätskor är användningsområdet vanligtvis i industrier med sur miljö, där vätskor som t.ex. syror och vissa salter mot betong förekommer. I andra områden som brobaneplasser och parkeringshus används ytskydd mot kloridinträngning eftersom betongen kommer i kontakt med vatten innehållande klorider (Johansson 1992).

Första kravet som ställs på ytskydd mot aggressiva vätskor är tätheten, då detta skapar en såpass tät yta att angripande vätskor inte kan trängas igenom betongen. Trots den täta ytan kan farliga vätskor som t.ex. saltsyra tränga sig in i betongen genom diffusion som kan förstöra vidhäftningen i betongen, därmed krävs i de flesta fall vattentät ytskydd. Annat krav som är självklart är att skyddet måste motstå förekommande ämnen och i några fall kan krav på värme- och nötningstålighet m.m. förekomma (Johansson 1992).

Estetiken påverkar mycket vid val av ytskydd i många fall. Dessa ytskydd som görs enbart av estetiskt ändamål kan erbjuda en viss skyddseffekt. När det gäller val av ytskydd tar man hänsyn till ytskyddets egenskaper, där kravet ska uppfyllas till avsedd miljö. Vidare faktorer som medföljer är kostnad, utförandet, applicering m.m. (Johansson 1992).

Idag finns det olika tekniker som används för självrengörande fasader, se bild 1. Hos Biltema har fasaden tillverkats av Cements och Strängbetong som använts sig av fotokatalysatorbeläggningen titandioxid TiO_2 . När UV-ljus träffar fasaden aktiveras fotokatalysatorn som bryter ner organismer som mossor och alger. Hydroxylradikal (OH) bildas även vid UV-ljus på betongytan och skapar en hydrofil yta. Därmed attraherar ytan vatten som i sin tur leder bort smutspartiklarna med passivt regn (Hertzell 2013).

I förhållande till hydrofoba ytskydd stöter det direkt bort vattnet och inget lagras på ytan, där nanoteknik används främst för att stöta bort vattnet men håller inte vid längden.



Bild 1. Självrengörande fasad av titandioxid TiO_2 . Hertzell (2013).

I fråga om krav på olika egenskaper av ytskydd hänvisas det till en publicerad tysk standard, DAfStb (1990) och till den gällande europeiska standarden EN 1504-2.

2.2 Hydrofoba ytskydd/impregnering

Saltinträngning är ett av de vanligaste problemen som angriper betongkonstruktioner, särskilt broar och andra konstruktioner som ligger nära kusten, men även från vägsaltning.

Idag använder man hydrofoba medel för att förebygga skador, dessa medel innehåller silaner som siloxaner och är vattenavvisande. Vid blandning sugts medlet in i betongen som binds kemiskt till porväggarna. Fördelen med detta är att porsystemet förblir den samma, vilket ger möjligheten till diffusion av vattenånga, som är viktigt för betongen då det hindrar frostsprängning och förhindrar vatteninsamling (Hertzell 2013).

Några av prestandakrav för ytliga skydd sammanfattas i EN 1504-2:2004.

Hydrofoba medel är inte enbart funktionellt för mekaniska syften, utan även för estetiska ändamål på grund av dess färglöshet som knappt har någon inverkan på ytans utseende. Inträngningsdjupet, betongens permeabilitet, fukt innehåll och molekylstorlek är några viktiga faktorer för att medlet ska kunna fungera till dess fulla potential. Vid tvättning och vattenrengöring kan medlets skyddseffekt minskas eller försvinnas, därför är det viktigt att medlet trängs in så djupt som möjligt i betongen. Enligt Hertzell (2013) bör minsta inträngningsdjupet vara 5 mm detta även för att kunna uppväga möjligen för inträffande sprickbildningar. Eftersom medlet påverkar tätheten på så sätt att porsystemet ändras i betongen ser det till att vattnet har svårare att tränga igenom betongytan. Man ska då ta hänsyn till permeabilitet, fuktinnehåll och molekylstorlek som också påverkar tätheten, detta är viktigt för att få ett fungerande porsystem, för att förebygga frostsprängning och vatten ackumulering (Hertzell 2013).

Trots medlets goda skyddseffekt är ytlig inträngning ömtålig mot åldring. Detta ger inte heller någon motståndskraft mot långvariga och kvarstående vatten innehållande klorider på horisontella ytor, t.ex. broar, vägar, P-hus, balkonger m.fl. Trafikverkets AMA-TRV, sätter

krav på att en impregnerad yta ska ha ett högre motstånd mot viktförlust efter ”frost-tö-salt” testet. För att ett impregneringsmedel/ytbehandling skall bli godkänt så ska det impregnerade provet motstå 20 frostcykler fler än det som inte impregnerats enligt EN 1504-2:2004.

Smuts är inte det enda som angriper betongkonstruktioner, vegetation som alger, mögel, mossor och svamp kan även vara ett dilemma. Bildning av denna påväxt har inte någon stor inverkan på betongens kvalitet. Heltäckande mossor kan däremot bidra med fukt på ytan av konstruktionen, detta kan leda till ökad risk av frostnedbrytning, kloridinträngning och armeringskorrosion, men riskerna är inte så stora. Frågan lutar då mer åt estetiska ändamål, om konstruktionen ska se ren ut eller att miljön har sin egen gång och lämnar sitt avtryck (Hertzell 2013).

Av den orsaken att smuts inte ger någon skyddande effekt på ytan, bör konstruktionen rengöras. Rengöringsmetoderna ger däremot oftast mer skada än själva smutsen. Ytans struktur kan skadas vilket leder till snabbare nedsmutsning. Det kan även ske en reaktion mellan cement och sura föroreningar samt rengöringsmedel som kan bilda saltkristaller, det leder till sprängning av betongen. Rengöring av fasader kan göras bäst med enbart varmt vatten, men det finns risk för skador då vattnet sprutas med enorm kraft. Då är frågan att kanske låta smutsen stanna kvar än att riskera skador på konstruktionen (Hertzell 2013).

Kraven som ställs gällande ytskydd mot vatten är att:

- Vara vattentät eller vattenavvisande
- vara ånggenomsläpplig
- ha en god åldringsbeständighet
- ha en god beständighet mot betongens alkalinitet
- ha en god beständighet mot temperaturskillnader
- tåla mekanisk belastning, i vissa fall
- förebygga sprickor
- inte missfärga betongen.

Skyddet bör även vara lätt att applicera med enkla medel med fördel av enkel reparation (Johansson 1992).

2.3 Högpresterande betong

Med högpresterande betong menar man att betongen har en hög tryckhållfasthet uppemot 150MPa och andra speciella egenskaper som täthet och beständighet, dessa egenskaper är förbättringar av en följd av reducerat vbt. De avgörande faktorerna att hålla vct eller vbt lågt är i stor utsträckning val av cementsort, tillsatsmedel och ballastegenskaper (Sandberg 2000).

Vattencementtalet(vct, se ekv.1), kvoten mellan mängden vatten och mängden cement avgör vilken hållfasthet betongen har, lägre vct än 0,40 kännetecknar högpresterande betong, ofta med tillsats av silikasoft. Vi har en vct på omkring 0,21.

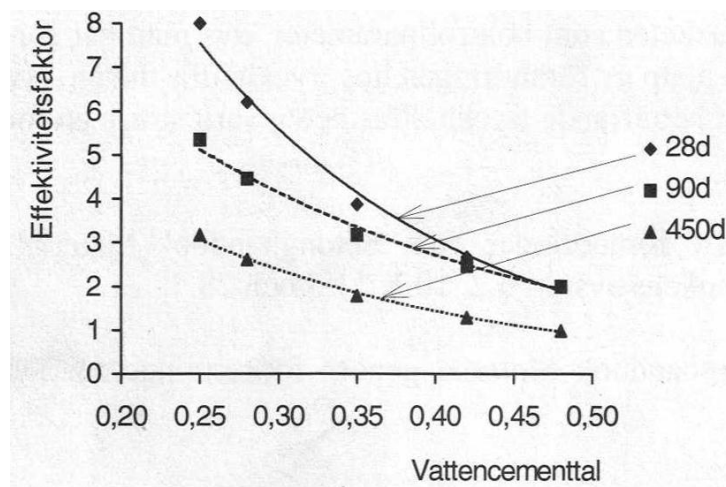
$$vct = \frac{W}{C} \quad (\text{ekv.1})$$

C = cementhalt
W = vattenhalt

Eftersom vår betong innehåller silikasoft omräknas mängden silikasoft till en ekvivalent cementning, C_{eq} . Denna erhålls genom att multiplicera mängden silikasoft med en effektivitetsfaktor k, se figur 1. Effektivitetsfaktorn beskriver ett tillsatsmaterials effekt på hållfasthet som anger hur stor del av cement kan ersättas av tillsatsmaterialet. Faktorn k är inte konstant utan är beroende av betongens ålder (Redaktionsgruppen 1997). Det ekvivalenta vattencementtalet beräknas av följande formel (vct_{eq} , se ekv.2).

$$vct_{eq} = \frac{W}{C + k * S} = \frac{W}{C + C_{eq}} \quad (\text{ekv.2})$$

C = cementhalt
W = vattenhalt
S = silikasoft



Figur 1. Effektivitetsfaktor som funktion av vattencementtal och ålder. Persson(1996).

Eftersom även tillsatsmaterial och tillsatsmedel tillsätts under framställningen av högpresterande betong använder man istället för vattencementtalet ett så kallat vattenbindemedelstalet (vbt, se ekv.3) som definieras enligt BBK, där alla använda tillsatsmaterial

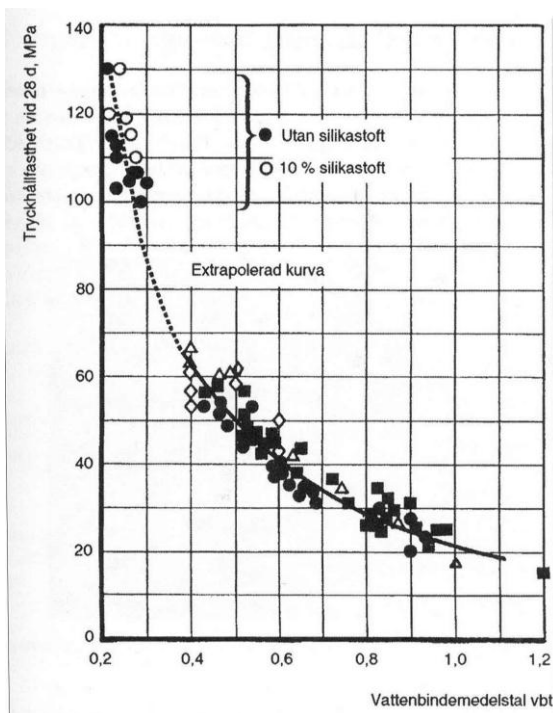
multiplieras med en effektivitetsfaktor k (0,3 för Flygaska t.ex.). Värdet på effektivitetsfaktorn relateras i regel till 28 dagns normhållfasthet, eftersom hållfastheten är ett mått på bindemedlets gelbildande förmåga hos cementgel (Sandberg 2000).

$$\frac{W}{C + Si + 0,3FA} = vbt \quad (\text{ekv.3})$$

C = cement
W = vatten
Si = Silikastoft
FA = Flygaska

Observera att man i beräkningen av vbt inte tar hänsyn till flyttillsatsmedel och mineralfyllning.

Sambandet mellan kubhållfastheten och vbt för standard betong och högpresterande betong visas i figur 2.



Figur 2. Samband mellan vbt och tryckhållfasthet. Värdet för $vbt > 0.40$ gäller betong utan silikastoft, $vct = vbt$. Burström (2006, s.255).

I detta examensarbete har Sikament HD10, producerad av Sika Sverige AB använts som flyttillsatsmedel. Det är en vattenreducerande flyttillsatsmedel och mycket god hållfasthetstillväxt.

Flyttillsatsmedlet påverkar den kemiska bindningen av vatten och cement samt ersätter kemiskt bundet vatten vilket leder till en minskad vct . Det dispergerar även cement och mikrofiller på ett sätt att betongen blir så kompakt som möjligt (Byfors 1997).

Högpresterande betong är dock mycket känslig för överdosering av vattenreducerare, detta kan leda till en så kallad retarderande effekt, en fördröjning av betongens tillstyvnad. (Sandberg 2000).

Den mest avgörande betydelsen för den färska högpresterande betongens E-modul är partikelstorleken på ballastmaterialer, vilket medför lättare bearbetbarhet. Inverkan av E-modul i högpresterande betong bestäms även av cementpastans egen E-modul.

Elasticitetsmodulen är en parameter inom hållfasthetsläran och beskriver förhållandet mellan mekanisk spänning och deformation. Det kan definieras på olika sätt, beroende på vilken spänningsskillnad som gäller. Av den anledningen skiljer man mellan tangentmodul E_{tan} och sekantmodul E_{sek} , se figur 3, där elasticitetsmodulerna illustreras som lutningen hos räta linjer i ett spänning-deformation-diagram (Hillerborg 1997).

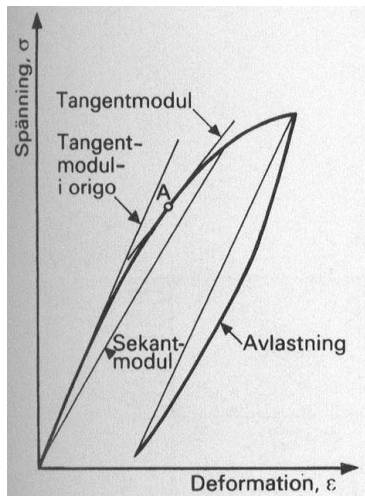
SESBE projektet har utgått från E_{sek} (se ekv.4) som E-modul i detta betongrecept som används och värdet redovisas i kap 4.1.

$$E_{sek} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{ekv. 4})$$

E_{sek} = Sekantmodul

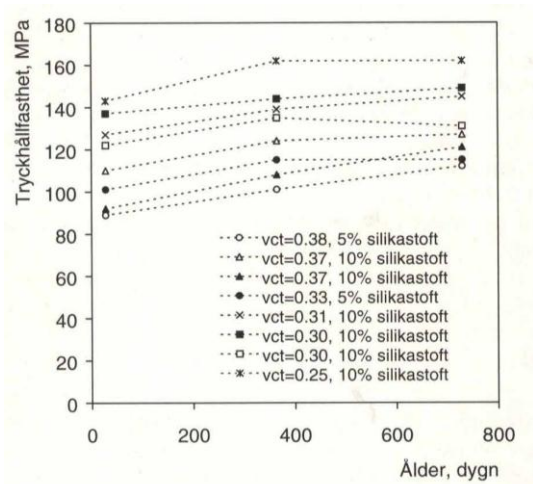
σ = Spänning

ε = Deformation



Figur 3. Definitioner av elasticitetsmoduler. Hillerborg (1997).

Utifrån vct påverkas hållfastheten även av andra faktorer som ballast och mognadsgrad. Det vill säga att högpresterande betongens tryckhållfasthet ökar med åldern, ett samband mellan ålder och tryckhållfasthet visas i figur 4 där silikastoft har tillsätts.



Figur 4. Samband mellan ålder och tryckhållfasthet, kub 100 mm. Persson (1995).

Att få till en hög hållfasthet enligt Fagerlund(1994) krävs att fukthalten i finfraktionerna ska kontrolleras. Små ändringar av fukthalt ger större hållfasthetsvariationer.

Graderingskurvan för sanden har stor betydelse för bearbetbarheten, påvisats av Persson (1995) där han baserar på mer än 400 provade betongblandningar, att siktkurvan skall uppfylla följande krav (s, se ekv.5), där "idealkurvan" kan användas som utgångspunkt för en proportionering i detta examensarbete där sand har använts. (Fagerlund 2000):

$$s = a * d^b \text{ för } 0,125 < d < 0,7d_{\max} \quad (\text{ekv. 5})$$

s = Passerande mängd på sikt d mm (%) (Passeringsmängden för sand illustreras i figur 5)

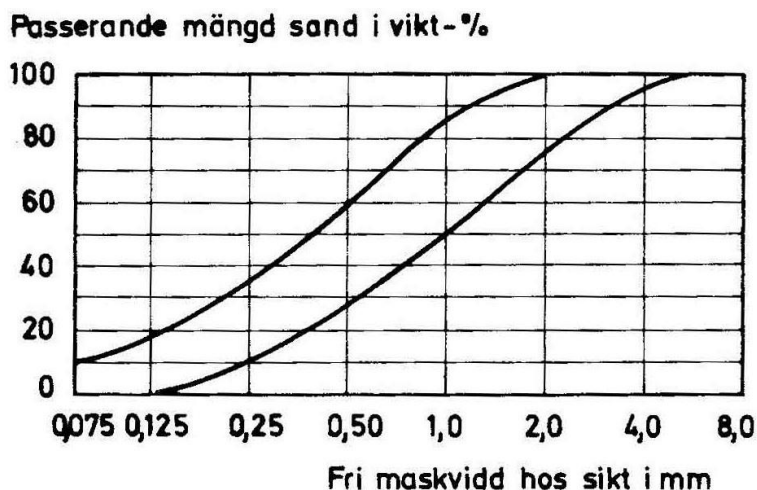
a = Konstant som varierar något från blandning till blandning (Ett normalvärde är $a = 38$.)

d = kornstorlek

b = Koefficient beroende på betongens hållfasthetsnivå (se tabell 1)

Tabell 1. Koefficienten b i ekv. 5. Persson (1995).

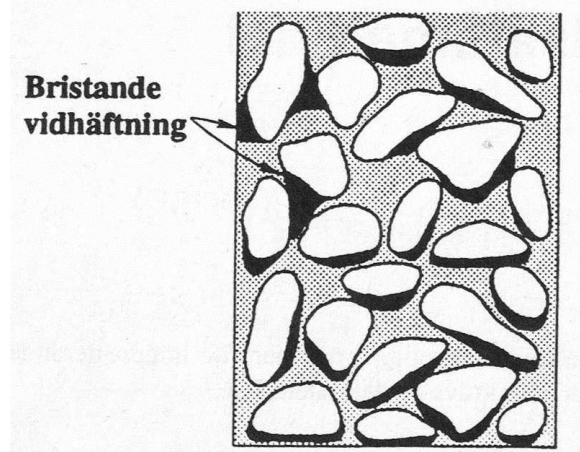
Betongkvalitet	K25	K60	K90	K120	K150
b	0,32	0,24	0,20	0,18	0,16



Figur 5. Gränskurvor för sandgraderingen enligt HUS AMA 98. Burström (2006, s.411).

I figur 5 anges vilka gränser graderingskurvorna ska ligga, detta har ett typiskt murbruk där sanden är det viktigaste ballastmaterialet. Väljer man en alltför finkornig sand krävs mer bindemedel, likaså gäller det för grov sand. Den maximala kornstorleken ska väljas med hänsyn till användning av murbruket (Burström 2006). Ultrahögpresterande betong har ett typiskt murbruk, däremot inte samma partikelfördelningskurva som en högpresterande betong.

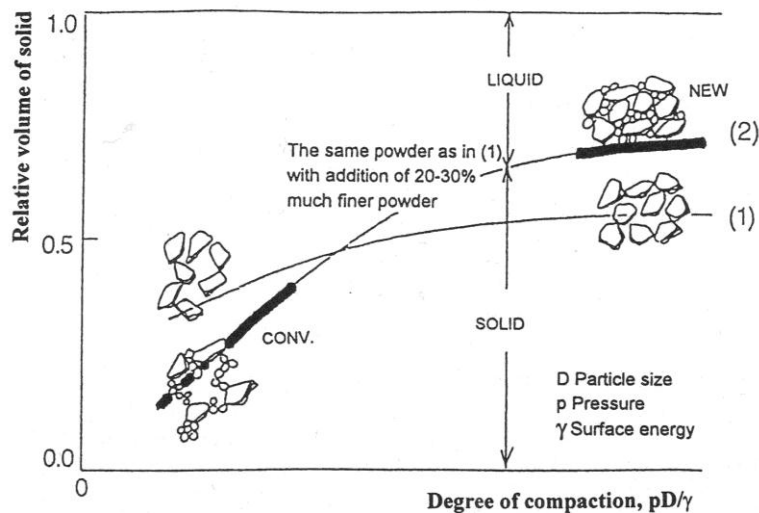
Ballasten utgör upp till 75 % av betongens volym, man vill fylla 20 % av hålrummen med kvarts filler för att få en optimal ballastgradering och för en minskning av porositeten. Fyller man inte hålrummen kan dålig bearbetbarhet som följd av inhomogenitet hända, se figur 6 (Sandberg 2000).



Figur 6. Brist på vidhäftning mellan ballast och pasta som följd av dålig kompaktering. Sandberg (2000).

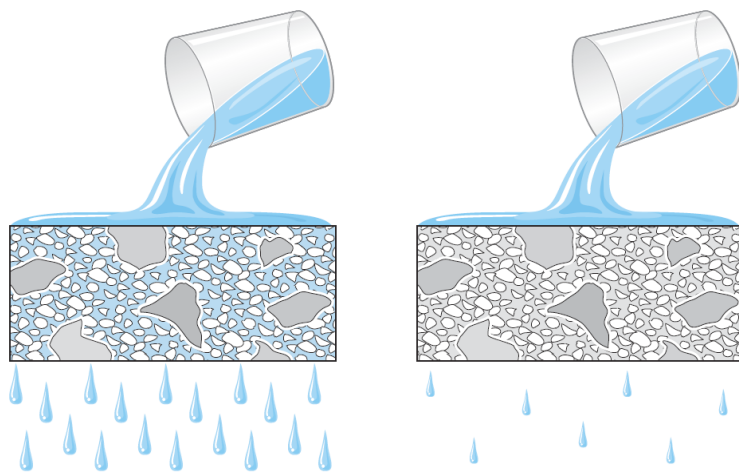
Vad gäller cementpastafasen i vanlig betong ligger porositeten på cirka 50 % enligt Atlassi och Kjellsen (2000). En hög porositet är den viktigaste orsaken till dålig prestanda hos betong gällande t.ex. mekaniska egenskaper. En minskad porositet genom kvarts filler gör betongen mer homogen, som i sin tur leder till ökad hållfasthet med god kompaktering samt en radikal sänkning av permeabiliteten (vattengenomsläppligheten). Fillerns påverkan ger ökad packningsgrad, ultrahögpresterande betong som används har bättre packningsgrad än

högpresterande betong på grund av en optimerad partikelstorleksfördelning, se figur 7 för en illustration för en så kallad fillereffekt (Sandberg 2000).



Figur 7. Illustration av den ökade packningsgraden som fås genom fillereffekten. En minskning av repulsionskrafterna mellan cementkornen innebär en ökande värde på termen pD/γ , ett minskande vbt. Bache (1995).

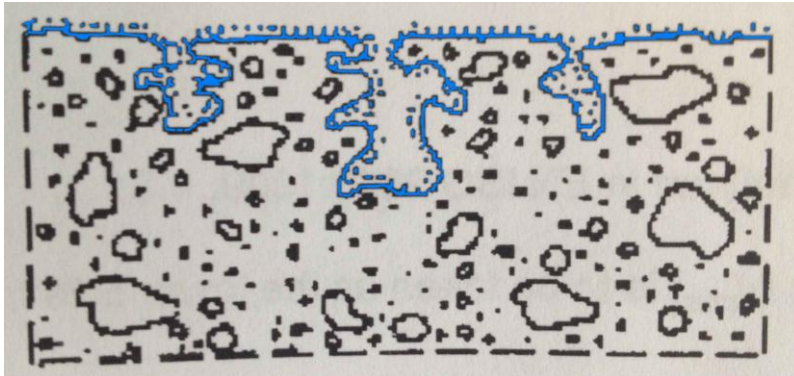
Permeabiliteten hos betong beror på hur porerna är förbundna med varandra, inte bara en funktion av mängden eller storleken på porerna. En högpresterande betong har låg permeabilitet, eftersom kapillärporositeten är mycket lägre än i vanlig betong (Helsing Alassi et al. 2000).



Figur 8. Permeabilitet i betong. Terence C. Holland (2005).

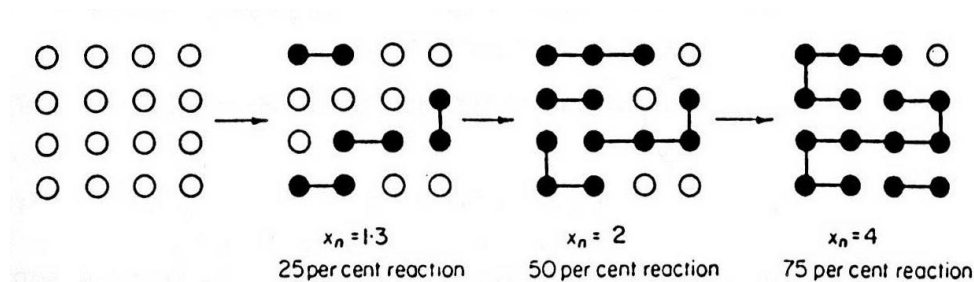
I figur 8 visas två olika betonger med olika permeabilitet. I den vänstra bilden visas en hög permeabilitet, då flyttas vattnet relativt lätt i betongen. Man tillsätter silikastoft för en sänkning av vct, då får man ökad täthet och permeabiliteten minskas till nästan noll. En sådan reduktion får vattnet och aggressiva kemikalier, som sulfater och klorider att svårt kunna tränga igenom betong som visas i den högra bilden (Terence C. Holland 2005).

För att ytterligare öka tätheten i betongen kan man impregnera betongen med vattenavvisande medel i betongblandningen. Detta producerar en vattenavvisande betongyta där medlet binds kemiskt med porerna och kapillärerna och beläggs internt, men fylls inte, se figur 9. En sådan reaktion kallas polymerisation. Komponenter som t.ex. silaner och siloxaner används (SIS 2004).



Figur 9. En översiktlig sektion av en typisk hydrofobisk impregnering, SIS (2004).

Det sker en slutfas i en slutprodukt (uppnådd härdning) till högpresterande betong. Slutfasen är en reaktion så kallad polymerisationsfas. Det menas att kalciumsilikathydrat från silikastoft förenar sig med kalciumsilikathydrat från cement reaktionen, med andra ord en sammankoppling av enkla enheter, monomerer. Vattnet avgår under polymerisationsfasen och därmed inget nytt fritt vatten binds kemiskt till reaktionsprodukten (Atlassi et al. 2000).



Figur 10. En schematisk process av stegvis polymerisation. Terselius (1995, s13).

I figur 10 visas att efter 25 % av reaktionstiden är kedjelängden i medeltal av monomerer mindre än 2; man ser tydligt att monomerer, de vita, är fler än polymer, de svarta. Efter 75 % av tiden är kedjelängden i medeltal bara 4 och inom betongen när silikatkedjorna för cement-silikasystemet är längre än i rena cementsystemet, beräknas det vara mer polymeriserad, påvisats av bland annat Justnes, Lundevall & Sellevold (1992).

En tid på omkring två veckor för betongen i ett klimatrum till uppnådd polymerisation för med god kvalitet, där mätningar som roll-off och kontaktvinkelmätning är lämpligast att börja utföras.

Generellt sett är variationen av kvaliteter hos högpresterande betong förhållandevis stor, eftersom restmaterial som flygaska och silikastoft används, där flygaskan ersätter cement som upprätthåller en konstant vct. Detta ger en stabil och smidig betong med lägre korttidshållfasthet och är ekonomiskt sett billigare, däremot mer känslig för plastiska krympsprickor. Silikastoft ersätter däremot inte cement och binder vatten och kohesion (Sandberg 2000).

När betongen har härdats kan mikrosprickor förekomma. Det förekommer genom självtorkning av betongen, där silikastoft har tillsätts. Självtorkning är dock en långsam process. Med mikrosprickbildning menar man att betongen mjuknar, d.v.s. en lägre E-modul förekommer och kvarstående deformationer erhålls efter belastning (Bernander och Emborg 1997). För att förebygga mikrosprickor ser man till att skydda betongen mot en tidig uttorkning och ändra parametrarna i betongen genom rätt val av ballast, cement och silikastoft (Emborg 2000).

Gällande byggtiden för högpresterande betong finns några aspekter som ska beaktas särskilt som inte är lika viktiga för en normalbetong (Hedenblad, Nilsson & Mjörnell 2000):

- Ska särskilt skyddas mot tidig uttorkning på grund av risken för plastiska krympsprickor, i alla oväder, detta krävs täckning med plastfolie redan innan betongytan avjämnats
- större noggrannhet krävs hos betongleverantören gällande självtorkningen
- ska mattläggas så att det icke-sugande underlaget låter vattnet torka bort.

Ekonomiskt sett är högpresterande betong som material dyrare (per kilo) än normal betong, men kan minska byggkostnaden i längden, ex. utnyttjande av färskas betongens egenskaper och utnyttja fördelar som ökad hållfasthet, beständighet och gjutbarhet.

Ökad nettointäkt kan uppnås genom (Fidjestöl 2000):

- Minskade underhållskostnader
- ökad livslängd
- större uthyrningsyta (mindre tvärsnitt på pelare)
- mindre mängd material: mindre tjocklek
- billigare transporter.

3. Material och Metod

Metodiken i detta examensarbete består av tillverkning av en lämplig blandning för betong som har studerats i teoridelen, tillverkning av gjutformar med ett designat mönster (textilformar och silikonformar) och olika impregneringstekniker som t.ex. tillsatt impregnering i betongblandningen.

För varje gjutning i grundformar används textila material för modifiering av betongytan och en visuell hydrofobtest utförs för att evaluera de bästa textilierna för vidare undersökning om mekaniska modifieringar av ytan. De använda textilierna listas i Tabell 3 och har valts utifrån deras individuella mönster. Varför vi har använt textilier är på grund av dess struktur, vi vill ha en liknande struktur som ett lotusblad. Bladytans nanostruktur orsakar den självrengörande och vattenavvisande förmågan kallad ”lotuseffekten”, se bild 2.

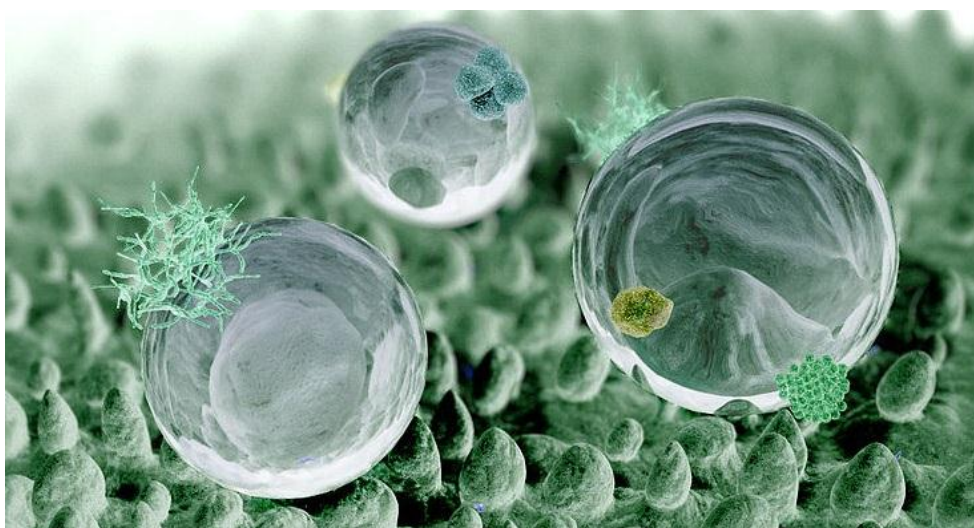


Bild 2. Grafisk bild över lotuseffekten. (Thielicke, 2007).





Vid gjutning är det viktigt att både övre och nedre ytor blir parallella för mätning av kontaktvinkel och roll-off-vinkelmätningar. Mätningarna är lämpligast att utföras omkring två veckor efter att proverna konditionerats i ett klimatrums vid 20°C och 65 % RF (relativ fuktighet). Därmed görs en hydrofobisk test med en vattenpipett för okulär bedömning för att välja prover till vidare undersökningar och provning av frostmotstånd.

Alla tester utgår från två olika impregneringsmedel, varav ett går under benämningen SILRES®BS 1001 som produceras av företaget Wacker och den andra StoCryl HG 200 från företaget Sto Scandinavia AB i Sverige. Dessa impregneringar har visat bäst resultat i tidigare tester. Allmän information om impregneringarna listas i Tabell 2.

Tabell 2. Impregneringsmedel som använts och information hämtade från Wacker Chemie AG (2015) samt StoCretec (2012).

Ytbehandling/Impregneringsmedel	Aktiv substans	Densitet (20-23°C)
SILRES®BS 1001	Mix av silan och siloxan	Ca 0,95 kg/l
StoCryl HG200	90 % silanhalt	Ca 0,9 kg/l

Tabell 3. Textilmönster T4-T10 tagna från Textilhögskolan i Borås, T1 och T11 från CBI.

Benämning	Typ	Färg	
T1 – "Flash"	Referens av okänd typ	Röd	
T4 - "Silver Surfer"	Polyamid nylon (silikonbelagd)	Silver	
T5 - "Frost"	Polyamid nylon	Grå	
T6 – "Panther"	Goretex-väv (polyamid)	Svart	
T7 – "Groot"	Släppduk	Vit	
T8 – "Hawk"	Impregnerad polypropylen	Vit	
T9 - "Feather"	Icke impregnerad polypropylen	Vit	
T10 - "Angel"	Polyester	Vit	
T11 – "Ironbark"	Släppduk	Grå	

3.1 Betongblandning

Gjutningar på laboratoriet, utfördes under handledning av CBI. Delmaterial för reaktiv pulverbetong (RPC), definierad som ultrahögpresterande betong på CBI listas i Tabell 4. Vi använde oss av följande recept:

Tabell 4. Reaktiv pulverbetong (RPC) mix nr. V.3

Komponenter	Typ	Mängden på 1 l (g)
Cement	CEM II/A-V 52.5 (Bascement)	730
Silikastoft	Elkem kondenserad/icke kond.	73
Flygaska	Microsit	160
Kvarts filler	M500	100
Sand	B15 (0,15mm)	370
	B28 (0,28 mm)	100
	B55 (0,55mm)	650
Flyttillsatsmedel	Sikament HD 10	35
Vatten	San Pellegrino (kranvatten)	150
Hydrofoberingsmedel	(2 % of cementmängden)	15

Utöver receptet behöves följande redskap till gjutning:

- 1 st skål
- 1 st skopa
- 2 st bågare
- 1 st tidtagare
- 1 st degskrapa
- 1 st våginstrument
- 6-12 st grundformar
- 12-24 st glasskivor
- 24-48 st skruvar.

Innan uppvägning av delmaterialen ska textilierna klippas i förhållande till grundformarna, se bild 3, man ska även se till att utvidga textilierna så pass mycket att inga ojämnheter uppstår för att få en så slät och exakt avtryck som möjligt.

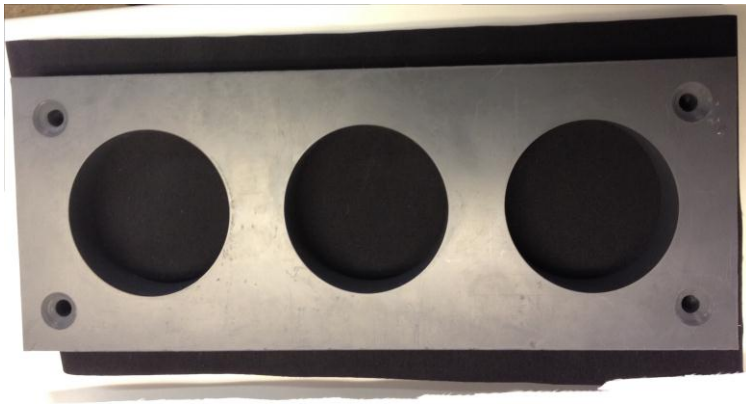


Bild 3. T6-textilen redo att skruvas fast under grundformen för gjutning.

De ballastmaterialen som använts, se bild 4, består endast av sand. Ultrahögpresterande betong har ett typiskt murbruk. Skillnaden i partikelfördelningen från vanlig betong är att inget krossat grus har tillsätts i syfte till högre packningsgrad.



Bild 4. Torra komponenter som använts, varav G och F i separat blandning.

För att blanda alla komponenter har en betongblandare (murbruksblandare) som rymmer 5 liter från laboratoriet i CBI använts, se bild 5.



Bild 5. Betongblandare (Murbruksblandare).

Arbetsprocessen för betongblandning redovisas i Tabell 5 där upp till fem gjutningstillfällen utfördes.

Tabell 5. Processen för betongblandning

Process	Tiden efter startad betongblandare (min)
1. Uppvägning av torra komponenter och placera i skålen. a. Väg upp vatten och flyttillsatsmedel	- 15
2. Placera skål i maskin, starta mixern	0
3. Tillsätt vatten	1
4. Tillsätt flyttillsatsmedel	3
5. Stoppa mixern och skrapa skålen	5
6. Starta mixern igen	6
7. I det här tillfället bör betongblandningen vara mjuk och degig.	10
8. Tillsätt hydrofobiskt medel	10
9. Stoppa mixern	14
10. Gjutning i prover	14-20

3.2 Gjutformar i textil och silikon

Användning av textila material i gjutformar är inte hållbart i längden. För att få samma avtryck på betongytan krävs det att efter varje gjutning måste textilen ersättas med en ny. Processen kan effektiviseras genom att tillverka silikonformar med textilavtryck. Silikonformen får en negativ bild av ytan på en textil. Sådana formar kan återanvändas, vilket bidrar till en hållbar och repeterbar teknik samt kostnadseffektiv process.

För tillverkning av silikonformar används RTV-Silikon 181 med en hög hållfasthet och slitstyrka. RTV-silikon 181 är ett tvåkomponentssilikon, Del A och Del B, som tvärbinds vid rumstemperatur och passar mycket bra för komplexa föremål. Del B (härdare) blandas med Del A till en mängd på 2-5 % där härdningstiden varierar mellan 14-24 timmar beroende på mängden härdare som använts. Innan applicering av silikon används textilproverna T1,T4,T6 samt T10 fastskruvade på grundformar. Därefter ska insidan av grundformarna smörjas med fett, som visas i bild 6, som förhindrar betongen och silikonet att fastna under härdning eller

förstöras vid avformning.

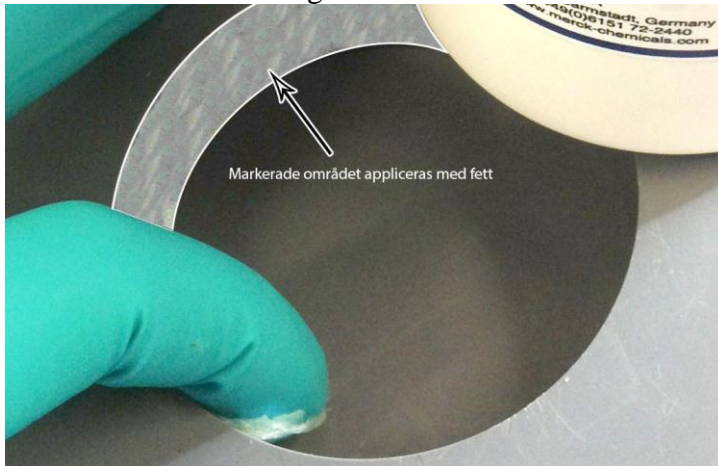


Bild 6. Fett appliceras på kanten av grundformarna.

När fett har applicerats kan framställning av silikonformar påbörjas.

Vid framställning av silikonformar ska Del A vägas upp och fyllas i en behållare till den beräknade mängden som ska användas. Därefter ska Del B (hårdare) mixas i cirka 25 sekunder bakom ett skyddsglas som vid inandning kan orsaka migrän. Proverna bevaras i ett skyddsskåp tills härdning är uppnådd, se bild 7.



Bild 7. Silikonformen härdad på T6 textilen.

3.3 Avrinningsvinkel – roll-off vinkel

För att utföra roll-off vinkelmätning har varje prov testats för att se om provet enkelt avleder vatten, genom att tillsätta en vattendroppe på 100 μ l på mitten av provet. Provytorna, övre och nedre ytan, är inte fullständigt parallella, därför har tre så kallade häftmassor placerats under provet som sedan kontrolleras med ett vattenpass. Ett vattenpass som visar att bubblan befinner sig helt i mitten av ett litet cirkelmärke tyder på en vågrätt plan. Detta repeteras efter avläst vinkel för att säkerställa att ytan befunnit sig vågrätt under mätningen.

För att vinkeln ska bestämmas finns en gradskiva installerat som roteras manuellt och försiktigt tills vattendroppet har börjat rinna ner från ytan. Mätningen utförs av prover med ett godkänt resultat från det visuella hydrofobtestet som gjorts med en vattenpipett för okulär bedömning av vattendroppens utformning. Testet utfördes på CBI med deras egna byggda instrument, se bild 8.

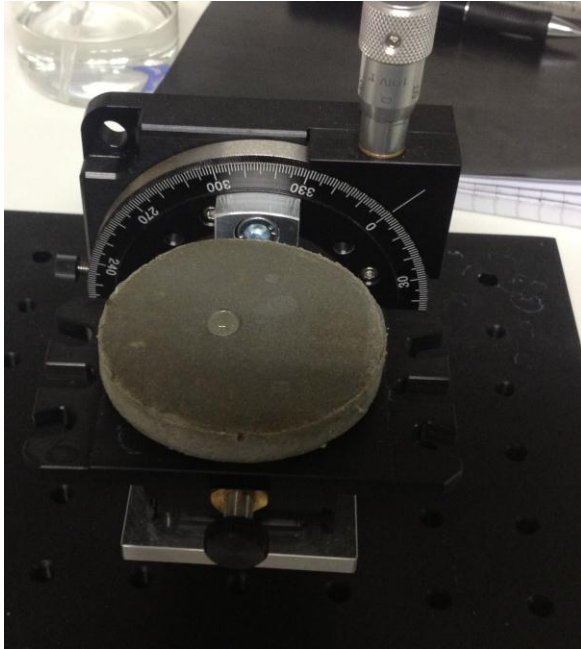


Bild 8. Roll-off vinkel instrument.

3.4 Vattnets avrinningsbenägenhet – kontaktvinkel metoden

För varje prov vi gjort görs en mätning, så kallad kontaktvinkelmätning. Detta är ett viktigt test som karakteriserar om en yta är hydrofob dvs. vattenavvisande eller inte. Testet utfördes på Textilhögskolan i Borås. Instrumentet som används är av Theta, tillverkad av Biolin Scientific, se bild 9, med tillkommande programvara OneAttention och en högupplöst kamera, där Sparbanksstiftelsen Sjuhärad stött ekonomiskt. Mätningen har utförts efter prover som har visat sig vara hydrofoba efter okulär bedömning samt efter roll-off vinkel på mindre än 37 grader, detta i syfte för val av prover med större hydrofoba förmågor än T1-Ref (referensprovet). Droppar placerades vid fem olika punkter på ett prov för att ta minska resultatets spridning och utesluta avvikande värden. Innan proverna placeras på plattan behöver kameran att kalibreras och fokus att ställas in korrekt för en klar bild med rätt beräknad storlek för programmet, detta för att bedöma den rätta mängden vattendroppe som ställs in i nålen med droppstorleken på 3 μl . Avjoniserat vatten har använts för att undvika felkällor och är standardmetoden på CBI.

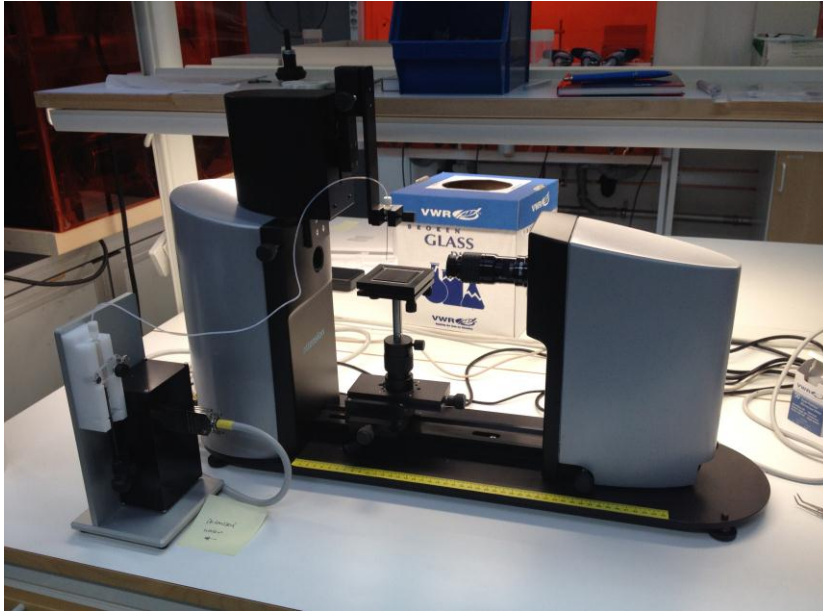


Bild 9. Mätinstrumentet med tillhörande kamera och nål.

För att kunna mäta noggrant utgörs en referenslinje i programmet, se bild 10, som placeras vid betongytan där nålen släpper vattendroppet. Därefter spelas utförandet in i dataprogrammet och analyserar droppens vinkel uppemot tolv sekunder med 12 bildrutor per sekund (FPS).

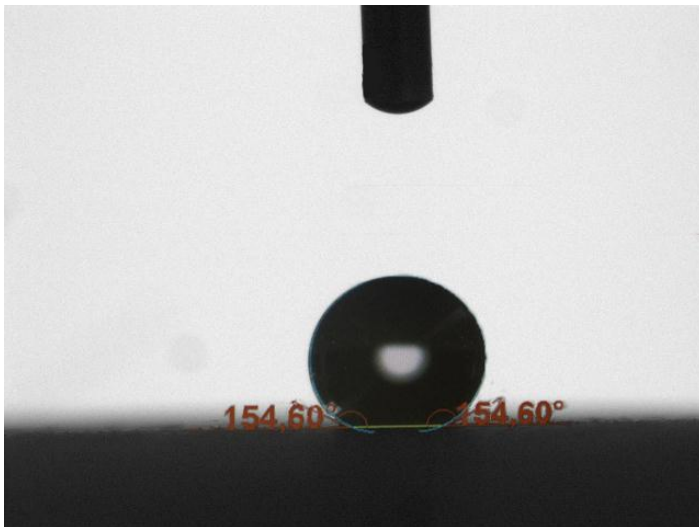


Bild 10. OneAttention har analyserat droppens vinkel.

3.5 Provning av impregnerad betong mot frost

Utöver kontaktvinkelmätningar utförs provning av frostbeständighet på betongprover för att utvärdera eventuella framtida skador. En betong har blivit frostsäker när skador blir mindre ju längre tid betongen fått tid att hårdna vid plustemperatur före frysning, och snabbt når en härdningsgrad då den inte längre skadas efter några få nedfrysningar. Betongens frostsäkerhet beror på typ av betongblandning och lufthalt.

Betongprover har valts ur diagram 3-4 baserat på en bedömning av mindre bra roll-off vinkel.

De proverna som valdes hade roll-off under 35 grader ytterligare S6-Y med SILRES®BS1001 impregnering valdes för provningen. Innan frysning ingick följande steg:

1. Tvätta rent proverna i cirka tio sekunder under rinnande vatten, borsta avlösa delar
2. Placera proverna i ett torkskåp i en timme vid 50 grader Celsius
3. Väg upp torrvikten av proverna
4. Fotografering av vattendroppe med en intervall på noll till två minuter
5. Mätning av Roll-off vinkel
6. Blöt ned proverna med rinnande vatten i cirka tio sekunder
7. Väg upp vikten av de blöta proverna

Provningen i detta arbete följer ingen standardmetod men är anpassad till de vanliga klimatförhållanden som råder i Sverige. Proverna placeras i en kyl frys i två dagar med en temperaturskillnad på -21 till +21 grader Celsius i en tidsintervall på 24 timmar. Steg 2-7 repeteras efter proverna tagits ut från kylfrys.

Uppvägning gjordes på CBI Betonginstitutet (CBI) med vågen Sartorius, en försluten, känslig och färdigkalibrerad våg med ett glasfat för noggrannare vägning, se bild 11.



Bild 11. Vägning av provkroppar.

4. Resultat

I tidigare avsnitt genomfördes en empirisk undersökning i förhållande till studiens standarder, teorier och metoder. I detta kapitel redogörs resultatet av den empiriska undersökningen. För att kunna underlätta kommunikationen och förståelse av resultatet har tabell 6-9 tillämpats. Följande tabeller visar benämningar, förkortningar, gjutningstillfällena och tester som har utförts.

Tabell 6. Textilytor och silikonytor som har använts för ytmodifiering, resultaten illustreras på tabell 10-14 och diagram 1-11.

Benämning	Färg	Benämning	Silikonform
T1	Röd	S1	
T4	Silver	S4	
T5	Grå	-	-
T6	Svart	S6	
T7	Vit	-	-
T8	Vit	-	-
T9	Vit	-	-
T10	Vit	S10	Bild saknas
T11	Grå	-	-

Tabell 7. Gjutningstillfällena som har gjorts under arbetets gång är följande:

Gjutning	Datum	Illustreras i	Impregneringsmedel	Silikastoft
1	2015-02-05	Tabell 10 Diagram 1 & 7	SILRES®BS 1001	Kondenserad
2	2015-02-10	Tabell 10	StoCryl HG200	Kondenserad
3	2015-02-26	Tabell 11 Diagram 2 & 8	SILRES®BS 1001 respektive StoCryl HG200	Icke kondenserad
4	2015-03-11	Tabell 12 Diagram 3 & 9	SILRES®BS 1001 respektive StoCryl HG200	Icke kondenserad
5	2015-04-01	Tabell 13 Diagram 4 & 10	SILRES®BS 1001	Kondenserad

Tabell 8. Godkända prover från hydrofobtesterna har förts vidare för en roll-off mätning. Därefter fördes prover med goda resultat vidare till kontaktvinkelmätning.

Hydrofobtest	Roll-off	Kontaktvinkel
Tabell 10	Diagram 1	Diagram 7
Tabell 11	Diagram 2	Diagram 8
Tabell 12	Diagram 3	Diagram 9
Tabell 13	Diagram 4	Diagram 10
Tabell 14	Diagram 5 före frost Diagram 6 efter frost	Diagram 11

Tabell 9. Följande förkortningar har använts i nedanstående tabell 10-14 och diagram 1-11 för en förenkling av resultaten.

Förkortningar	Förklaring
BS	SILRES®BS1001
HG	StoCryl HG200
T	Textilavtryck
S	Silikonavtryck från textil
Y	Ytbehandlad silikonyta med impregnering innan gjutning
U	Utan ytbehandling på silikonytan innan gjutning
Ref.	Referens
Tvättad	Silikonform som har återanvänts från tidigare gjutning
CA	Contact Angle (Kontaktvinkel)
S4 Oljebelagd	Oljebelagd textil (T4) innan tillverkning av silikonform (S4).

4.1 Hydrofobtest

Resultat från samtliga mätningar illustreras i tabell 10-14. I dessa tabeller visas det okulära hydrofobtestet som utfördes omkring 2 veckor efter avformning. Resultat är klassat utifrån egna observationer och är betecknade med G för hydrofobisk yta respektive U för hydrofil (ingen vattenavvisande) yta. Detta har beslutats efter vattendroppens utformning som visas i bild 12.

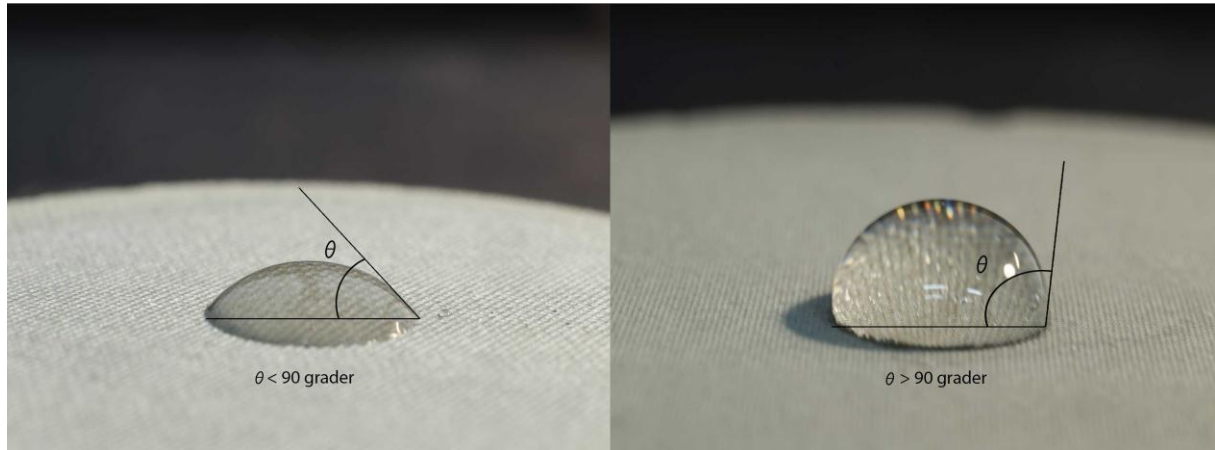


Bild 12. Hydrofil yta (vänster bild) och hydrofob yta (höger bild) testats på betongprov T4 respektive T10.

I bild 12 visas två olika resultat på hydrofobicitet på betongytan. I den vänstra bilden visas en hydrofil yta på prov T4-BS, som fick resultat icke godkänd. En hydrofobisk yta suger inte åt sig vatten men har en synlig rundare vattendroppe som visas i den högra bilden.

Tabell 10. Hydrofobtest 1. Nedan redovisas två olika gjutningstillfällen som har utförts, proverna innehåller avtryck från olika textilier i kombination med olika impregneringsmedel. T1-ref har tagits ur SESBE som referens. Utvärdering G/U gjordes 10 dagar efter avformningen.

Textilavtryck efter 10 dagar					
Prover	Impregneringsmedel		Resultat	Gjutningsdatum	Avformning
	BS	HG			
T1-ref	x		G	2014-09-22	2014-09-23
T4	x		G-	2015-02-05	2015-02-06
T5	x		U	2015-02-05	2015-02-06
T6	x		G	2015-02-05	2015-02-06
T7	x		U	2015-02-05	2015-02-06
T8	x		U	2015-02-05	2015-02-06
T9	x		U	2015-02-10	2015-02-11
T10	x		G-	2015-02-05	2015-02-06
T11	x		U	2015-02-10	2015-02-11
T4		x	U	2015-02-10	2015-02-11
T5		x	U	2015-02-10	2015-02-11
T6		x	U	2015-02-10	2015-02-11
T7		x	U	2015-02-10	2015-02-11
T8		x	U	2015-02-10	2015-02-11
T9		x	U	2015-02-10	2015-02-11
T10		x	U	2015-02-10	2015-02-11
T11		x	U	2015-02-10	2015-02-11
T = Textilavtryck BS = SILRES®BS 1001 HG = StoCryl HG200					

Tabell 11. Hydrofobtest 2 med samtliga godkända textilier från tabell 10. Utvärdering G/U gjordes 10 dagar efter avformningen.

Textilavtryck efter 10 dagar					
Prover	Impregneringsmedel		Resultat	Gjutningsdatum	Avformning
	BS	HG			
T1-ref	x		G	2014-09-22	2014-09-23
T4	x		G	2015-02-26	2015-02-27
T4		x	G	2015-02-26	2015-02-27
T6	x		G-	2015-02-26	2015-02-27
T6		x	G-	2015-02-26	2015-02-27
T10	x		G-	2015-02-26	2015-02-27

Tabell 12. Hydrofobtest 3 med silikon som avtryck för samtliga godkända textilier från tabell 11 och S1. Utvärdering G/U gjordes 18 dagar efter avformningen.

Silikonavtryck efter 18 dagar					
Prover	Impregneringsmedel		Resultat	Gjutningsdatum	Avformning
	BS	HG			
T1-ref	x		G	2014-09-22	2014-09-23
S1-Y	x		G	2015-03-11	2015-03-12
S1-Y	x		G	2015-03-11	2015-03-12
S1-U	x		G	2015-03-11	2015-03-12
S1-Y		x	G	2015-03-11	2015-03-12
S1-Y		x	G	2015-03-11	2015-03-12
S4-Y	x		G	2015-03-11	2015-03-12
S4-Y		x	U	2015-03-11	2015-03-12
S4-U	x		U	2015-03-11	2015-03-12
S6-U		x	G	2015-03-11	2015-03-12
S6-Y		x	G-	2015-03-11	2015-03-12
S6-Y	x		G	2015-03-11	2015-03-12
S10-U	x		U	2015-03-11	2015-03-12
S10-Y	x		U	2015-03-11	2015-03-12
S10-U		x	G	2015-03-11	2015-03-12
S10-Y		x	G	2015-03-11	2015-03-12

**S= Silikonavtryck Y = Ytbehandlad silikonytan med impregnering
U = Utan ytbehandling**

Tabell 13. Hydrofobtest 4 med silikon som avtryck. Ett ytterligare test utfördes för samtliga godkända textilavtryck på silikonform från tabell 12 i flera mängder för att säkerställa tidigare uppnådda resultat. Prover med markeringen (tvättad), är silikonformar som använts tidigare i tabell 12, i syfte till att undersöka utifall resultatet blir den samma eller bättre med återanvända silikonformar. Utvärdering G/U gjordes 15 dagar efter avformningen.

Silikonavtryck efter 15 dagar					
Prover	Impregneringsmedel		Hydrofob	Gjutningsdatum	Avformning
	BS		G/U		
T1-ref	x		G	2014-09-22	2014-09-23
S1-U	x		G	2015-04-01	2015-04-02
S1-Y	x		G	2015-04-01	2015-04-02
S1-Y (tvättad)	x		G	2015-04-01	2015-04-02
S1-U (tvättad)	x		G	2015-04-01	2015-04-02
S4-Y	x		G	2015-04-01	2015-04-02
S4-Y (tvättad)	x		G	2015-04-01	2015-04-02
S6-Y	x		G	2015-04-01	2015-04-02
S6-Y (tvättad)	x		G	2015-04-01	2015-04-02

Tabell 14. Hydrofobtest 5 för de prover som lagts in i kylfrys. S1-Y-STO och S6-U-STO har valts ut från tabell 12 för frostprovning. Resterande prover har valts ut från tabell 13.

Frostprover						
Prover	Impregneringsmedel		Innan frost	G/U	Efter frost	G/U
	BS	HG				
S1-Y	x		2015-04-17	G	2015-04-20	G
S1-U	x		2015-04-17	G	2015-04-20	G-
S1-Y		x	2015-04-17	G	2015-04-20	G
S4-Y	x		2015-04-17	G-	2015-04-20	G
S6-U		x	2015-04-17	G	2015-04-20	G-
S6-Y (tvättad)	x		2015-04-17	G	2015-04-20	G

4.2 Roll-off vinkel

Roll-off test som visas på nedanstående resultaten är utförda på prover som blev godkända under hydrofobtesten, motsvarande resultat från tabell 10-13 illustreras i diagram 1 – 4. Tabell 14 motsvarar diagram 5-6 för innan/efter frost resultatet. En referens för roll-off har tagits från SESBEs T1-ref där vinkeln ligger på 36 grader. För att prover ska kunna godkännas och vidare befordras för en kontaktvinkelmätning måste dessa ligga under 37 grader.

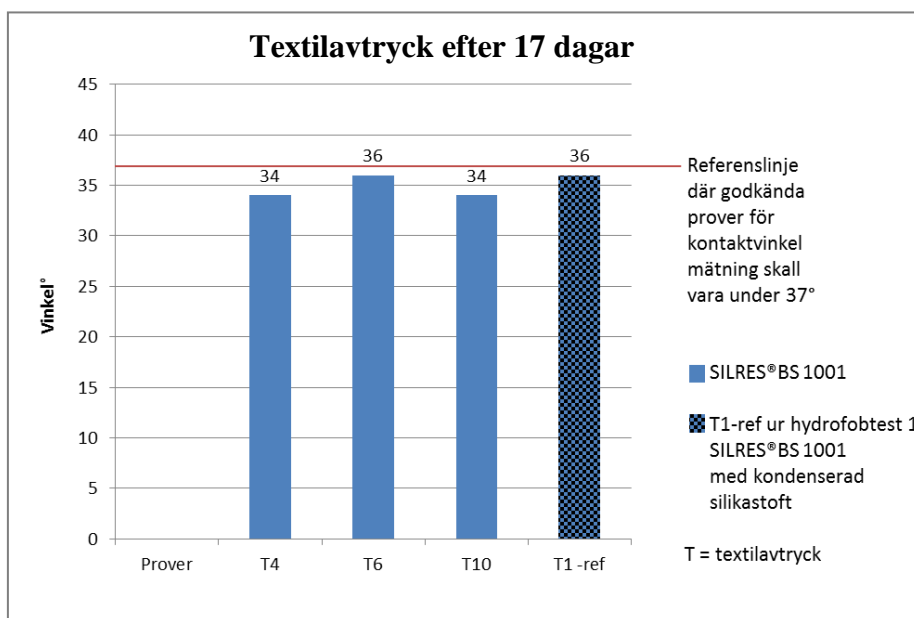


Diagram 1. Roll-off mätning med samtliga godkända prover från tabell 6. Testet utfördes 17 dagar efter avformning.

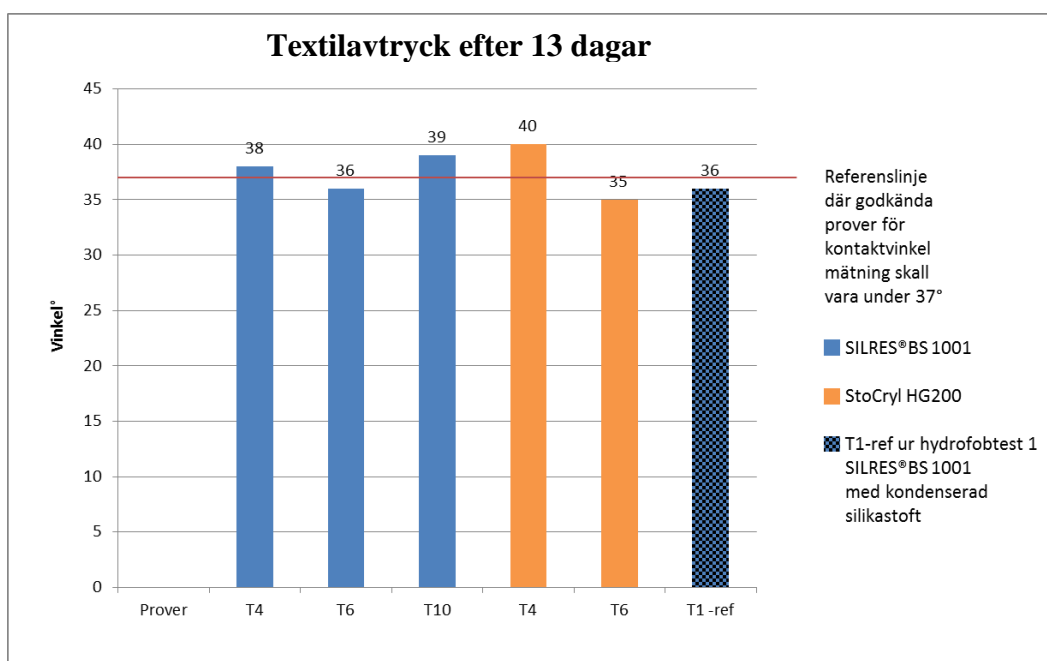


Diagram 2. Roll-off mätning med samtliga godkända prover från tabell 7. Testet utfördes 13 dagar efter avformning.

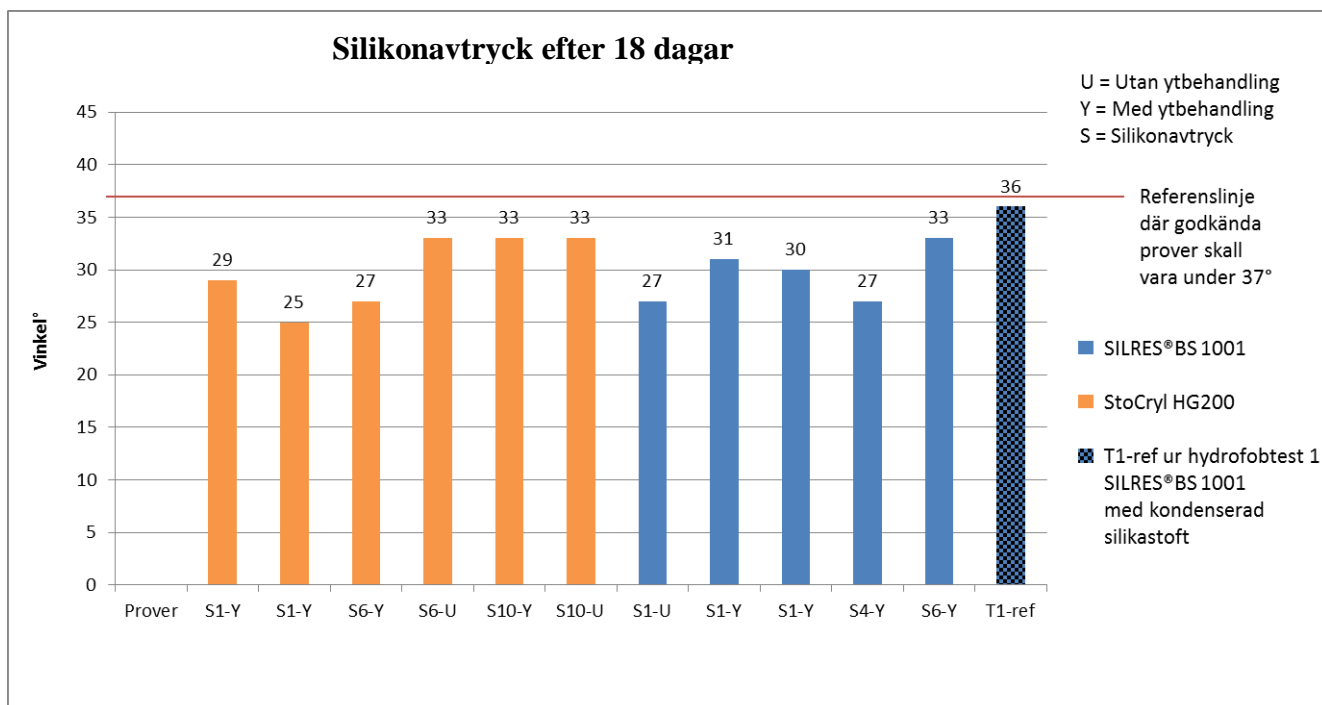


Diagram 3. Roll-off mätning med samtliga godkända prover från tabell 8. Testet utfördes 18 dagar efter avformning.

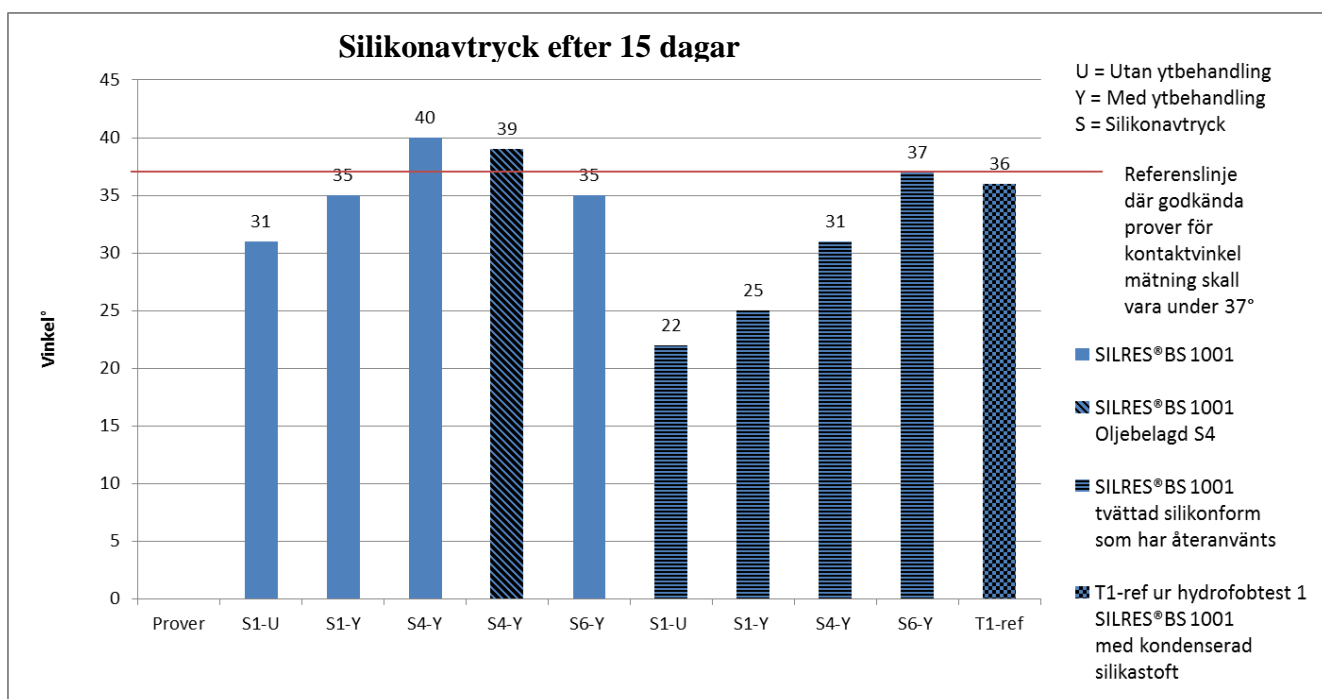


Diagram 4. Roll-off mätning med samtliga godkända prover från tabell 9. Testet utfördes 15 dagar efter avformning.

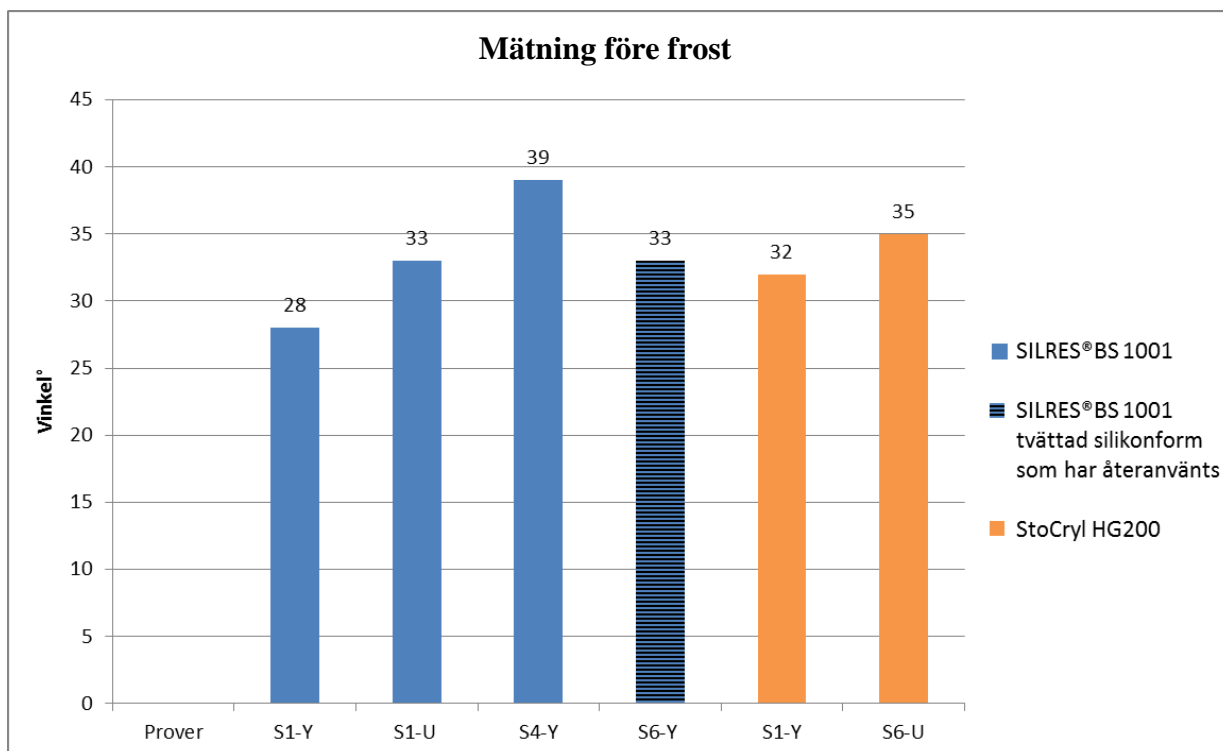


Diagram 5. Roll-off mätning med samtliga godkända prover från tabell 14 före frostprovning. Prover betecknade med S1-Y och S6-U innehåller icke kondenserad silikastoft. Resterande prover innehåller kondenserad silikastoft.

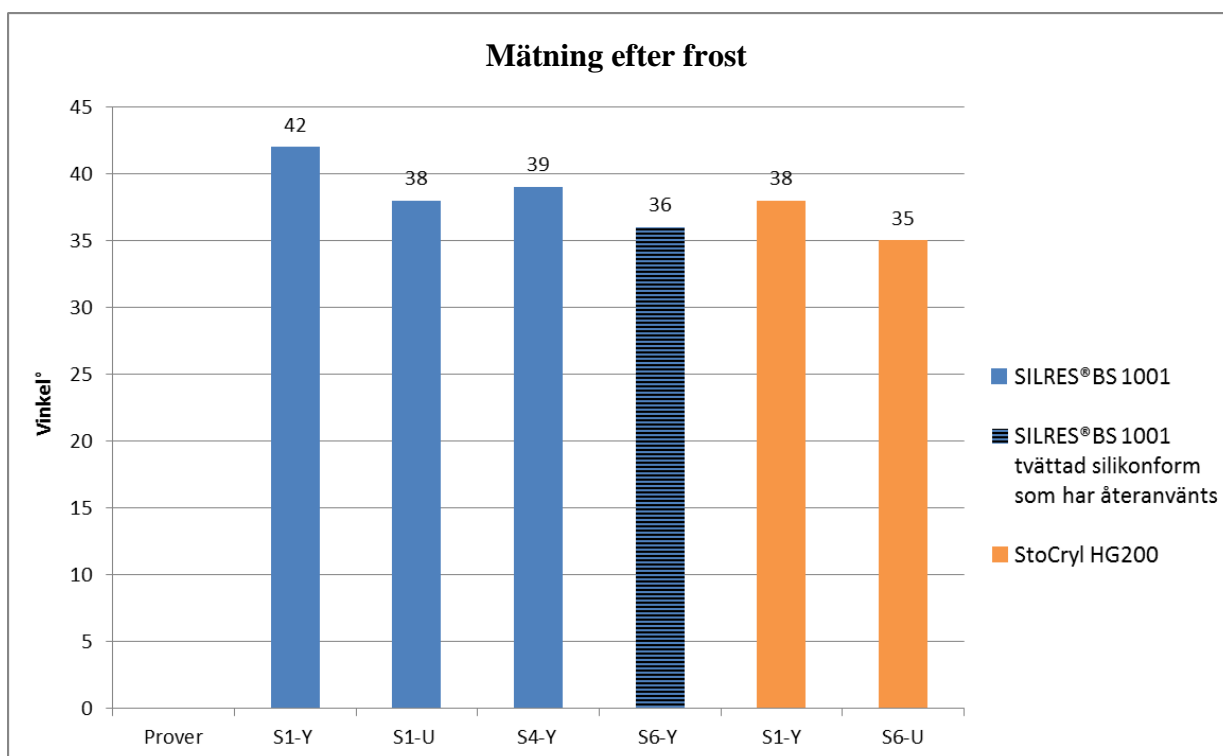


Diagram 6. Roll-off mätning efter provning av frost.

4.3 Kontaktvinkelmätning

Resultat för kontaktvinkelmätning för samtliga prover, motsvarande resultat från diagram 1-4 gällande roll-off illustreras i diagram 8-11. Dessa prover har befunnit sig under referenslinjen och har klassats i tre delar:

- Hydrofil < 90 grader, hydrofob > 90 grader och superhydrofob > 150 grader.

En fortsatt mätning på frostprover illustreras i diagram 11. Två prover gick inte att utföras med droppstorlek 3 µl och redovisas i bilaga 3 med droppstorleken 5,5 µl.

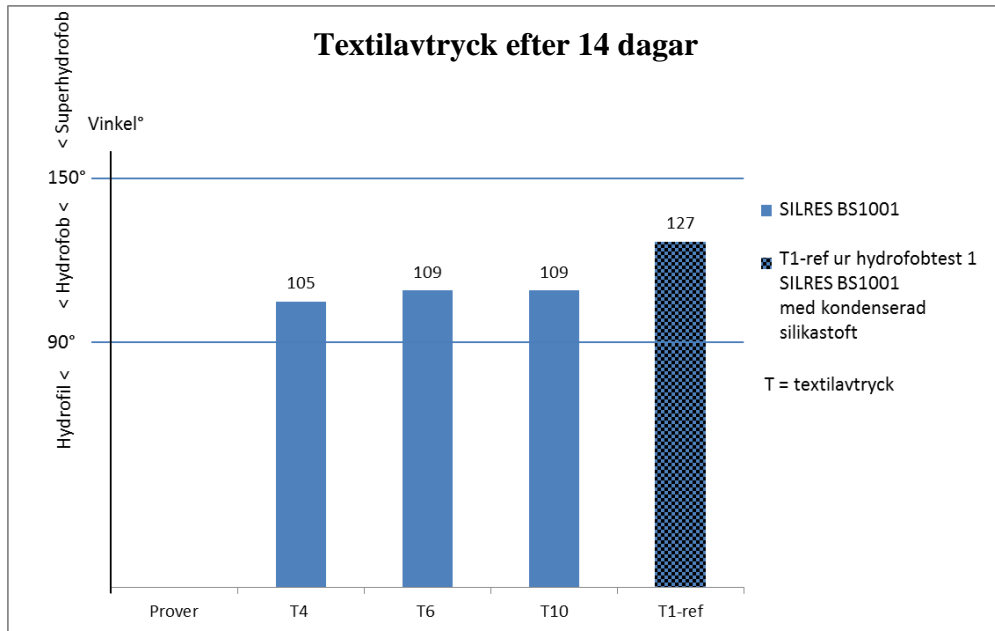


Diagram 7. Kontaktvinkelmätning på samtliga godkända prover från tabell 10. Mätningen utfördes 14 dagar efter avformningen.

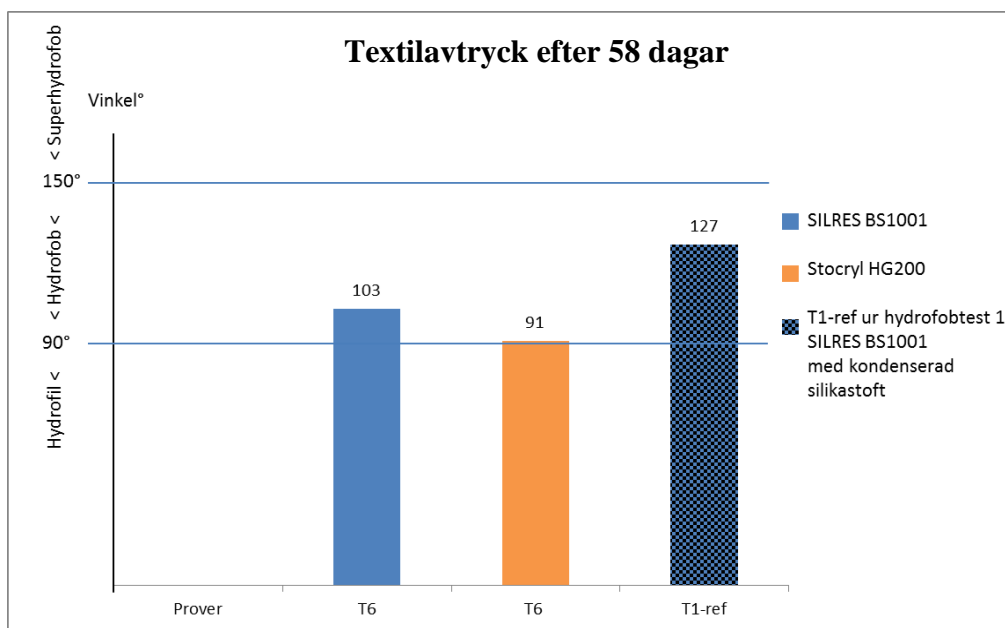


Diagram 8. Kontaktvinkelmätning på samtliga godkända prover från diagram 2 med icke silikastoft. Mätningen utfördes 58 dagar efter avformningen.

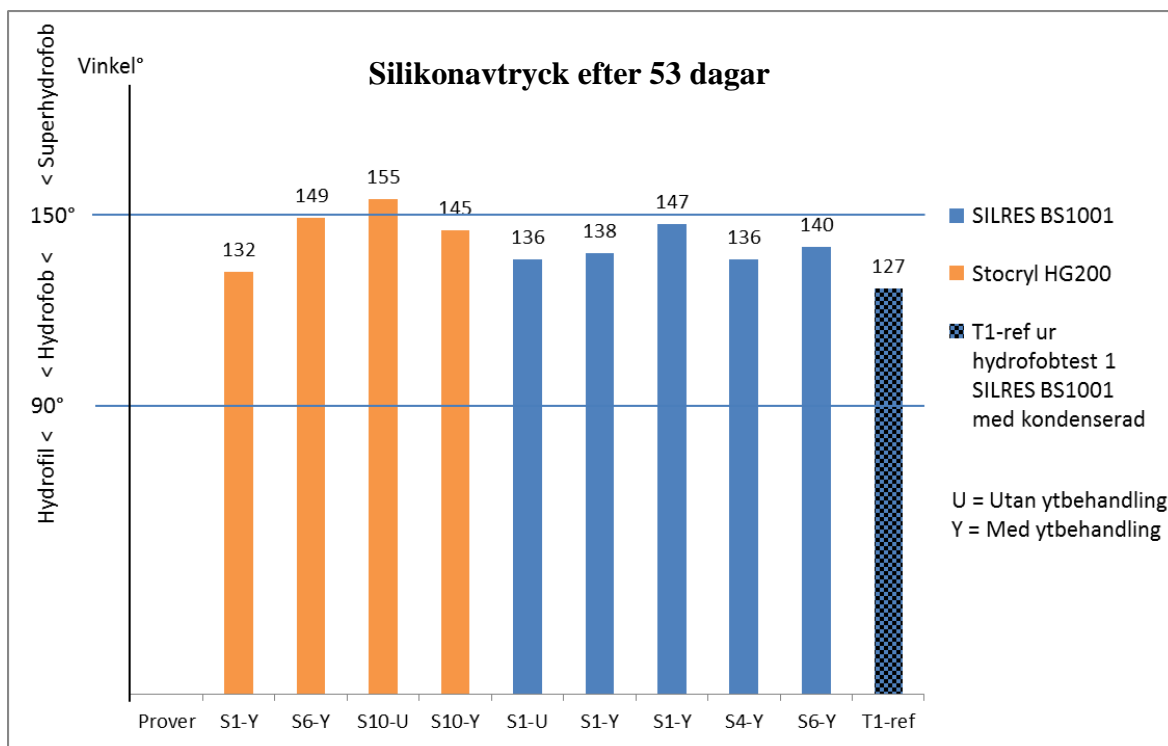


Diagram 9. Kontaktvinkelmätning på samtliga godkända prover från diagram 3 innehåller icke kondenserad silikastoft med avtryck från silikonprov. Mätningen utfördes 53 dagar efter avformningen.

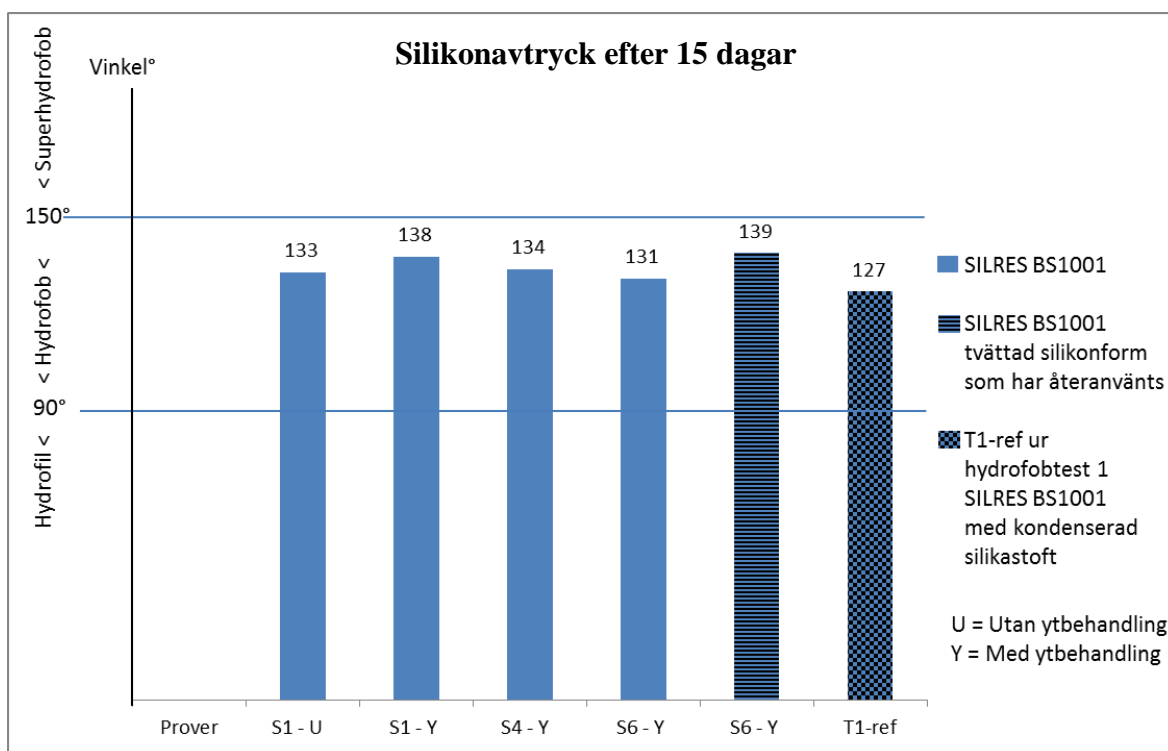


Diagram 10. Kontaktvinkelmätning på samtliga godkända prover från diagram 4 innehåller kondenserad silikastoft med avtryck från silikonprov. Mätningen utfördes 15 dagar efter avformningen.



Diagram 11. Kontaktvinkelmätning för samtliga prover som är tagna ur olika gjutningstillfällen för frostprovning. S1-Y-STO och S6-U-STO har valts ut från tabell 12 för frostprovning. Resterande prover har valts ut från tabell 13. Mätningen utfördes 1 dag efter frostprovning.

4.4 Frostpåverkan av impregnerad betong mot absorptionsförmågan

Att evaluera om skador har skett på betongytan och se hur pass väl impregneringen står sig emot frysning, undersöktes absorptionsförmågan vid kvarstående vattendroppe på två minuter före och efter frysning.

Resultat för provning av impregnerad betong mot frost illustreras i tabell 6-7. Resultaten visar att proverna som gjutits utan impregnering på silikonytorna stod emot frost utan någon förändring av absorptionsförmågan. I tidigare avsnitt beskrevs fördelning av kontaktvinkelmätning i tre klasser såsom hydrofil < 90 grader, hydrofob > 90 grader och superhydrofob > 150 grader.



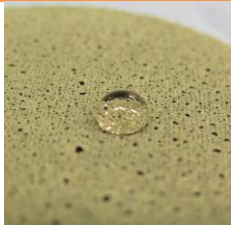
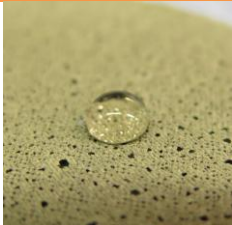
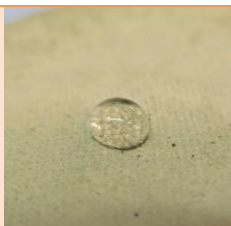


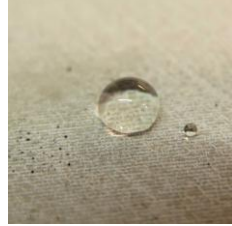
I detta avsnitt visas klasserna för CA (kontaktvinkel) enligt följande tabell 6-7:

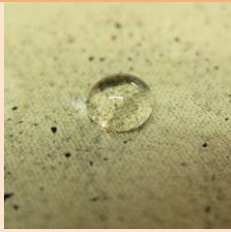

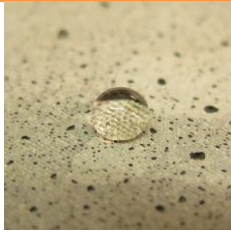

$\alpha < 90$ grader – Klass I

$\alpha > 90$ grader – Klass II

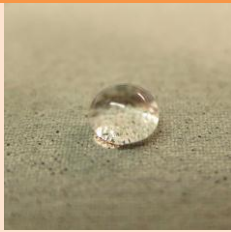
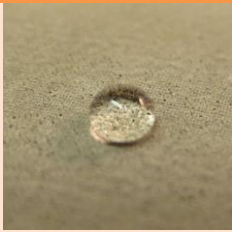


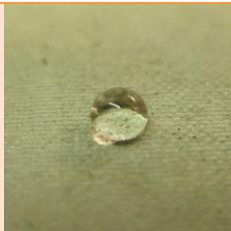
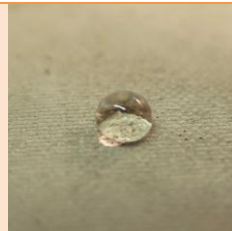
$\alpha > 150$ grader – Klass III

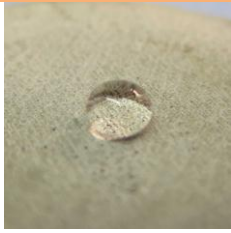

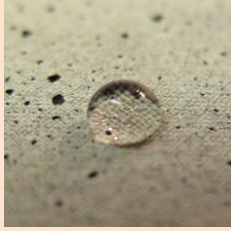
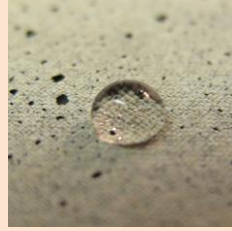
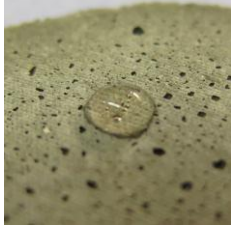
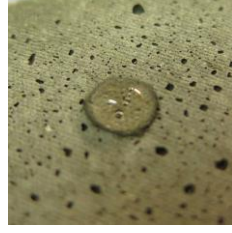
Tabell 15. Vattenabsorptionen före frostprovningen och viktförändringen.

Prover	Torr vikt (g)	Blöt vikt (g)	Absorption %	Roll -off (β)	CA (α)	Absorption av vattendroppe. Foto taget direkt	Absorption av vattendroppe. Foto taget efter 2min
S1-Y BS	56,27	56,29	0,036	28	II 138		
S1-U BS	70,40	70,41	0,014	33	II 136		
S4- Y BS	60,63	60,71	0,132	39	II 136		
S6- Y BS	67,51	67,53	0,030	33	II 140		

S1- Y HG	79,24	79,25	0,013	32	II 132		
S6- U HG	80,05	80,07	0,025	35	e.b.		
e.b. = Ej bestämd							

Tabell 16. Vattenabsorptionen efter frostprovnigen och viktförändringen.

Prover	Torr vikt (g)	Blöt vikt (g)	% absorption	Roll-off (β)	CA (α)	Absorption av vattendroppe. Foto taget direkt	Absorption av vattendroppe. Foto taget efter 2min
S1-Y BS	56,42	56,43	0,018	42	II 137		
S1-U BS	70,47	70,52	0,071	38	II 115		
S4- Y BS	60,86	60,89	0,049	39	II 137		

S6- Y BS	67,67	67,68	0,015	36	II 141		
S1- Y HG	79,33	79,36	0,038	38	II 119		
S6- U HG	80,13	80,14	0,012	35	II 111		

4.5 Tryckhållfastheten och E-modulen

Resultaten för mekaniska tester är hämtade från EU projektet SESBE som CBI koordinerar där V.3 är samma betongblandning vi använde för detta projekt.

Standardmetoden (SS-EN12390-3:2009) följdes för framtagandet av tryckhållfastheten f_c för tre prover och (SS-EN12390-13:2013 method B) för framtagandet av stabiliserad sekundmodul $E_{c,s}$ på tre prover.

Resultatet i tabell 6-7 visar tryckhållfastheten efter 7 dagar och tabell 8-9 visar efter 28 dagar.

Tabell 17. Tryckhållfastheten f_c för V.3 (RPC) receptet efter 7dagar.

Id	Gjutning	Testad	Ålder	Längd, l	Diameter, d_m	Area, A_c	Tryckhållfasthet, f_c
	[datum]	[datum]	[dagar]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]
V.3-1	140603	140610	7	100.4	54.4	2322	93.0
V.3-2	140603	140610	7	100.2	54.4	2325	105.0
V.3-3	140603	140610	7	100.6	53.5	2250	89.9
V.3-4	140603	140610	7	100.4	54.4	2325	100.8
Medelvärde							97,2

Tabell 18. Elasticitetsmodulen $E_{c,s}$ för V.3 (RPC) receptet efter 7 dagar.

Id	Gjutning [datum]	Testad [datum]	Ålder [dagar]	Längd, l [mm]	Diameter, d_m [mm]	Area, A_c [mm ²]	Elasticitetsmodul, $E_{c,s}$ [GPa]	Tryckhållfasthet, f_c¹⁾ [MPa]
V.3-5	140603	140610	7	99.3	54.4	2320	46.9	115.1
V.3-7	140603	140610	7	100.3	53.6	2255	47.2	99.8
V.3-8	140603	140610	7	100.5	53.6	2252	45.0	105.8
Medelvärde							46.4	107.5
1) Tryckhållfasthet testet utförd efter bestämd elasticitetsmodul.								

Tabell 19. Tryckhållfastheten f_c för V.3 (RPC) receptet efter 28 dagar.

Id	Gjutning [datum]	Testad [datum]	Ålder [dagar]	Längd, l [mm]	Diameter, d_m [mm]	Area, A_c [mm ²]	Tryckhållfasthet, f_c [MPa]
V.3-9	140603	140701	28	99.5	53.8	2269	145.6
V.3-10	140603	140701	28	99.5	53.6	2253	149.8
V.3-11	140603	140701	28	99.6	53.5	2251	146.3
Medelvärde							141.6

Tabell 20. Elasticitetsmodulen $E_{c,s}$ för V.3 (RPC) receptet efter 28 dagar.

Id	Gjutning [datum]	Testad [datum]	Ålder [dagar]	Längd, l [mm]	Diameter, d_m [mm]	Area, A_c [mm ²]	Elasticitetsmodul, $E_{c,s}$ [GPa]	Tryckhållfasthet, f_c¹⁾ [MPa]
V.3-12	140603	140701	28	99.7	54.5	2329	49.7	147.3
V.3-13	140603	140701	28	98.7	53.5	2252	48.3	124.9
V.3-14	140603	140701	28	99.7	54.4	2325	50.7	152.7
Medelvärde							49.6	141.6
1) Tryckhållfasthet testet utförd efter bestämd elasticitetsmodul.								

5. Diskussion

Utförda tester med specifik kombination gällande textilier, vattenavvisande impregnering och silikonformar gav bra resultat. Testerna som visade goda resultat studerades inte direkt och detta p.g.a. att längre polymeriseringstid gav bra resultat.

Det fanns ett antal möjliga felkällor som uppstod under utförandet:

- Textilierna utvidgades vid förberedning av grundformarna. Det är möjligt att vissa blev mer utvidgade än andra på grund av dess individuella elasticitet. Det kan orsaka att strukturen ändras något som kan ha påverkat provernas roll-off vinkel.
- Vid gjutning skulle betongblandningen med impregneringsmedlet StoCryl HG200 efter 10 min omrörning vara degig, vilket det inte blev. Orsaken kan bero på en förskjuten bindetid av medlet till cementpastan som inte togs hänsyn till.
- Textilmönstret T6 var svår att utvidga till en slät yta som orsakade en ”vallyta” på betongytan, se bild 13. Detta kan bero på att gore-tex väven på baksidan av tyget hade tendensen att krympa ihop sig.
- De första proverna som gjutits absorberade vatten. En anledning kan bero på att textilierna absorberade in det hydrofoba medlet från betongytan där medlet inte hann bindas kemiskt med porerna och kapilläerna.
- Under tillverkning av silikonformar var längden av härdningen alldeles för kort, vilket ledde till en svagare slitstyrka av silikonet. Detta var orsaken till att silikonformen S4 fastnade hårt på textilmönstret T4 och slets sönder under avformning, se bild 14. En annan bidragande faktor kan ha varit att textilmönster T4 redan var silikonbelagt. Att utöka mängden RTV-Silikon 181 Del B (hårdare) accelereras härdningstiden, vilket resulterar i ökad slitstyrka och därmed skadas inga silikonformar. Annat alternativ gäller applicering av ett tunt lager olja/fett på textilytan innan tillverkning av silikon.
- Vid avformning av proverna med silikonavtryck hade betongen inte fullständigt härdats och kunde därmed enkelt förstöras. Därmed förlängdes avformningen till 36 timmar efter gjutningen.
- En del prover med silikonavtryck blev porösa på betongytan, främst de utan något tillskott av det vattenavvisande medlet på silikonytan innan gjutning. Detta kan bero på att vibreringstiden var alltför kort.

Resultaten för hydrofobtest, roll-off och kontaktvinkelmätning är uppdelade efter datum för avformning som gjorts under detta examensarbete, däremot utfördes inte alla prover under samma testdatum på grund av fullbokad laboratorium av mätinstrumentet på Textilhögskolan i Borås. En sammanfattad redovisning av resultaten är följande punkter:

- Repeteras utförandet av kontaktvinkelmätningarna, är det med stor sannolikhet att resultaten blir den samma, detta på grund av att dataprogrammet analyserar droppens vinkel. Det gäller att även referenslinjen placeras noggrant.
- Prover med goda resultat från kontaktvinkel fick aning sämre på roll-off. Detta beror på ytans renhet och homogenitet. En smutsig yta ger olika roll-off vinklar och fenomenet kallas kontaktvinkel hysteres, se figur 11. Rengör man ytan med

tvättsvamp under rinnande vatten tas smutsen bort och detta kan leda till ett bättre resultat på roll-off.

- De okulära bedömningarna av hydrofobtestet har validerats korrekt, genom att ha noggrant kollat på vattendroppens utformning. För en ökad noggrannhet placerades även vattendroppar på flera ställen och bedömdes utifrån alla ställen.
- Prover med superhydrofoba ytor var svåra att mäta vinkeln på, Vattendroppen stöttes bort från betongytan och lämnade aldrig nålen. En vattendroppe på 5,5 µl användes istället för tidigare 3 µl. Resultaten för 5,5 µl bifogas som bilaga 3.
- Återanvändningen av samma silikonform gav samma resultat. Detta visade att strukturen på silikonets yta inte förstörs efter tvättning, vilket möjliggör återanvändning av silikonformar utan ett försämrat resultat.
- Efter frysprovning visade sig prover utan någon ytbehandling på silikonformarna en försämrad vattenavvisande förmåga.

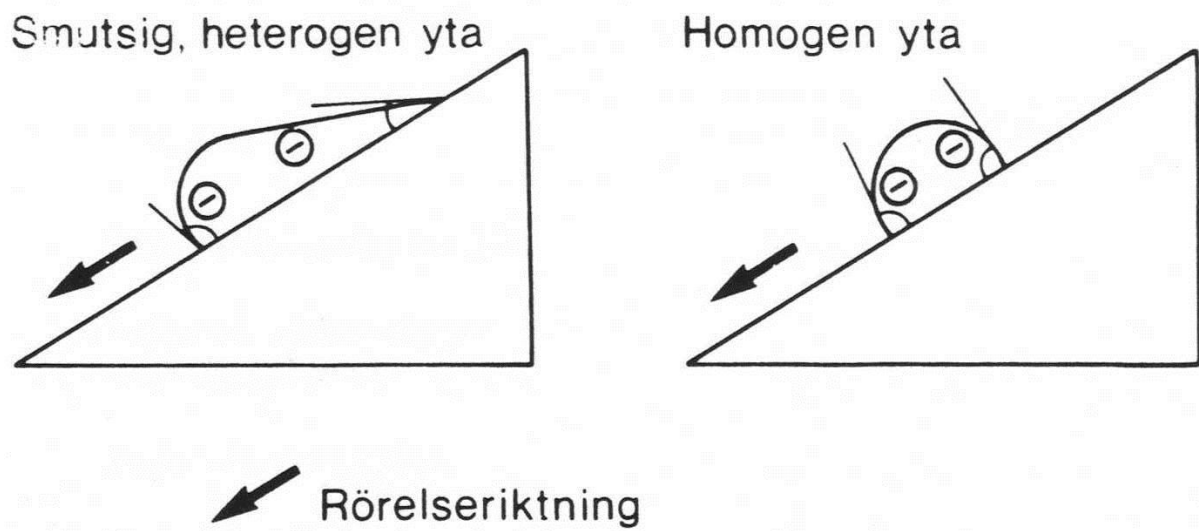
Bedömningar som gjorts är att vi främst har använt oss av boken *Högpresterande Betong: Material och Utförande* på grund av dess trovärdiga källa. Mycket omfattar teorier om de komponenter som använts i vårt recept och dess påverkan samt inflytande i slutprodukten. Det finns väldigt lite information om användning av hydrofob impregnering i betongblandning eftersom det inte tidigare har forskats men vi har följt oss av standardmetoden *EN 1504-2:2004* för ytbehandling. Ansträngningar har gjorts av framtaganden av information om hydrofoba ytskydd och dess påverkan på betongytan.



Bild 13. ”Vallyta” på T6 provet.



Bild 14. Förstörd silikonform från T4 textilen efter avformning.



Figur 11. Kontaktvinkel hysteres. Jönsson, Olofsson & Olsson (1984, s.12)

6. Slutsatser

Frågeställningen för examensarbetet har varit:

- Kan en betongyta bli hydrofob och vilka krav ställs på en sådan yta?
- Vilken teknik finns idag och i framtiden som kan bli lämplig för att åstadkomma sådana ytor?
- Vilka betongegenskaper påverkas av olika kemiska ytbehandlingar som appliceras på ytan eller betongblandningen?
- Varför är det viktigt att åstadkomma hydrofoba ytor? Ekonomisk, miljö- och estetisk nytta.

Betong vill naturligt absorbera vatten och betraktas som ett hydrofilt material. Det finns två sätt att förhindra vatteninträngning i betongen: att impregnera ytan eller/och blanda impregneringsmedel inne i betongblandningen. Testresultaten bevisar att genom att använda olika impregneringsmedel kan en betong bli hydrofob. En hydrofob yta har en kontaktvinkel större än 90 grader och kraven gäller för en betongyta att ha en god åldringsbeständighet och förebygga sprickor.

Den mest effektiva tekniken för att åstadkomma hydrofoba ytor är att tillverka silikonformar som har en negativ bild av en mönstrad textil. För att uppnå superhydrofoba ytor ($\alpha > 150^\circ$) kom vi fram till att belägga impregneringsmedel på silikonytan precis innan gjutning. Tekniken har en stor potential och kan utvecklas i framtiden. Utveckling av vattenavvisande betongytor är ett specifikt område inom byggt teknik, där fasader ska bli lätta att underhålla och motstå inträngning av vatten in i betongen samt bakomliggande lager av isolering m.fl. Det finns bl.a. andra tekniker som nanoteknik, men de är ekonomiskt sett dyrare.

Effekterna av impregneringsmedel/ytbehandlingen StoCryl HG 200 i förhållande till SILRES®BS1001 i betongblandningen har det påvisats att SILRES®BS1001 har en bättre förmåga att motstå vattenabsorption i betongen, däremot ser StoCryl HG 200 estetiskt bättre ut men flyter mindre, vilket medför svårare bearbetbarhet. Appliceras ytbehandlingar på betongytan ökas tätheten och förgrenar sig mer på porsystemet. Medlets skyddseffekt kan däremot minska med tiden eller försvinnas. Vid mekanisk påverkan, där sprickbildningar kan förekomma, är medlet inte verksamt.

Ekonomiskt sett är det lönsamt att åstadkomma hydrofoba betongytor med hjälp av impregnering, det skyddar mot t.ex. saltinträngning, frost, fukttransport och karbonatisering som kan minska livslängden på betongkonstruktioner. Att använda ultrahögpresterande betong på fasader används mindre mängd material och kräver ingen stålarmering, vilket bidrar till mindre tjocklek. Att ha en lättrengörande betongyta, är det gynnsamt för miljön eftersom rengöringsmetoderna inte är miljövänliga och det skadar oftast ytan men inte själva smutsbeläggningen. För ultrahögpresterande betong på fasader används mindre mängd material, vilket medför billigare transport. Ur estetiska ändamål är hydrofoba medel i de flesta fall färglösa som inte har någon inverkan på ytans utseende, här kommer avtryck från silikon in, som snyggar till betongytan.

I detta examensarbete framställdes vattenavvisande mönstrade betongytor med gjutning i specialdesignade textil- och silikonformar. Den tekniken är ingen standardteknik men har

utvecklats inom ett EU projekt. Detta arbete bidrar till vidareutveckling av betongytor. Framtida planer på CBI kring området som har arbetats med, blir att tillverka prover i större skalor och senare utveckla superhydrofoba egenskaper med kontaktvinklar större än 150 grader. Denna höga kontaktvinkel ser till att ytorna nästan är helt fria från föroreningar. Dessa två huvudpunkter kännetecknar de självrengörande ytor (Feng et al. 2000).

Referenser

- Bache H H. Concrete and concrete technology in a broad perspective. Aalborg, 1995. Aalborg Portland CBL, Repring No. 27.
- Bernander, S. & Emborg, M. (1997). Temperatur, mognadsutveckling och egenspanningar i ung betong, avsnitt 12.7. I Ljungkrantz, C., Möller, G. & Petersons, N. (red.) *Betonghandbok: Material*, 2. uppl., Solna: Svensk byggtjänst, ss. 579-580
- Burström, P.G. (2006). *Byggnadsmaterial: Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*, Lund, Studentlitteratur AB. ISBN 978-91-44-02738-8
- Byfors, K. (1997). Tillsatsmedel. I Ljungkrantz, C., Möller, G. & Petersons, N. (red.) *Betonghandbok: Material*, 2. uppl., Solna: Svensk byggtjänst, ss. 105-122.
- Emborg, P. (2000). Temperatur- och fuktberoende egenspanningar och sprickbildning. I Ljungkrantz, C. (red.) *Betonghandbok. Högpresterande betong: material och utförande*. Solna: Svensk byggtjänst, ss. 227 -250
- Fagerlund, G. (2000). Ballast. I Ljungkrantz, C. (red.) *Betonghandbok. Högpresterande betong: material och utförande*. Solna: Svensk byggtjänst, ss. 41-52
- Fagerlund G. Kapitel 28, Högpresterande betong. Ur ”Betonghandbok: Material. Utgåva 2”, Svensk byggtjänst och Cementa AB, Stockholm, 1994.
- Feng, L. & Jiang, L. (2010). *Bioinspired Intelligent Nanostructured Interfacial Materials*, Beijing, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. ISBN-13 978-981-4280-31-0
- Fidjestöl, P. (2000). Inledning. I Ljungkrantz, C. (red.) *Betonghandbok. Högpresterande betong: material och utförande*. Solna: Svensk byggtjänst, ss. 13-18
- Hedenblad, G., Nilsson, L-O. & Norling-Mjörnell, K (2000). Fuktegenskaper. I Ljungkrantz, C. (red.) *Betonghandbok. Högpresterande betong: material och utförande*. Solna: Svensk byggtjänst, ss. 209-226
- Helsing Atlassi, E. & Kjellsen, Knut O. (2000). Hydratationskinetik och strukturutveckling. I Ljungkrantz, C. (red.) *Betonghandbok. Högpresterande betong: material och utförande*. Solna: Svensk byggtjänst, ss. 107-140
- Hertzell, T. (2013). *Betongens yta*, Stockholm, Forskningsrådet Formas, Upplaga 1:5, ISBN 978-91-540-6084-9.
- Hillerborg, A. (1997). Deformationer under last. I Ljungkrantz, C., Möller, G. & Petersons, N. (red.) *Betonghandbok: Material*, 2. Uppl., Solna: Svensk byggtjänst, ss. 463-484.
- HUS AMA 98 (1998). Allmän material och arbetsbeskrivning för husbyggnadsarbeten, AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Johansson, L. (2013). *Ytskydd för betong: en litteraturstudie*, Cement och Betong Institutet, Stockholm. ISSN 0346-8240

Justnes H, Sellevold E J & Lundevall G. High strength concrete binders part A: Reactivity and composition of cement pastes with and without condensed silica fume. Ur: 4th Canmet/ACI Int. Conference on Fly Ash, silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, 1992. Vol 2, s 873-890.

Jönsson, U., Olofsson, G. & Olsson, S. (1984). *Kontaktvinkelmätning: En metod att karakterisera fasta ytor*. Umeå: Försvarets Forskningsanstalt 1984. ISSN 0347-2124

Ljungkrantz, C. (red.) *Betonghandbok. Högpresterande betong: material och utförande*. Solna: Svensk byggtjänst 2010. ISBN 91-7332-928-2

Ljungkrantz, C., Möller, G. & Petersons, N. (red.) *Betonghandbok: Material*, 2. uppl., Solna: Svensk byggtjänst 1997. ISBN 91-7332-799-9

Persson B. High performance concrete tested. Högpresterande betong. Intern rapport M6:14, 1995.

Persson B. Hydration and strength of high performance concrete. Ur: Advanced Cement Based Materials, 1996(3), ss. 107-123

Persson B. Ideal partikelfördelning i färsk betong. Betong Nr 3, september 1995.

Redaktionsgruppen (1997). Tillsatsmaterial, avsnitt 6.1. I Ljungkrantz, C., Möller, G. & Petersons, N. (red.) *Betonghandbok: Material*, 2. uppl., Solna: Svensk byggtjänst, ss. 123-128

Sandberg, P. (2000). Cement och tillsatsmedel. I Ljungkrantz, C. (red.) *Betonghandbok. Högpresterande betong: material och utförande*. Solna: Svensk byggtjänst, ss. 19-34

Sandberg, P. (2000). Tillsatsmedel. I Ljungkrantz, C. (red.) *Betonghandbok. Högpresterande betong: material och utförande*. Solna: Svensk byggtjänst, ss. 35-40

SIS (2004). *SS-EN 1504-2:2004* Stockholm: Swedish Standards Institute

StoCretec (2012). *Tekniskt faktablad: StoCryl HG 200*. Hämtat från sto: http://www.sto.se/webdocs/0000/SDB/T_01806-004_0208_SV_01_00.PDF [2015-05-07]

Svensk betong (u.å). *Fakta om betong*. Hämtat från svenskbetong: <http://www.svenskbetong.se/fakta-om-betong.html> [2015-04-03]

Terence C. Holland (2005). Silica Fume Association: *Silica Fume User's Manual* (2005). Om silikastoft, s.37. <http://www.silicafume.org/pdf/silicafume-users-manual.pdf> [2015-02-21]

Terselius, B. (1995). *Polymerers kemiska och fysikaliska egenskaper*, Stockholm, KTH.

Thielicke, W. (2007). *wikimedia*. Hämtat från Wikipedia: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lotus3.jpg#/media/File:Lotus3.jpg>. [2015-05-06]

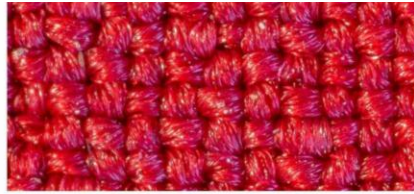
Wacker Chemie AG (2015). *SILRES®BS 1001*. Hämtat från wacker: <http://www.wacker.com/cms/en/products/product/product.jsp?product=10072> [2015-05-07]

Bilaga 1

Textilier

Betongytor

T1



T4



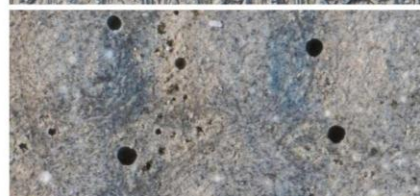
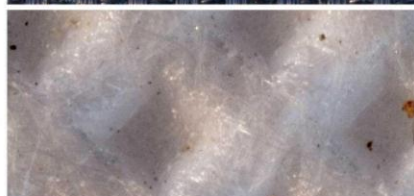
T5



T6



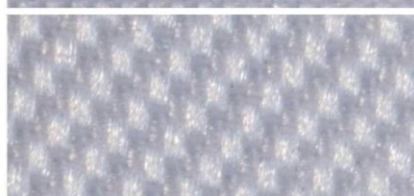
T7



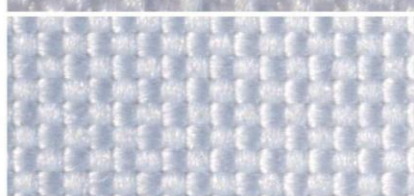
T8



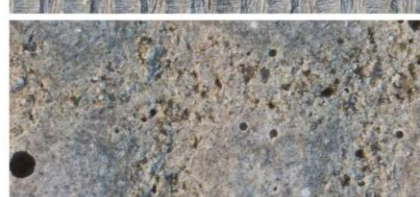
T9



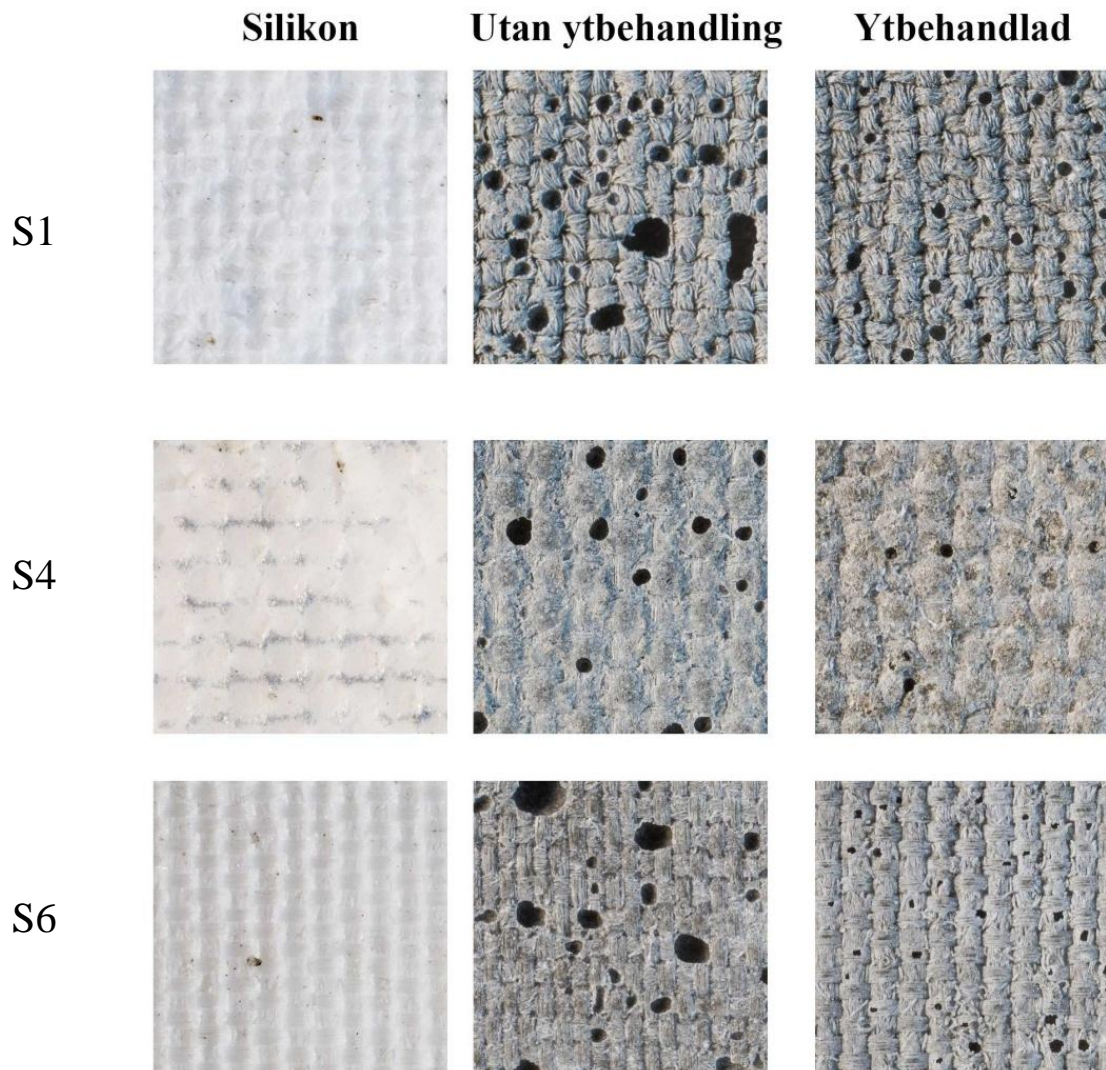
T10



T11



Bilaga 2



Bilaga 3

Diagram 12. Kontaktvinkelmätning för samtliga prover som inte kunde utföras med en vattendroppe på storleken 3 µl. Vattendroppe på 5,5 µl användes.

