

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi
Avdelningen för Byggnadsmaterial

Utvärdering av SikaAer Solid Luftporbildare i betong

Evaluation of a new air entraining agent
in concrete - SikaAer Solid

Daniel Sundqvist

Jacob Lif

TVBM-5086

Examensarbete

Lund 2012

© Copyright Daniel Sundqvist & Jacob Lif

Lunds Tekniska Högskola
Institutionen för Bygg- och Miljöteknologi
Avdelningen för Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund

Tel: 046-222 74 15
Fax: 046-222 44 27
www.byggnadsmaterial.lth.se

ISRN: LUTVDG/TVBM--12/5086--SE (1-73)
ISSN: 0348-7911 TVBM

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och utgör den avslutande delen av utbildningen på civilingenjörsprogrammet Väg- och Vattenbyggnad, 300 högskolepoäng, vid Lunds Tekniska Högskola. Examensarbetet genomfördes vårterminen 2012 vid Avdelningen för Byggnadsmaterial på Lunds Tekniska Högskola på uppdrag av Sika Sverige AB och AB Sydsten.

Handledare för examensarbetet har varit Katja Fridh vid Avdelningen för Byggnadsmaterial och till henne vill vi rikta ett stort tack. Vi vill även tacka våra två industrihandledare Niklas Johansson, Sika Sverige AB samt Peter Weywadt, AB Sydsten. Likaså vill vi tacka vår examinator Lars Wadsö.

Ett stort tack även till dessa:

Bo Johansson, Forskningsingenjör, Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH
Stefan Backe, Forskningsingenjör, Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH
Bengt Nilsson, Forskningsingenjör, Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH
Göran Fagerlund, Professor, Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH

Till sist ett stort tack till alla på Avdelningen för Byggnadsmaterial som bidragit med goda råd, gott humör och ett trevligt bemötande.

Lund, våren 2012



Daniel Sundqvist



Jacob Lif

Sammanfattning

- Titel:** Utvärdering av SikaAer Solid – luftporbildare i betong
- Författare:** Daniel Sundqvist & Jacob Lif
- Handledare:** Katja Fridh, Universitetslektor, Avd. för Byggnadsmaterial
Niklas Johansson, Sika Sverige AB
Peter Weywadt, AB Sydsten
- Examinator:** Lars Wadsö, Professor, Avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH
- Problemställning:** När vatten i betong fryser ökar dess volym med 9 %, denna expansion kan orsaka att betongen spricker. För att göra betong frostbeständig tillsätts extra luft. Den extra luften har till uppgift att fungera som ett expansionskärl för det vatten som fryser. Idag sker den extra luftinblandningen genom att man tillsätter ett luftporbildande tillsatsmedel, vanligtvis tensider. Detta sker i samband med betongtillverkningen. Genom inblandning av tensider erhålls ett porsystem med små luftporer som ligger jämt fördelade intill varandra.
- Vid tillverkning av frostbeständig betong har man idag problem med att hitta rätt dosering av det luftporbildande tillsatsmedlet för att erhålla en betong med ca 5 % lufthalt. Svårigheterna är att få en jämn lufthalt i betongen beror på att det förekommer variationer hos delmaterialen grus, sten och cement. Vid transport, pumpning och vibrering av betongen kan luftporsystemet påverkas vilket innebär att luftporsystemet måste vara stabilt. För att sänka vattencementtalet används flyttillsatsmedel, vilket kan påverka luftporbildarens funktion. Rätt kombination av luftporbildare och flyttillsatsmedel blir därför väldigt viktigt.
- Tillsatsmedelsleverantören Sika har utvecklat en ”fast” luftporbildare som består av mycket små plastkulor. Dessa skall enligt tillverkarens uppgift fungera som vanliga luftporer genom att plastkulorna trycks ihop om is bildas nära kulorna. Produkten har namnet SikaAer Solid och är framtagen för att slippa de problem som de kemiska luftporbildande tillsatsmedlen kan orsaka. SikaAer Solid har använts med gott resultat i Tyskland. Enligt Sika anses produkten särskilt lämplig i konventionell anläggningsbetong,

självkompakterande anläggningsbetong och undervattensbetong.

Syfte: Detta examensarbete har som syfte att undersöka om SikaAer Solid är en fullgod luftporbildande produkt för att erhålla en frostbeständig betong.

Metod: Initialt inleddes examensarbetet med en litteraturstudie. Med litteraturgenomgången i bagaget fortsatte sedan examensarbetet med laborativa undersökningar. Undersökningarna har skett vid Lunds Tekniska Högskola. En ny typ av lufthaltsmätare (Roll-A-Meter) har använts eftersom en konventionell lufthaltsmätare inte fungerar för en betong med SikaAer Solid. För att kontrollera om SikaAer Solid ger en frostbeständig betong har saltfrostprovning genomförts. Varje betongrecept med inblandning av SikaAer Solid har jämförts med en referensblandning med enda skillnaden att denna betong har konventionell luftporbildare. Det har även utförts kloridmigrationstester för att kontrollera tätheten i betongen med och utan SikaAer Solid. En planslipsanalys, som visar luftporstrukturen, har genomförts vid Danish Technological Institute (DTI) Köpenhamn och visar bland annat om plastkulorna fördelas homogent i betongmassan samt den totala lufthalten. Examensarbetet är både teoretiskt och praktiskt där fokus ligger på den praktiska delen. Alla tester som berör betongen i både färskt och härdat tillstånd har följt rådande standarder (se nedan). Det finns ingen standard för lufthaltsmätning med Roll-A-Meter. Mätningarna har därför utförts enligt tillverkarens instruktioner.

Saltfrostprovning enl. SS 13 72 44:2005

Lufthalt enl. SS-EN 12350-7

Sättnmätt enl. SS-EN 12350-2

Betongkuber för frysprovning enl. SS 13 72 45

Tryckhållfasthet enl. SS-EN 12390-2:2009

Kloridmigration enl. NT BUILD 492

Luftporstruktur enl. EN 480-11

Slutsatser: SikaAer Solid är en fullgod ersättare till konventionell luftporbildare gällande anläggningsbetong och

självkompakterande betong. I saltfrostprovningen fick båda betyget ”Mycket god”. Undervattensbetongen med lägst dosering SikaAer Solid blev underkänd i frystestet, dock visar det sig att högre dosering SikaAer Solid ger en mer frostbeständig betong.

Hållfastheten är i de flesta fall högre med SikaAer Solid jämfört med konventionell luftporbildare.

Roll-A-Metern verkar vara en bra lufthaltmätare för att visa mängden SikaAer Solid, dock finner vi oklarheter med bedömningen av den totala lufthalten.

Nyckelord:

Betong, frostbeständighet, frostsprängning, skademekanismer, luftporbildare, SikaAer Solid

Abstract

Title: Evaluation of a new air entraining agent in concrete – SikaAer Solid

Authors: Daniel Sundqvist & Jacob Lif

Supervisors: Katja Fridh, PhD, Division of Building Materials
Niklas Johansson, Sika Sweden AB
Peter Weywadt, AB Sydsten

Examiner: Lars Wadsö, Professor at the Division of Building Materials, LTH

Questions: When water in concrete freezes its volume increases by 9 %, this expansion causing the concrete to crack. In order to make the concrete frost resistance additional air needs to be added. The additional air serves as an expansion space for the water that freezes. The most common way to add the extra air mixture is by using an air entraining agent, usually surfactants. This is usually done when the concrete is manufactured. By incorporation of surfactants, a pore system with small air pores, located close to each other, is obtained.

The production of frost resistance concrete tends to be problematic. The one problem is to find the correct dosage of the air entraining agent to obtain concrete with about 5 % air content. The difficulty is to come up with a uniform air concentration in the concrete because there are due to variations in part materials, such as gravel, stone and cement. During transport, pumping and vibrating the concrete, the air pore system can be affected. To decrease the water cement ratio, superplasticizers is used, often affecting the air entraining agent functionality. The right combination of air entraining agents and superplasticizer is therefore extremely important.

Additives supplier Sika has developed a solid air entraining agent consisting of tiny plastic beads. According to Sika these beads should work like common air pores, when the water freeze the beads will be compressed. The product is called SikaAer Solid and is designed to avoid the problems of chemical air entraining agents may cause. SikaAer Solid has previously been used successfully in Germany. According

to Sika, the product is considered suitable for conventional plant concrete, self compacting concrete plant and underwater concrete.

Purpose: This master thesis aims to investigate whether SikaAer Solid is an adequate air entraining product to obtain a frost-resistant concrete.

Method: We started this master thesis with a literature review, and then continued with laboratory investigations. The surveys have taken place at the Faculty of Engineering in Lund. A new type of air content meter (Roll-A-Meter) has been used as conventional air content meter in combination with SikaAer Solid does not work. To see if SikaAer Solid provides a frost resistant concrete salt freezing tests has been performed. Each concrete recipe mixed with SikaAer Solid has been compared to a reference mixture, the only difference is that the concrete has conventional air entraining agent. It has also been performed chloride migration tests to check the density of the concrete with and without SikaAer Solid. A flat tie analysis showing air pore structure has been conducted at the DTI in Copenhagen and shows among other things plastic beads distributed uniformly in the concrete mass and the total air content. The thesis is both theoretical and practical with the focus on the practical part. All tests relating to the concrete in both the fresh and hardened state have followed the current standards (see below). The "Roll-A-Meter"- tests follow no standard because none is available but we have followed the manufacturer's instructions.

Freeze-thaw test by SS 13 72 44:2005

Air content by SS-EN 12350-7

Slump by SS-EN 12350-2

Concrete specimens for frost resistance by SS 13 72 45

Compression strength by SS-EN 12390-2:2009

Chloride migrations test by NT BUILD 492

Air pore structure by EN 480-11

Conclusions:

SikaAer Solid is an adequate replacement for conventional air entraining agents in construction concrete and self-compacting concrete. In freeze-thaw tests both got rated "Very Good". The underwater concrete with the lowest dosage SikaAer Solid failed in the freeze-thaw test, however, it is found that higher dosage SikaAer Solid provides a more frost resistant concrete.

The compression strength is in most cases higher with SikaAer Solid compared with conventional air entraining agent.

The Roll-A-Meter seems like a good air content meter to display the amount SikaAer Solid, however, we find unclaritys in the assessment of the total air content.

Keywords:

Concrete, frost resistance, frostburst, damage mechanism, air entraining agent, SikaAer Solid

Innehållsförteckning

Förord	I
Sammanfattning	II
Abstract.....	V
1 Inledning	11
1.1 Bakgrund.....	11
1.2 Syfte.....	11
1.3 Avgränsningar	12
2 Teori	13
2.1 Betong.....	13
2.2 Delmaterial i betong – En översikt	13
2.2.1 Cement	13
2.2.2 Vatten.....	14
2.2.3 Ballast	14
2.2.4 Tillsatsmedel	14
2.2.5 Tillsatsmaterial	15
2.3 Frostbeständighet	16
2.3.1 Allmänt.....	16
2.3.2 Typer av frostangrepp	17
2.4 Skademekanismer.....	18
2.4.1 Sluten behållare	18
2.4.2 Hydrauliskt tryck	19
2.4.3 Osmotiskt tryck	22
2.4.4 Islinsbildning.....	23
2.5 Luftporbildare	25
2.5.1 Uppbyggnad och funktion.....	25
2.6 SikaAer Solid.....	27
2.6.1 Allmänt.....	27
2.6.2 Tillverkning & teknisk data.....	28
2.6.3 Användningsområden	28
2.6.4 Referensobjekt.....	28

2.7 Tidigare erfarenheter av liknande produkter.....	29
2.7.1 Kleenopor SA-8.....	29
2.7.2 Microcelkuler.....	30
2.8 Aktörernas roll i betongproduktionen.....	31
2.8.1 Konstruktör.....	31
2.8.2 Betongtillverkaren.....	32
2.8.3 Beställare – Exempel på krav.....	33
2.9 Anläggningsbetong.....	34
2.9.1 Allmänt.....	34
2.10 Undervattensbetong.....	34
2.10.1 Allmänt.....	34
2.10.2 Användningsområde & frostbeständighet.....	34
2.11 Självkompakterande betong.....	35
3 Laboratorieundersökningar.....	37
3.1 Delmaterial.....	37
3.2 Utförande.....	37
3.3 Recept.....	38
3.4 Undersökningar.....	39
3.4.1 Lufthalt.....	39
3.4.2 Konsistensmått.....	40
3.4.3 Kloridmigration.....	41
3.4.4 Saltfrostprovning.....	42
3.4.5 Tryckhållfasthet.....	43
3.4.6 Planslipsanalys & Tunnslipsanalys.....	44
4. Resultat.....	45
4.1 Lufthalt.....	45
4.2 Konsistensmått.....	46
4.3 Kloridmigration.....	48
4.4 Saltfrostprovning.....	49
4.5 Tryckhållfasthet.....	50
4.6 Planslipsanalys & tunnslipsanalys.....	51
4.7 Utvärdering av Roll-A-Meter.....	55
5. Diskussion och slutsatser.....	59
6. Referenser.....	61

Utvärdering av SikaAer Solid – Luftporbildare i betong

Bilaga I – Konsistensmått	64
Bilaga II – Kloridmigration	65
Bilaga III – Saltfrostprovning	66
Bilaga IV – Tryckhållfasthet.....	67
Bilaga V – Produktdatablad SikaAer Solid.....	69
Bilaga VI – ”Roll-A-Meter”	71

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I dagsläget har man vissa problem vid tillverkning av frostbeständig betong. Problemet ligger i att hitta rätt dosering av luftporbildande tillsatsmedel för att erhålla en betong med ca 5 % luft. När vatten i betong fryser ökar dess volym med 9 %. Denna expansion gör att betongen utsätts för dragpåkänningar och brott kan bli aktuellt. Det är därför väldigt viktigt att kunna säkerställa en betong med rätt mängd luft samt att luftporerna är av rätt storlek. Luften har till uppgift att då fungera som expansionskärl när vattnet fryser i betongen.

Idag sker den extra luftinblandningen genom att man tillsätter ett luftporbildande medel, vanligtvis tensider. Men det finns vissa svårigheter och problem med denna metod. För det första är det svårt att få en jämt lufthalt i betongen eftersom det förekommer variationer hos delmaterialen grus, sten och cement. Kornformen har stor betydelse för cementhalt och mängd flyttillsatsmedel eftersom många små korn kräver mer vatten. Vid transport, pumpning och vibrering kan luftporsystemet påverkas vilket innebär instabilitet i betongen.

Tillsatsmedeltillverkaren Sika har därför utvecklat en ”fast” luftporbildare som består av små (10-100 μm) plastkulor och benämns SikaAer Solid. Dessa kulor ska fungera precis som konventionell luftporbildare, dvs. hantera vattnets expansion vid frysning.

Funktionen kring dessa skall enligt tillverkarens uppgift fungera som vanliga luftporer genom att plastkulorna trycks ihop om is bildas nära kulorna. Fördelen med dessa kulor är att man slipper de kemiska problemen som kan uppstå vid konventionell luftinblandning. Av miljöskäl har man på senare tid börjat ersätta cement med andra delmaterial vid betongtillverkningen. Det har heller inte skett så mycket forskning på detta men man tror att luften i betongen kommer påverkas av detta. Alltså tensiderna förlorar sin funktion och risken för betong med alltför låg lufthalt blir aktuell. En ”fast” luftporbildare såsom SikaAer Solid vore ett stort steg i rätt riktning.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att undersöka om SikaAer Solid är en fullgod luftporbildare för att erhålla en frostbeständig betong. Produkten ska dessutom inte påverka en betongs övriga egenskaper såsom hållfasthet och täthet.

1.3 Avgränsningar

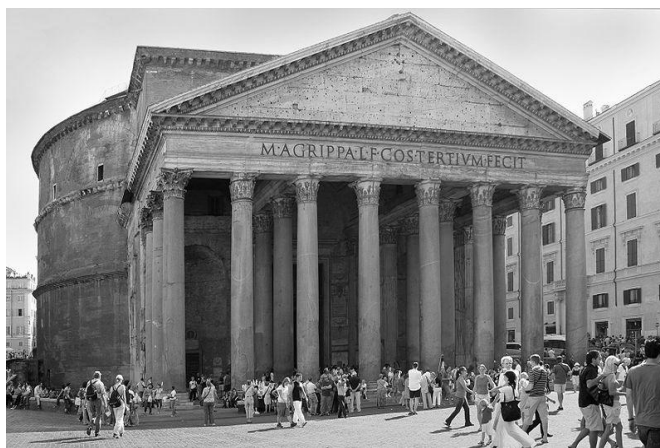
- Studien omfattar endast CEM I betong.
- Fokuset har legat på de fysikaliska egenskaperna.
- Vi har följt alla standarder i största möjliga utsträckning kunnat men antalet provkroppar har varit färre än standarderna föreskrivit. Detta pga. tidsbrist, materialbrist och platsbrist.
- Vid betongtillverkningen har vi använt oss av en frifallsblandare.

2 Teori

2.1 Betong

Betong är ett byggnadsmaterial som används i bärande konstruktioner där krav på god beständighet finns, t.ex. vattenkraftverk, broar etc. Betong består av cement, vatten och ballast. Under betongteknikens utveckling är det numera även vanligt att man blandar i tillsatsmedel och tillsatsmaterial i betongen för att förändra betongens egenskaper (Burström, 2001).

Betong är inget nytt material utan redan under romartiden använde romarna ett betongliknande material vid byggandet av broar, vattencisterner och hamnar. Vissa av dessa står fortfarande kvar än idag och en av de mest kända är Pantheon i Rom, 1790 (Fagerlund, 1999a).



Figur 1. Pantheon i Rom, Italien Foto: Martin Olsson

2.2 Delmaterial i betong – En översikt

2.2.1 Cement

Cement är ett hydrauliskt bindemedel eftersom det först stelnar vid kontakt med vatten och sedan blir tät och beständig mot vatten. Den vanligaste råvaran i cementtillverkning är kalksten tillsammans med lera (Burström, 2001)

Cement kan delas in i tre huvudtyper; CEM I, CEM II samt CEM III. CEM I är ett rent portlandcement medan de övriga typerna innehåller andra material. CEM II, som benämns portland-kompositcement, måste innehålla minst 65 % portlandklinker. Resterande del består då av andra material såsom masugnsslagg, silikastoft, flygaska, kalksten eller blandningar av dessa, se avsnitt 2.2.5. Den tredje typen CEM III, som benämns slaggcement, ska minst innehålla 20 % portlandklinker. Det finns också ett högsta krav och detta är satt till 65 % portlandklinker. Resterande del består av slagg precis som i CEM II (Burström, 2001).

I Sverige har anläggningscementet (CEM I) länge varit den mest använda cementsorten men på senare tid har byggcement (CEM II) blivit allt mer populär. Detta främst pga. miljöskäl eftersom byggcement innehåller mer kalkstensfiller (Burström, 2001). Enligt Fridh (2012) är byggcement den mest använda idag.

Byggcement CEMII/A-LL 42,5 R tillverkas genom att kalksten och lera bränns i en roterande ugn där produkten blir klinker. Klinkern mals sedan med gips, kalksten och järnsulfat för att bilda cement (Fagerlund, 1999a. Johansson, 2012)

För närvarande är det byggcementet som man använder sig mest utav. Men även typen CEM III blir allt vanligare. Det finns dock en oro kring detta eftersom man inte riktigt vet

hur dessa typer av cement fungerar med vanlig konventionell luftporbildare. Oron ligger t.ex. i hur tillsatsmaterialen påverkar luften i betongen. Således skulle man slippa fundera över komponenternas kemiska kompatibilitet vid inblandning av SikaAer Solid i betongen (Fridh 2012).

När cement och vatten blandas bildas cementpasta. Förhållandet mellan cement och vatten kallas vattencementtalet, förkortat vct. Detta bestämmer till stor del över egenskaperna (hållfasthet, härdningstid, värmeutveckling) hos cementpastan och betongen (Burström, 2001).

$$vct = \frac{W}{C}$$

där

W är blandningsvattnet [kg], [kg/m³] eller [l/m³]

C är mängden cement [kg], [kg/m³]

2.2.2 Vatten

Kvaliteten på vattnet har inte så stor påverkan på betongens hållfasthet men en tumregel är att om vattnet går att dricka så går det att använda till betongblandning. Man bör dock undvika att blanda med saltvatten då detta kan medföra armeringskorrosion (Burström, 2001).

2.2.3 Ballast

Ballast är ett samlingsnamn för bergmaterial som används vid betongtillverkning. Den vanligaste ballasten är från naturliga bergarter och brukar delas in i olika storlekar, sand <4 mm, fingrus ≤8 mm och sten >8 mm. Dock är det svårt att få dessa både naturligt och krossat vilket har lett till att man vid betongtillverkning delar in ballasten i olika fraktioner, t.ex. 0-8 mm, 8-32 mm (Burström, 2001). Man brukar skilja på krossad sten som benämns makadam och naturlig sten som benämns singel. Den senare har en rund form och utvinns ur rullstensåsar. Dock är det vanligaste ballastmaterial makadam. Även grusmaterialet kan vara krossat eller naturligt. Kornformen har stor betydelse för cementhalt och mängd flyttillsatsmedel eftersom många små korn kräver mer vatten (Johansson, 2012). När ballasten blandas med cement och vatten är det viktigt att använda flera olika kornfraktioner så att tomrummen mellan de större stenarna fylls ut med mindre grus och sand (Burström, 2001).

2.2.4 Tillsatsmedel

För att förändra betongens egenskaper kan olika typer av tillsatsmedel användas. Det vanligaste är flyttillsatsmedel som gör betongen mera lättflytande och därmed ökar arbetbarheten. Eftersom betongen blir mer lättflytlig kan vattenmängden minskas med bibehållen konsistens, detta ger ett lägre vct vilket medför en högre hållfasthet. Det finns även andra tillsatsmedel som accelererar betongens hållfasthetstillväxt och det finns

medel som på motsvarande sätt retarderar hållfasthetstillväxten och betongens härdningsprocess (Burström, 2001).

Ett annat viktigt tillsatsmedel är luftporbildare som ger inblandning av luft i betongen ökar betongens frostbeständighet, se avsnitt 2.5.

2.2.5 Tillsatsmaterial

Ibland ersätts en del av cementen med olika tillsatsmaterial, t.ex. silikastoft, flygaska och granulerad masugnsslagg. Den vanligaste förekommande i Sverige är silikastoft som är en restprodukt vid tillverkning av olika legeringsämnen till stål. Denna brukar ersätta 4-10% av cementvikten (Burström, 2001). Anledningen till användningen av silikastoft är för att vid normal reaktion mellan cement och vatten bildas cementgel men även stora mängder kalciumhydroxid. Silikastoft innehåller kiselsyra som reagerar med kalciumhydroxiden och bildar mer cementgel. Alltså tar silikastoftet hand om restprodukter vid bildandet av cementgel och omvandlar det till mer cementgel vilket medför ökad hållfasthet med samma cementmängd (Fagerlund, 1999a). Detta medför att vct ersätts med ett vattebindemedelstal, vbt, även kallat vct_{ekvivalent}

$$vbt = \frac{W}{C + \beta D}$$

där

W är blandningsvattnet [kg]

C är mängden cement [kg]

D är mängden tillsatsmaterial [kg]

β är ”effektivitetsfaktor” (0-1)

β beskriver hur stor påverkan tillsatsmaterialet har på cementpastan. T.ex. om ett tillsatsmaterial är hälften så effektivt som vanlig portlandcement så ska denna mängd multipliceras med 0,5 (Burström, 2001).

2.3 Frostbeständighet

2.3.1 Allmänt

Frostangrepp förekommer hos porösa och spröda byggnadsmaterial. Ett materials porositet beskriver hur mycket vatten som kan fördelas i porstrukturen före frysning. Om sedan vattnets temperatur sjunker under fryspunkten sker en frysning som innebär att det frysta vattnets volym ökar med nio procent vilket medför inre spänningar som betongen inte kan stå emot. Det är därför av högsta intresse att man kan bedöma betongens frostbeständighet och på så vis även dess livslängd. Exempel på utsatta delar i byggnaden är ytor som utsätts för stark fuktbelastning, t.ex. ytor i det fria, konstruktioner i vatten etc. Den omgivande miljön har också en stor betydelse i ett långt perspektiv och har oftast en nedbrytande inverkan på betongen (Fagerlund, 1999b).

Frostbeständighet är viktigt i länder med kallt klimat eftersom skadorna pga. frostangrepp kan leda till stora problem. På 1930-talet upptäckte man i USA att en luftinblandning i material ledde till ökad frostbeständighet. Detta ledde till stor forskning inom området och utvecklingen i att framställa medel som skapar luftporer inleddes. Men det var först på 1960-talet som luftporbildande tillsatsmedel introducerades i Sverige. Man applicerade först kunskapen på byggnadsdelar som var särskilt utsatta som t.ex. broar, betongpelare i vatten etc. och man fann ganska snabbt att frostsadorna minskade på utsatta konstruktioner vid luftinblandning (Fridh, 2005).



Figur 2. Frostangrepp hos en betongtrapp. (Stockholm Betongkonsult AB, 2009)



Figur 3. Frostangrepp hos en betongkonstruktion. (PCA, 1998)

2.3.2 Typer av frostangrepp

Skador till följd av frostangrepp kan delas in i två fall, inre frostsprängning och ytavskalning. Inre frostsprängning kan ske om betongen fryser när den har högt fukttinnehåll, detta resulterar i inre sprickbildning, se figur 6 (Fagerlund, 1999). En förhöjd lufthalt och användning av vattentät betong som enligt SS 137003 har ett vattencementtal lägre än 0,60 gör att angreppet minskas. Ytavskalning kan ske både i kontakt med vanligt vatten samt salthaltigt vatten och resulterar i ett angrepp på betongytan. Skadorna kännetecknas ofta av avskalningar och ytan avskalas successivt efter varje frysning. Ytavskalning är svårare att övervinna och det krävs därför ett luftporsystem med mycket hög kvalitet samt en mer vattentät betong än vanlig konventionell betong (Fagerlund, 1999b). Det råder fortfarande oklarheter om hela mekanismen bakom ytavskalning. Teorier finns att samma mekanism ligger bakom både inre frostsprängning och ytavskalning (Fridh, 2005).



Figur 4. Vattenkraftsanläggning i Luleå-älven. Stora avskalningar som till slut frilägger armeringen (Persson & Rosenqvist, 2009)



Figur 5. Vatten (och salt) från vägbanan rinner ner på kantbalken och orsakar ytavskalning (Fridh, 2012)



Figur 6. Fundamenten är uppspruckna pga. inre frostsprängning (Fridh, 2012)

2.4 Skademekanismer

2.4.1 Sluten behållare

Om isbildning sker i en sluten behållare, dvs. ingen vattentransport sker, kan stora tryck uppstå när temperaturen når fryspunkten. För att bemästra tryckpåkänningarna måste det finnas en luftfylld porvolym runt isbildningen på 9 % av det frysbara vattnet för att klara av volymökningen. En för liten luftvolym innebär att den slutna behållaren kommer utsättas för dragspänningar som överskrider draghållfastheten i betongen och detta kommer resultera i deformationer kring behållaren (Fagerlund, 1999b). Man brukar förklara detta med en kritisk vattenmättnadsgrad, S_{kr} , dvs. att mängden frysbart vatten inte får vara för stor i förhållande till tillgänglig mängd luft:

$$S_{kr} = \frac{W_f}{W_f + 0,09 * W_f} \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}$$

där

W_f är mängden frysbart vatten [$\text{m}^3\text{/m}^3$]

Mängden frysbart vatten, W_f , är dock svår att bedöma i praktiken vilket har lett till en förenkling för att bestämma vattenmättnadsgraden S . Förenklingen innebär att man tar hänsyn till mängden förångningsbart vatten (kapillär- och absorberat vatten) i förhållande till den totala porvolymen (Fagerlund, 1999b). Den totala porvolymen beräknas på följande vis:

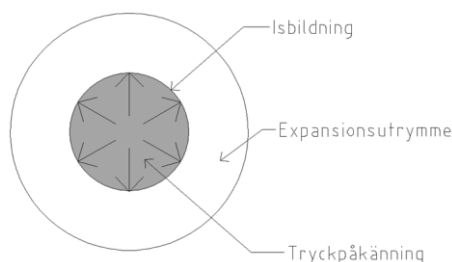
$$V_p = V_g + V_w$$

där

V_g är volymen porgas [m^3]

V_w är volymen porvatten [m^3]

Gränsvärdet på den kritiska vattenmättnadsgraden, S_{kr} , är 0,917. Ett värde som är högre än 0,917 betyder att andelen vatten är för stor vilket leder till att vatten vill pressas undan. Detta medför i sin tur tryck i behållaren och brott kring behållaren blir aktuellt. Frysning och frostangrepp inträffar så fort vattenmättnadsgraden överskrider det kritiska värdet i kombination med låg temperatur (Chatterji, 2002).

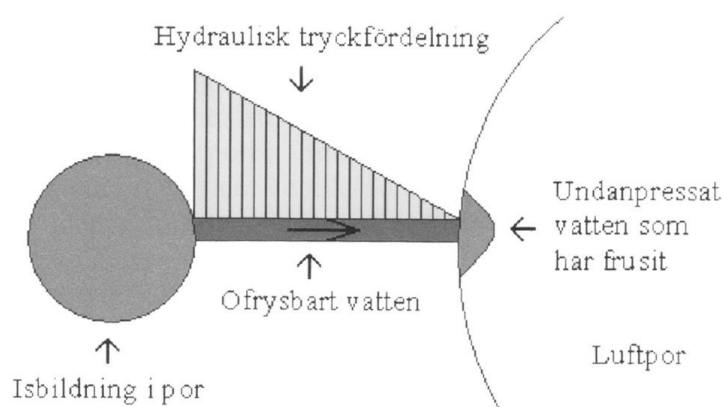


Figur 7. Isbildning i en sluten behållare (Fridh, 2005)

2.4.2 Hydrauliskt tryck

I porösa material såsom betong kommer det finnas fruset vatten men även ofruset vatten pga. kapillärt undertryck. Ju mindre porerna är desto lägre är dess fryspunkt. Betong som har stor andel små porer har alltså en stor mängd ofrysbart vatten vilket påverkar frostbeständigheten positivt (Fagerlund, 1999b).

Verkligheten har visat att det krävs mer än 9 % (av det frysbara vattnet) luftfyllda porer för att klara isens expansion. Detta eftersom vatten måste kunna transporteras från isbildningen till närmsta luftpor. När vatten transporteras från den plats där frysning sker, till följd av volymökningen som sker vid isbildningen, uppstår ett hydrauliskt tryck i betongen. Hydrauliskt tryck uppstår pga. motståndet mot vattentransporten och resulterar i att betongen utsätts för dragspänningar. Om draghållfastheten överskrids skadas betongen. Avståndet mellan luftporerna får således inte vara för stort då detta ökar trycket (Fagerlund, 1999b).



Figur 8. Hydrauliskt tryck när vatten pressas från kapillärpor till luftpor (Persson & Rosenqvist, 2009)

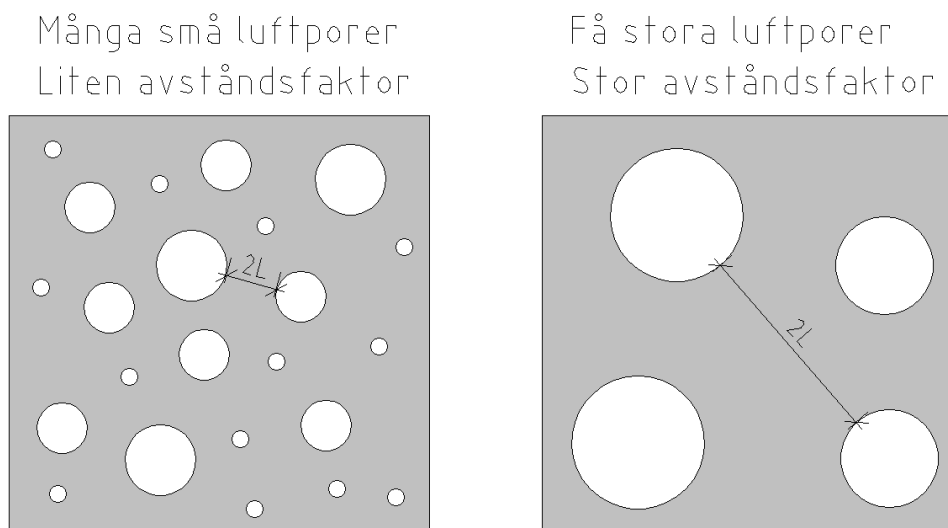
Avståndet mellan luftporerna beror på två saker, dels porernas storlek och dels volymandelen luftfyllda porer i betongen. Avståndet mellan luftporerna benämns i tekniska sammanhang för avståndsfaktor, L . Hög avståndsfaktor innebär att vattentransporten mellan porerna blir längre. Därmed blir tryckpåkänningen större och risken för frysning ökar. Låg avståndsfaktor är att föredra eftersom porerna ligger tätare varandra, även vid samma lufthalt. När avståndet L uppnår ett kritiskt värde L_{kr} uppstår skada i betongen (Fagerlund, 1999b).

$$L = r \left(1,4 \left(\frac{1}{a} \right)^{1/3} - 1 \right) [m]$$

där

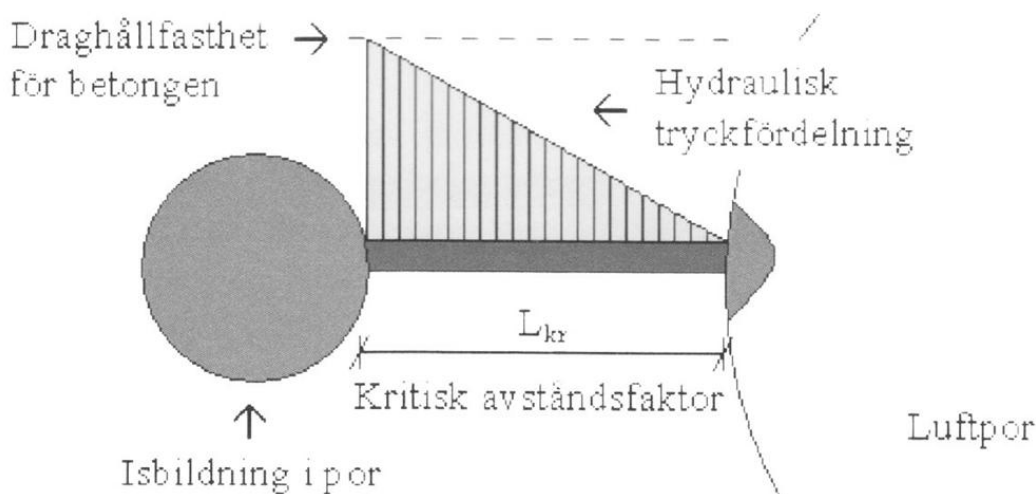
a är volymandelen luftfyllda porer i betongen [m^3/m^3]

r är radien hos porerna [m^3/m^3]



Figur 9. Storleken på porerna samt dess volym påverkar avståndsfaktorn (Fagerlund, 1999b)

Kunskapen om det kritiska avståndet, L_{kr} , är alltså väldigt angeläget vid frostbeständighetsbedömning. Detta avstånd kan endast bestämmas genom experiment. Ett teoretiskt värde kan inte erhållas eftersom kunskapen om vilket tryck som exakt uppstår när isen bildas saknas. Den ena metoden är approximativ vilket innebär att man inte alls tar hänsyn till vattenabsorptionen som sker i luftporsystemet och man får därmed en s.k. fiktiv kritisk avståndsfaktor. I metod nummer två, den exakta, beaktar man däremot vattenabsorptionen och man får således en verklig kritisk avståndsfaktor. Den mest använda metoden är dock den approximativa och man strävar efter att ha en fiktiv kritisk avståndsfaktor mellan 0,18 och 0,25 mm beroende på om frysning sker i rent vatten eller i saltlösning. Den verkliga är däremot högre till följd av att en del luftporer är fyllda med vatten (Fagerlund, 1999b). Verklig kritisk avståndsfaktor bör vara mellan 0,37 och 0,43 mm (Fridh, 2005).



Figur 10. Kritisk avståndsfaktor (Persson & Rosenqvist, 2009)

Specifik yta handlar om hur luftporsystemet i en betong ser ut, dvs. storleken på luftporerna. Ur frostbeständighetssynpunkt vill man ha en betong med en blandad luftporstorleksfördelning. Med enbart små luftporer erhåller man ett luftporsystem med korta medelavstånd mellan porerna. Korta avstånd mellan porerna är en fördel men att enbart ha en betong med små luftporer gör att betongen blir sämre ur frostbeständighetssynpunkt. Detta eftersom porerna inte kan hantera expansionen som kommer att ske när vatten fryser. En blandad, dvs. luftporernas medeldiameter är högre, luftporstorleksfördelning skulle istället resultera i ett luftporsystem som kan hantera expansionen mycket bättre (Fagerlund, 1992). En hög specifik yta önskas. Specifik yta beräknas enligt följande:

$$\text{Specifika ytan} = \frac{6}{D}$$

där

D är luftporernas medeldiameter

Detta kan förklaras på följande vis. Tänk en stor luftpor. Om denna delas in i mindre porer, låt oss säga 10 st. blir medeldiametern något lägre vilket resulterar i att den specifika ytan ökar. Samtidigt som den specifika ytan ökar blir avståndet mellan luftporerna mindre. Låt oss nu dela den stora luftporen i 100 st. mindre porer. Resultatet av detta blir en ännu högre specifik yta eftersom medeldiametern hos luftporerna blir mindre. Detta resulterar således att samma volym har delats in i mindre volymer och därmed är avståndet, avståndet mellan luftporerna, mindre än i fallet en stor luftpor alternativt 10st luftporer.

2.4.3 Osmotiskt tryck

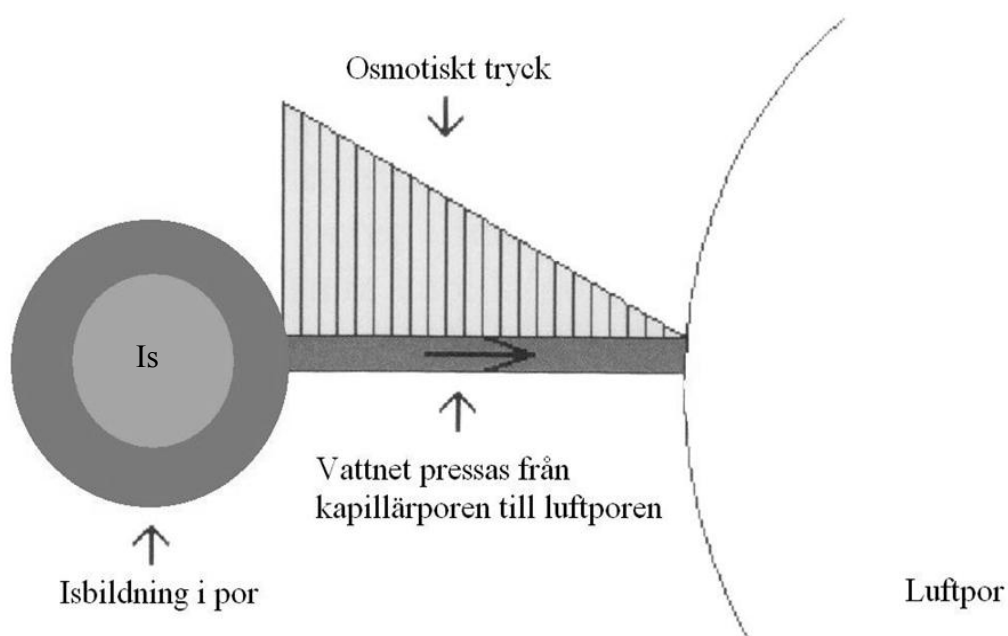
Ett osmotiskt tryck kan inträffa i porsystemet om vattnet i porsystemet innehåller salt. När vattnet i kapillärporen fryser ökar salthalten i vattnet som inte har fryst i kapillärporen. Mer isbildning leder således till ökad jonkoncentration i kapillärporen vilket i sin tur resulterar i en koncentrationsskillnad mellan vattnet i kapillärporen och luftporen. För att skapa jämvikt i porsystemet pressas det ofrysta vattnet från kapillärporen till luftporen och ett osmotiskt tryck byggs upp. Detta tryck blir alltså ett tillskott till det vanliga trycket som inträffar i porsystemet (Fridh, 2005).

Trycket som uppstår kan beskrivas med Van't Hoffs ekvation och beror på koncentrationen av lösningar samt temperaturen. Trycket ökar med en högre koncentration och minskar med lägre temperatur (Babbitt, 1955).

$$P = \frac{R * T}{V} * \log (\lambda)$$

där

- R är allmänna gaskonstanten [J/mol K]
- T är den absoluta temperaturen [K]
- V är molvolym hos rent vatten [m³/mol]
- λ är aktivitet i lösningen [mol/ m³]



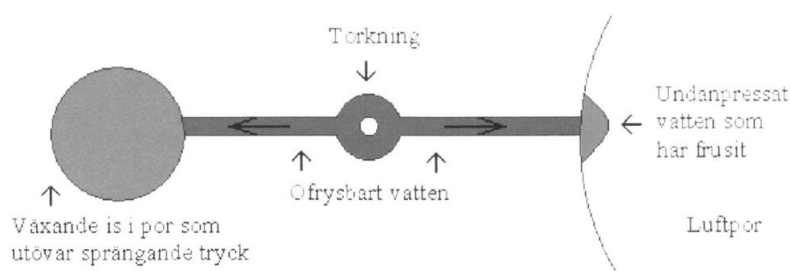
Figur 11. Osmotiskt tryck uppstår när vatten pressas mellan porerna till följd av koncentrationsskillnader i porsystemet (Persson & Rosenqvist, 2009)

2.4.4 Islinsbildning

Eftersom det både finns fruset och ofruset vatten pga. undertryck i porerna kommer det vid minusgrader finnas större porer som är frusna medan mindre vattenfyllda porer fortfarande är ofrusna. Frysning med islinsar kan därför under vissa förhållanden ha större betydelse än hydrauliskt tryck. Skillnader i energiinnehåll hos ofruset vatten och is skapar förutsättningarna för islinstillväxt. Högre temperatur hos vatten än hos isen innebär att det ofrusna vattnet kommer ha högre energiinnehåll vilket resulterar i en vattentransport till islinsen (Fagerlund, 1999b).

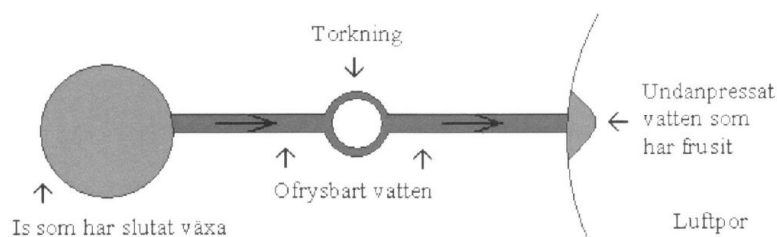
1. Mikroskopiska islinsar

Initialt kommer vattentransporten att ske både till kapillärporen och till luftporen. Isbildningen som kommer ske i kapillärporen kommer att utsätta porväggarna för ett tryck. I luftporen kommer det ofrusna vattnet inte påverka luftporen speciellt mycket eftersom isbildningen kommer att ske utan mottryck. I ett senare skede kommer det ofrusna vattnet endast transporteras mot luftporen eftersom kapillärporen är fylld samtidigt som en uttorkning blir aktuell. Detta fenomen kallas mikroskopisk islinsbildning och blir aktuellt i kapillärporen. Denna mekanism är även beroende av avståndet mellan kapillärporen och luftporen. Isbildningen som sker i helt fyllda porer kommer så småningom smälta pga. uttorkningen som sker och resulterar i att trycket i poren minskas (Fagerlund, 1999a).



Figur 12. Vattentransport i båda riktningarna (Persson & Rosenqvist, 2009)

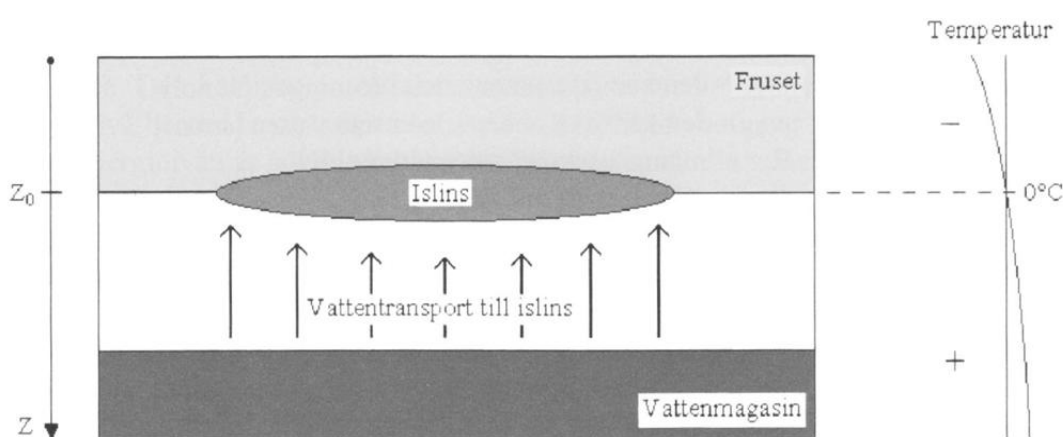
Minskat avstånd innebär minskade tryckpåkänningar samt att tiden tills processen vänder blir kortare. Om trycket i kapillärporen överstiger draghållfastheten innan vattnet byter riktning skadas betongen. Detta betyder att det finns en kritisk avståndsfaktor mellan luftporer. Undersökningar har visat att om avståndsfaktorn är liten i en betong så har man observerat en krympning hos betongen. Orsaken till detta är att uttorkningen är mer aktuell eftersom isbildningen i luftporen får ske relativt enkelt. Om avståndsfaktorn är stor observerades däremot en volymökning hos betongen till följd av att islinsbildningen skett i kapillärporerna (Fridh, 2005).



Figur 13. Vattentransport i en riktning (Persson & Rosenqvist, 2009)

2. Makroskopiska islinser

Denna mekanism, kan jämföras med islinnsbildningarna som inträffar vid tjälbildning i mark. För att makroskopiska islinser ska kunna bildas i betong krävs det att vattnets fryspunkt inträffar vid djupet Z_0 samt att marken har tillräcklig kapillärstighöjd. Temperaturen vid djupet Z_0 måste också vara relativt konstant för att en islinns ska kunna bildas. En annan förutsättning för att islinnsbildning ska kunna ske är att islinsen hela tiden ska förses med vatten. Detta betyder alltså att betongen måste ha tillräckligt hög permeabilitet för att kunna tillgodose detta (Fagerlund, 1999a). Den största drivkraften är dock densamma som vid bildningen mikroskopiska islinser nämligen att det råder skillnader i energiinnehåll hos ofruset vatten och is (Fridh, 2005)



Figur 14. Mekanismen bakom makroskopisk islinnsbildning (Persson & Rosenqvist, 2009)

2.5 Luftporbildare

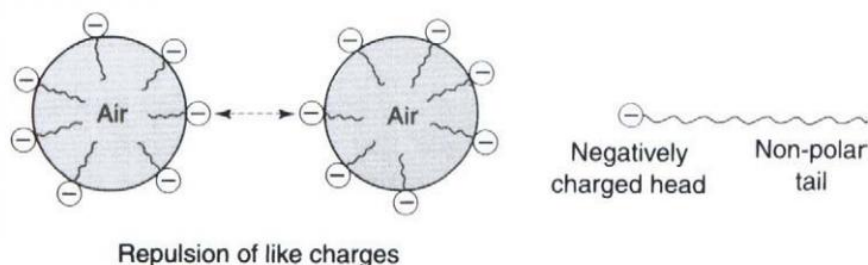
För att göra betong frostbeständig tillsätts luftporbildande medel för att skapa en kontrollerad mängd små mikrobubblor. Dessa ska ta hand om den volymökning som sker när porvattnet i betongen fryser till is. En betong utan luftporbildande tillsatsmedel får genom blandningen ca 2 volymprocent luft, denna brukar benämnas ”grundluft”. Denna ger inte tillräckligt stort utrymme för isens expansion utan ytterligare (ca 3 volymprocent) luftporer behövs, (Rixom, 1999).

2.5.1 Uppbyggnad och funktion

Den grundläggande beståndsdel i luftporbildare är tensider, som är en kolkedja som ingår i en hydrofil polär grupp (Hewlett, 2004). Det finns både organiska och syntetiska tensider och båda kan användas som luftporbildare var för sig eller en blandning mellan dessa (Sika, 2012a). Den vanligaste organiska tensiden är Vinsolharts som framställs bl. a. ur stubbar från furuindustrin. Vinsolharts innehåller natrium salt som är den aktiva substansen i luftporbildaren. På senare tid har även syntetiska tensider utvecklats på grund av högre priser på vinsolharts samt begränsad tillgång (Xinping, 2008). De syntetiska tensiderna är oftast anjoniska och de vanligaste är natrium dodecyl benzen, natrium oleat och natrium oleyl (Hewlett, 2004).

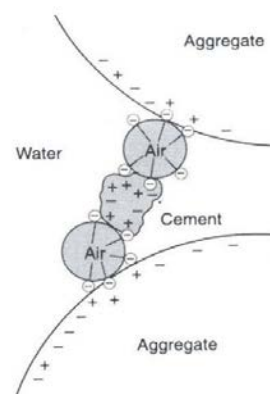
Tensider är en av de vanligaste beståndsdelarna i tvättmedel, tvålar och rengöringsprodukter. Ett annat ord för tensid är surfaktant som kommer från engelskans Surface Active Agent, som namnet säger påverkar tensiden vattnets ytspänning beroende på vilken egenskap man vill att tensiden ska ha (Tensid, 2011).

Surfaktantens kolkedja kan enkelt beskrivas som mask med ett negativt laddad huvud som dras till vatten och en icke laddad svans som gillar luft. När sedan luftporbildaren blandas med cementblandningen attraheras tensiden av syret i vattnet och organiserar sig runt syremolekylen. Eftersom luftporerna är negativt laddade så stöter dessa bort varandra och motverkar att luftbubblorna växer sig för stora. Diametern på luftporerna brukar maximalt bli 250 µm och som minst 10 µm, detta kan dock variera beroende på vilken luftporbildare som används (Rixom, 1999). Se figur 15.



Figur 15. Tensiderna organiserar sig (Hewlett, 2004)

De negativa luftporerna attraheras sedan till de positivt laddade delarna på cementpastan och ballasten, se figur 16. Genom att luftporerna lägger sig på både cementpastan och ballasten skapas små hoppresbara luftfickor vilket gör att friktionen mellan kornen minskas och arbetbarheten ökar (Hewlett, 2004).



Figur 16. Luftporernas mekanism (Hewlett, 2004)

För att klara frostbeständigheten så brukar man normalt tillsätta den mängd luftporbildare som krävs för att ge betongblandningen 3-6 volymprocent luft där optimal porstorlek är mellan 0,02 mm och 1,0 mm och avståndet mellan luftporerna är < 250 µm (Hewlett, 2004).

De luftporbildare som används idag levereras i koncentrerad samt utspädd form och doseringarna som tillverkarna rekommenderar är inte tillräckligt exakta. Därför är det nödvändigt att provblanda betongen i mindre skala innan för att få rätt lufthalt. Det har påvisats att luftinblandningen sänker betongens tryckhållfasthet med ungefär 3-5 % för varje volymprocent tillsatt luft, dock finns det inget som tyder på att draghållfastheten sänks (Fagerlund, 1999b).

Det finns även andra faktorer som påverkar betongens lufthalt. Se tabell 1. Det är därför svårt att rent teoretiskt räkna fram ett recept med ett exakt luftinnehåll utan man måste förprova med de material som ska ingå. Om man t.ex. vet att transporten är lång och betongen ska pumpas är det nödvändigt att tillsätta extra luft på fabriken för att kompensera för förlusterna som transporten och pumpningen medför.

Tabell 1. Faktorer som påverkar lufthalten (Thomas, Wilson 2002)

Material/påverkan	Förändring	Effekt
Cement	Ökad cementmängd	↓
	Ökad koncentration	↓
	Ökat alkaliinnehåll	↑
Tillsatsmaterial	Flygaska	↓↓↓
	Silikastoft	↓↓↓
	Masugnsslagg	↓
Ballast	Ökad stenmängd	↓
	Ökad sandmängd	↑
Kemiska tillsatsmedel	Vattenreducerande	↑
	Retarderande	↑
	Acceleratorer	↔
vct	Ökat vct	↑
Sättnmätt	Ökat sättnmätt upp till 150mm	↑
	Sättnmätt >150mm	↓
	Lågt sättnmätt <75mm	↓
Produktion	Blandning	↑↓
	Öka storleken på blandaren	↑
	Blandningshastigheten	↑
	Blandningstid	↑
Transport och leverans	Transport	↓
	Lång transportsträcka	↓
	Efterdosering av flyttillsats	↑
Gjutning och finish	Transportband	↓
	Pumpning	↓↓↓
	Överdriven finish	↓
	Lång invändig vibrering	↓

Förklaringar:

↓ Minskning av luftinnehåll
 ↑ Ökning av luftinnehåll
 ↔ Oförändrat luftinnehåll

2.6 SikaAer Solid

2.6.1 Allmänt

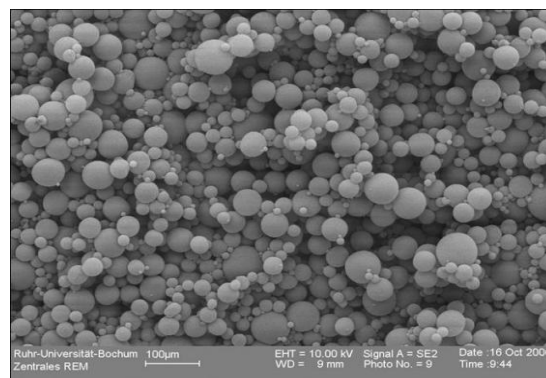
SikaAer solid består av små mikrokulor (10-100 µm) av plast och utseendet på dessa är vitt pulver. Dessa skall enligt tillverkarens uppgift fungera som vanliga luftporer genom att plastkulorna trycks ihop om is bildas nära kulorna. Eftersom SikaAer Solid är en fast luftvolym så påverkas den av varken transport eller pumpning. Alltså är den lufthalt som finns i betongfabriken den samma som sedan hamnar i formarna ute på byggarbetsplatsen.

Fördelarna med SikaAer Solid enligt produktblad:

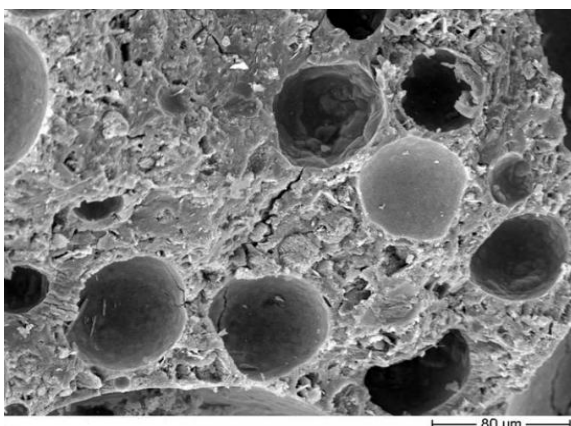
- Mer specifikt luftporsystem (storlek, diameter etc.)
- Mindre effekt på hållfastheten jämfört med traditionell luftporbildare
- Mer robust slutprodukt
- Ingen inkompatibilitet med avseende på andra tillsatsmedel
- Finare porstruktur
 - Avståndsfaktor: < 0,2 mm
 - Mikroporinnehåll: ca 1 Vol.-%
 - Total lufthalt: ca 2-3 Vol.-%



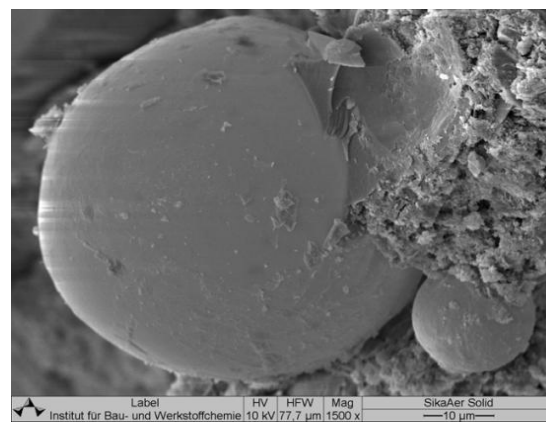
Figur 17. SikaAer Solid, små plastkulor i storleken 10-100 µm.



Figur 18. SikaAer Solid.



Figur 19. Avståndet mellan kulorna får inte vara för stort. Ett för långt avstånd innebär högre tryckpåkänningar i betongen och risk för brott blir aktuellt.



Figur 20. Runt dessa är det tänkt att vattnet ska kunna expandera när frysning sker.

2.6.2 Tillverkning & teknisk data

Tillverkning: Sika vill inte ge ut information om hur tillverkningen sker.

Teknisk data:

- Densitet: 200 kg/m³
- Kemisk bas: Akrylnitril-polymer
- Tillsättning: Tillsammans med övrigt ballastmaterial
- Maximal dosering
 - Konventionell betong: 3,5 kg/m³
 - Sprutbetong: 7,0 kg/m³

Med hänvisning till produktdatabladet (SikaAer Solid, Bilaga V) för fullständig information.

2.6.3 Användningsområden

SikaAer Solid används förslagsvis i broar och marina konstruktioner där krav på hög hållfasthet samt god frostbeständighet ställs. Produkten är också väldigt bra att använda i en självkompakterande betong eftersom kulorna behåller sin funktion under t.ex. transport, pumpning etc. Vid användning av den traditionella luftporbildaren kan lufthalten i många fall påverkas negativt under både transport och pumpning.

2.6.4 Referensobjekt

SikaAer Solid har tidigare använts i Tyskland med goda resultat. Några exempel på referensobjekt är köpcentret "Blautalcenter" i Ulm, gångbron vid Sassnitz samt ett antal broar i Tyskland. Med goda resultat innebär att betongen klarat Tysklands motsvarighet när det gäller saltfrostprovning men även andra tester. Metoden kallas CDF-test men vi har valt inte gå in på metodiken bakom detta test utan nöjer oss med de tester vi funnit och de resultaten som man kom fram till. Våra resultat från saltfrostprovningen går heller inte att jämföra med resultaten från ett CDF-test eftersom metoderna skiljer sig och har således andra krav och kriterier (Sika, 2012b).



Figur 21. Blautalcenter, Ulm (Sika, 2012b)



Figur 22. Referensobjekt (Sika, 2012b)



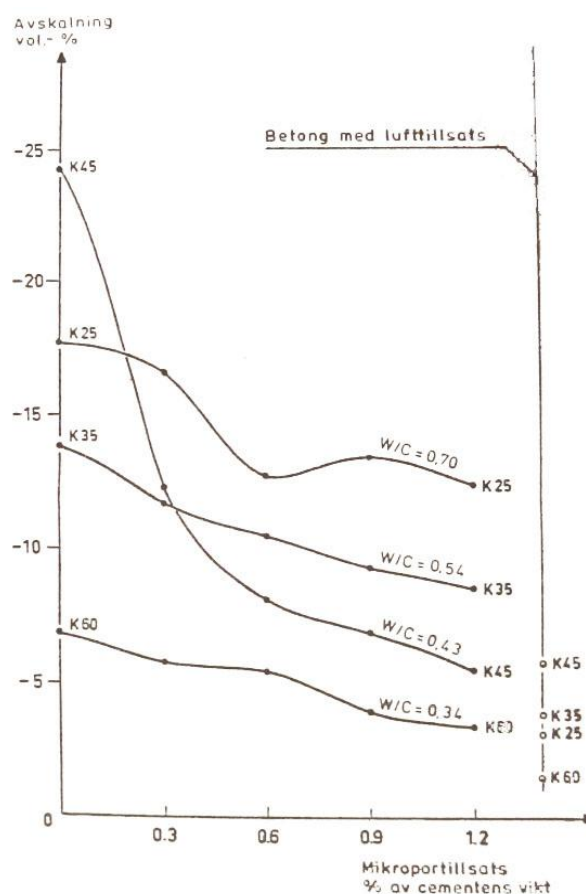
Figur 23. Gångbro, Sassnitz (Sika, 2012b)

2.7 Tidigare erfarenheter av liknande produkter

2.7.1 Kleenopor SA-8

Små ihåliga plastkuler som påminner om SikaAer Solid har tidigare använts i byggbranschen och produkten kallades för Kleenopor SA-8. Kulornas medelstorlek var ca 40 μm och dess skrymdensitet var 30 kg/m^3 . Produkten har sitt ursprung i Holland. Intresset för Kleenopor SA-8 växte fram eftersom tillsats av medlet inte ansågs påverka betongens tryckhållfasthet samtidigt som arbetbarheten inte påverkades. I Finland, vid statens tekniska forskningscentral, genomfördes därför ett antal undersökningar och laborationer om hur kulorna betedde sig i betong. En annan positiv egenskap som också ökade intresset för kulorna var att säkerheten vid dosering var mycket högre än vid konventionell luftinblandning. En sänkning av betongens tryckhållfasthet samt pumpningsvårigheter är något man får räkna med vid konventionell luftporbildare (Vesikari, 1982).

Man kom fram till att Kleenopor effektivt förbättrar frostbeständigheten hos betong (se figur 23). Mätningarna visade däremot att inblandning av Kleenopor inte resulterade i en bättre frostbeständighet kontra en konventionell luftinblandning hos betong. Sambandet kring detta ansågs vara att storleken på kulorna var allt för liten och man föreslog att kulornas medelstorlek borde ligga kring 100 μm . Beständigheten hos betongen blev däremot sämre eftersom en stor andel av kulorna förstördes i samband med blandningen. Man ansåg senare att fokus skulle ligga på att utveckla en skonsammare blandningsmetod vilket skulle innebära att fler kuler bevaras och skulle fylla sin funktion (Vesikari, 1982).



Figur 23. Avskalning/Andel Kleenopor (Vesikari, 1982)

2.7.2 Microcelkulator

Microcelkulator är en typ av luftporbildare som består av små luftfyllda glassfärer, s.k. cenosfärer. Kulorna kommer från flygaska som normalt innehåller luftfyllda glassfärer. Medelvärdet av storleken på kulorna är ca 70 μm , dvs. större än Kleenopor SA-8. Detta borde innebära att microcelkulator är bättre än Kleenopor eftersom kulorna innehåller mer luft men så är inte fallet. Tanken bakom microcelkulator var att dessa skulle vara av lös konsistens, okänsliga för vibrering samt okänsliga för vattenreducerande medel. Kravet för att microcelkulorna ska kunna fungera som luftporbildare är att glasväggarna är tillräckligt tunna för att på så vis brytas ner i betongen. En utebliven nedbrytning innebär nämligen att luftporer inte blir tillgänglig för vattnets expansion (Fagerlund, 1987).

Man har vid Lund Tekniska Högskola studerat microcels inverkan i ett par olika betongblandningar. Resultaten av undersökningarna visar att microcelkulator inte ger en ökad frostbeständighet hos betongen. Man framhöll dock de potentiella fördelarna med att ha inerta luftporbildare. Orsaken till den icke ökande frostbeständigheten ansågs vara att glasväggarna var för täta vilket förhindrade att kulorna inte kunde fungera som tryckutjämnare när vatten frös. Man kom också fram till det motsatta, dvs. att kulorna krossades under blandningen vilket medförde att kulorna vattenfylldes, därmed fanns det ingen expansionsmöjlighet för vattnet när det frös (Bengtsson, 1987).

2.8 Aktörernas roll i betongproduktionen

2.8.1 Konstruktör

När en konstruktör dimensionerar en betongkonstruktion måste hänsyn tas till hållfasthet samt vilken miljö som betongen kommer utsättas för. Enligt SS EN 206-1 som är den gällande europastandarden för betongkonstruktioner så finns det en mängd olika exponeringsklasser där olika nedbrytningsmekanismer (armeringskorrosion, frostangrepp och kemiska angrepp) beskrivs. Utifrån dessa väljs sedan en exponeringsklass. I denna rapport har vi valt att begränsa oss till frostbeständighet vilket leder till exponeringsklasserna XF1-XF4 (se tabell 2) studeras mer noggrant och hur betongtillverkarna använder dessa klasser för framtagning av betongrecept som uppfyller kraven.

Tabell 2. Angrepp av frysning/upptining med eller utan klorider

Exp-klass	Max vbt	Beskrivning enligt SS EN 206-1	Exempel på konstruktioner (Betongindustri, 2012)
XF1	0.6	Måttligt vattenutsatt utan tössalter	Vertikala ytor utsatta för regn eller frysning. Utomhus med större lutning än 30°. T.ex. Fasader, inomhus i oisolerade byggnader och ventilerade sidoutrymmen i vägtunnlar
XF2	0.45	Måttligt vattenutsatt <u>med</u> tössalter	Vertikala ytor utsatta för frysning. T.ex. delar av broar under mark och övriga trafikutrymmen i vägtunnlar
XF3	0.55	Mycket vattenutsatt utan tössalter	Horisontella ytor utsatta för regn och frysning. Utomhus med mindre lutning än 30°. Konstruktioner i sötvatten med/utan ensidigt vattentryck eller utsatta för stänk/skvalp. T.ex. Utomhusbassänger, balkonger utan risk för saltning och dammkonstruktioner
XF4	0.45	Mycket vattenutsatt <u>med</u> tössalter	Ytor direkt utsatta för stänk av avsningsmedel eller skvalpzon i saltvatten med frysning. T.ex. Parkeringsdäck och bjälklag i P-hus utomhus, garageuppfarter trappor/ramper utomhus, överyta på brobana

2.8.2 Betongtillverkaren

Vid betongbeställning anges sällan v_{ct} utan snarare $v_{ct_{ekv}}$ som motsvarar litteraturens vattenbindemedelstal, vbt (Weywadt, 20012).

Konstruktören har nu föreskrivit en exponeringsklass och hållfasthet på den valda betongkonstruktionen. Betongtillverkaren går då in i en "lathund" för att se vilket vbt ($v_{ct_{ekv}}$) som krävs för att uppfylla kraven.

T.ex. En bro skall byggas, konstruktören föreskriver XF4 samt hållfasthetsklass C35/45. Man vet även att bron kommer bli utsatt för klorider dvs. vägsalt. Det ger en kombination av XF4 och XD3 eftersom bron kommer vara cyklisk våt eller torr. Detta medför att betongen får ett slutgiltigt $v_{ct_{ekv}}=0,40$ eftersom XD3 kräver det.

Vidare måste betongen ha frystestats samt ha frostresistent ballast enligt kraven för XF4. Se figur 24 (Obs: De exponeringsklasser som inte ingår i exemplet är borttagna). Utifrån vilken konsistens betongen ska ha väljer betongtillverkaren ut en provtestad standardbetong som uppfyller konstruktörens krav (Weywadt, 2012).

Kravelement	Ingen risk för korrosion eller angrepp	Exponeringsklasser										
		Korrosion föranledd av klorider						Angrepp av frysning/upptining				
		Från havsvatten			Andra än från havsvatten							
		X0	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4
Närmast motsvarande tidigare miljöklass enligt BBK94 ⁽¹⁾	A1/B1	A3	A3	A4	A3	A3	A4	B2	B3	B3	B4	
Beskrivning	Oarmerat utan frost eller mycket torrt	Utsatt för luftburet salt	Ständigt under vatten	Tidvatten, skvalp- eller stänkzon	Måttlig fuktighet	Våt, sällan torr	Cyklisk våt eller torr	Måttlig vatten-mättnad utan avisnings-medel	Måttlig vatten-mättnad med avisnings-medel	Hög vatten-mättnad utan avisnings-medel	Hög vatten-mättnad med avisnings-medel	
Högsta $v_{ct_{ekv}}$	---	0,45	0,45	0,40	0,45	0,45	0,40	0,60	0,45	0,55	0,45	
Lägsta cementhalt C_{ekv} kg/m ³	---	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Användbara beprövade cement enligt SS EN 197-1 ⁽²⁾	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement.	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement	SH-, Anl-, Vit- och Bygg-cement
Anl-cement gäller alltid vid anläggningskonstruktioner enligt Bro2004												
Hållfasthetsklass		≥ 32,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5	≥ 42,5
Högsta vikts-% tillsatsmaterial av cement-vikten av Vit-, Anl- och SH-cement	Silika	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	6
	Flygaska	50	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	Slagg	230	25	25	25	25	25	25	25	25	25	0
Frostresistent ballast		---	---	---	---	---	---	ja	ja	ja	ja	ja
Provning av betongs frostresistens		---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	ja
Lägsta lufthalt eller provning av frostresistens		---	---	---	---	---	---	---	ja, se tabell 5.3.2b i SS137003	ja, se tabell 5.3.2b i SS137003	---	---

Figur 24. Lathund för framtagning av betongrecept (Weywadt, 2012).

2.8.3 Beställare – Exempel på krav

Öresundsbron



Figur 25. Öresundsbron. Foto: Pierre Mens / Øresundsbron

Vid tillverkningen av Öresundsbron ställdes höga krav på betongens frostbeständighet i alla led under betongens utveckling. Grundkravet var en frostbeständig betong med luftporbildande tillsatsmedel. Redan i förprovningsstadiet skulle entreprenören säkerhetsställa ett minimivärde på lufthalten. Minst tre olika

betongblandningar med olika kombinationer av luftporbildare och flyttillsatsmedel skulle testas (Fagerlund, 2008). Dessutom skulle stabiliteten av luftporsystemet testas med avseende på olika blandningstider, transporttider, vibreringstider etc. Entreprenören skulle även kunna säkerhetsställa ett samband av lufthalten direkt efter blandning samt efter transport. Betongen fick max innehålla 10 % luft direkt efter blandning. Enligt Fagerlund (2008) skulle minst 30 samhörande mätningar av lufthalten före och efter pumpning stämma överens. En dokumentation var 14:e dag var också tvunget för att visa att förhållandet mellan lufthalten före och efter pumpning fortfarande gällde.

Kontrollerna fortsatte även under betongens härdande, där minsta lufthalt i betongen ska vara 3 % samt att avskalningen i saltfrostprovningen maximalt får vara 0,5 kg/m² efter 56 cykler. För varje gjutning ska en kärna borrar ut inom 12 dagar där lufthalten kontrolleras. Om den inte uppfyller kraven borrar ytterligare två kärnor ut och om medelvärdet på dessa överensstämmer med kravet får gjutningen godkänd. Är medelvärdet under 3 % ska ytterligare en ny kärna borrar ut och saltfrostprovas, om provet inte klarar saltfrostprovningen blir gjutningen underkänd. Utöver detta utfördes även kompletterande provningar för varje 5000 m³ gjuten betong där fyra kärnor borrades ut inom 10 dygn efter gjutning för saltfrostprovning. Om avskalningen var högre än kravet skulle en ny förprovning genomföras. Enligt Fagerlund (2008) så fungerade regelsystemet mycket bra och frostbeständigheten på den färdiga konstruktionen är synnerligen god. Detta påvisades i samband med 5-årsbesiktningen. Han menar även att regelsystemet bör vara en vägledning för liknande stora projekt där höga krav ställs på frostbeständighet. När Citytunneln i Malmö skulle byggas användes samma principer för utformning av regelverket (Fagerlund, 2008).

2.9 Anläggningsbetong

2.9.1 Allmänt

Anläggningscement karaktäriseras av att den ger låg värmeutveckling samt relativt långsam hållfasthetstillväxt. Dessa egenskaper har gjort den till en populär cementsort att använda vid medelgrova till grova konstruktioner där temperatursprickbildning kan vara ett problem (Cementa, 2012). Trafikverket har som krav att CEM I Anläggningscement ska användas i alla deras anläggningsprojekt (Weywadt, 2012). Anläggningscement har även lågt alkaliinnehåll samt är sulfatresistent vilket lämpar sig för utomhuskonstruktioner.

2.10 Undervattensbetong

2.10.1 Allmänt

Gjutning av betong under vatten, s.k. undervattensgjutning har länge använts inom byggbranschen. Faktorer som påverkar gjutresultatet är gjutmetod, betongens sammansättning och arbetbarhet. På senare tid har dock utveckling skett på materialsidan. Tillsatsmedel som minskar risken för utvaskning har utvecklats och dessa kallas antiutvaskningsmedel (AUV) samt gör betongen mer trögflytande.

Antiutvaskningsmedlet har haft stora positiva effekter inom byggbranschen eftersom risken för misslyckade gjutningar har minskat. Upprepade gjutningar med dåligt resultat leder ofta till att den gjutna konstruktionen måste bilas eller sprängas bort.

Vid tillsats av AUV erhålls en kohesiv betong (vilket förhindrar utvaskning) samtidigt som flytegenskaperna blir bättre. Betongen blir dessutom stabil, självkompakterande och separerar inte i vatten. Arbetbarheten förbättras också tack vare att utvaskning av cement minskas vilket leder till bättre sikt i vattnet vid gjutning (Sandström, 2006).

Enligt Johansson och Fridh (2012) har betongbranschen svårigheter med att få in luft i undervattensbetong vilket gör att den sällan klarar kraven för frostbeständighet. Vid t.ex. gjutning av ett brofundament används undervattensbetong upp till skvalpzonen för att sedan övergå till anläggningsbetong som är frostbeständig. Ur gjutningssynpunkt vore det en klar fördel att kunna gjuta hela konstruktionen med samma betong, därför undersöks om undervattensbetong med inblandning av SikaAer Solid kan ge en frostbeständig betong.

2.10.2 Användningsområde & frostbeständighet

Exempel på användningsområden för undervattensbetong är nya konstruktioner, reparationer och undergjutningar i vatten. Gjutmetoderna är goda och man kan använda de klassiska metoderna såsom pumpning, rörgjutning, ränna osv. Vid val av undervattensbetong måste man ta hänsyn till produktions- och utförandeförhållanden men även aktuella material i betongen (Rescon, 2012).

Betonggjutningar med tillsats av antiutvaskningsmedel får användas upp till frostfri nivå. Frostangrepp till följd av dålig frostbeständighet kan dock inträffa på frostfria nivåer och detta beror på att kyla kan ledas ner i konstruktionen. Frostbeständigheten hos betong har dock visat sig sämre vid tillsats av antiutvaskningsmedel i kombination med vanlig luftporbildare. Anledningen till detta anses vara att avstånden mellan luftporerna blir stora samtidigt som luftporerna i sig blir stora. Det kräver därmed en högre dos luftporbildare för att göra betongen mer frostbeständig. Osäkerheten ur beständighetssynpunkt blir således tveksam. Vidare har undersökningar visat att inblandning av luftfyllda platskolor medfört en frostbeständig undervattensbetong (SBUF, 2010).

2.11 Självkompakterande betong

Självkompakterande betong är en betong som ej behöver vibreras för att ta bort instängd luft. Den utvecklades i Japan under tidigt 90-tal, detta pga. att konstruktionerna med mycket armering krävde allt för stor vibreringsinsats och tog för lång tid. Dessutom kräver vibrering, extra manskap, extra utrustning samt är ohälsosamt för betongarbetarna (Roger, 2003).

Betongen karakteriseras av att den är lättflytande, fyller ut alla ytor i formen samt att den kompakterar sig själv av sin egen vikt. För att uppnå dessa egenskaper används mer finkorniga material som ballast. Steninblandningen sänks kraftigt och denna ersätts med mer sand samt filler, oftast kalkstenmjöl (Roger, 2003). Trots att betongen är så lös och lättflytlig så separerar den inte pga. inblandningen av filler (Burström, 2003).

3 Laboratorieundersökningar

3.1 Delmaterial

Cementsorten som används i detta projekt heter Anläggningscement och är ett CEM I 42.5 N MH SR LA Portlandcement som tillverkas i Degerhamn. Den grova ballasten (sten och grus) består av krossad gnejs och diabas från Dalby stenbrott. Sanden kommer från Hvidovre i Danmark (Weywadt, 2012).

3.2 Utförande

Vid betongtillverkningen användes en 30-liters frifallsblandare. De torra delmaterialen blandades först 30 sekunder. Därefter tillsattes vattnet tillsammans med flyttillsatsmedel (och luftporbildare för referensbetongen). Totala blandningstiden var 240 sekunder. Vid undervattensbetongtillverkningen tillsattes UV-medlet efter 180 sekunder och fick sedan blandas tillsammans med övriga material i 120 sekunder. Detta resulterade i en total blandningstid på 300 sekunder.

Tre olika betongtyper har tillverkats och doseringen av flyttillsatsmedel samt luftporbildare har justerats för att erhålla kraven som ställs på konsistens samt lufthalt (detta gäller referensblandningen för varje betongtyp). Vi har sedan tillverkat tre ytterligare varianter av respektive betongtyp med inblandning av SikaAer Solid och receptet för dessa blandningar är utifrån resultatet i referensblandningen. Kraven som ställdes på konsistens och lufthalt var enligt följande:

Tabell 3. Krav på färsk betong

Betongtyp	Sättmått	Flytsättmått	Lufthalt
Anläggningsbetong*	170 ± 20 mm		5,0 ± 0,5 %
Självkompakterande betong*		700 ± 30 mm	5,0 ± 0,5 %
Undervattensbetong*	220 ± 20 mm		5,0 ± 0,5 %

*I fortsättningen kommer vi benämna dessa tre betongtyper Anl, SKB och UV.

För varje blandning utfördes även ett antal provningar. Provningarna var enligt följande:

- Betongtemperatur 5 min efter blandning
- Sättmått/Flytsättmått 5, 30, 60 min
- Lufthalt 5 min
- Tryckhållfasthet 28 dygn (3 kuber)
- Frysprovning 7, 14, 28, 42, 56 cykler (2 kuber)
- Kloridmigration 56 dagar (3 cylindrar)
- Luftporstruktur 56 dagar (planslips- och tunnslipsanalys utfördes på DTI i Köpenhamn)

3.3 Recept

Tabell 4. Anläggningsbetong, vct 0,40

	Referens [kg/m ³]	1,0 kg SikaAer Solid [kg/m ³]	1,5 kg SikaAer Solid [kg/m ³]	2,0 kg SikaAer Solid [kg/m ³]
Degerhamn Anl	385,0	385,0	385,0	385,0
Vatten	159,0	159,0	159,0	159,0
Sand 0-4 mm	907,6	928,0	924,6	921,2
Sten 4-8 mm	213,7	218,5	217,7	216,9
Sten 8-16 mm	642,7	657,2	654,8	652,4
Sikament Evo 26	1,35	1,35	1,35	1,35
SikaAer S 10%	0,65	-	-	-
SikaAer Solid	-	1,0	1,5	2,0

Tabell 5. Självkompakterande betong, vct 0,40

	Referens [kg/m ³]	1,0 kg SikaAer Solid [kg/m ³]	1,5 kg SikaAer Solid [kg/m ³]	2,0 kg SikaAer Solid [kg/m ³]
Degerhamn Anl	435,0	435,0	435,0	435,0
Vatten	178,0	178,	178,0	178,0
Kalkfiller	90,0	90,0	90,0	90,0
Sand 0-4 mm	910,3	933,1	929,3	925,5
Sten 4-8 mm	204,6	209,7	208,9	208
Sten 8-16 mm	469,4	481,2	479,2	477,3
Sikament Evo 26	2,87	2,87	2,87	2,87
SikaAer S 10%	1,09	-	-	-
SikaAer Solid	-	1,0	1,5	2,0

Tabell 6. Undervattensbetong, vct 0,40

	Referens [kg/m ³]	1,0 kg SikaAer Solid [kg/m ³]	2,0 kg SikaAer Solid [kg/m ³]	3,0 kg SikaAer Solid [kg/m ³]
Degerhamn Anl	385,0	385,0	385,0	385,0
Vatten	159,2	159,2	159,2	159,2
Sand 0-4 mm	892,7	913,2	906,4	899,5
Sten 4-8 mm	210,2	215,0	213,4	211,8
Sten 8-16 mm	632,2	646,7	641,9	637,0
UV-medel	5,0	5,0	5,0	5,0
Sikament Evo 26	7,7	7,72	7,74	7,76
SikaAer S 10%	6,55	-	-	-
SikaAer Solid	-	1,0	2,0	3,0

3.4 Undersökningar

3.4.1 Lufthalt



Figur 26. Tryckmätningmetoden, Anl. ref = 5 %

Lufthalten på de färska referensbetongerna bestämdes enligt SS-EN 12350-7 med tryckmätningmetoden. Metoden går ut på att en 8 liters behållare fylls i tre omgångar och vibreras efter varje omgång. Efter detta moment appliceras en konisk överdel som kläms fast mot behållaren så att den blir tät. Konens överdel fylls sedan med vatten. Genom att pumpa upp ett tryck i den slutna enheten så komprimeras betongen ihop och det bildas en luftficka högst upp i konen, denna luftficka motsvarar den luft som fanns i betongen. Sedan släpper man på trycket och en manometer visar aktuell lufthalt.

På betongblandningarna som innehåller SikaAer Solid fungerar inte denna metod eftersom det är kulorna som innehåller luft (förutom de ca 2 % luft som blir vid blandningen). Detta medför att det aldrig blir någon luftficka högst upp i konen och manometern kan inte visa korrekt mängd luft.



Figur 23. Roll-A-Meter. Total lufthalt 3,5 %

Det finns dock ett annat instrument att mäta lufthalten i betong, Roll-A-Meter. Förförandet är relativt lika med tryckmätningmetoden där man fyller en behållare och vibrerar denna. Efter detta fäster man en kon som bildar en tät enhet. Denna enhet fylls sedan upp med vatten tills mätglaset visar 0 %. Efter detta vänds Roll-A-Metern upp och ner och betongen blandas med vatten. Denna procedur upprepas i upp till 5 minuter tills betongen har lösts upp och blivit utblandad med vattnet (Se bilaga ”Roll-A-Meter”). Nu har vattnet tagit luftens plats i behållaren och luften stiger uppåt. Vid inblandning av SikaAer Solid så flyter plastkulorna upp och det bildas ett vitt lager. Roll-A-Metern visar nu både 2 % luft som kommer från blandningen och SikaAer solid. Se figur 27. Betongen som lufttestas i denna figur är SKB med 2,0 kg SikaAer Solid.

3.4.2 Konsistensmått

Betongkonsistensen väljs med hänsyn till gjutbarhet, konstruktionens utformning och vald produktionsmetod. Detta är särskilt viktigt eftersom betongen inte får vara för styv eller för lös. En för styv betong resulterar i ett svårt gjutningsförfarande och en för lös betong kan medföra separationer i betongmassan. För anläggningsbetong och undervattensbetong ställs krav på sättmått och utfördes enligt SS-EN 12350-2. För den självkompakterande betongen används istället flytsättmått. Konsistensen hos betongen har analyserats vid 5, 30 respektive 60 min för att få en uppfattning om betongens hydrationsgrad.

Nedan visas ett par bilder för hur sättmått samt flytsättmått mäts.



Figur 28. UV ref sättmått (60min) 225mm

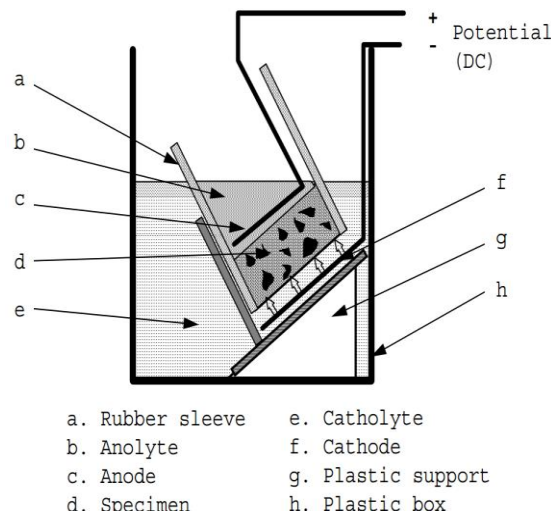


Figur 29. SKB 2,0kg flytsättmått (5min) 760mm

3.4.3 Kloridmigration

För att kontrollera betongens täthet genomfördes ett kloridmigrationstester enligt standard NT BUILD 492. För varje betongrecept tillverkades tre cylindrar med diametern $\varnothing 100$ mm som efter härdning i minst 28 dygn sågades till 50mm tjocka puckar.

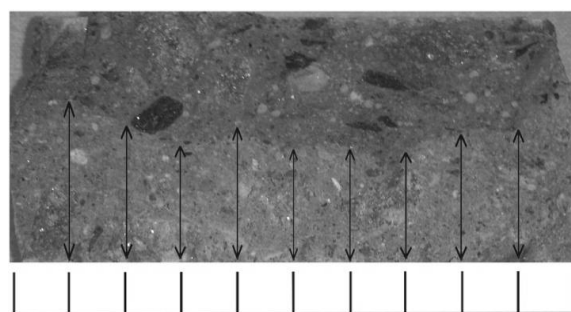
Principen för testet är följande: När puckarna blivit sågade läggs dom i en vakuummättningsutrustning. Efter att puckarna vakuummättats i tre timmar fylls behållaren med kalciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) i ytterligare en timme. Sedan stängs vakuumutrustningen av och puckarna ligger kvar i kalciumlösningen i 16 timmar. Själva testet går ut på att ena sidan av pucken ligger i en saltvattenslösning som fungerar som anod. Den andra sidan, som genom en gummiduk är avskiljd från den anolytiska lösningen ligger i natriumhydroxidlösning som agerar som katod. En extern spänning läggs över provkroppen för att tvinga kloridjonerna att vandra genom provkroppen (se figur 30).



Figur 30. Preparering av provkropp (NT BUILD 492)

När 24 timmar har passerat så klyvs pucken på mitten och silvernitrat sprutas på brottytan. Silvernitratet reagerar i sin tur med de inträngda kloridjonerna och inträngningsdjupet uppenbarar sig som en rosa nyans (se figur 31).

Medelinträngningsdjupet beräknas och utifrån följande formel kan sedan kloridmigrationskoefficienten, D_{nssm} beräknas:



Figur 31. Mätning av inträngningsdjup

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 * (273 + T) * L}{(U - 2) * t} * \left(x_d - 0,0238 * \sqrt{\frac{(273 + T) * L * x_d}{U - 2}} \right)$$

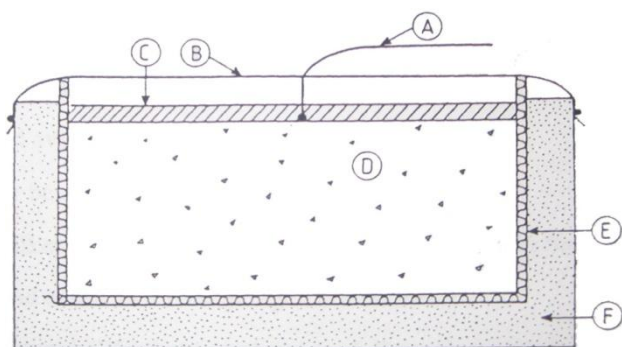
Där

U	Spänning (V)
T	Medelvärde av T_{start} och T_{slut} ($^{\circ}$ C)
L	Tjockleken av provkroppen (mm)
x_d	Medelinträngningsdjup (mm)
t	Testtid (h)

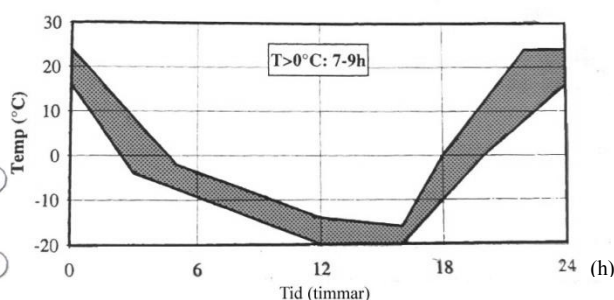
3.4.4 Saltfrostprovning

För att testa frostbeständigheten utförs en saltfrostprovning enligt den nationella standarden SS 13 72 44:2005, även kallad Boråsmetoden. Metoden kan utföras enligt två olika principer, nämligen att frysvätskan består av antingen 3 % NaCl i vanligt kranvatten eller avjoniserat vatten. I detta fall användes 3 % NaCl och 97 % kranvatten som frysmedium.

Standardmätningen sker enligt följande. Ett antal standardiserade kuber (150x150 mm²) tillverkades av den betong som ska användas härddas i 21 dagar, därefter sågades en 50 mm tjock skiva som sedan placerades i ett klimatrums. Där inne preparerades provkropparna för frystestet genom att klä in sidorna och botten med en gummiduk som förhindrar att fukt kan transporteras i dessa riktningar. Efter detta sänktes provet ner i en värmeisolerande form och det avjoniserade vattnet hälldes på. Totalt tillbringade provet 10 dagar i klimatrums för att sedan läggas in i fryskammaren som kommer utföra 56 cykler där provet utsattes för en upprepad frykning och upptining per dag (cykel).



Figur 32. Provkropp (Fagerlund, 1999a)



Figur 33. Fryscykel (Fagerlund, 1999a)

- Där
- A=Termoelement
 - B=Plastfolie
 - C=Frysvätska
 - D=Provkropp
 - E=Gummiduk
 - F= Värmeisolering

Under dessa cykler kommer betongens yta att skadas av avskalningarna som sker till följd av frysnings/upptiningen. Efter 7, 14, 28, 42 och 56 dagar vägs det avskalade materialet. Denna vikt summeras ihop och sätts i relation till den ytan som blivit avskalad. Enligt standarden ges följande gränsvärden enligt tabell 7.

Tabell 7. Gränsvärden för frostbeständighet

Frostbeständighet enligt SS 13 72 44:2005	Krav
Mycket god	Avflagningarnas medelvärde efter 56 cykler (m_{56}) är mindre än $0,10 \text{ kg/m}^2$
God	Avflagningarnas medelvärde efter 56 cykler (m_{56}) är mindre än $0,20 \text{ kg/m}^2$, eller medelvärdet efter 56 cykler är mindre än $0,50 \text{ kg/m}^2$ samtidigt som $m_{56}/m_{28} < 2$
Acceptabel	Avflagningarnas medelvärde efter 56 cykler (m_{56}) är mindre än $1,0 \text{ kg/m}^2$ samtidigt som $m_{56}/m_{28} < 2$
Inte acceptabel	Om inte ovanstående krav uppfylls

3.4.5 Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten på proverna bestämdes enligt SS-EN 12390-2:2009. Standarden beskriver bl.a. hur formning, vibrering och avjämning av betongytan skall ske. Provkropparna gjuts i $150 \times 150 \text{ mm}^2$ kubformar och efter ett dygns härdning förvaras kuberna i ett $20 \text{ }^\circ\text{C}$ vattenbad fram tills provningstillfället. 28 dygn efter gjutningstillfället provtrycks kuberna i en press som registrerar vid vilken kraft kuberna går sönder. Hållfasthetsvärden redovisas i tryck/areaenhet (pascal, Pa) vilket medför att den uppmätta kraften ska delas med sidoarean på kuberna.



Figur 34. Tryckprovning av Anl $1,0 \text{ kg/m}^3$

3.4.6 Planslipsanalys & Tunnslipsanalys

Planslip

Analys av hårdnad betong delas upp i två steg. Första steget är på makroskopisk nivå, benämns planslipsanalys, och ger således makroskopisk information. Om ytterligare information krävs genomförs steg två som innebär analys på mikroskopisk nivå och denna benämns tunnslipsanalys. Innan en planslipsanalys genomförs undersöks betongprovkroppen okulärt. Därefter slipas betongkroppen till ett planslipsprov som får benämningen planslip. Ytan slipas till dess att en plan yta erhålls och detta görs med hjälp av en automatiserad slip och dess slipskivor blir finare ju längre processen går. När ytan bedöms plan svärtas den för att sedan behandlas med bariumsulfat så att en kontrast mellan betong och luftporer uppstår. Nästa moment i en planslips analys är att göra en bildanalys av provet och detta görs med hjälp av dator, scannerutrustning och stereomikroskop. Med en bildanalys får man information om betongens lufthalt, porernas avståndsfaktor samt dess specifika yta. Förstoringsgraden hos ett stereomikroskop är i storleksordningen 50 gånger (Svensson, 2008).

Tunnslip

En tunnslips analys innebär att man sågar ut en liten del av den provkropp man vill analysera ytterligare och denna benämns tunnslip. Storleken på tunnslipen är i storleksordningen 10-20 cm² och fästs efter tillverkning på ett analysglas. Därefter slipas den ned till en mycket tunn skiva. Den utsågade biten är då så pass tunn att man kan analysera den i ett ljusmikroskop, s.k. polarisationsmikroskop, med fluorecensljus. Med hjälp av ljusmikroskopin karakteriseras och kvantifieras sedan betongens mikrostruktur och på så vis får man information om betongens materialsammansättning och dess struktur (Lindqvist, 2007).

Bättre mikroskop möjliggör större förstoring av provet och resulterar således i mer säkerhet kring betongens sammansättning. Vanligtvis använder man sig av glas som ger mellan 25-400 gånger förstoring. Metoden är mycket tillförlitlig och därmed också populär. Eftersom betong är ett poröst material krävs det noggrannhet och ordentligt hanterande vid tillverkning av tunnslip. Genom god kunskap och rätt användande av mikroskop kan man erhålla bra data gällande betongen. Vid tillämpning av tunnslips analys erhålls egenskaper hos betongen såsom blandningsförhållande, luftinnehåll, luftporstruktur, ballastens storleksfördelning, cement som använts, tillsatta tillsatsmedel, hur homogen pastan är, defekter osv. (Svensson, 2008).

4. Resultat

4.1 Lufthalt

Lufthaltsmätningarna har genomförts på både färsk och hård betong. På färsk betong utfördes mätningarna enligt standard för varje betongblandning. Men pga., i början, bristande kunskap med Roll-A-Metern noterades ett par icke trovärdiga resultat. I övrigt ser siffrorna bekanta ut gällande total lufthalt eftersom en inblandning av SikaAer Solid ska resultera i en betong med lägre total lufthalt, se avsnitt 2.6.1. Mängden SikaAer Solid ser ut att stämma ungefär och vi hänvisar till avsnitt 4.7 där vi diskuterar maximal mängd SikaAer Solid. I några fall är dock mängden SikaAer Solid något låg men vid ytterligare kontroller noterades bättre resultat, se avsnitt 4.7. Förklaringen till de höga mängderna SikaAer Solid i den självkompakterande betongen anser vi vara att även kalkstensfyller har flutit upp och på så vis också noterats på mätinstrumentet. Lufthaltsanalysen på hård betong genomfördes på Danish Technological Institute (DTI). Metoderna som användes i detta fall var planslips- respektive tunnslipsanalys. Resultaten från DTI anses vara de mest trovärdiga eftersom analysen är mycket mer ingående än analysen som normalt genomförs på färsk betong. Om vi enbart kollar på siffror från planslipsanalysen noterar vi den totala lufthalten i de flesta fallen är något lägre vid inblandning av SikaAer Solid. Produktbladet för SikaAer Solid säger också så och vi kan utifrån våra egna mätningar samt analysen från DTI konstatera detta. En jämförelse mellan lufthaltsmätningarna enligt tryckmätningmetoden/Roll-A-Metern och planslipsanalysen visar vissa skillnader och vi vill därför trycka på viss osäkerhet i både tryckmetoden och Roll-A-Meter utförandet. En inblandning av SikaAer Solid ska enligt produktbladet resultera i betong med en total lufthalt kring 2-3 %. Vi kan utifrån mätningar och analyser konstatera att detta inte stämmer. Man erhåller en något högre lufthalt i samtliga fall.

Tabell 8. Lufthaltsmätningar

Betongtyp	Anl. ref	Anl. 1.0kg	Anl. 1.5kg	Anl. 2.0kg	SKB ref	SKB 1.0kg	SKB 1.5kg	SKB 2.0kg	UV ref	UV 1.0kg	UV 2.0kg	UV 3.0kg
Lufthalt 1 (%)	5.9	4.3	4.2	4.1	5.2	3.4	5.6	5.1	4.4	2.6	2.8	3.6
Lufthalt 2 (%)	5.0	-	-	-	4.4	-	-	-	5.4	-	-	-
Lufthalt 3 (%)	0*	6.5*	2.5	3.9	4.7	2.5	3.8	3.6	7.5*	3.0	2.8	3.2
Varav SikaAer Solid (%)	-	0.5	0.5	1.0	-	1.0	1.4	1.8	-	0.5	0.5	0.7

Lufthalt 1 = Enligt planslipsanalys utförd av DTI

Lufthalt 2 = Enligt Tryckmätningmetoden

Lufthalt 3 = Enligt Roll-A-Meter

*Ej trovärdigt resultat pga. läckande Roll-A-Meter

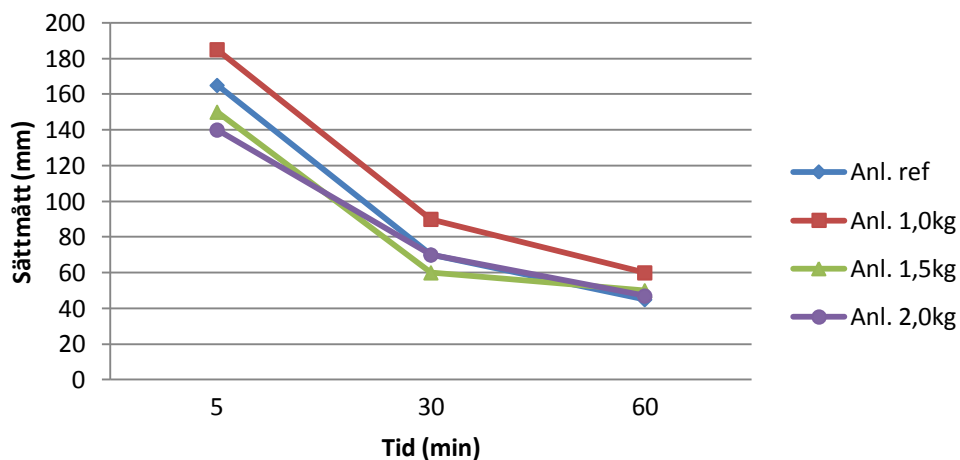
4.2 Konsistensmått

När det gäller referensbetongerna med tensid uppfylldes kraven enligt avsnitt 3.2. Den generella tendensen var att betongtyperna som har sättmåttkrav blir något styvare vid inblandning av SikaAer Solid istället för vid konventionell luftporbildare. När det gäller anläggningsbetongen så har sättmättet halverats efter 30 minuter, se figur 35. Det är därför av stor vikt att betongen används så fort som möjligt för att inte få problem med gjutningen. Anledningen till att undervattensbetongen inte får samma utveckling när det gäller sättmått är pga. den höga doseringen av flyttillsatsmedlet som användes.

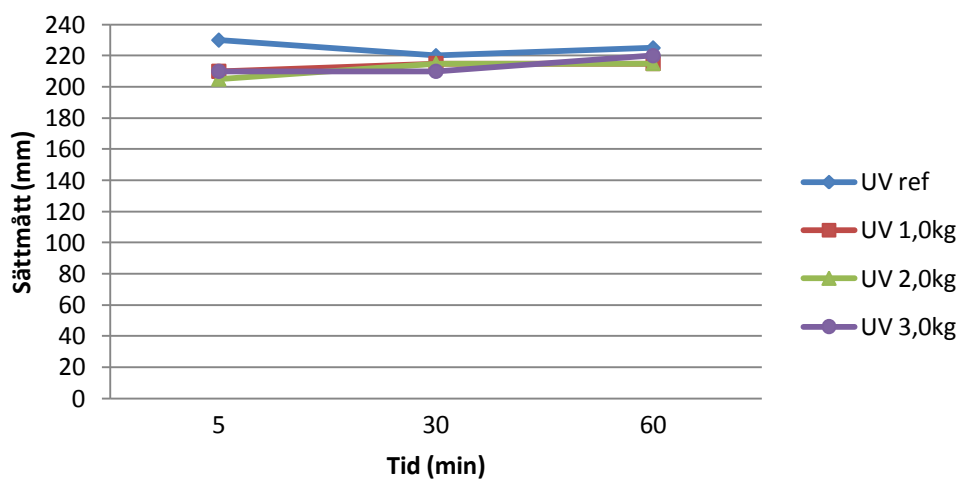
Doseringen är dock ett måste för att betongen ska klara det uppsatta kravet. Den höga mängden flyttillsatsmedel fördröjer hydratationen i betongen vilket innebär att betongen inte blir styvare. Detta innebär en fördel vid gjutningen. Inblandning av SikaAer Solid i undervattensbetong gav ingen märkbar förändring gällande konsistensutvecklingen under provningstiden, se figur 36.

En självkompakterande betong med SikaAer Solid som luftporbildare resulterade i en lösare betong över tiden vilket skapar mer tid till gjutningen. Vid försöken noterades ingen separation.

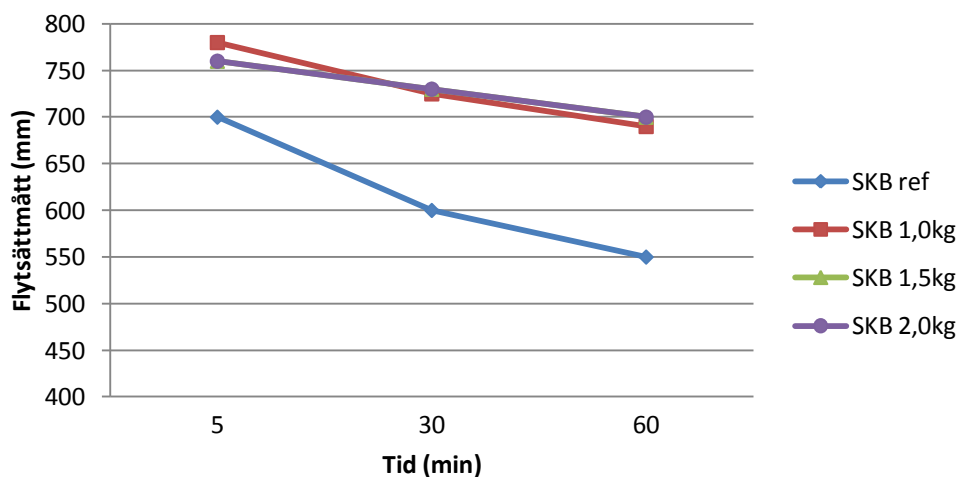
För fullständiga siffror se BILAGA I.



Figur 35. Konsistensutveckling anläggningsbetong



Figur 36. Konsistensutveckling undervattensbetong



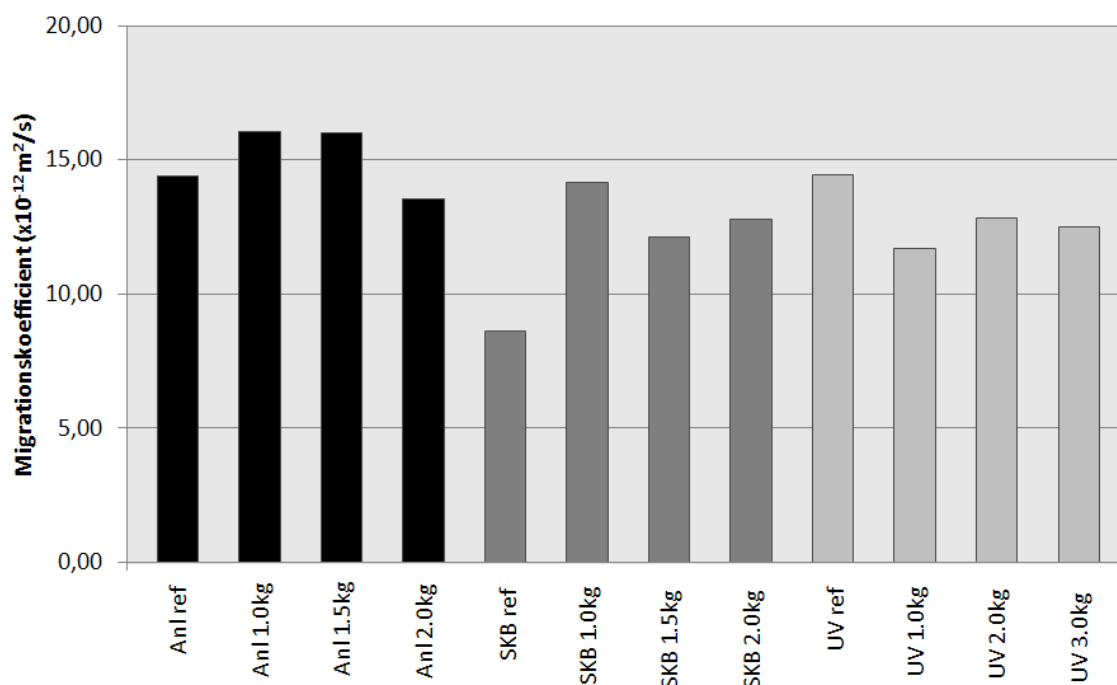
Figur 37. Konsistensutveckling självkompakterande betong

4.3 Kloridmigration

En kloridmigrationskoefficient bestämdes för varje betong för att kunna jämföra tätheten. För varje recept tillverkades tre puckar som kloridtestades. Av resultaten, se figur 38, följer att anläggningsbetongen blir något mindre tät med SikaAer Solid, den självkompakterande betongen blir betydligt otätare med SikaAer Solid. Dock skiljer sig undervattensbetongen mot de andra två genom att tätheten ökar med SikaAer Solid. Rent generellt visar resultaten att oavsett recept så verkar SikaAer Solid ge en kloridmigrationskoefficient på ca $14 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Det finns inga generella gränsvärden för kloridmigrationskoefficientens värde utan antingen använder man en betong med så låg migrationskoefficient som möjligt eller utgår från armeringens tröskelvärde för korrosion (Fridh, 2012).

Fullständiga siffror se bilaga II.

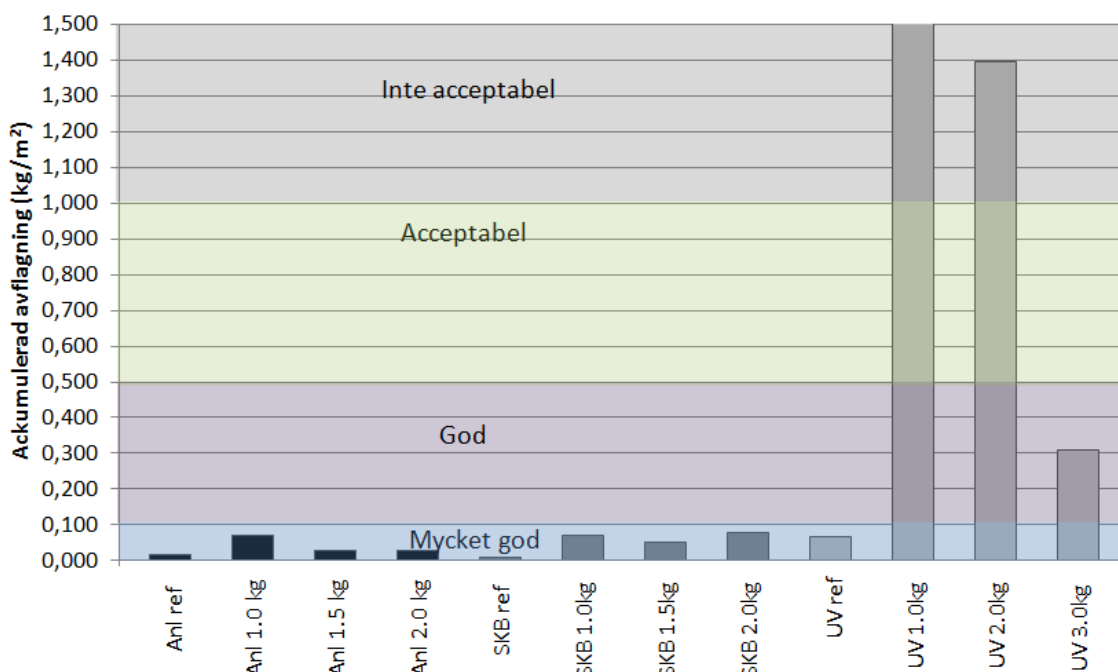


Figur 38. Kloridmigrationskoefficienter för de olika recepten

4.4 Saltfrostprovning

För att kontrollera om SikaAer Solid är en fullgod ersättare till konventionell luftporbildare utfördes saltfrostprovning på betong med och utan SikaAer Solid. Syftet med undersökningen är att se om SikaAer Solid ger en betong som är frostresistent. För varje betongrecept användes två kuber till saltfrostprovningen. Provningsresultatet visade att både anläggningsbetongen samt den självkompakterande betongen klarar kravet ”Mycket god”, se avsnitt 3.4.4 samt figur 39. Figur 39 visar endast avskalningarna, hänsyn till m_{56}/m_{28} redovisas i tabell 9. Undervattensbetongen med 1,0 kg/m³ SikaAer Solid är den betongen som presterade sämst i testet. Detta kan enligt avsnitt 3.4.1 kopplas till att just den betongen hade lägst total lufthalt. Enligt samma avsnitt noterades att lufthalten i undervattensbetongen ökar med ökad mängd SikaAer Solid vilket innebär att betongen presterar bättre i frystestet. Rent generellt verkar ökad mängd SikaAer Solid ge en mer frostbeständig betong.

Fullständiga siffror se bilaga III.



Figur 39. Resultat saltfrostprovning efter 56 cykler för de olika recepten.

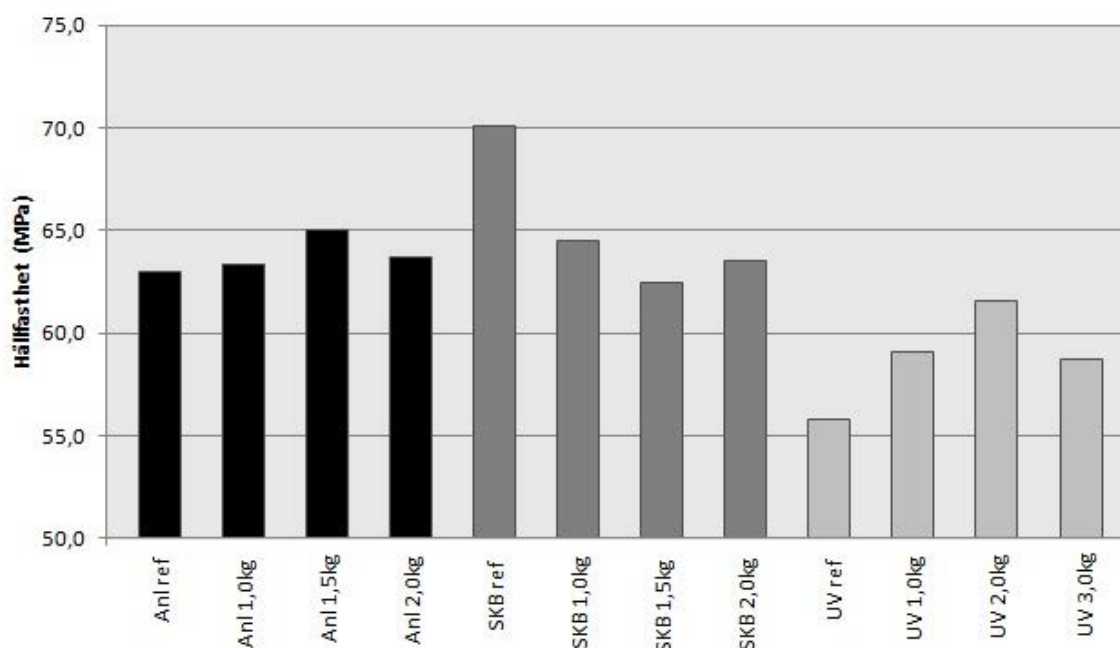
Tabell 9. Ytterligare krav enligt standard, avflagningarnas acceleration

Betong	m_{56}/m_{28}	Bedömning enligt SS 137244
Anl ref	1.44	Mycket god
Anl 1.0kg	1.27	Mycket god
Anl 1.5kg	1.17	Mycket god
Anl 2.0kg	1.21	Mycket god
SKB ref	1.56	Mycket god
SKB 1.0kg	1.14	Mycket god
SKB 1.5kg	1.21	Mycket god
SKB 2.0kg	1.22	Mycket god
UV ref	4.18	Inte acceptabel
UV 1.0kg	3.33	Inte acceptabel
UV 2.0kg	3.42	Inte acceptabel
UV 3.0kg	1.92	God

4.5 Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten hos respektive betong kontrollerades genom att provtrycka 3 st. kuber av varje betong. Enligt SikaAer Solids produktblad ska en inblandning av produkten medföra en robustare slutprodukt samt mindre effekt på hållfastheten jämfört med konventionell luftporbildare. Detta visades hos både anläggningsbetongen samt undervattensbetongen, se figur 40. Den höga siffran på tryckhållfastheten hos referensblandningen av den självkompakterande betongen kan härledas till dess täthet, se avsnitt 4,3. Men av lufthaltsmätningarna att döma borde resultatet gällande tryckhållfastheten vara annorlunda eftersom mindre luft skapar en kompaktare. I bilaga IV redovisas även densiteten och vi noterar att de är snarlika med varandra. Utifrån figur 40 verkar det som att hållfastheten avtar med en högre dosering av SikaAer Solid.

Fullständiga siffror se bilaga IV.



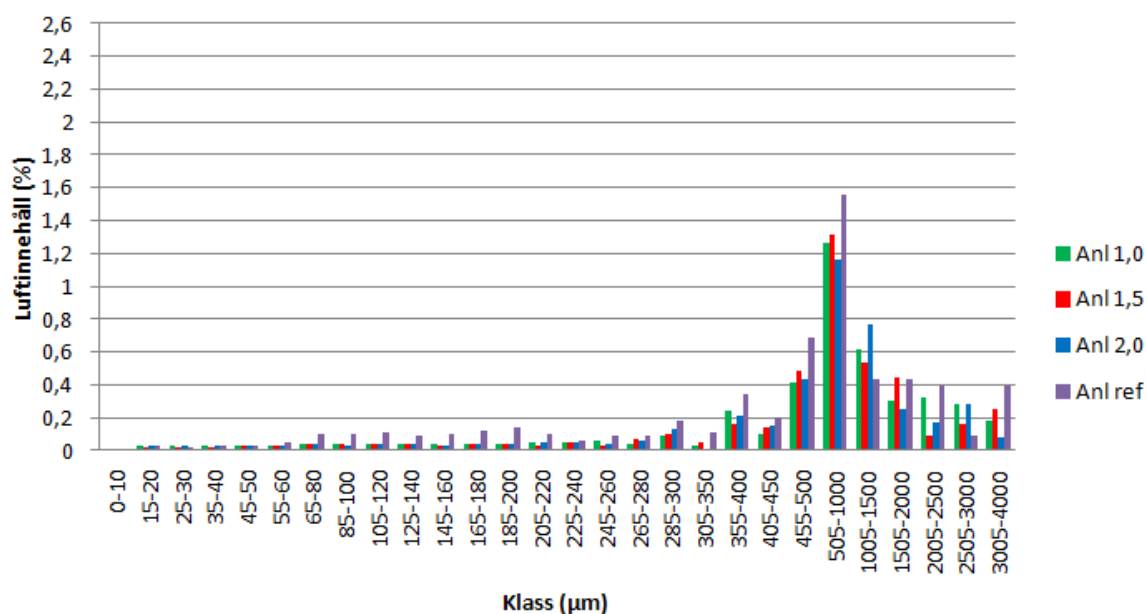
Figur 40. Tryckhållfasthet i MPa för de olika recepten

4.6 Planslipsanalys & tunnslipsanalys

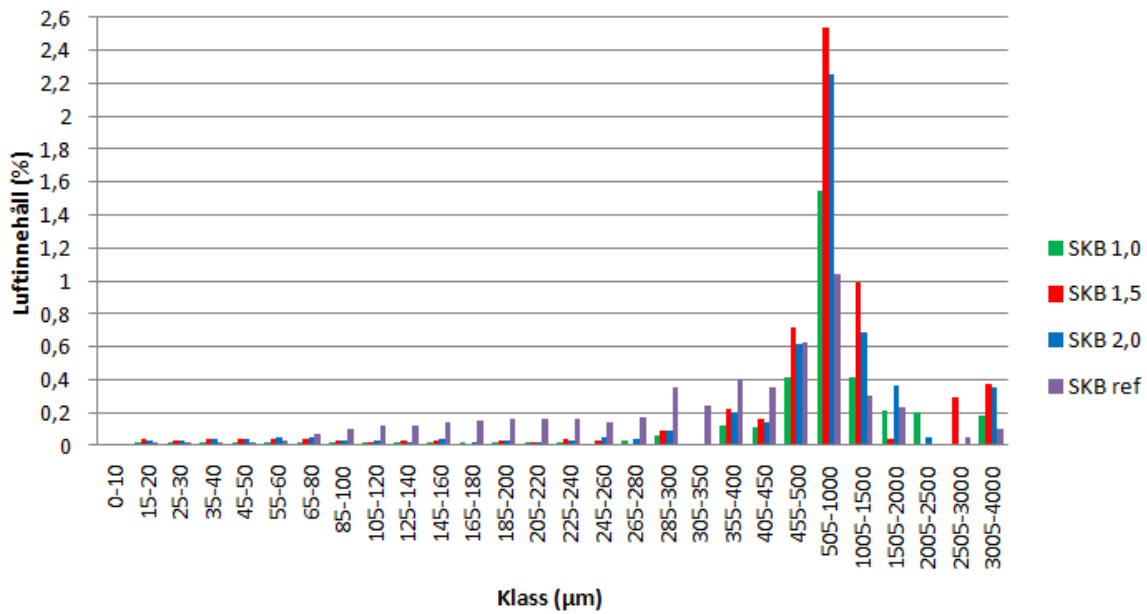
För diskussion kring betongens totala lufthalt hänvisar vi till avsnitt 4.1. I detta avsnitt diskuteras övriga resultat från planslipsanalysen gjord på DTI såsom luftporfördelning, specifik yta och avståndsfaktor.

På samtliga planslipsanalyser noterades en fördelningstopp för luftporer 505-1000 µm, se figur 41-43. Analysen ifrågasätts eftersom kulornas storlek är mellan 10-100 µm. Detta skulle i så fall betyda att kulorna inte ens existerar eftersom den samlade lufthalten mellan 0-100 µm är nästintill obefintlig.

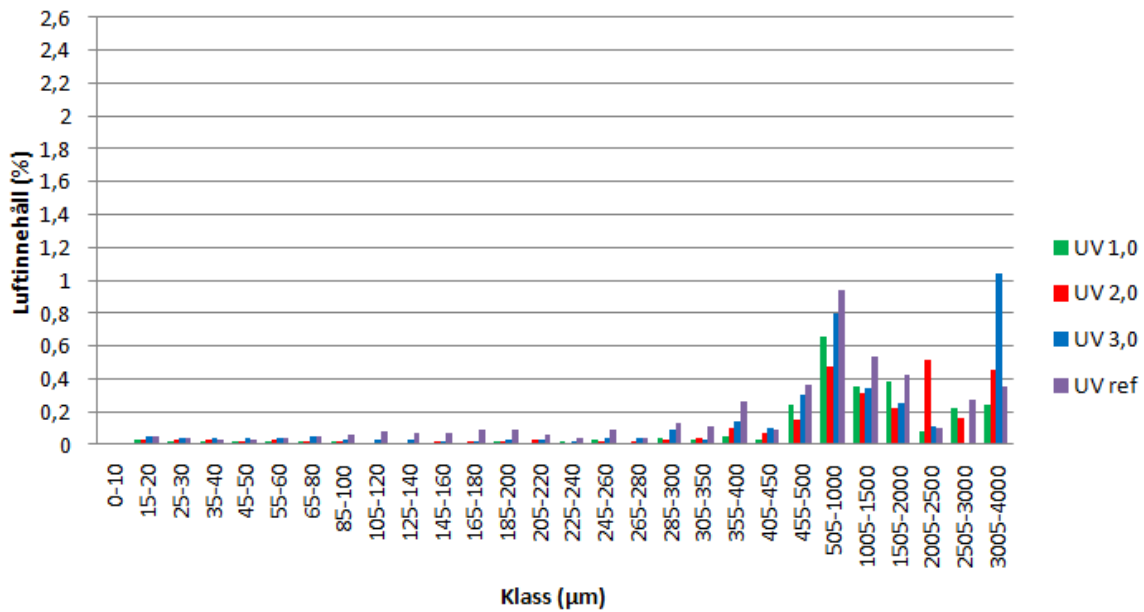
Tveksamheten kring analysen stärks vid studiebesöket på DTI då olika resultat erhöles beroende på inställningen av analysutrustningen (zoom, kontrast och skärpa). Den totala lufthalten överensstämmer i de flesta fall med mätningarna på den färska betongen.



Figur 41. Luftporfördelning anläggningsbetong



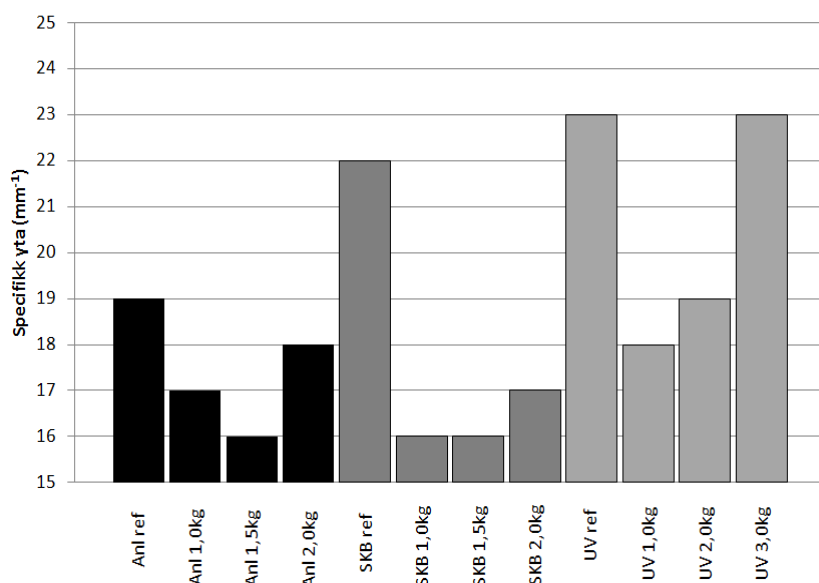
Figur 42. Luftporfördelning självkompakterande betong



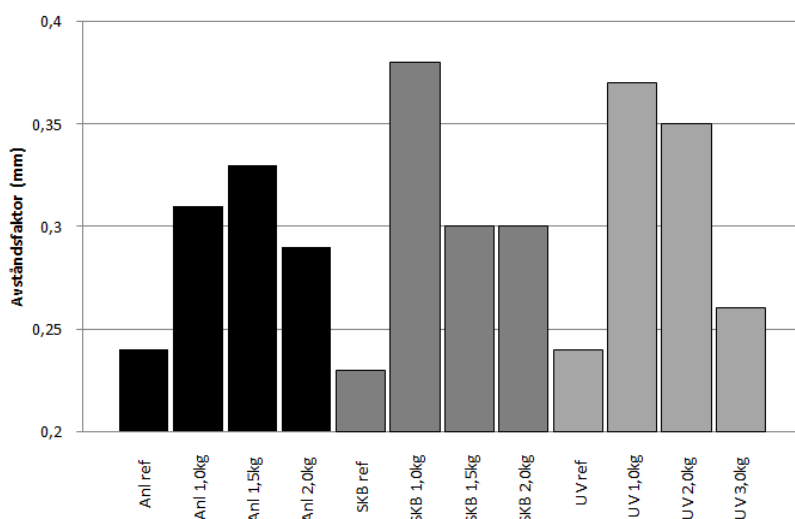
Figur 43. Luftporfördelning undervattensbetong

I figur 44 nedan noterades att den specifika ytan är högre i samtliga referensblandningar. Den specifika ytan ökar också med högre dosering SikaAer Solid. Som synes, se figur 44, ger en inblandning av SikaAer Solid en betong med högre specifik yta vid ökad dosering SikaAer Solid.

I figur 45 noterades att avståndsfaktorn är högre i de betongblandningarna där den specifika ytan är låg. UV 1,0 kg har en låg specifik yta, dvs. medeldiametern hos luftporerna är hög, samtidigt som avståndsfaktorn är hög. Två faktorer som borde resultera i en betong med dålig frostbeständighet. Detta visar även frystesterna.



Figur 44. Specifik yta för de olika recepten



Figur 45. Avståndsfaktor för de olika recepten

Tunnslipsanalysen visar att samtliga prov har en högre lufthalt än planslipen. Detta kan bero på inställningar i analysutrustningen.

Tabell 10. Resultat från tunnslipsanalys

Betong	Pastainnehåll	Total lufthalt	Specifik yta	Avståndsfaktor
	%	%	mm⁻¹	mm
Anl 2.0	28.6	4.5	16	0.31
SKB 2.0	32.2	6.1	15	0.32
UV 3.0	29.9	3.9	17	0.33

4.7 Utvärdering av Roll-A-Meter

Tillförlitlighet

För att kontrollera repeterbarheten hos Roll-A-Metern utfördes följande studie. På samma recept uppmättes lufthalten sex gånger. Betongen som användes vid denna kontroll var en anläggningsbetong med doseringen 2 kg/m³ SikaAer Solid och den totala blandningstiden var 240 sek. Två blandningar blandades (30 liter) och i varje blandning kontrollerades lufthalten tre gånger, därav sex lufthaltsmätningar, se tabell 11.

Tabell 11. Lufthalter i Roll-A-Meter

	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
Lufthalt	3.5 %	4.7 %	3.6 %	2.2 %	1.6 %	2.4 %
Varav SikaAer Solid	1.0 %	1.0 %	1.0 %	0.8 %	0.8 %	0.9 %

Den första 30 liters blandningen gav två snarlika värden på total lufthalt medan mätning 1.2 är något högre. Detta kan bero på ev. läckage i Roll-A-Metern vilket resulterar i att vatten läcker ut och detta ger en högre uppmätt lufthalt. Det höga värdet kan också bero på att en luftficka bildats i just den blandningen. Men det mest troliga är att Roll-A-Metern läcker eftersom vi stött på detta problem tidigare.

Efter mätning 1.3 lät fick Roll-A-Metern stå i ca 1 timme och därefter bestämdes lufthalten på nytt vilket gav en total lufthalt på 3,8 % (varav 1,4 % SikaAer Solid). Detta tyder på att ju längre Roll-A-Metern får stå desto högre blir lufthalten. Skillnaden är dock ganska liten men det noterades även att en större andel av SikaAer Solid flöt upp till ytan.

Från den andra 30 liters blandningen genomfördes mätningarna 2.1–2.3 och dessa visade låga lufthalter. Mängden ”grundluft” bör ligga kring 2 %. Noterbart är dock att Roll-A-Meterns uppvisar förväntade mängder gällande SikaAer Solid.

Maximal mängd SikaAer Solid

Den teoretiskt maximala mängden SikaAer Solid är också av stort intresse. Dels för att se om Roll-A-Metern är trovärdig men även för att se om kulorna är intakta efter att ha blandats med övriga delmaterial. Nedan visas ett räkneexempel för den teoretiskt maximala mängden SikaAer Solid i en anläggningsbetong med doseringen 2 kg/m³.

- Torrsvikt SikaAer Solid är 2 kg
- Kulornas densitet är 200 kg/m³
- En m³ motsvarar 1000 liter

Mängden SikaAer Solid uttryckt i liter blir således

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{2}{200} = 0,01 \text{ m}^3 = 10 \text{ liter}$$

Teoretiskt maximala mängden SikaAer Solid uttryckt i volymprocent blir således

$$SikaAer\ Solid_{max} = \frac{V_{Sika\ Aer\ Solid}}{V_{Totalt}} = \frac{10}{1000} = 0,01 = 1 \%$$

Samma beräkning har gjorts med doseringarna 1.0, 1.5 och 3.0kg/m³ SikaAer Solid. Den teoretiskt maximala mängden SikaAer Solid för varje dosering redovisas nedan.

Tabell 12.

	1.0kg	1.5kg	2.0kg	3.0kg
SikaAer Solid_{max}	0.5 %	0.8 %	1.0 %	1.5 %

Utifrån tabell 11 och 12 verkar SikaAer Solid intakta eftersom andelen SikaAer Solid i samtliga sex mätningar ligger nära den teoretiskt maximala mängden. Variationen i mängden ”grundluft”, se tabell 11, samt att den totala lufthalten beror på att blandningarna utfördes vid olika tillfällen men med samma recept, således har t.ex. sanden ett mindre vatteninnehåll.

Blandningstid

För att se hur snabbt SikaAer Solid blandas in i betongen kontrollerades även lufthalten efter 120 respektive 180 sekunder.

Resultat enligt nedan:

<u>Lufthaltsmätning 1, 120sek (%)</u>	<u>Inget trovärdigt resultat</u>
<u>Lufthaltsmätning 2, 180sek (%)</u>	<u>2,0 (varav 0,6 SikaAer Solid)</u>
<u>Lufthaltsmätning 3, 240sek (%)</u>	<u>3,9 (varav 1,0 SikaAer Solid)</u>

Lufthaltsmätning 1 gav inte något trovärdigt resultat. Det gick utifrån mätinstrumentet på Roll-A-Metern inte att konstatera vare sig den totala lufthalten eller mängden SikaAer Solid pga. dålig skiktning. Slutsatsen blir därför att 120 sekunder är en alldeles för kort blandningstid. Även en blandningstid på 180 sekunder är för kort eftersom den totala lufthalten är 2 % samtidigt som mängden SikaAer Solid endast uppmättes till 0,6 %. Även i detta försök användes en dosering på 2 kg/m³ vilket innebär att mängden bör ligga kring 1 % för SikaAer Solid.

Fördelning

Hur SikaAer Solid fördelar sig i betongen efter lång vibrering (2ggr standardvibrering, SS 13 72 45) analyserades genom att lufthalten kontrollerades i både betongens övre och nedre del. Även i detta fall användes dosering 2 kg/m³.

Resultat enligt nedan:

<u>Lufthaltsmätning 1, övre del (%)</u>	<u>2,0 (varav 1,1 SikaAer Solid)</u>
<u>Lufthaltsmätning 2, övre del (%)</u>	<u>2,0 (varav 1,0 SikaAer Solid)</u>
<u>Lufthaltsmätning 3, övre del (%)</u>	<u>2,0 (varav 0,6 SikaAer Solid)</u>
<u>Lufthaltsmätning 1, nedre del (%)</u>	<u>2,2 (varav 0,7 SikaAer Solid)</u>
<u>Lufthaltsmätning 2, nedre del (%)</u>	<u>2,0 (varav 0,5 SikaAer Solid)</u>
<u>Lufthaltsmätning 3, nedre del (%)</u>	<u>1,3 (varav 0,5 SikaAer Solid)</u>

En högre halt SikaAer Solid uppvisades i de övre delarna vilket tyder på att kulorna flyter upp. Den totala lufthalten är låg pga. den långa vibreringen vilket beror på att en del av ”grundluften” har avgått.

5. Diskussion och slutsatser

- När det gäller undervattensbetong med inblandning av konventionell luftporbildare har man svårt att erhålla en betong som är frostbeständig. Utifrån våra undersökningar noterades att man erhåller en betong med bättre frostbeständighet ju högre dosering SikaAer Solid som används. Största doseringen som använts i dessa undersökningar har varit 3 kg/m^3 och denna betong klarar kravet för god frostbeständighet. Våra rekommendationer är att göra ytterligare undersökningar med ökad mängd SikaAer Solid. Detta eftersom det skulle underlätta väldigt mycket i gjutningsförfarandet om man skulle kunna använda sig av samma betong i hela konstruktionen.
- Utifrån undersökningen av lufthalterna noterades att undervattensbetongen med doseringen 1 kg/m^3 , som har lägst lufthalt, presterar sämst i saltfrostprovningsen. Detta visar att lufthalten är oerhört viktig och för låg lufthalt kan resultera i kortare livslängd för utsatta konstruktioner.
- Samtliga anläggningsbetonger och självkompakterande betonger med varierande dosering SikaAer Solid klarar kravet mycket god frostbeständighet. Dock måste doseringen av SikaAer Solid ökas för att erhålla samma låga siffror som referensbetongerna gällande avflagning.
- Oavsett dosering SikaAer Solid och betongrecept noterades en jämn täthet i betongen baserat på kloridmigrationstest. Men tätheten är något sämre än referensbetongerna, för anläggningsbetongen och den självkompakterande betongen men inte för undervattensbetongen. Detta kan bero på antiutvaskningsmedlet som används i undervattensbetongen.
- Inblandning av SikaAer Solid resulterar i betong med högre hållfasthet i anläggningsbetong och undervattensbetong än för motsvarande recept med vanlig luftporbildare. Dock lägre i den självkompakterande betongen.
- Utifrån utvärderingen av Roll-A-Metern är slutsatsen att den är tillförlitlig när det gäller doseringen av SikaAer Solid. Tveksamheter finns dock vad gäller den totala lufthalten vilket stärks med resultatet från DTI.
- Normal blandningstid rekommenderas. En kortare blandningstid resulterade i en för låg lufthalt och att SikaAer Solid inte blev homogent fördelad i betongen.

- Resultatet från undersökningen av fördelningen SikaAer Solid i betongens övre och nedre del vid lång vibrering visar att kulorna flyter upp. Dessa försvinner däremot inte, som vid vanlig luftinblandning, till följd av att kulorna är en ”fast” luftvolym. Rekommendationer blir därför att göra ytterligare tester för att säkerställa om produkten klarar transport, pumpning och vibrering bättre än konventionell luftinblandning.
- Baserat på denna studie rekommenderas SikaAer Solid i både anläggningsbetong och självkompakterande betong eftersom frostbeständigheten i provningarna enligt Boråsmetoden är mycket god, hållfastheten hög samt att man får en jämn täthet uppmätt med kloridmigrationstest i samtliga betongrecept oavsett dosering. För att erhålla en undervattensbetong som uppfyller kravet mycket god frostbeständighet krävs troligtvis en högre dosering SikaAer Solid. Detta kräver ytterligare undersökningar.

6. Referenser

Litteratur

- Babbitt, J. D. (1955). "Osmotic Pressure - American Association for the Advancement of Science " s. 285-287
- Bengtsson, A. (1987). "Frostbeständighet hos flytbetong - Microcel som luftporbildare, TVBM-5010" LUND, LTH.
- Burström, P. G. (2001). "Byggnadsmaterial, Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper". LUND, Studentlitteratur.
- Chatterji, S. (2002). "Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents" , Cement & Concrete Composites s.759-765.
- Fagerlund, G. (1987). "Cenosfärer som luftporbildare", Cementa Rapport 87053.
- Fagerlund, G. (1992). "Betongkonstruktioners Beständighet – En översikt" Cementa, Danderyd.
- Fagerlund, G. (1999a). "Kompendium i Byggnadsmaterial, Vol 2, Cement och andra oorganiska bindemedel" LUND, LTH.
- Fagerlund, G. (1999b). "Kompendium i Byggnadsmaterial, Vol 3, Cement och andra oorganiska bindemedel" LUND, LTH.
- Fagerlund, G. (2008). "Krav på frostbeständighet hos svensk betong åren 1994-2008" LUND, LTH.
- Fridh, K. (2005). "Internal frost damage in concrete - Experimental studies of destruction mechanisms", TVBM-1023. LUND, LTH.
- Hewlett, P. C. (2004). "Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Chapter 15 - Cement Admixtures" s. 841–905.
- Persson, M. and M. Rosenqvist (2009). "Examensarbete - Frostsprängning i betongdammar", TVBM-5074. LUND, LTH.
- Rixom, R. (1999). "Chemical Admixtures for Concrete, Chapter 3 - Air-entraining agents"
- Sika. (2012b). "Robuster Luftporenbeton durch Einsatz von Mikrohohlkugeln" Underlag från Niklas Johansson, Sika Sverige AB
- Vesikari, E. (1982). "Nordiskt forskningsseminarium "Betongs frostbeständighet". FINLAND.
- Xinping, O. (2008). "The feasibility of synthetic surfactant as an air entraining agent for the cement matrix" Construction and Building Materials s. 1774-1779

Internet

- Betongindustri. (2012). "*Exponeringsklasser*" från <http://www.heidelbergcement.com/se/sv/betongindustri/Betong/exponeringsklasser.htm>, hämtad: 2012-02-14 kl. 09:42
- Cementa. (2012). "*Produktblad - Anläggningscement*" från http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/3F634599-DF30-4060-B82B-EE4D56804C67/0/SE_Anlcem_Deg_Juni2011.pdf hämtad: 2012-05-04 kl. 09:42
- Lindqvist, J.-E. (2007). "*Hur man tolkar och analyserar av historiska mur-, fog-, och putsbruk – SP RAPPORT 27*" från [www-v2.sp.se/publ/ViewDocument.aspx?RapportId=8172](http://www.v2.sp.se/publ/ViewDocument.aspx?RapportId=8172) , hämtad: 2012-05-04 kl.10:58
- Rescon, T. (2012). "*Produktdatablad - Antiutvaskningsmedel för undervattensbetong*" från http://www.mapei.com/public/SE/products/rescon_t_ny_se.pdf hämtad: 2012-02-24 kl. 13:44
- Roger, P. (2003). "*Self-Compacting Concrete*" från http://www.irishconcrete.ie/downloads/self_compact_concrete_dec.pdf hämtad: 2012-05-04 kl. 13:49
- Sandström, T. (2006). "*Undersökning av frostbeständighet hos undervattensgjutna betong*" från http://www20.vv.se/fudresultat/Publikationer_000401_000500/Publikation_000406/2006_Slutrapport%20undervattensgjutna%20betong.pdf hämtad: 2012-02-24 kl. 14:12.
- SBUF. (2010). "*Beständiga undervattensgjutna kajkonstruktioner SBUF projekt 11940*" från http://bygginfo.byggtjanst.se/PageFiles/97764/SBUF_11940_Slutrapport_Best%203%20A4ndiga_UV-gjutna_kajkonstruktioner.pdf hämtad: 2012-02-24 kl. 13:47.
- Sika. (2012a). "*Luftporbildare*" från http://swe.sika.com/sv/solutions_products/02/02a001/02a001100/02a001107.html hämtad: 2012-05-04 kl. 13:47
- Svensson, U. H. J. M. (2008). "*Strukturanalys av betong - God kvalitetsmätare* ", från http://www.betongcentrum.se/_root/media/39933_Nr%203%202008_Strukturanalys%20av%20betong%20-%20God%20kvalitetsm%20E4tare.pdf hämtad: 2012-05-04 kl.11:10
- Tensid. (2011). "*Tensider gör rengöringsmedel effektiva*" från <http://tensid.se/>, hämtad:2012-02-14 kl:10:24

Standarder

Betong - Användning av EN 206-1 i Sverige - SS 137003

Betongkuber för frysprovning enl. SS 13 72 45

Kloridmigration enl. NT BUILD 492

Lufthalt enl. SS-EN 12350-7

Luftporstruktur enl. EN 480-11

Saltfrostprovning enl. SS 13 72 44:2005

Sättningsmått enl. SS-EN 12350-2

Tryckhållfasthet enl. SS-EN 12390-2:2009

Figurer

Figur 1 "Pantheon" ,Foto Martin Olsson, 2006

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pantheon_rome_2005may.jpg

hämtad: 2012-05-03 kl. 14:50

Figur 2 "Frostangrepp hos en betongtrapp" "Stockholm Betongkonsult AB, 2009"

<http://www.betongkonsult.se/betongkonsult/extern/vanliga-skador.htm>

hämtad: 2012-02-13 kl. 09:33

Figur 3 "Frostangrepp hos en betongkonstruktion" "Portland Cement Association, 1998".

<http://www.cement.org/tech/pdfs/PL981.pdf>

hämtad: 2012-02-13 kl. 09:36

Figur 7-14 (Persson, M. and M. Rosenqvist (2009). "Examensarbete - Frostsprängning betongdammar", TVBM-5074. LUND.

Figur 25 "Öresundsbron" Foto: Pierre Mens Øresundsbron,

<http://data.oresundsbron.com/image/press/original/2002111510.zip>

hämtad: 2012-02-10 kl. 14:55

Tabeller

Tabell 1 "Vad i processen som sänker/höjer lufthalten" *Admixtures for Use in Concrete*, Thomas & Wilson 2002

Tabell 2 "Exponeringsklasser" SS EN 206-1

Korrespondens

Johansson, N. (2012) Sika Sverige Ab

Weywadt, P. (2012) AB Sydsten

Fridh, K. (2012) Handledare

Bilaga I – Konsistensmått

Betongtyp	Sättmått (5min)	Sättmått (30min)	Sättmått (60min)
Anl. ref	165	70	45
Anl. 1,0kg	185	90	60
Anl. 1,5kg	150	60	50
Anl. 2,0kg	140	70	47

Betongtyp	Sättmått (5min)	Sättmått (30min)	Sättmått (60min)
UV ref	230	220	225
UV 1,0kg	210	215	215
UV 2,0kg	205	215	215
UV 3,0kg	210	210	220

Betongtyp	Flytsättmått (5min)	Flytsättmått (30min)	Flytsättmått (60min)
SKB ref	700	600	550
SKB 1,0kg	780	725	690
SKB 1,5kg	760	730	700
SKB 2,0kg	760	730	700

Bilaga II – Kloridmigration

Betong	D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Medel D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
Anl ref 1	13.3	
Anl ref 2	14.7	14.40
Anl ref 3	15.2	
Anl 1.0 1	15.9	
Anl 1.0 2	15.9	16.05
Anl 1.0 3	16.5	
Anl 1.5 1	15.6	
Anl 1.5 2	15.9	16.00
Anl 1.5 3	16.5	
Anl 2.0 1	12.9	
Anl 2.0 2	14.0	13.55
Anl 2.0 3	13.8	
SKB ref1	9.6	
SKB ref2	8.3	8.60
SKB ref3	7.9	
SKB 1.0 1	14.8	
SKB 1.0 2	13.7	14.17
SKB 1.0 3	14.0	
SKB 1.5 1	11.5	
SKB 1.5 2	11.6	12.13
SKB 1.5 3	13.3	
SKB 2.0 1	11.5	
SKB 2.0 2	12.7	12.77
SKB 2.0 3	14.1	
UV ref 1	14.3	
UV ref 2	13.7	14.44
UV ref 3	15.3	
UV 1.0 1	11.1	
UV 1.0 2	11.5	11.70
UV 1.0 3	12.5	
UV 2.0 1	12.9	
UV 2.0 2	10.9	12.83
UV 2.0 3	14.7	
UV 3.0 1	12.7	
UV 3.0 2	12.7	12.50
UV 3.0 3	12.1	

Bilaga III – Saltfrostprovning

Betong	7 dygn (kg/m ²)	14 dygn (kg/m ²)	28 dygn (kg/m ²)	42 dygn (kg/m ²)	56 dygn (kg/m ²)	Akkumulerad avflagnig (kg/m ²)	m ₅₆ /m ₂₈	Bedömning enligt SS 137244
Anl ref 4	0,008	0,002	0,001	0,009	0,000	0,021	1,820	Mycket god
Anl ref 5	0,011	0,003	0,001	0,002	0,000	0,017	1,156	Mycket god
Anl 1,0 4	0,015	0,013	0,018	0,015	0,006	0,066	1,444	Mycket god
Anl 1,0 5	0,035	0,015	0,013	0,006	0,003	0,072	1,141	Mycket god
Anl 1,5 4	0,007	0,003	0,001	0,002	0,003	0,015	1,447	Mycket god
Anl 1,5 5	0,021	0,010	0,006	0,001	0,002	0,040	1,094	Mycket god
Anl 2,0 4	0,023	0,004	0,002	0,003	0,001	0,033	1,135	Mycket god
Anl 2,0 5	0,012	0,006	0,003	0,005	0,002	0,028	1,309	Mycket god
Skb ref 4	0,002	0,004	0,001	0,002	0,001	0,010	1,467	Mycket god
Skb ref 5	0,002	0,0004	0,001	0,002	0,001	0,007	1,707	Mycket god
Skb 1,0 4	0,064	0,025	0,011	0,007	0,004	0,111	1,111	Mycket god
Skb 1,0 5	0,015	0,005	0,003	0,004	0,002	0,029	1,268	Mycket god
Skb 1,5 4	0,020	0,009	0,004	0,004	0,004	0,040	1,218	Mycket god
Skb 1,5 5	0,032	0,016	0,008	0,004	0,007	0,067	1,200	Mycket god
Skb 2,0 4	0,019	0,012	0,016	0,004	0,012	0,064	1,360	Mycket god
Skb 2,0 5	0,057	0,014	0,008	0,003	0,008	0,090	1,134	Mycket god
Uv ref 4	0,006	0,002	0,001	0,002	0,002	0,014	1,459	Mycket god
Uv ref 5	0,006	0,006	0,010	0,028	0,068	0,117	5,388	Inte acceptabel
Uv 1,0 4	0,124	0,284	0,664	0,748	2,019	3,839	3,580	Inte acceptabel
Uv 1,0 5	0,066	0,097	0,193	0,164	0,391	0,910	2,559	Inte acceptabel
Uv 2,0 4	0,054	0,083	0,138	0,118	0,520	0,912	3,322	Inte acceptabel
Uv 2,0 5	0,087	0,146	0,307	0,506	0,831	1,876	3,475	Inte acceptabel
Uv 3,0 4	0,043	0,042	0,029	0,024	0,086	0,223	1,961	God
Uv 3,0 5	0,056	0,069	0,084	0,040	0,148	0,396	1,904	God


Bilaga IV – Tryckhållfasthet

Betong	Area (mm ²)	Tryck (kN)	Hållfasthet (MPa)	Medel- hållfasthet	Vikt (g)	Densitet (kg/m ³)
Anl ref 1	22950	1380	60.1		7979	2317.8
Anl ref 2	22800	1450	63.6	63.0	8154	2384.2
Anl ref 3	22650	1480	65.3		8163	2402.6
Anl 1.0 1	22800	1450	63.6		8097	2367.5
Anl 1.0 2	22800	1400	61.4	63.3	8074	2360.8
Anl 1.0 3	22800	1480	64.9		8152	2383.6
Anl 1.5 1	22952	1460	63.6		8210	2384.7
Anl 1.5 2	22800	1500	65.8	65.1	8102	2369.0
Anl 1.5 3	22801	1500	65.8		8045	2352.2
Anl 2.0 1	22800	1440	63.2		8046	2352.6
Anl 2.0 2	22500	1410	62.7	63.7	8040	2382.2
Anl 2.0 3	22650	1480	65.3		8153	2399.7

Betong	Area (mm ²)	Tryck (kN)	Hållfasthet (MPa)	Medel- hållfasthet	Vikt (g)	Densitet (kg/m ³)
SKB ref 1	22500	1580	70.2		7797	2310.2
SKB ref 2	22500	1540	68.4	70.1	7928	2349.0
SKB ref 3	22650	1620	71.5		8067	2374.4
SKB 1.0 1	22650	1440	63.6		7902	2325.8
SKB 1.0 2	22350	1440	64.4	64.4	7877	2349.6
SKB 1.0 3	22500	1470	65.3		7966	2360.3
SKB 1.5 1	22350	1380	61.7		7751	2312.0
SKB 1.5 2	22350	1425	63.8	62.4	7874	2348.7
SKB 1.5 3	22350	1380	61.7		7934	2366.6
SKB 2.0 1	22500	1460	64.9		7895	2339.3
SKB 2.0 2	22350	1410	63.1	63.5	7782	2321.3
SKB 2.0 3	22500	1410	62.7		7867	2331.0

Betong	Area (mm ²)	Tryck (kN)	Hållfasthet (MPa)	Medel- hållfasthet	Vikt (g)	Densitet (kg/m ³)
UV ref 1	22500	1210	53.8		8018	2375.7
UV ref 2	22499	1280	56.9	55.8	8050	2385.3
UV ref 3	22350	1270	56.8		7972	2377.9
UV 1.0 1	22500	1310	58.2		8121	2406.2
UV 1.0 2	22500	1310	58.2	59.1	8181	2424.0
UV 1.0 3	22500	1370	60.9		8098	2399.4
UV 2.0 1	22200	1320	59.5		8094	2430.6
UV 2.0 2	22350	1400	62.6	61.6	8084	2411.3
UV 2.0 3	22350	1400	62.6		8125	2423.6
UV 3.0 1	22650	1340	59.2		8087	2380.3
UV 3.0 2	22650	1310	57.8	58.7	8212	2417.1
UV 3.0 3	22500	1330	59.1		8079	2393.8

Bilaga V – Produktdatablad SikaAer Solid

Construction	Product Data Sheet Edition 07/2011 SikaAer Solid	
	SikaAer Solid	
	Prefabricated air bubbles	
	Product Description	SikaAer Solid are used for mortar and concrete with high resistance to freezing/thawing and de-icing salts.
	Uses	Bridge, road and marine constructions Concrete with high compressive strength and high resistance to freezing/thawing Very flowable concrete e. g. SCC, where it is difficult to keep normal air bubbles in no-slump concrete, where it is difficult to introduce air shotcrete with high resistance to freezing/thawing and de-icing salts difficult conditions e. g. long transportation time or pumping pipeline
	Characteristics / Advantages	SikaAer Solid are small prefabricated air bubbles with an elastic plastic envelopment. Similarly to air pores introduced artificially by means of air-entraining agents they provide expansion space for freezing water a reduced suction of capillary pores a substitute of fines This supports in mortar and concrete a high resistance to freezing/thawing and de-icing salts a reduced capillary water absorption an improved workability by means of „ball bearing effect“ The advantages of SikaAer Solid compared to conventional air entraining agents are the following: easily obtaining of a high resistance to freezing/thawing and de-icing salts even under difficult conditions lower strength reduction
	Tests	
	Approval / Standards	Approval of the German Institute of Construction Technology (DIBt) Applies for European technical approval (ETA)
	Product Data	
	Appearance / Colours	White paste
Chemical Base	Acrylnitril-Polymer	
Density	0,2 g/cm ³	
Equivalent Sodium Oxide as % Na₂O	≤ 0,02 M.-%	
Packaging	Plastic bag: 2 kg, 8 bags/carton, space demand approx. 0.16 m ³ , 12 carton / pallet	
Storage Conditions / Shelf Life	Must be protected against loss of moisture If stored in closed bags, durability unlimited	
		

Loss of moisture during long storage has no influence on the performance

Application

Maximum of recommended dosage	3.5 kg/m ³ for concrete acc. DIN EN 206-1/DIN 1045-2: 7 kg/m ³ for sprayed concrete acc. DIN EN 14487/DIN 18551
Addition	SikaAer Solid should be preferably added with the aggregates, in any case before adding the superplasticizer
Testing	The presence of SikaAer Solid in concrete can be verified by washing out the hollow microspheres acc. ASTM C-173/C-173M-01. Testing in an air void pot will produce incorrect results. Within the initial testing a CDF-test acc. DIN CEN/TS12390-9 must be performed.

Important Advices

Value Base	All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.
Health, Safety and Environment Information	Product code BZM 1 For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Material Safety Data Sheet containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.
Legal notes	The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika [®] products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users should always refer to the most recent issue of the Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



Sika Deutschland GmbH Phone +49 6224 988 04
 Peter-Schuhmacher-Str. 8 Telefax +49 6224 988 502
 D-89181 Leimen www.sika-addiment.com

Bilaga VI – "Roll-A-Meter"

OPERATION OF THE ROLL-A-METER



IMPORTANT

Care should be taken to have approximately the same proportions of mortar and coarse aggregate as are used in the mix. Larger than 2-inch aggregate should be discarded and air determinations made on the balance.

After proper agitation, the air, accompanied by some foam, rises to the top. This should be allowed to stand, with occasional light agitation until the bubbles practically cease rising. This may take 3 to 5 minutes, although an immediate reading will tell whether there is any material excess or deficiency of air.

Following this, for closer results if desired, two general steps are possible:

Method A

The foam may be dispelled by adding 23 ml. of IsoPropyl alcohol (rubbing alcohol) in a special brass cup provided with each meter. This 23 ml. is sufficient to reduce the air reading 1% (decreased air due to the added alcohol) will be the correct percentage of the air in the test batch.

Method B

Numerous tests made by Method A indicate that usually the true reading should be 85 to 90 percent of the primary reading before defoaming. This is often sufficiently accurate for routine control purposes, but may be confirmed or modified by a few (A) tests. The water, the kind of air entraining agent used, as well as the brand of cement and the type of sand, gravel or admixture, may alter the above factor.

VALUE OF AIR ENTRAINMENT

This is probably the greatest new development in concrete in this generation. Tests indicate that correctly controlled air entrainment will increase the durability of concrete under severe exposure several hundred percent.

The careful control of the air to about 4% of the volume is considered ideal for average 1-1/2" to 2" maximum concrete. Beyond this point the concrete strength is rapidly reduced.

Air entrainment increases the placability of concrete, and aids in preventing segregation. When air is entrained, the water may be reduced, which aids in keeping the strength high.

With air entrainment, coarser sand may be used or less of the regular sand, which again helps to lower the water and maintain high strengths. Sand may be increased in coarseness from .3 to .5 above normal Fineness Modulus when proper air entrainment is used.

Tests indicate that the troubles caused by premature stiffening of cement may be materially decreased by the use of the ideal amount of air. Resistance to the deleterious action of sulphate waters may be increased with air entrainment.

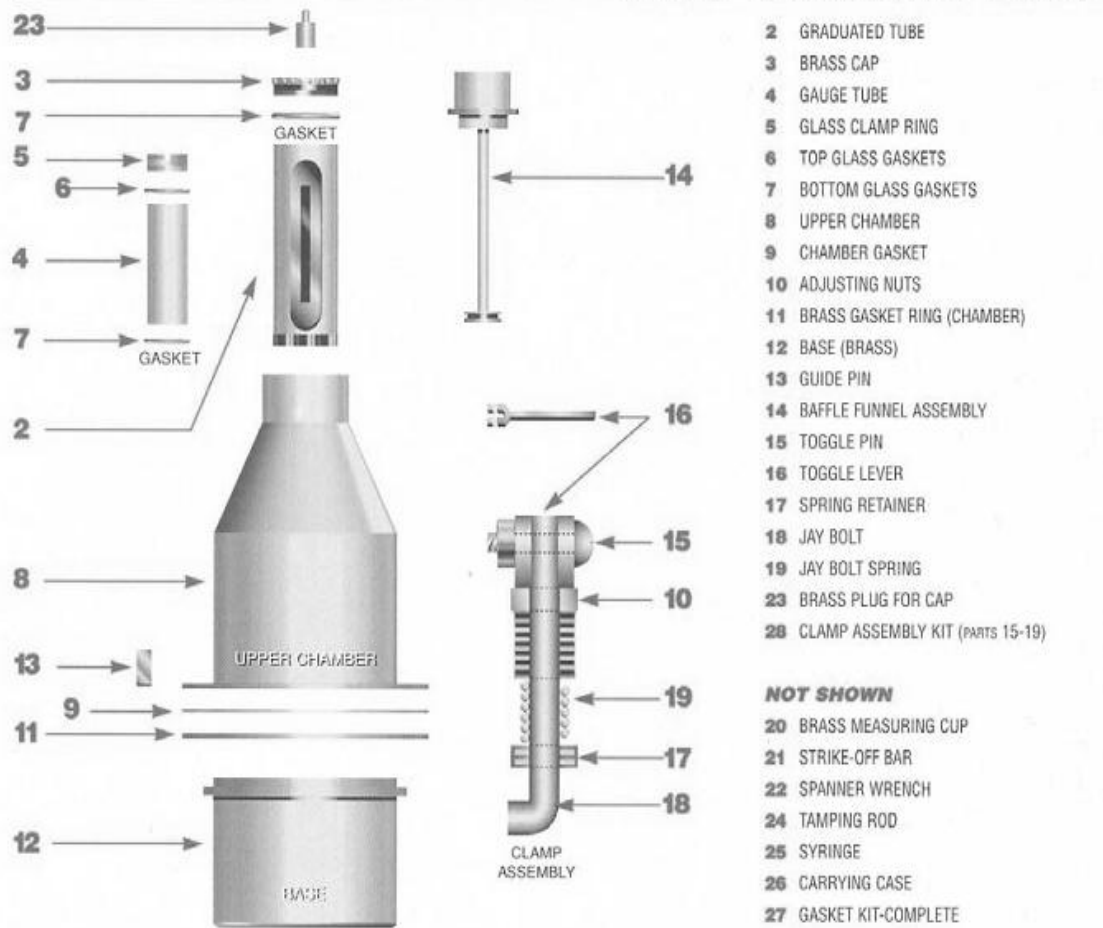
Many contractors are voluntarily using air entraining agent because of the great improvement in placability, prevention of bleeding, and reduction in segregation accompanying its use, even where the extra durability is not required.

WHERE IS AIR ENTRAINMENT DESIRABLE?

Any job where the concrete is to be exposed to weathering will benefit by the use of an air entraining agent. To avoid loss in strength due to too much air, which may be serious if over 5 or 6 percent, frequent routine tests of entrained air will be invaluable. No change of mix can be made without a resulting change in the percentage of air entrained with the same amount of air entraining agent being used. A prompt air meter measurement whenever a change occurs in temperature, slump, time of mixing, richness of mix, or proportion of sand to gravel, will usually reveal a corresponding change in air content which will call for modifying the amount of agent to be used.



PART NUMBER & NAME





THE SOLUTION

The accuracy of Roll-A-Meter results is not dependent on the correctness of all these factors, but gives directly the percent air in the sample. *It is unnecessary to know anything about the weight or physical characteristics of the ingredients which are supposed to be in the mix.*

In contrast to other methods commonly used to determine the percentage of entrained air, this method is unaffected by changes in water cement ratio, sand cement ratio, sand to gravel ratios, inaccuracies of specific gravity determinations, and uncertainties as to absorbed or free water content of the aggregates used in the mix.

The use of the Roll-A-Meter has eliminated practically all of the above listed work, together with the arduous computations and uncertainties involved.

Even the extremely accurate measurement of the sample to be tested is not as important with this new meter, as the resulting error would be only about 1/20 as great in using the meter as the same error would be when using other methods or meters. Only a small percentage of the original error is involved in the Air-Meter result.

USED AS A PYCNOMETER, the Roll-A-Meter has been found to be excellent for other tests, such as determination of specific gravities of cement, sand, gravel and admixtures, and for quickly obtaining the percentage of free water in damp sand and gravel.

PRACTICAL CONTROL OF ENTRAINED AIR

Held within well-established limits, air entrainment is highly beneficial in many ways. With ordinary highway or building construction using 1-1/2" to 2" maximum aggregate, a maximum of about 4% air is usually desirable. Consequently, it is fundamentally important that an accurate method of determining the percentage of air be available. Having this, the amount of air entraining agent to be used, under any of the infinitely variable mix combinations and placing conditions can be quickly determined and effectively controlled.

WHY THE UNIT WEIGHT OR GRAVIMETRIC METHOD IS UNSATISFACTORY

The Unit Weight method of determining the volume of entrained air is tedious and often impractical and unreliable. It involves technical manipulations and computations which can readily lead to serious errors.

GENERAL INFORMATION

The accuracy of the Unit Weight method is dependent on extreme accuracy of several corollary technical determinations. Among these are:

- [1] Specific gravity of cement.
- [2] Specific gravity of sand and gravel.
- [3] Absorption of sand and gravel.
- [4] Average free moisture in sand and gravel.
- [5] There must also be accurate batching and accurate recording of all ingredients (including water) in the batch.
- [6] Thorough mixing of all ingredients.
- [7] Accurate measurement of the sample taken for an entrained air test.

How reliable is the Unit Weight method? It is possible for two well-qualified laboratory technicians to run parallel tests on all the above details and to come out with results differing materially in apparent entrained air.

Here is some convenient information in regard to the extreme accuracy required in determination of percent of air by other methods. Slightly incorrect factors may make errors as great or greater than listed below:

An error of:	In	Material =	% Air Error
.03	Spec. Grav.	Sand	.3%
.03	Spec. Grav.	Gravel	.7%
.1	Spec. Grav.	Cement	.6%
2%	Free Water	Sand	5%
1%	Free Water	Gravel	5%
1%	Absorption	Sand & Gravel	.7%

Cement brands may differ .10 to .15 in specific gravity; or using kerosene instead of water for obtaining specific gravity of cement may cause .8%.

A sample taken from a poorly mixed batch may weigh as much as 3 lbs. per cubic foot more or less than average. This would lead to an error of 2% or so in apparent air entrainment. Thus, accuracy by other meters or methods are dependent on:

- [1] Highly refined accuracy in determining all of the factors listed above;
- [2] On getting truly "average" representative samples of all materials used for making the above determinations;
- [3] On getting all materials uniformly mixed;
- [4] On getting a sample for air content test which has all the ingredients contained in the main batch, in practically the same proportions as the main batch.

Satisfactory accuracy of all of these operations is very difficult to obtain in the field.

SPECIFICATIONS

Net Weight of Meter, less Accessories	18 lbs.
Total Weight, including Accessories and Carton	22 lbs.
Height	22 inches
Outside Diameter at Center	8 inches
Volume of Base	130 cu. in.