

STENFYLLNADS- BETONG

Mekaniska och beständighetsegenskaper - Etapp II



Ingemar Löfgren

Anders Lindvall

Oskar Esping

2017-12-19

FÖRORD

Denna rapport är andra etappen av SBUF projektet ”Mekaniska och beständighetsegenskaper hos injekteringsbetong”. Etapp I (ID:12550, oktober 2012) var en litteraturstudie i ämnet, här i etapp II redovisas resultaten från en serie laboratorieförsök.

Arbetet har utförts vid Thomas Concrete Group Centrala laboratorium i Göteborg.

Projektets referensgrupp har varit sammansatt av:

- Anders Lindvall, Thomas Concrete Group
- Tommy Ellison, BESAB
- Jonas Magnusson, NCC Teknik
- Ingemar Löfgren, Thomas Concrete Group
- Tang Luping, Chalmers tekniska högskola
- Karin Lundgren, Chalmers tekniska högskola
- Hans Hedlund, Skanska
- Mats Karlsson, Thomas Betong
- Ledamöter i FoU Väst

Inledningsvis var även Peter Harryson (då Trafikverket) med i referensgruppen.

Projektet har finansierats av SBUF, BESAB, Thomas Betong samt NCC. Ett tack framförs till projektets finansiärer samt referensgruppens medlemmar.

Göteborg, december 2017

Oskar Esping, projektledare, Thomas Concrete Group C-lab.

SAMMANFATTNING

Stenfyllnadsbetong syftar på principen med att ett cementbruk enbart av sin egenvikt skall rinna ner och fylla ut ett packat stenskelett. En alternativ metod är att cementbruket injekteras. Stenfyllnadsbetong ställer höga krav på brukets konsistens, men även på stenens storlek, kornform och gradering. Den packade stenen behöver ha ett tillräckligt öppet hålrum, och bruket en mycket lättflytande konsistens och samtidigt kunna stabilisera tillsatt luft. Bruket behöver också ha ett tillräckligt lågt *vct* för att klara exponeringen för tösaltade konstruktioner och få tillräcklig hållfasthet.

Egenskaperna gör denna betong potentiellt fördelaktig för att använda för exempelvis reparation (byte) av kantbalkar, vilket då ställer extra höga krav på kloridinträngning och frostresistens (saltfrostangrepp). Det finns dock en del osäkerheter kring frostbeständighet hos stenfyllnads- och injekteringsbetong, men också en rad fördelar såsom enklare och effektivare utförande samt minskad krympning (mindre tvångskrafter och sprickrisk).

Målet var att enbart använda ”vanliga” delmaterial som kan finnas tillgängliga på en betongfabrik, såsom cement, tillsatsmaterial (silikastoft och kalkfiller), tillsatsmedel (luftporbildare och flytmedel) samt sand/fingrus.

Som referens användes två anläggningsbetonger (*vct* 0,40 och 0,45). Bruket till stenfyllnadsbetongerna provades vid olika *vct* (0,35, 0,40 och 0,45), med två olika cement (ANL CEM I 42,5 N SR 3 MH/LA och STD CEM I 52,5 N), samt utan och med luftporbildare och ”fysisk” lufttillsats. Förutom provning av betongens frostresistens (enligt SS 137244) och motstånd mot inträngning av klorider (kloridmigration enligt NT Build-492), har krympning (enligt SS 137215), tryckhållfasthet (enligt SS-EN 12390-3) samt armeringens vidhäftning provats.

Försöken visar på att stenen som används behöver vara ren från leror och liknande finpartiklar, samt bör var ”naturligt rundad” och vara av en relativt grov och strikt (ensgraderad) fraktion (företrädesvis 16/25 eller 16/32) för att skapa det öppna hålrum som krävs för god utfyllnad. Bruket behöver ha en mycket lättflytande konsistens, men ändå tillräckligt stabilt för att inte separera. För att bli frostresistent är inblandning av fysisk luft att föredra framför luftporbildande tillsatsmedel, eftersom det visade sig svårt att skapa ett stabilt luftporsystem med de senare. Stenfyllnadsbetongen uppvisade låg krympning, men brukets relativt höga krympning (i kombination med stenens mothåll) gav tendens till mikrosprickor. De olika cementen gav likvärdiga resultat, förutom motstånd mot inträngning av klorider (bestämd som kloridmigration) där betong med STD-cement visade sig vara dubbelt så högt motstånd jämfört med betongmed ANL-cement.

Till skillnad från injekteringsbetong där cementbruket trycks in den packade stenen, är gjuthöjden med stenfyllnadsbetong begränsad av brukets förmåga att rinna ner och fylla ut enbart av sin egenvikt.

INNEHÅLL

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Begränsningar	2
2	Förstudie.....	3
2.1	Undersökning 1 – Utfyllnad.....	3
2.2	Undersökning 2 – Luftstabilitet	6
2.3	Slutsats förstudier	8
3	Huvudstudie – betongsammansättning och provningar	9
3.1	Betongsammansättning och tillverkning	9
3.2	Provningar	11
3.3	Vidhäftning	15
4	Huvudstudie – Resultat	16
4.1	Konsistens.....	16
4.2	Lufthalt	17
4.3	Tryckhållfasthet	18
4.4	Motstånd mot kloridinträngning	19
4.5	Frostresistens	20
4.6	Krympning	21
4.7	Lokal vidhäftning	23
5	Sammanfattande kommentarer	26
5.1	Allmänt	26
5.2	Resultat provningar.....	27
6	Referenser.....	30

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

Injekterings- och stenfyllnadsbetong bygger på principen att en grövre ballastfraktion först placeras och kompakteras i formen, varefter ett cementbruk fylls (exempelvis genom injektering, så kallad injekteringsbetong) i hålrummet som finns hos stenskelettet, se Lindvall (2012). För stenfyllnadsbetong, till skillnad från injekteringsbetong där cementbruket trycks in i hålrummet mellan stenarna, skall bruket enbart av sin egen vikt rinna ner och fylla ut hålrummet.

Användningen av injekterings- och stenfyllnadsbetong syftar främst till att minimera de tvångskrafter som kan uppstå i betongen, genom att minska dess krympning samt begränsa temperaturutvecklingen. Men det finns också produktionstekniska fördelar som möjliggör ett mer rationellt byggande. Traditionellt används denna typ av betong i konstruktioner exponerade för mindre aggressiva miljöer, utan höga krav på beständighet hos betongen. Betongen har även potential för användning i konstruktioner i mer aggressiva miljöer, t.ex. längs tösaltade vägar eller i marina miljöer, där det finns krav på bärförmåga samt god beständighet hos betongen. För att kunna utnyttja betongen i dessa miljöer krävs dock att egenskaper såsom hållfasthet, beständighet med avseende på saltfrostangrepp och armeringskorrosion initierad genom kloridinträngning undersöks ytterligare.

Det finns osäkerheter kring frostbeständighet hos injekterings- och stenfyllnadsbetong eftersom brukets lättflytande konsistens gör det svårt att stabilisera tillsatt luft. Det finns fördelar med principen stenfyllnadsbetong framför injekteringsbetong, såsom enklare och effektivare utförande. Egenskaperna gör denna betong potentiellt fördelaktig för att exempelvis använda för reparation (byte) av kantbalkar, vilket då ställer extra höga krav på stort motstånd mot kloridinträngning och god frostresistens (saltfrostangrepp).

I denna rapport kommer endast egenskaper hos stenfyllnadsbetong att presenteras. En genomgång av egenskaper hos injekteringsbetong har gjorts i den första etappen av detta projekt, se Lindvall (2012).

1.2 Syfte

Syftet är att förbättra kunskapen kring användningen av stenfyllnadsbetong i tuffa miljöer. Målet med projektet är att undersöka och dokumentera egenskaper hos betongen samt ge rekommendationer om hur den bör sättas samman. Denna studie är en laborativ fortsättning på den första teoretiska etappen i SBUF-projektet ”Mekaniska och beständighetsegenskaper hos injekteringsbetong” (ID:12550, oktober 2012), där resultaten presenteras i Lindvall (2012)

Fokus i projektet har varit på betong avsedd för användning till konstruktioner i miljöer med krav på god bärförmåga och beständighet. För denna typ av konstruktioner är det av vikt med låg krympning samt god

beständighet med avseende på armeringskorrosion initierad av kloridinträngning och saltfrostangrepp.

1.3 Begränsningar

Projektet har begränsats till att studera stenfyllnadsbetong som är sammansatt med delmaterial som finns tillgängliga på en typisk betongfabrik, t.ex. cement, sand, grov ballast, tillsatsmaterial och tillsatsmedel. Cementbruket som ska fylla den förpackade grova ballast ("stenskelett") avses att tillverkas på en typisk betongfabrik, dvs. med frifalls- eller tvångsblandare, och transporteras till arbetsplatsen med roterbil. På detta sätt blir cementbruket enkelt att tillverka, transportera till arbetsplats och fylla i form.

Försöken har begränsats till en gjutmetod där cementbruket av sin egen vikt skall rinna ner och fylla ut en förpackad grov ballast, så kallad stenfyllnadsbetong. Höjden på gjutningen har begränsats till 200 mm. Betongen har varit sammansatt så att den uppfyller krav på för exponeringsklasserna XD3 och XF4 enligt Tabell 8 i SS 137003:2015.

Andra produktionsmetoder, t.ex. injektering, beskrivs i Lindvall (2012).

2 FÖRSTUDIE

Projektet inleddes med en förstudie där olika sammansättningar på stenskelettet och cementbruket studerades med avseende på utfyllnad och stabilitet hos luftporsystemet.

Svårigheten med tekniken där ett cementbruk av sin egenvikt skall fylla ut ett stenskelett, är att uppnå en tillräckligt lös konsistens på bruket samtidigt som tillsatt luft blir stabil. Dessutom får inte cementbruket separera, vilket kan vara en risk om konsistensen är lättflytande. Cementbruket måste också ha ett lågt *vct* för att betongen skall uppnå tillräckligt god beständighet i aggressiva exponeringsmiljöer och få tillräcklig hållfasthet. Den grova ballastens egenskaper är också avgörande för att en god utfyllnad av cementbruket i stenskelettet. Exempel på viktiga egenskaper är kornstorlek, ytbeskaffenhet, kornform och gradering. Dessutom inverkar den grova ballastens egenpackning, dvs. hur väl ballastkornen kan packas. Önskvärt är ett material som är relativt strikt graderat och med en inte alltför stor egenpackning.

Förstudien ligger till grund för sammansättning av de olika bruken som provats i denna studie, samt val av grov ballast till stenskelettet.

2.1 Undersökning 1 – Utfyllnad

Den första undersökningen som genomfördes i förstudien var att undersöka hur väl cementbruk med olika sammansättning kunde fylla ut olika typer av packad grov ballast. Provningsen gjordes med en cylinderform med diameter 100 mm och höjden 200 mm som först packades med grov ballast och därefter hälldes cementbruk på.

Cementbruket var sammansatt av följande delmaterial:

- Cement. Cementa Anläggningscement, CEM I 42,5 N – SR 3 MH/LA.
- Kalkfiller, Nordkalk Limus 40.
- Silikastoft, Elkem MG 920D.
- Vatten.
- Superplasticerande tillsatsmedel, BASF MasterGlenium 5118 (förkortat MG 51/18).
- Grus, där två olika typer av grus provades
 - Natursand 0/4 mm (Backesand).
 - Industrisand 0/0,5 mm (B28-sand).

Bruket är sammansatt för att vara tillräckligt lättflytande utan att separera. Fördelningen (vikt) mellan cement/kalk/sand var ca 1,0/0,5/0,5 samt 6 % silikastoft av cementvikten. Brukets vattencementtal (*vct*) var 0,40.

Provningsen inleddes med grov ballast bestående av krossad sten från Tagenetäkten med två olika fraktioner 8/16 mm respektive 16/25 mm. Egenpackningen för båda dessa fraktioner var ca 0,575 och stenen var något flisig och flakig.

Tidigare erfarenheter låg till grund för sammansättningen av cementbruket, där konsistensen bedöms med:

- Utrinningstid 1,0 liter bruk (tratt med 12,7 mm hål enligt ASTM C939, likt SS-EN 445)
- Utbredningsmått (100/70/60 mm Haegemannkon enligt SS-EN 1015-3, likt ASTM C230)

Som ett riktvärden för när cementbruket har lämplig konsistens var en maximal uttrinningstid på ca 15-20 sekunder, och ett utbredningsmått runt 400 mm. Om uttrinningstiden översteg 20 s (med extra luft tillsatt ca 15 s) visade det sig att cementbruket inte kunde fylla ut stenskelettet tillräckligt bra.

I *Figur 1* visas utfyllnaden för provningen av tre olika sammansättningar stenskelettet och cementbruket (numrerat från vänster till höger i figuren):

- I) 8/16 Tagene (kross) med 0/0,5 B28-sand.
- II) 8/16 Tagene (kross) med 0/4 Backesand.
- III) 16/25 Tagene (kross) med 0/4 Backesand.

Då stenskelettet består av 8/16 mm sten klarade bruket med B28 sand (I) att fylla ut hela cylinderformen någorlunda bra, men med Backe (II) stannade det mesta av bruket i den övre delen av cylinderformen. Med ett stenskelett bestående av 16/25 mm sten klarade bruket med Backesand (III) att fylla ut cylinderformen ordentligt. Eftersom B28 är en förädlad produkt, och inte en sand som normalt används inom betongproduktion, är (I) inte en variant som normalt skulle användas för tillverkning av betong. Till nästa steg valdes därför (III) som den variant som var aktuell att gå vidare med med ytterligare provning.



Figur 1. Inledande provning av brukets förmåga att rinna ner och fylla ut stenskelettet i en cylinderform med diameter 100 och höjd 200 mm. Till

vänster (I) 8/16 mm sten med B28-sand, i mitten (II) 8/16 mm sten med Backesand, och till höger (III) 16/25 mm sten med Backesand.

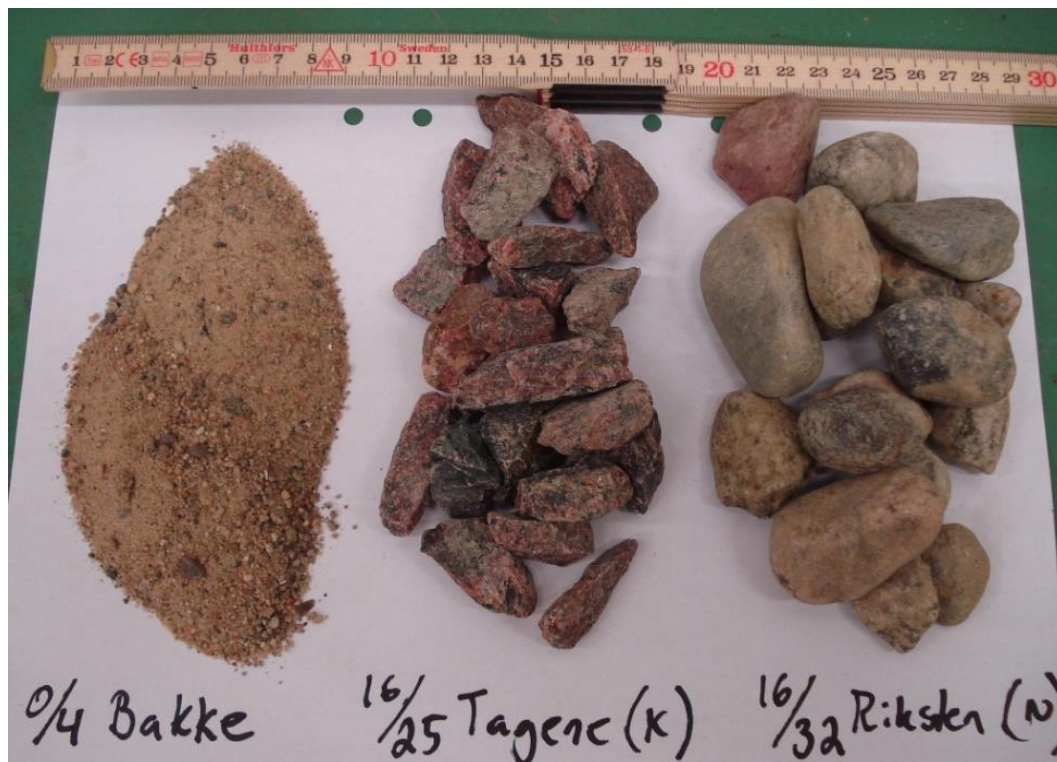
För att undersöka variant (III) ytterligare göts en större provkropp, bestående av en pall med pallkrage klädd med 0,2 mm polyetenfolie. Dimensionen på provkroppen var 600x800 mm med höjd 180 mm. Genom att borra ut cylindrar (ø100 mm) bedömdes cementbrukets förmåga att enbart av sin egenvikt rinna ner och fylla ut det packade "stenskelettet" visuellt. I *Figur 2* visas exempel på utborrade cylindrar, där det tydligt går att se att utfyllnaden inte blev riktigt god.



Figur 2. Resultat från den inledande provningen av cementbrukets förmåga att rinna ner och fylla ut ett stenskelett med 16/25 mm Tagene (kross). Utborrade cylindrar visar på bristfällig utfyllnad.

Resultaten visar att med krossad sten fås inte den öppna struktur som behövs för god utfyllnad av stenskelettet. Detta eftersom packad krossad sten tenderar att generera allt för mycket smala passager och stor kontaktyta mellan stenarna. Av denna anledning valdes istället att gå vidare med en natursten med fraktion 16/32 mm från Rikstentäkten.

I *Figur 3* illustreras de olika ballastmaterialen som har använts



Figur 3. De olika ballastmaterialen som har använts, med 0/4 Bakke (naturesand), 16/25 Tagene (kross) från Tagene och 16/32 Riksten (natur).

I Figur 3 framgår tydligt skillnaden mellan de olika stenmaterial. Den krossade stenen som har använts, 16/25 Tagene, är både mer flisig och flakig jämfört med den natursten, 16/32 Riksten, som slutligen användes.

Det visade sig att naturstenen från Rikstentäkten hade en hel del ytbeläggning av finmaterial, varför stenen behövde tvättas före användning. Dessa ytbeläggningar var dock svåra att tvätta bort helt trots att mycket vatten spolades på stenen, vilket tyder på att det sannolikt är leror som sitter på ytorna.

2.2 Undersökning 2 – Luftstabilitet

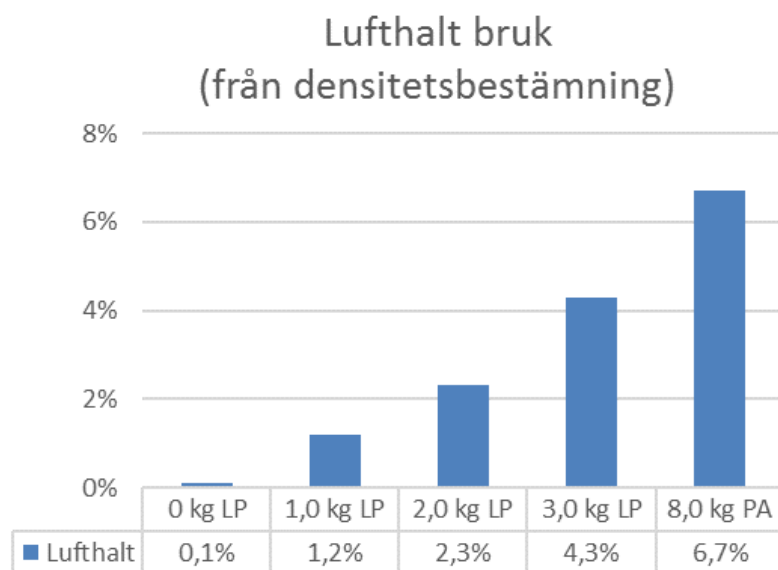
Den andra undersökningen som genomfördes i förstudien var att bestämma hur cementbruket skulle sättas samman för att både vara tillräckligt lättflytande, för att fylla ut stenskelettet, och samtidigt ha en tillräckligt hög lufthalt, för att tillräckligt god frostbeständighet. Med en lättflytande konsistens hos cementbruket finns det dock svårigheter med att skapa ett tillräckligt stabilt luftporsystem. Ett riktvärde för genomförda provningar var att försöka ha en lufthalt i den färdiga stenfyllnadsbetongen på minst ca 3 %, vilket då motsvarar en lufthalt i cementbruket på ca 6 %.

Cementbruk med fyra olika doseringar av ett luftporbildande tillsatsmedel (LP) provades. Dessutom provades fysisk luft (PA), som kort förklarar är små plastkuler som blandas i betongen för att skapa luftporer. Det luftporbildande tillsatsmedlet var MicroAir 105 från BASF (som är baserat

på en syntetisk tensid) och som var utspädd 1:20, med en normal dosering av ca 0,10-0,20 % av cementvikten för betong. Den fysiska luften var SolidAir från SIKA, som har en normal dosering på upp till ca 3,5 kg/m³ betong. Cementbruket hade $v_{ct_{ekv}}$ 0,40 och var sammansatt med följande delmaterial:

- Cement. Cementa Anläggningscement, CEM I 42,5 N – SR 3 MH/LA.
- Silikastoft, Elkem MG 920D.
- GGBS (mald granulerad masugnsslagg), Holcim Slagg Bremen.
- Vatten.
- Superplasticerande tillsatsmedel, BASF MasterGlenium 51 18 (förkortat MG 51/18).
- Naturgrus, Backesand med fraktion 0/4 mm.
- Luftporbildande tillsatsmedel, där följande doseringar provades:
 - ”Naturlig” - Utan LP.
 - ”Låg” - 1,0 kg LP (0,125 % av C).
 - ”Måttlig” - 2,0 kg LP (0,250 % av C).
 - ”Hög” - 3,0 % kg LP (0,375 % av C).
 - ”Fysisk luft” - 8,0 kg PA (1,00 % av C).

Densitetsbestämning gjordes på bruket genom att fylla och väga en behållare med känd volym (404,0 ml). Lufthalten beräknades av skillnaden mellan uppmätt densitet och receptets densitet, och detta redovisas i *Figur 4*.



Figur 4. Lufthalten hos cementbruket, beräknad från uppmätt densitet.

I *Figur 4* framgår tydligt svårigheterna att skapa ett stabilt luftporsystem med luftporbildande tillsatsmedel (LP i figuren). Även vid höga doseringar uppnås inte önskad lufthalt (6 %). Däremot vid användning av fysisk luft (PA i figuren) fås tillräckligt hög lufthalt.

Förutom att bestämma lufthalten i cementbruket bedömdes också utfyllnaden av stenskelettet för de olika sammansättningarna av bruket. Denna bedömning gjordes på cylindrar (diameter 100 och höjd 200 mm) med

hålrumshalt på ca 45 %. Två cylindrar av respektive bruksblandning tillverkades. Denna bedömning visade att stenskelettet fylldes ut på ett tillfredsställande sätt av samtliga brukssammansättningar.

2.3 Slutsats förstudier

Genomförda förstudier visade på svårigheterna med att sätta samman ett cementbruk som både är tillräckligt lättflytande och har tillräckligt hög lufthalt. För att få till ett tillräckligt luftstabiliserande bruk får konsistensen inte vara för lös, men ändå tillräckligt lättflytande för att säkerställa god utfyllnad av stenskelettet. Cementbruken har blandats med delmaterial som normalt används vid en betongfabrik, dvs att stenen är av en typ som används för betongtillverkningen, så även fingrus/sand, cement, tillsatsmaterial (GGBS eller silikastoft) och tillsatsmedel.

Resultaten från genomförda undersökningar visar att en viss mängd grus eller sand behövs för att stabilisera cementbruket, men dessa material bör inte vara allt för grova eftersom det då försämrar brukets förmåga att fylla ut stenskelettet. Grus eller sand behövs också för att minska krympningen. Med en fin specialsand (0-0,5 mm B28) klarade cementbruket att till viss del fylla ett stenskelett bestående av 8/16 mm Tagene (kross), men om cementbruket innehöll naturgrus (0-4 mm Backesand) blev utfyllnaden dålig. Med stenskelettet av 16-25 mm Tagene (kross) blev utfyllnaden av cementbruk med naturgrus bättre, men inte tillräckligt bra. Detta kan härledas till trånga passager och stora kontaktzoner mellan krossade stenarna, som förvärrades p.g.a. att dessa inte var tillräckligt kubiska. Om stenskelettet däremot sattes samman av natursten 16-32 mm från Rikstenstakten blev utfyllnaden av cementbruk med naturgrus däremot acceptabel.

Genomförda undersökningar visade också att det behövdes relativt hög dosering av luftporbildande tillsatsmedel för att få en tillräcklig lufthalt i cementbruket. För att bruket skulle kunna stabilisera luften visar resultaten från provningarna att uttrinningstiden måste vara minst ca 15 sekunder för 1 liter bruk i ASTM C939 konen (och för utfyllnaden max ca 20 sekunder).

3 HUVUDSTUDIE – BETONGSAMMANSÄTTNING OCH PROVNINGAR

I huvudstudien undersöktes egenskaper hos elva olika betongsammansättningar, fördelade på två konventionella anläggningsbetonger och nio stenfyllnadsbetonger. I följande kapitel redovisas hur dessa betonger har varit sammansatta och tillverkats samt vilka provningar som har genomförts.

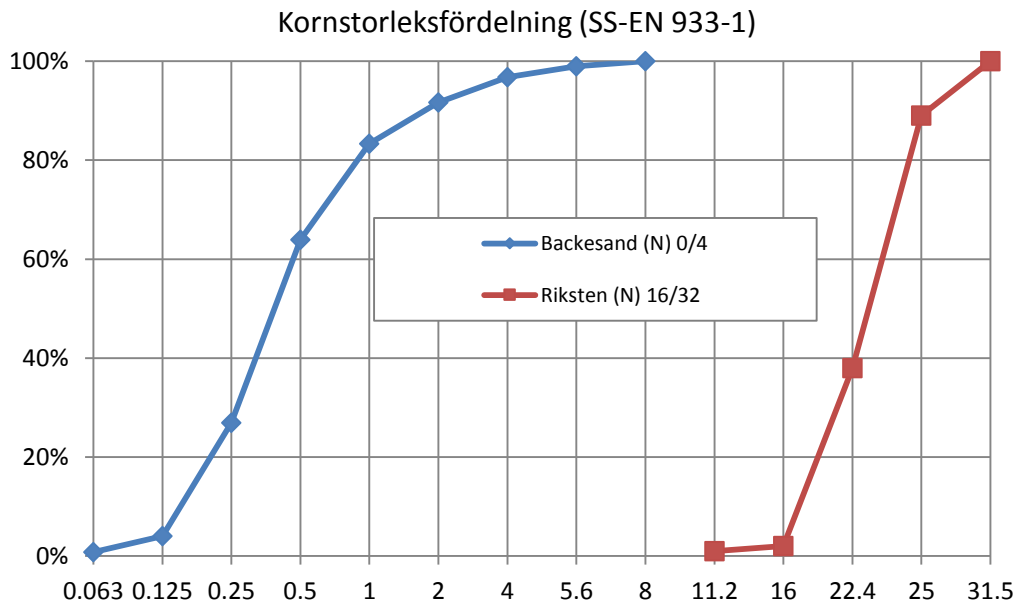
3.1 Betongsammansättning och tillverkning

Referensbetonger har varit två frystestade betonger med 25 mm sten där v_{ct} 0,45 (C32/40) respektive 0,40 (C35/45). De nio cementbruk som blandades var sammansatta med:

- Två olika cement (Cementa Anläggningscement, CEM I 42,5 N – SR 3 MH/LA, och Cemex Standardcement, CEM I 52,5 N).
- Med och utan luftporbildande tillsatsmedel (LP) eller med ”fysisk luft” (PA).
- Tre $v_{ct_{ekv}}$ (0,35, 0,40 och 0,45).

Den grova ballasten som har använts har varit olika för referensbetongerna och stenfyllnadsbetongerna. För referensbetongerna har krossad sten från Tagenetäkten (tre olika fraktioner; 4/8, 8/16 och 16/25 mm) använts, medan för stenfyllnadsbetongen har natursten från Rikstenstäckten (en fraktion; 16/32 mm) använts.

För stenfyllnadsbetongerna redovisas inte den packade naturstenen (Riksten) i Tabell 2. Stenen uppskattas ha en egenpackning på ca 0,55 (ca 45 % hålrumshalt), vilket betyder att recepten på bruken kan multipliceras med 0,45 för att få ungefärliga delmängder i kg per m³ stenfyllnadsbetong. Naturstenen (Riksten) var inte helt ren, varför den behövde tvättas med rikligt vatten för att få bort finmaterialet som satt fast på ytorna. Siktkurvor för de material som används i stenfyllnadsbetongen, dvs. 16/32 mm Riksten (natur) och 0/4 mm Backesand (natur), redovisas i *Figur 5*.



Figur 5. Siktcurva för naturgruset (0/4 Backe) och naturstenen (16/32 Riksten).

Figur 5 visar tydligt den skillnad i siktcurvor mellan den grova ballasten och den ballast som finns i cementbruket, som är en förutsättning för att utfyllnaden av stenskelettet skall bli fullgod.

I Tabell 1 (referensbetonger) och Tabell 2 (cementbruk för stenfyllnadsbetonger) redovisas de elva olika sammansättningar som har provats.

Tabell 1. Sammansättning för de 2 frystestade referensbetongerna (nr 1-2).

		Mix id	T35/45	T32/40
			25 S4	25 S4
			0,40 LP	0,45 LP
			<i>nr 1 (ref)</i>	<i>nr 2 (ref)</i>
		$v_{ct_{ekv}}$ [-]	0,390	0,440
Material	Namn	Lev.	Vikt [kg/m ³]	
Cement	ANL CEM I 42,5N SR3/MH/LA	Cementa	420	390
T.material	Limus 40	NordKalk		
	Microsilica Grade 920D	Elkem		
Ballast	0/4 Backesand (N)	NCC	795	815
	4/8 Tagene (K)	NCC	104	105
	8/16 Tagene (K)	NCC	139	140
	16/25 Tagene (K)	NCC	713	698
T.medel	Master Glenium 51 18	BASF	2,94	2,15
	Micro Air 105 (1:10)	BASF	0,84	0,78
Vatten			164	172

Tabell 2. Sammansättning för de nio cementbruken (nr 3-11). Angivna vikter gäller utan sten, för att få det per m³ betong multipliceras vikterna med ca 0,45 (16/32 Riksten egenpackning ca 0,55).

		Mix id	ANL	ANL	ANL	STD	ANL	ANL	STD	ANL	ANL
			0,35	0,40	0,45	0,40	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45
							LP	PA	LP	LP	PA
			<i>nr 3</i>	<i>nr 4</i>	<i>nr 5</i>	<i>nr 6</i>	<i>nr 7</i>	<i>nr 8</i>	<i>nr 9</i>	<i>nr 10</i>	<i>nr 11</i>
		vct _{ekv} [-]	0,350	0,400	0,450	0,400	0,400	0,400	0,400	0,450	0,450
Material	Namn	Lev.	Vikt [kg/m ³]								
Cement	ANL CEM I 42,5N SR3/MH/LA STD CEM I 52,5N	Cementa Cemex	950	850	750		800	800		700	700
						850			800		
T.material	Limus 40 Microsilica Grade 920D	NordKalk Elkem	300	400	500	400	400	400	400	500	500
			57	51	45	51	48	48	48	42	42
Ballast	0/4 Backesand (N) 16/32 Riksten (N)	NCC Jehander	450	450	450	450	450	450	450	450	450
			X	X	X	X	X	X	X	X	X
T.medel	Master Glenium 51 18 Micro Air 105 (1:10) SolidAir	BASF BASF SIKA	11,40	9,35	7,50	11,48	9,20	9,20	12,40	7,70	8,40
							3,20		3,20	2,80	
								7,00			7,00
Vatten			372	381	378	381	358	358	358	353	353

Blandningen har gjorts i satser om ca 30-50 liter, i en Zyklus ZZ 50 HE (extrautrustad med en "High Speed Agitator". De torra materialen blandades först kort, därefter tillsattes vattnet och sist tillsatsmedel (flyt och luftporbildare). Betongen samt bruket blandades i ca 3 minuter.

3.2 Provningar

Ett antal relevanta egenskaper hos stenfyllnadsbetong har undersökts i det aktuella projektet. Fokus i provningarna har varit på beständighets-egenskaper, främst med avseende på risk för armeringskorrosion initierad av kloridinträngning och skador från saltfrostangrepp. Egenskaper hos det färskt cementbruket och betongen har också undersökts. Dessutom har tryckhållfasthet och krympning hos den hårdnande betongen samt vidhäftning mellan betong och armering undersökts.

Provningen har gjorts på ett urval av betongsammansättningarna, vilket framgår av provningsmatrisen i *Tabell 3*. Nästan all provning har utförts vid Thomas Concrete Groups Centrala laboratorium (C-lab) i Göteborg, förutom vidhäftningsprovningen som är utförd hos Chalmers tekniska högskola.

De provningar som har gjorts är:

- Lufthalt (färsk), antingen enligt SS-EN 12350-7 (referensbetonger) eller SS-EN 12350-6 (cementbruk).
- Tryckhållfasthet, enligt SS-EN 12390-3.
- Kloridmigration, enligt NT Build 492.
- Frostresistens (saltfrostangrepp), enligt SS 137244 metod III/A (sågad yta på cylinder med 3,0 % NaCl-lösning som frysmedium).
- Krympning, enligt SS 137215 (betongens fria krympning).
- Vidhäftning av armering, enligt en metod använd vid Chalmers tekniska högskola. Mer information finns i Magnusson (2000).

Dessutom har det färska bruket provats vad gäller uttrinngstid (1,0 liter i tratt med 12,7 mm hål enligt ASTM C939) samt betongens sättmått (enligt SS-EN 12350-2).

Tabell 3. Matris som illustrerar de provningar som har utförts (ifyllda rutor) på respektive betongsammansättning.

	Antal prov	T35/45 0,40 LP <i>nr 1 (ref)</i>	T32/40 0,45 LP <i>nr 2 (ref)</i>	ANL 0,35 <i>nr 3</i>	ANL 0,40 <i>nr 4</i>	ANL 0,45 <i>nr 5</i>	STD 0,40 <i>nr 6</i>	ANL 0,40 LP <i>nr 7</i>	ANL 0,40 PA <i>nr 8</i>	STD 0,40 LP <i>nr 9</i>	ANL 0,45 LP <i>nr 10</i>	ANL 0,45 PA <i>nr 11</i>
Lufthalt (färsk)	1											
Tryckhållfasthet	4*											
Kloridmigration	3*											
Frysprovning	3*											
Krympning	3											
Vidhäftning armering	3											

* borrades ur gjuten platta (1/2 pall, 600x800x200 mm)

Proverna för mätning av tryckhållfasthet, kloridmigration och frysprovning har tagits från kärnor som har borrats ut ur en gjuten platta med dimensionerna 600x800x200 mm. Betongen har varit sammansatt av ett stenskelett som packats med 16/32 Riksten (natursten) och där cementbruket runnit ner enbart av sin egen vikt. Diametern på proverna för bestämning av tryckhållfasthet och frostresistens var 120 mm, och till bestämning av kloridmigration 100 mm. Utborrning av kärnor från den gjutna plattan gjordes något dygn efter gjutning, där proverna sedan har lagrats fram till provning.

Foton på plattan med det stenskelettet och utborrningen av cylindrarna kan ses i *Figur 6*. Proverna för krympmätning (100x100x400 mm) och provning av armeringens vidhäftning (200x200x200 mm) göts i separata formar.



Figur 6. Foton på ½-pallen med packad 16/32 natursten samt utborrningen av cylindrar för tryckhållfasthet, kloridmigration och frysprovning.

3.2.1 Lufthalt

Lufthalten bestämdes på den färska betongen och cementbruket med två metoder:

- På betong (blandning 1 och 2), med lufthaltsmätare, enligt SS-EN 12350-7.
- På bruk (blandning 3-11), beräknat som kvoten mellan uppmätt densitet enligt SS-EN 12350-6 (404,0 ml kärl) och densitet enligt recept.

Lufthalten för stenskelettsbetongen (blandning 3-11) är uppskattningsvis 45 % av brukets lufthalt, baserat på att 16/32 stenen har en egenpackning på ca 0,55 (45 % hålrumshalt).

3.2.2 Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten bestämdes på utborrade och planade cylindrar med $\varnothing 120$ mm (h 120 mm) som vattenlagrats fram till provning vid 7, 28 och 56 dygns ålder (dvs. efter gjutning). Provuttag, dimension, provning och lagring är gjord enligt SS-EN 12390-2, 12390-3 och 12504-1.

3.2.3 Motstånd mot kloridinträngning

Betongens motstånd mot inträngning av klorider, har bestämts som en kloridmigrationskoefficient enligt NT Build 492. Provningsen är gjord på 50 mm tjocka skivor (3 st) som sågats ur utborrade cylindrar (diameter 100 mm och höjd 180 mm), minst 10 mm in från ändarna. Kloridmigrationen har provats vid 28 och 56 dygns ålder (dvs. efter gjutning).

3.2.4 Frostresistens

Provningsen av betongens frostresistens är utförd enligt SS 137244 med förfarande IIIA (sågad yta på cylindrar med 3,0 % NaCl-lösning som frysmedium) på fyra cylindrar med diametern 120 mm utborrade ur provplatta. Följande provningsförfarande har använts::

- Dag 1 – Uttag borrning cylinder och lagring i vattenbad (20 °C)
- Dag 7 – Cylindern tas ur vatten och placeras i klimatrum (20 °C och 65 % RF)
- Dag 21 – Cylindern sågas (50 mm tjock skiva, 20 mm in från gjutyta, dvs. överyta)
- Dag ca 27 – Limning med gummiduk
- Dag 28 – Provkroppen vattnas
- Dag 31 – In i klimatskåp med saltvatten på ytan

Efter detta mäts avflagningen efter 7, 14, 28, 42 och 56 dygn i klimatskåp.

3.2.5 Krympning

Betongens fria krympning har bestämts på tre prismor med dimension 400x100x100 mm enligt SS 137215. För stenfyllnadsbetongen fylldes först balkformen med 16/32 sten som kompakterades lätt (se *Figur 7*) varefter cementbruket fylldes på. Efter ett dygn avformades balkarna och dessa vattenlagrares fram till dygn 7 då första mätningen gjordes (referenslängd). Därefter lagrades balkarna i 20 °C samt 50 % RF och längdändringen mättes efter 14, 21, 35, 63, 119 och 231 dygns ålder.



Figur 7. Foton visande provning av krympning enligt SS 137215. Till vänster de tre krympformarna (en packad med 16/32 sten), och till höger mätriggen.

3.3 Vidhäftning

Betongens vidhäftning till armeringen har mätts genom utdragsprovning av ett $\varnothing 16$ mm armeringsjärn (K500BT) som gjutits in i en kub med kantlängderna 200 mm. Armeringens vidhäftningszon på 50 mm längd begränsades med ett 150 mm långt plaströr (se Figur 8). Provnigen utfördes på tre kuber per betongsammansättning efter ca 28 dygns ålder, där dragkraft, tid och deformation registrerades. För utförligare beskrivning av metoden se Magnusson (2000) och fib (2000).

Vidhäftningshållfastheten (τ_b) hos armeringen har beräknats enligt:

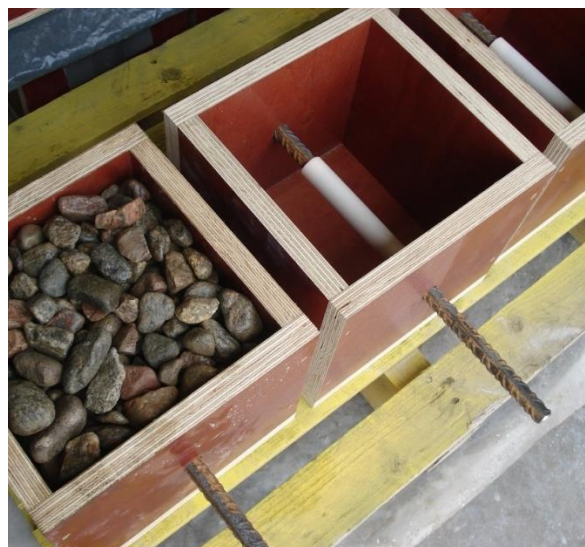
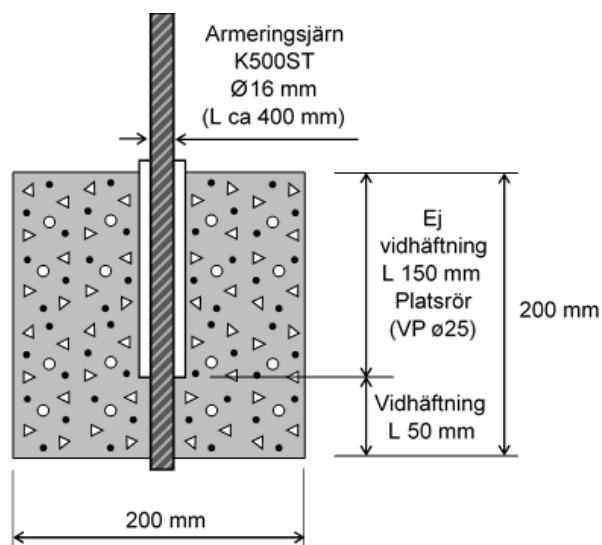
$$\tau_b(s) = \frac{N(s) \cdot 1000}{\pi \cdot D \cdot l_e} \quad [\text{mm}]$$

N = Dragkraft [kN]
D = Diameter (nominell) armeringsjärn [mm]
= 16 mm
l_e = längd vidhäftningszon [mm]
= 50 mm

Den normaliserade vidhäftningshållfastheten (enligt MC 2010, fib 2013) har beräknats enligt:

$$= \frac{\tau_{b,max}}{\sqrt{f_c}} \quad [-]$$

$\tau_{b,max}$ = Vidhäftningshållfasthet (max.) [MPa]
f_c = Tryckhållfasthet (cylinder) [MPa]



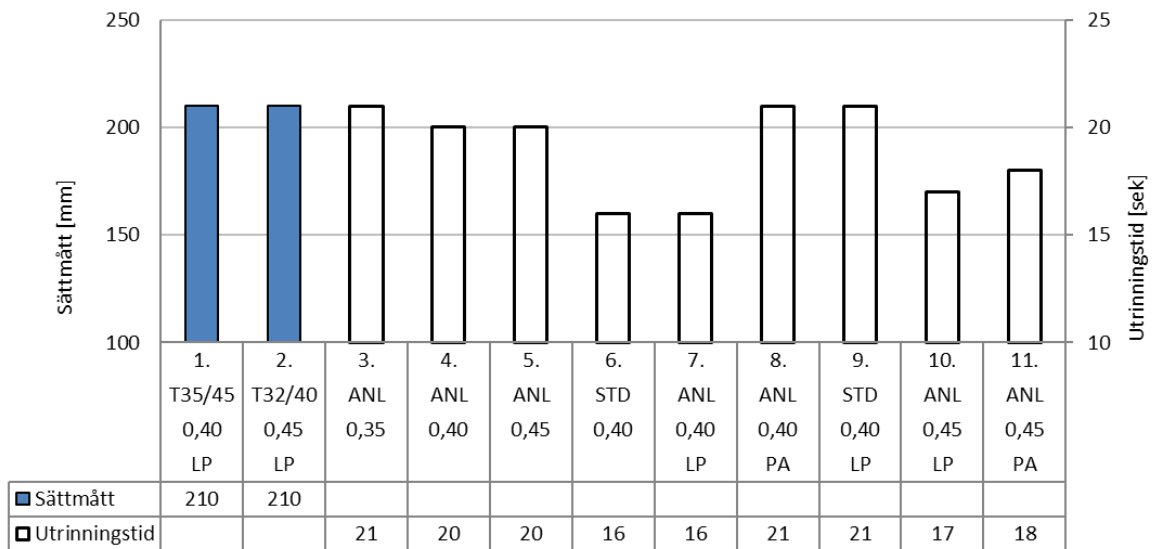
Figur 8. Till vänster principiell skiss över provkroppen, och till höger foto visande kubformen med armeringsjärn och plaströr monterat.

4 HUVUDSTUDIE – RESULTAT

En sammanställning av resultat från provningar av konsistens, lufthalt, tryckhållfasthet, motstånd mot kloridinträngning (kloridmigration), frostresistens (saltfrostangrepp), krympning och vidhäftning mellan betong och armering redovisas nedan.

4.1 Konsistens

Konsistensen har bestämts som sättmått (enligt SS-EN 12350-2) eller uttrinningstid (för 1,0 liter cementbruk genom en trätt med 12,7 mm hål enligt ASTM C939). Sättmättet har bestämts för referensbetongerna (blandning 1-2) och uttrinningstiden har bestämts för cementbruk avsedda för stenfyllnadsbetong (blandning 3-11). Riktvärdet för konsistensen var sättmått motsvarande S4 (160-210 mm) för referensbetongerna respektive 15-20 sekunder uttrinningstid för cementbruken. Konsistensen för de olika blandningarna redovisas i *Figur 9*. Skillnaden i uttrinningstid för de olika bruken kan kopplas till typ av cement, lufthalt samt sammansättning (*vct*, flytmedelsdosering, mm).

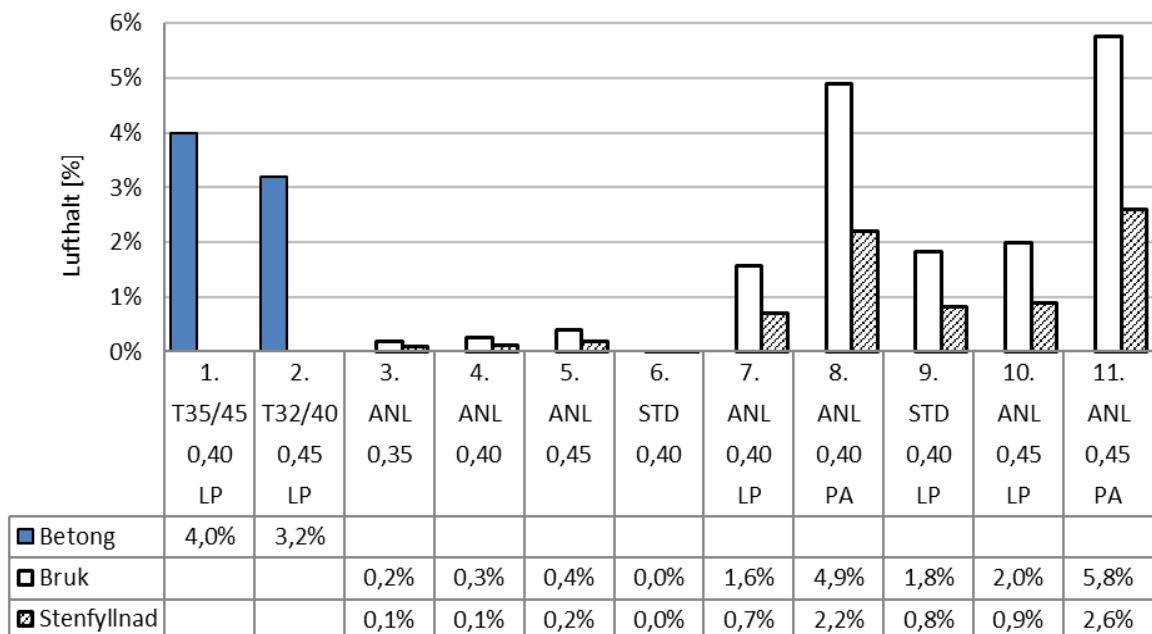


Figur 9. Mätresultat konsistens för de två referensbetongerna (sättmått) och utrinningstid för de nio bruken.

4.2 Lufthalt

Referensbetongernas (blandning 1-2) lufthalt mättes med lufthaltsmätare (tryckmetoden enligt SS-EN 12350-7). För cementbruken (blandning 3-11) beräknades lufthalten från uppmätt densitet (enligt SS-EN 12350-6 med 404,0 ml kärl). För den stenfyllnadsbetongen (nr 3-11) uppskattades lufthalten genom att anta att stenskelettet (16/32 mm) hade en hålrumshalt på ca 45 % (baserat på dess egenpackning).

Resultaten för de olika blandningarna redovisas i Figur 10.

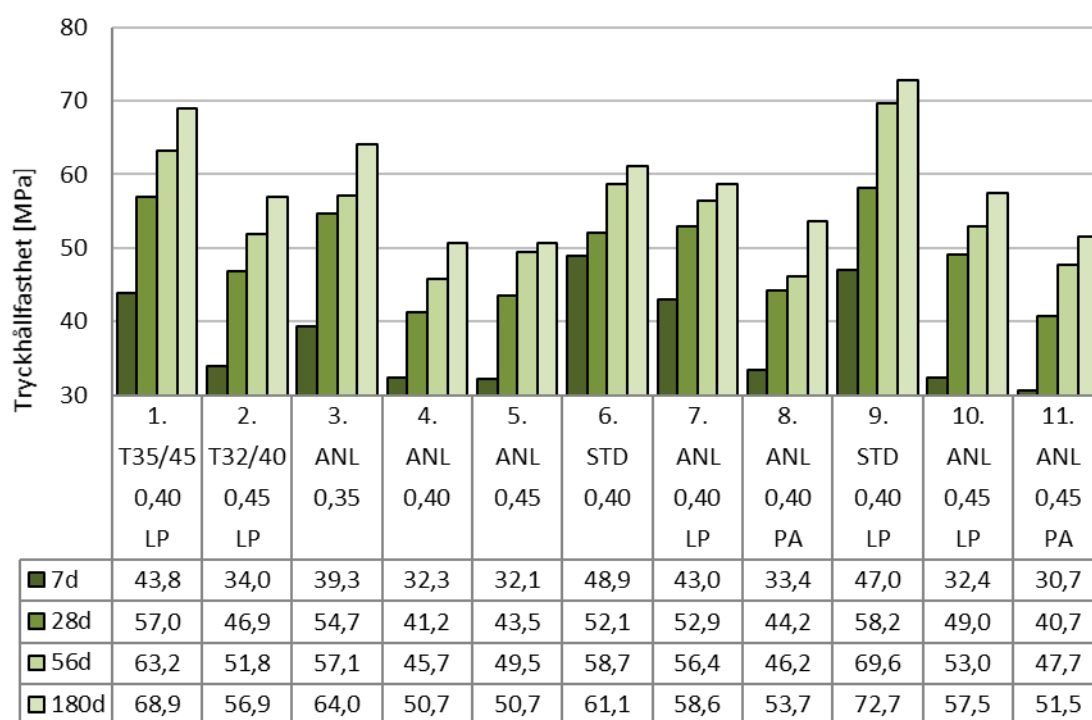


Figur 10. Uppmätt lufthalt för de två referensbetongerna, samt beräknad från densiteten för de nio bruken och sedan omräknat för stenfyllnadsbetongerna (antaget 45% hålrum).

I *Figur 10* framgår att lufthalten i stenfyllnadsbetongerna varierar en hel del. Målet var att få en lufthalt i betongen på minst ca 3 %, vilket då skulle motsvara drygt det dubbla i enbart bruket. Men då brukets konsistens var mycket lös (krävs för god utfyllnad) var luften svår att stabilisera i bruket. Med fysisk luft (PA) uppvisade bruken betydligt högre lufthalt än med luftporbildande tillsatsmedel (LP).

4.3 Tryckhållfasthet

Provningsen av tryckhållfasthet, både referens- och stenfyllnadsbetong, har gjorts på utborrade cylindrar (med längden 120 mm och diametern 120 mm) som vattenlagrats fram till provning vid 7, 28 och 56 dygns ålder (två cylindrar vid respektive ålder). Resultaten för de olika betongerna redovisas i *Figur 11*, där även tryckhållfastheten efter 180 dygn finns redovisad.



Figur 11. Uppmätt medeltryckhållfasthet på utborrade cylindrar för samtliga betonger, där de två första är referensbetonger och resterande nio är stenfyllnadsbetonger.

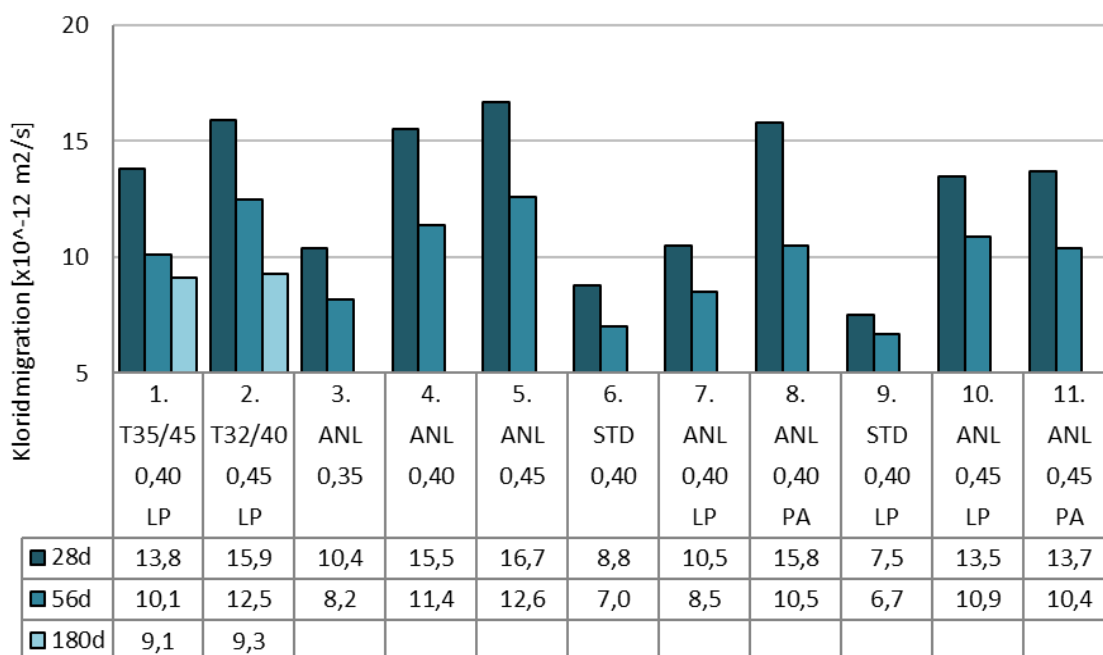
I *Figur 11* framgår att uppmätta tryckhållfastheter varierar en del mellan de olika betongsammansättningarna. Detta kan delvis kopplas till skillnader i lufthalt i betongen. Även vidhäftningen till den grövre ballasten kan vara en påverkande faktor, då naturstenen (16/32 mm) hos stenfyllnadsbetongen (blandning nr 3-11) tenderade att ha en yta som gav en försvagad gränsszon mellan den grova ballasten och cementpastan. Eventuella mikrosprickor i bruket, av krympningen i kombination med stenens interna mothåll, skulle även kunna påverka hållfastheten negativt.

Betong med vct 0,40 utan lufttillsats förväntas klara C40/50 (blandning 4 och 6), och C35/45 med luft (blandning 1, 7, 8 och 9). Med vct 0,45 utan luft C35/45 (blandning 5), och C32/40 med luft (blandning 2, 10 och 11). Med vct 0,35 utan luft minst C45/55 (blandning 3). Noterbart är att tryckhållfastheten för blandning 4 blev betydligt lägre än förväntat. Detta antas främst vara orsakat av en försvagad gränsszon mellan den grova ballasten och cementpastan samt mikrosprickor i cementpastan. Även blandning 3, 5 och 8 hade lägre hållfasthet än förväntad, men då bara strax under.

4.4 Motstånd mot kloridinträngning

Motståndet mot kloridinträngning har mätts på 50 mm tjocka skivor (3 st) som sågats ur utborrade cylindrar med diametern 100 mm, som vattenlagrats fram till provning vid 28, 56 dygns ålder. Provningen är gjord enligt NT Build 492, och redovisas som kloridmigrationskoefficient (D_{RCM}) i *Figur 12*. Motståndet mot kloridinträngning är omvänt proportionellt mot D_{RCM} , vilket betyder att motståndet ökar med minskande D_{RCM} . Det finns inga direkta riktvärden på D_{RCM} , men för att säkerställa livslängden i aggressiv miljö (ex. tösaltade eller marina armerade betongkonstruktioner) föreskrivs ibland en övre gräns på $D_{RCM} \leq 5,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ vid 180 dygns ålder, se t.ex. Tang & Löfgren (2016).

Som väntat visar resultatet på att lägre vct ger lägre D_{RCM} (vilket betyder ökad täthet mot kloridinträngning). Dessutom hade de använda cementen olika effekt, där Cemex Standardcement gav betydligt lägre D_{RCM} än Cementa Anläggningscement.



Figur 12. Betongernas motstånd mot kloridinträngning, uppmätt som kloridmigrations-koefficient D_{RCM} enligt NT Build 492 vid 28 och 56 dygns ålder (samt 180 dygn för de två referenserna).

Skillnaden i kloridmigrationskoefficient kan främst förklaras av typ av cement och *vct*. För stenfyllnadsbetongerna har även eventuell sprickbildning i cementpastan och att gränssonen runt vissa av de grova ballastkornen var försvagad påverkat kloridmigrationskoefficienten

Ett exempel på hur en försvagad gränsson mellan grov ballast och cementpasta kan påverka visas i . Den bristfälliga gränssonen har här fungerat som en väg in i betongen för klorider vid provning av kloridmigration.



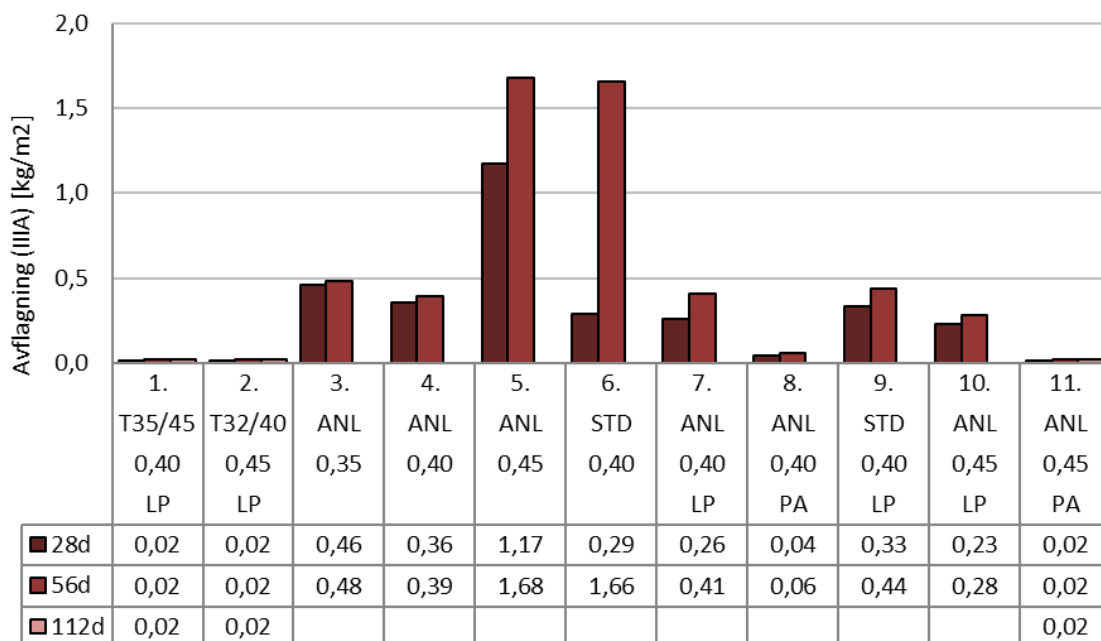
Figur 13. Foto visande provkropp sågad inför mätning av inträngningsdjup av klorider för bestämning av D_{RCM} . På bilden kan ses tecken på bristfällig vidhäftning till stenen.

4.5 Frostresistens

Betongens frostresistens har bestämts på fyra utborrade cylindrar med diametern 120 mm, enligt förfarande IIIA i SS 137244 (sågad yta på cylindrar med 3,0 % NaCl-lösning som frysmedium). Resultatet från provningen redovisas i *Figur 14* som ett medelvärde för alla fyra provkroppar.

För att uppfylla "God" frostresistens är kravet max 0,50 kg/m² i avflagnings efter 56 dygn samtidigt som kvoten mellan avflagnings efter 56 och 28 dygn är mindre än 2,0 (eller enbart max 0,50 kg/m² efter 112d). För "Acceptabel" frostresistens är kravet max 1,00 kg/m² efter 56 dygn samtidigt som kvoten 56/28d är mindre än 2,0 (eller enbart max 1,00 kg/m² efter 112d).

Tanken var att alla betonger skulle frysprovats med förlängd provning till 112 frysning/upptiningscykler (istället för det normala 56 cykler). Efter en tid hade flertalet av provkropparna med stenfyllnadsbetonger problem med läckage av frysmedium, varför provningen för dessa (blandning 3-10) avbröts efter 56 frysning/upptiningscykler. En förklaring till läckaget är den bristfälliga gränsszon till naturstenen som kunde observeras (se). Därför gjordes förlängd frysprovning till 112 cykler enbart för referensbetongerna (blandning 1 och 2) samt stenfyllnadsbetongen med v_{ct} 0,45, blandad med Cementa Anläggningscement och fysisk luft (blandning 11). Blandning 11 var också den stenfyllnadsbetong som hade högst lufthalt (se *Figur 10*). På motsvarande sett uppvisade de betonger med låg lufthalt störst avflagnings. Förutom referensbetongerna (blandning 1 och 2) klarade enbart stenfyllnadsbetongerna med fysisk luft (PA, blandning 8 och 11) ”Mycket god” frostresistens (max 0,1 kg/m² avflagnings efter 56 cykler). I övrigt klarade alla blandningar utom blandning nr 5 och 6 ”God” frostresistens, trots att lufthalten i betongen låg under 3 %.



Figur 14. Betongernas frostresistens, redovisat som ett medel av fyra provkroppar provade enligt förfarande IIIA i SS 137244.

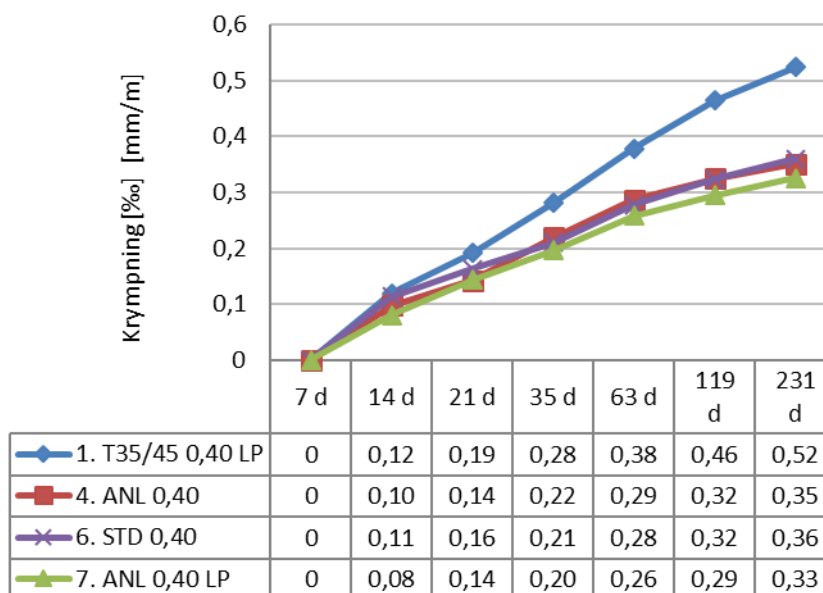
4.6 Krympning

Betongens fria krympning har mätts enligt SS 137215, och resultatet redovisas i *Figur 15* som ett medel av tre balkar. Mätningen är gjord på ett urval av betongerna med v_{ct} 0,40 (blandning 1, 4, 6 och 7). Normalt ligger krympningen på ca 0,6 ‰ (231 dygn), och för stenfyllnadsbetongerna är målet att uppnå en lägre krympning än detta. Med en lägre krympning minskar också risken för sprickbildning, vilket i sin tur innebär att mängden sprickarmering i betongen kan minskas.

Uppmätt krympning för stenfyllnadsbetongerna (blandning 4, 6 och 7) var likvärdig, med en medelkrympning på 0,35 ‰ efter 231 dygn. Detta motsvarar en minskning med ca 30 % jämfört med krympningen för referensbetongen (0,52 ‰ för blandning 1).

Cementbruket i stenfyllnadsbetongerna har relativt stor krympning, men stenskelettet fungerar som ett internt mothåll för denna krympning. Detta kan resultera i att mikrosprickor uppkommer i bruket efter en tid, vilket möjligtvis kan påverka betongens hållfasthet och beständighet negativt, såvida inte självläkning kan ske. Denna typ av sprickbildning kan ses i vänstra delen av *Figur 16*, där en av balkarna med stenfyllnadsbetong som vattenlagrats har torkat lätt på ytan för att tydliggöra sprickorna.

Vid formytan visade sig bruket ha svårt att helt fylla ut, vilket kan ses i den högra delen av *Figur 16*. Detta är troligen mer av ett estetiskt problem än att det påverkar stenfyllnadsbetongens egenskaper negativt.



Figur 15. Uppmätt krympning, redovisat som ett medel av tre gjutna balkar (SS 137215).



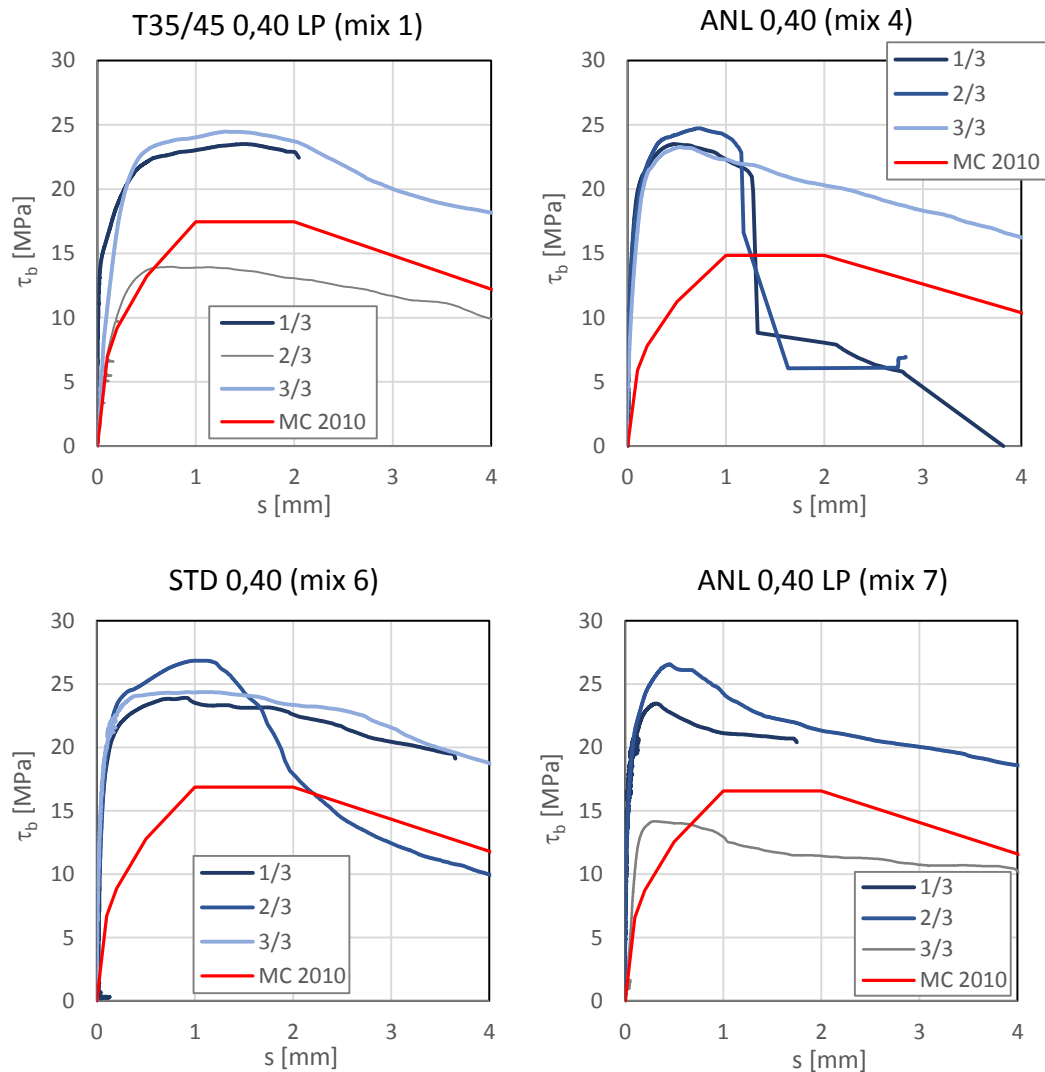
Figur 16. Till vänster foto visande mikrosprickor i balk med stenfyllnadsbetong, som vattenlagrats fram till krympmätning efter 231 dygn. Till höger foto som visar hur stenen exponeras i formytan av att bruket inte helt fyllt ut vid ytan.

4.7 Lokal vidhäftning

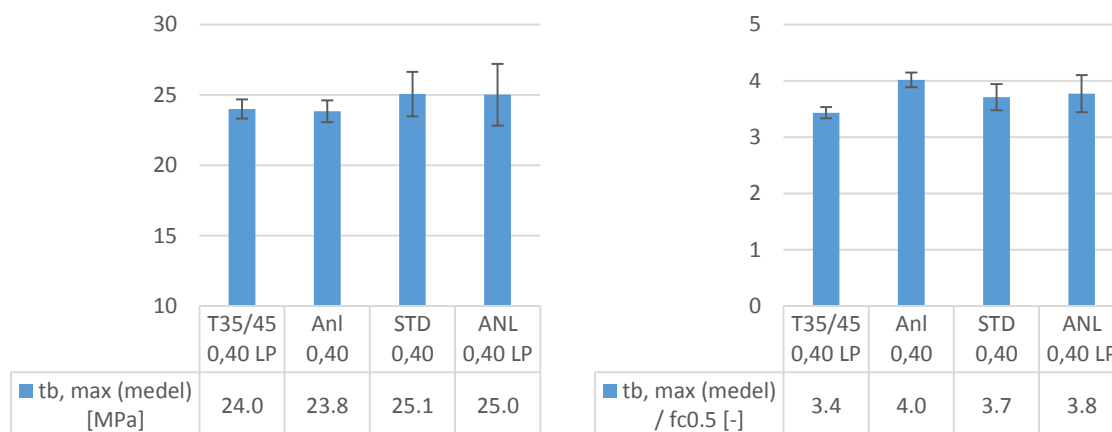
Betongens vidhäftning till armeringen har mätts på kuber med ingjutna armeringsjärn. I *Figur 17* redovisas vidhäftningsspänningen (τ_b) som funktion av armeringsstångens glidning (s) för respektive provkropp. I *Figur 18* redovisas den maximala vidhäftningshållfastheten, samt kvoten mellan vidhäftningshållfastheten och roten av tryckhållfastheten ($\tau_{b,max}/\sqrt{f_c}$). Mätningen är gjord på ett urval av de betonger med vct 0,40 (mix 1, 4, 6 och 7).

Vidhäftningen kan beräknas enligt *fib Model Code for Concrete Structures, MC 2010* (*fib*, 2013). Enligt MC 2010 (*fib*, 2013) kan $\tau_{b,max}$ antas vara $2,5 \times \sqrt{f_c}$ om utdragsbrott sker (ej spjälkning) och om god vidhäftning föreligger. I *Figur 18* jämförs uppmätt vidhäftnings-glidningssambandet med det enligt MC 2010 (*fib*, 2013). Som framgår av resultaten så uppvisar alla resultat en högre vidhäftning än vad som antas i MC 2010 (*fib*, 2013). För blandning 1 och 7 uppstod dock problem vid provningen som gör att provkropp 2/3 för blandning 1 och 3/3 för blandning 7 erhöll betydligt lägre vidhäftning. Detta tros bero på att dessa prover råkade bli belastade i samband med fastsättning i belastningsriggen. Det som kan noteras är dock att för blandning 4 (med Cements Anläggningscement vct 0,40) så erhöles för två av proverna ett sprödare beteende och en viss spjälkning skedde. I *Figur 18* redovisas maximal vidhäftningshållfasthet (medelvärde) samt kvoten mellan vidhäftningsspänning och roten ur tryckhållfastheten. Med undantag av blandning 4 (med Cements Anläggningscement vct 0,40) så kan det konstateras att det inte är någon tydlig skillnad i vidhäftningsegenskaper mellan konventionell betong och stenfyltnadsbetongen. Avvikelsen för

blandning 4 (med Cementa Anläggningscement *vct* 0,40) kan bero på den väsentligt lägre tryckhållfastheten för denna betong.



Figur 17. Uppmätt lokalt vidhäftnings-glidningssamband. Resultaten redovisas för respektive betong (4 st) och provkropp samt jämfört med MC 2010 (fib, 2013).



Figur 18. Till vänster medelvärdet av maximal vidhäftningshållfasthet för armeringen ($t_{b, \max(\text{medel})}$), och till höger kvoten mellan vidhäftningshållfasthet och roten ur uppmätt tryckhållfasthet ($t_{b, \max(\text{medel})} / \sqrt{f_c}$). (För T35/45 0,40 LP (mix 1) och ANL 0,40 LP (mix 7) är medelvärdet baserat på två prover (avvikande resultat har försumrats).



Figur 19. Foto visande spräckt provkropp efter provning av vidhäftning till armeringen. Här kan också observeras en viss bristfällig vidhäftning till stenen som kan ge en försvagad gränsszon.

5 SAMMANFATTANDE KOMMENTARER

5.1 Allmänt

Injekterings- och stenfyllnadsbetong bygger på principen där en grövre ballastfraktion först placeras och kompakteras i formen, varefter ett cementbruk fylls i hålrummet som finns hos stenskelettet. Vid injekteringsbeton tryck bruket in underifrån medans stenfyllnadsbetong bygger på att bruket fylls på uppifrån och med hjälp av gravitationen fyller ut stenskelettet. Till skillnad från stenfyllnadsbetong möjliggör injekteringsbetong högre utfyllnad och större gjuttjocklek eftersom bruket istället trycks in i hålrummet mellan stenarna.

I detta projekt har egenskaper hos stenfyllnadsbetong studerats. Utgångspunkt har varit att använda delmaterial tillgängliga vid en typisk betongfabrik, d.v.s. cement, sand, grov ballast och tillsatsmedel. Cementbruket har blandats i vanliga blandare på en typisk betongfabrik, dvs. frifalls- eller tvångsblandare, och transporteras till arbetsplatsen med roterbil. Vid gjutning skall cementbruket av sin egen vikt rinna ner och kunna fylla ut ett lager av förpackad grov ballast ("stenskelett"). Detta ställer krav på brukets konsistens, men även på storlek, kornform och gradering hos stenen för stenskelettet. Cementbruket behöver ha en tillräckligt lättflytande konsistens och den packade stenen ha ett öppet hålrum.

Projektet inleddes med två förstudier för att bestämma lämpliga sammansättningar på stenskelettet och cementbruket i stenfyllnadsbetongen.

Resultaten från den första förstudien visar att med krossad sten som användes i försöken uppnåddes inte den öppna struktur som behövs för god utfyllnad av stenskelettet. Viktiga faktorer visade sig vara storlek, egenpackning, ytbeskaffenhet och kornform. Utfyllnaden var inte tillräcklig med krossad sten med fraktionerna 8/16 mm respektive 16/25 mm, då kontaktytan mellan stenarna blev för stor och allt för smala passager skapades för bruket vilket delvis berodde på kornformen (flisig och flakig). Den grövre stenen fungerade dock bättre än den finare. Av denna anledning valdes istället att gå vidare med en natursten. Det visade sig att naturstenen hade en hel del ytbeläggning av finmaterial, varför stenen behövde tvättas före användning. Dessa ytbeläggningar var dock svåra att tvätta bort helt trots att mycket vatten spolades på stenen, vilket tyder på att det sannolikt är leror som sitter på ytorna.

Resultaten från den andra förstudien visade att cementbruket som ska fylla stenskelettet måste ha en tillräckligt lättflytande konsistens men också en stabilitet som möjliggör luftporer och för att undvika separation. Brukets *vct* behöver även vara lågt för att klara krav på betongsammansättning för tösaltade konstruktioner (exponeringsklasser XD3 och XF4) och för att få tillräckligt hög hållfasthet. Bruket var sammansatt av cement, tillsatsmaterial (silikastoft och kalkfiller), tillsatsmedel (luft och flyt) samt sand/fingrus. Viktfördelningen mellan cement/kalk/sand blev ca 1,0/0,5/0,5. Dessutom innehöll cementbruket 6 % silika av cementvikten, samt ungefär

dubbel dosering av luftporbildande och superplasticerande tillsatsmedel jämfört med motsvarande konventionell betong.

I den huvudsakliga studien undersöktes: (1) betongens frostresistens (enligt SS 137244); (2) motstånd mot inträngning av klorider (kloridmigration enligt NT Build-492); (3) krympning (enligt SS 137215); (4) tryckhållfasthet (enligt SS-EN 12390-3); samt (4) betongens vidhäftning till armeringen.

Provningarna har gjorts på elva olika betongsammansättningar. Som referens användes två traditionella anläggningsbetonger (*vct* 0,40 och 0,45), och till cementbruket i stenfyllnadsbetong provades olika *vct* (0,35, 0,40 och 0,45) och två olika cement (Cementa Anläggningscement och Cemex Standardcement). Stenfyllnadsbetongerna tillverkades utan och med traditionellt luftporbildande tillsatsmedel och ”fysisk” lufttillsats.

5.2 Resultat provningar

Genomförda provningar visade följande:

- 1. Stenskelett i stenfyllnadsbetong**, där ett stenskelett med öppen struktur eftersträvades.
 - För stenskelettet lämpar sig en grov och relativt strikt (ensgraderad) fraktion med naturligt rundade stenar, exempelvis 16/32 mm. En finare fraktion eller krossad sten har svårt att skapa det öppna hålrum som krävs för god utfyllnad med bruket.
 - För att säkerställa vidhäftningen till stenen behöver den vara fri från finmaterial och leror. En naturligast rundad sten kan kräva mer omfattande rengöring innan den kan användas.
 - En krossad sten kan vara möjlig att använda förutsatt att den är någorlunda ensgraderad och har en kornform som inte skapar allt för stora kontaktytor och smala passager.
- 2. Cementbruket för stenfyllnadsbetong**, där ett cementbruk som är tillräckligt lättflytande men inte separerar samtidigt som lufthalten är tillräckligt hög.
 - Det visade sig svårt att skapa ett stabilt luftporsystem i cementbruket. Med den lättflytande konsistens som krävdes (för utfyllnad) var det svårt att få ett stabilt luftporsystem med traditionella luftporbildande tillsatsmedel, trots relativt höga doseringar. Med användning av luftporbildande tillsatsmedel blev lufthalten låg i cementbruket (ca 1,0 %). Med ”fysisk” luft blev lufthalten i cementbruket högre (ca 2,5 %). Detta kan jämföras med den frystestade referensbetongen som hade ca 4,0 %. Utan användning av luftporbildare blev lufthalten i cementbruket nära 0 %.
 - Konsistensen hos cementbruket visade sig vara avgörande för hur väl stenskelettet i stenfyllnadsbetongen fylldes ut. En bra metod att säkerställa att bruket har tillräckligt lös konsistens är att mäta dess

uttriningsstid i en tratt eller liknande. Ett riktvärde kan vara att 1 liter bruk bör rinna ut genom en 12,7 mm öppning på ca 15-20 sekunder.

3. Allmänna noteringar kring Stenfyllnadsbetong.

- Mikrosprickor i bruket observerades hos den fuktiga men yttorra betongen, något som antas ha orsakats av hög krympning hos bruket i kombination med internt mothåll av stenskelettet.
- En försvagad gränsszon mellan sten och bruk kunde ses när betongen spräcktes upp, vilket i detta fall skulle kunna förklaras av otillräcklig tvättning av stenen från leror i kombination med dess relativt släta ytor. Med försvagad gränsszon runt stenarna och mikrosprickor i bruket riskerar betongen att få lägre tryckhållfasthet samt försämrade motstånd mot inträngning av skadliga ämnen (t.ex. klorider).
- Vid formytan visade det sig att bruket kan ha svårt att helt fylla ut hålrum vid ytan. Detta är dock mer ett estetiskt problem än att det påverkar egenskaper hos stenfyllnadsbetongen negativt.
- Principen med att bruket enbart av sin egenvikt skall kunna rinna ner och fylla ut stenskelettet begränsar möjlig gjuttjocklek. Erfarenheter från projektet visar att beroende på brukets flytförmåga och den packade stenens hålrum, möjliggör stenfyllnadsbetong en gjuthöjd på upp till uppskattningsvis 200-300 mm. För större gjuthöjder med ett förpackat stenskelett bör cementbruket istället tryckas in, dvs. injekteringsbetong.

4. Resultat från genomförda provningar

- Tryckhållfastheten visade sig bli något lägre för stenfyllnadsbetongerna jämfört med referensbetongerna. Dessutom visade det sig att tryckhållfastheten för blandning 4 (med Cementa Anläggningscement *vct* 0,40) blev väsentligt lägre än vad som kan förväntas vid detta *vct*. Även varierande hållfasthet kunde noteras. En förklaring till uppmätta variationer i tryckhållfasthet antas vara olika lufthalt, bristfällig gränsszon till ballasten och mikrosprickor.
- Kloridmigrationskoefficienten D_{RCM} (tätheten mot inträngning av klorider) varierade något. Det finns ingen tydlig skillnad i uppmätta D_{RCM} mellan stenfyllnads- och referensbetongerna, dvs. beständigheten är minst lika god för en stenfyllnadsbetong jämfört med motsvarande Anläggningsbetong. Det visade sig vara en skillnad i D_{RCM} beroende på använt cement, där D_{RCM} för betongerna med Cemex standard blev ungefär halverad jämfört med de med Cementa Anläggningscement.
- Frostresistensen (med avseende på saltfrostangrepp) var mycket god för de betonger som hade någorlunda hög lufthalt, dvs. båda referenserna (blandning 1 och 2) och de stenfyllnadsbetongerna som hade fysisk luft (blandning 8 och 11). För fyra stenfyllnadsbetonger

blev frostresistensen god (blandning 3, 4, 7, 9 och 10) och för två ej acceptabel (blandning 5 och 6). En förklaring till den mindre goda frostresistensen är att luftporsystemet i betongerna blev mindre bra (främst för låg lufthalt).

- Den uppmätta krympningen för stenfyllnadsbetongerna var generellt ca 30 % lägre än referenserna. Uppmätt krympning för referensen var 0,52 ‰ (blandning 1) relativt 0,35 ‰ för stenfyllnadsbetongerna (medel för blandning 4, 6 och 7).
- Vidhäftningen mellan betongen och armeringen och samband mellan vidhäftning och glidning uppvisade generellt förväntat beteende. Ingen skillnad mellan konventionell betong och stenfyllnadsbetong kunde observeras. Enda avvikelserna var för blandning 4 (med Cementa Anläggningscement *vct* 0,40) där spjälkning uppstod och detta tros bero på den väsentligt lägre tryckhållfastheten för denna betong.

Sammanfattningsvis visar resultaten från genomförda undersökningar att det finns potential för stenfyllnadsbetong. Det måste dock säkerställas att en fullständig utfyllnad sker, bl.a. genom att tillse att stenen i stenskelettet är har lämplig kornform och gradering samt att den är helt ren från finmaterial, leror och liknande. Cementbruket behöver också ha tillräckligt lättflytande konsistens för att få god utfyllnad av cementbruk i stenfyllnadsbetongen. I konstruktionsdelar där det krävs frostresistent stenfyllnadsbetong är inblandning av fysisk luft att föredra framför luftporbildande tillsatsmedel för att skapa hos god frostresistens hos betongen.

Resultaten visar också att naturligt rundad sten har en kornform som är bättre lämpad för stenfyllnadsbetong än krossad sten. Men krossad sten är betydligt vanligare och lättare att tillgå, varför denna skulle vara att föredra. Genom att kubisera eller på annat sett få till en krossballast vars geometri inte skapar allt för stora kontaktytor och smala passager i stenskelettet skulle även denna kunna användas. Detta är något som skulle behöva undersökas vidare för användning till stenfyllnadsbetong.

6 REFERENSER

ASTM C230 (2014), *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*.

ASTM C939 (2016), *Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*.

fib (2000), *Bond of reinforcement in concrete*, fib Bulletin 10, the International Federation for Structural Concrete, Lausanne.

fib (2013), *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin Germany.

Lindvall A (2012), *Injekteringsbetong - Mekaniska och beständighets egenskaper*, Slutrapport från SBUF-projekt 12550, Thomas Concrete Group, Göteborg, 2012.

Magnusson J (2000), *Bond Behavior of Deformed Bars in High-Strength and Normal-Strength Concrete*, PhD thesis Chalmers university of technology.

NT Build-492 (1999), *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, Nordtest method.

SS 137003 (2015), *Betong - Användning av EN 206 i Sverige*, SIS förlag.

SS 137215 (2000), *Betongprovning - Hårdnad betong - Krympning*, SIS förlag.

SS 137244 (2005), *Betongprovning - Hårdnad betong - Avflagnings vid frysning*, SIS förlag.

SS-EN 1015-3 (1999), *Bruk - Del 3: Färskt murbruk - Bestämning av konsistens med sättkon*, SIS förlag.

SS-EN 12350-2 (2011), *Provning av färsk betong - Del 2: Sättnmätt*, SIS förlag.

SS-EN 12350-6 (2011), *Provning av färsk betong - Del 6: Densitet*, SIS förlag.

SS-EN 12350-7 (2011), *Provning av färsk betong - Del 1: Provtagnings*, SIS förlag.

SS-EN 12390-2 (2012), *Provning av hårdnad betong - Del 2: Tillverkning och härdning av provkroppar för hållfasthetsbestämning*, SIS förlag.

SS-EN 12390-3 (2013), *Provning av hårdnad betong - Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar*, SIS förlag.

SS-EN 12504-1 (2012), *Provning av betong i färdiga konstruktioner - Del 1: Borrkärnor - Uttag, undersökning och tryckprovning*, SIS förlag.

SS-EN 445 (2007), *Betongkonstruktioner - Bruk för injektering av foderrör för spännkablar - Provning*, SIS förlag.

Tang, L. & Löfgren, I. (2016), *Evaluation of Curability of Concrete with Mineral Additions with regard to Chloride-Induced Corrosion*, Report No. 2016-4, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2016.