

Rapport

R-17-21

December 2017



Utveckling av konstruktionsbetong till kassunerna i 2BMA

Björn Lagerblad

Patrick Rogers

Carsten Vogt

Per Mårtensson

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

ISSN 1402-3091

SKB R-17-21

ID 1589975

December 2017

Utveckling av konstruktionsbetong till kassunerna i 2BMA

Björn Lagerblad, Lagerblad Konsult

Patrick Rogers, CBI Betonginstitutet

Carsten Vogt, Betong och Stålteknik

Per Mårtensson, Svensk Kärnbränslehantering AB

Nyckelord: Concrete, 2BMA, SFR, SFR3.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

© 2017 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, beläget i Forsmark, har varit i drift sedan 1988 och drivs sedan 1 juli 2009 av Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB. Förvaret är inrymt i berg-rum 50 meter under Östersjöns botten och här lagras driftavfall från svenska kärnkraftverk såväl som från sjukvården och industrin.

Den befintliga anläggningen är dimensionerad för slutförvaring av huvudsakligen driftavfall från de svenska kärnkraftverken. Nu planeras en utbyggnad av anläggningen för slutförvar även av det avfall som kommer att uppstå vid rivning av dessa, SFR3. I denna utbyggnad kommer en sal för medelaktivt avfall, 2BMA, att ingå. Förvarskonstruktionerna i 2BMA utgörs av oarmerade betongkassuner.

För att kunna visa att SKB kan uppföra kassunerna i enlighet med gällande krav för anläggningen har ett utvecklingsprogram omfattande ett antal olika verifieringssteg initierats. Detta utvecklingsprogram omfattar stegen från materialutveckling till och med provgjutning av en representativ sektion av en betongkassun i Äspölaboratoriet och uppföljning av dess egenskaper.

I denna rapport redovisas det inledande utvecklingsarbetet av en betong till kassunerna i 2BMA.

Arbetet tog avstamp i identifierade krav på både den färska och den härdade betongens egenskaper, förutsättningar kopplade till tillverkning och transport av betong samt gjutningens storlek och miljöfaktorer och har omfattat följande huvudsteg:

- Karaktärisering av berggrunden i området för det framtida SFR3 och identifiering av lämpliga täkter för tillverkning av ballast som kan användas under utvecklingsarbetet. Tidigare redovisat i Lagerblad et al. (2016) och sammanfattat i denna rapport.
- Utveckling av betong i laboratorieskala på betonglaboratorium och egenskapsundersökningar. Syftet med detta arbete var att identifiera ett lämpligt grundrecept inför det fortsatta arbetet.
- Blandningsförsök i laboratorieskala på betongstationer eller på betonglaboratorium med de på betongstationerna tillgängliga delmaterialen. Syftet med detta arbete var att undersöka möjligheterna att i efterföljande uppskalningsförsök utnyttja på betongstationerna befintliga delmaterial och därmed undvika materialtransporter inför fullskaleförsöken.
- Tillverkning av betong i fullskala på betongfabrik i Västberga och i Kalmar samt transportsimuleringar, pumptester och egenskapsundersökningar.

De olika undersökningarna har visat följande:

- Det entreprenadberg som uppkommer vid utsprängningen av anläggningen är relativt lämpligt för tillverkning av betongballast. Dock, för att få så bra ballast som möjligt så måste det berg som skall användas som betongballast tas ut selektivt. Bäst ballast fås om berget VSI-krossas så att partiklarna får en mer kubisk form.
- Genom noggrann proportionering av betongens delkomponenter kan en betong som uppfyller samtliga här gällande egenskapskrav tillverkas.
- Betongens arbetbarhet är känslig för mängden mikrobruk. För att erhålla en betong med god arbetbarhet men samtidigt låg krympning och låg värmeavgivning har en kombination av låg cement- och vattenhalt och tillsats av kommersiella kalkstensfiller använts.
- Kalkstensfillern fungerar som en accelerator och påskyndar hydratationsförloppet. För att erhålla en betong med tillräckligt lång öppetid behöver retarder användas.

Nedan sammanställt betongrecept uppfyller samtliga egenskapskrav och rekommenderas för användning vid provgjutningen av en för kassunerna representativ sektion i Äspölaboratoriet.

Komponent	Produkt	Mängd (kg/m ³)
Cement	Degerhamn anläggningscement	320
Inert filler	OmyaCarb 2GU	130
Inert filler	Myanit 10	33,3
Vatten		156,8
Ballast 16–22 mm		393,3
Ballast 8–16 mm		425,7
Ballast 4–8 mm		92,0
Ballast 0–4 mm		840,9
Superplasticerare	MasterGlenium Sky 558	1,30
Superplasticerare	Master Sure 910	1,70
Retarder	Master Set RT 401	0,96 (0,3 % av cementvikten)

Summary

The final repository for radioactive waste, SFR, located in Forsmark, has been in operation since 1988 and has been operated since 1 July 2009 by Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB. The repository is located in rock vaults 50 meters below the sea bed of the Baltic Sea, and stores waste from Swedish nuclear power plants as well as from health care and industry.

The existing facility is designed for final disposal of mainly operational waste from the Swedish nuclear power plants. At present, an extension of the repository is being planned for disposal also of the waste that will arise during the dismantling of the Swedish nuclear power plants, SFR3. In this extension, a rock vault for intermediate-level waste, 2BMA, will be included. The repository structures in 2BMA consist of unreinforced concrete caissons.

In order to demonstrate that SKB is able to construct the concrete caissons in accordance with requirements under current prerequisites, a development program comprising a number of different development and verification steps has been initiated. This development program includes the steps from material development through casting of a representative section of a concrete caisson in the Äspö Laboratory and monitoring of its properties.

This report presents the initial development work of a concrete to the caissons in 2BMA.

The work took off in identified requirements for both the fresh and the hardened concrete properties, the prerequisites related to the manufacture and transport of concrete, as well as the dimensions of the caissons and environmental factors. The program has included the following main steps:

- Characterization of the bedrock in the area of the future SFR3 and identification of suitable quarries that can be used for ballast production during the development work. Previously reported in Lagerblad et al. (2016) and summarized in this report.
- Laboratory scale development of concrete in a concrete laboratory. The purpose of this work was to identify an appropriate basic recipe for the continued work.
- Laboratory scale experiments at concrete production plants or in concrete laboratory with materials available at the concrete production plants. The purpose of this work was to investigate the possibility of utilizing existing material in subsequent up-scaling experiments, thus avoiding material transport before full scale testing.
- Manufacturing of concrete in full scale at concrete plants in Västberga and Kalmar, as well as transport simulations, pump tests and property investigations.

The following conclusions can be drawn from these investigations

- The rock material that is obtained during excavation of the repository can be used for production of concrete ballast. However, in order to ensure a high ballast quality, the rock material to be used in ballast production must be removed selectively. The quality can be further improved if the rock is VSI crushed to give the particles a more cubic shape.
- By accurate proportioning, a concrete that meets all of the present requirements can be manufactured.
- The concrete's workability is sensitive to the amount of micro grout. In order to obtain a concrete with good workability, but at the same time low shrinkage and low heat dissipation, low cement and water content in combination with the addition of commercial limestone fillers have been used.
- The limestone filler acts as an accelerator and speeds up the hydration process. In order to obtain a concrete with a sufficiently long opening time, retarder needs to be used.

The concrete recipe compiled below complies with all the requirements and is recommended for use in the test casting of a representative section of a concrete caisson in the Äspö laboratory.

Component	Product	Amount (kg/m³)
Cement	Degerhamn Anläggningscement	320
Inert filler	OmyaCarb 2GU	130
Inert filler	Myanit 10	33,3
Water		156,8
Ballast 16–22 mm		393,3
Ballast 8–16 mm		425,7
Ballast 4–8 mm		92,0
Ballast 0–4 mm		840,9
Superplasticiser	MasterGlenium Sky 558	1,30
Superplasticiser	Master Sure 910	1,70
Retarder	Master Set RT 401	0,96 (0,3 % of cement weight)

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte och mål	9
1.3	Metodik för utvecklingsarbetet	9
1.4	Rapportens struktur	10
2	Förutsättningar och krav	11
2.1	Slutförvaret kortlivat radioaktivt avfall, SFR	11
2.2	Bergssal för medelaktivt avfall, 2BMA	11
2.3	Förutsättningar för utformning av betongrecept till kassunbetongen	12
2.4	Egenskapskrav	13
	2.4.1 Färsk betong	13
	2.4.2 Härdad betong	13
2.5	Förutsättningar för val av betongens delkomponenter	13
3	Konceptuell modell för proportionering av betong	15
3.1	Översikt	15
3.2	Partikelpackning vid proportionering av betong	15
3.3	Användning av fillermaterial i modern betong	16
3.4	Användning av puzzolaner i modern betong	16
4	Betongballast	19
4.1	Introduktion	19
4.2	Krossat berg som betongballast: kunskapsläge	19
4.3	Testmetoder och undersökningsmetodik	21
	4.3.1 Petrografisk undersökning av ballastmaterialet	21
	4.3.2 Indirekta metoder för karaktärisering av ballast	22
	4.3.3 Reologiska undersökningar av bruksblandningar	23
5	Geologi och förutsättningar för ballastproduktion i SFR-området	29
5.1	Översikt	29
5.2	Bergartstyper i SFR-området och dess egenskaper som betongballast	29
	5.2.1 Petrografisk undersökning av bergartstyperna	29
5.3	Indirekta tester för karaktärisering av ballast	30
	5.3.1 Packning-hållrumshalt.	30
	5.3.2 Flödestal-rinntid	30
5.4	Reologiska undersökningar av mikrobruk	31
5.5	Reologitester av bruksblandningar	33
	5.5.1 Prover från SFR-området	33
	5.5.2 Jämförelse med material från likartat berg	33
	5.5.3 Representativitet hos laboratoriekrossat material	35
	5.5.4 Undersökning av ballast från till SFR närliggande täkter	35
5.6	Effekt av krossningsteknik och vindsiktning	36
	5.6.1 Krossningsteknik	36
	5.6.2 Vindsiktning	36
	5.6.3 Inverkan av krossningsteknik och vindsiktning på bruksreologin	37
5.7	Slutsatser ballast och rekommendation	39
6	Identifiering av grundrecept för kassunbetongen	41
6.1	Analys av egenskapskrav	41
	6.1.1 Hållfasthet	41
	6.1.2 Krympning	41
	6.1.3 Arbetbarhet	42
	6.1.4 Öppethållandetid	42
	6.1.5 Beständighet	43
6.2	Baskoncept för kassunbetongen	43
6.3	Arbetsgång	44

6.4	Använda delmaterial	44
6.4.1	Cement	44
6.4.2	Ballast	44
6.4.3	Filler	45
6.4.4.	Superplasticerare	45
6.4.5	Retarder	46
6.5	Grundrecept vid betongförsöken	46
7	Blandningsförsök i laboratorieskala	47
7.1	Inledande blandningsförsök på CBI	47
7.2	Blandningsförsök på Swerocks betongstation i Västberga inför uppskalning till produktionsskala	48
7.3	Blandningsförsök på CBI med material från Swerocks betongstation i Kalmar inför inkörning av recept inför provgjutning i Äspö.	48
7.4	Blandningsförsök i tombolablandare på Swerocks betongstation i Kalmar	51
7.5	Uppföljande blandningsförsök på CBI	51
7.6	Fortsatta blandningsförsök i tombolablandare vid Swerocks betongstation i Kalmar	52
7.7	Egenskaper hos härdad betong tillverkad med recept 1–24	53
7.7.1	Tryckhållfasthet	53
7.7.2	Krympning	54
7.8	Diskussion blandningsförsök i laboratorieskala	57
8	Uppskalning av recept till produktionsskala	59
8.1	Swerocks betongstation i Västberga	59
8.1.1	Blandning av betongen	59
8.1.2	Transportsimulering	59
8.1.3	Gjutning av monolit	59
8.1.4	Resultat	60
8.1.5	Erfarenheter och slutsatser	61
8.2	Blandningsförsök på Swerocks betongstation i Kalmar	62
8.2.1	Blandning av betongen	62
8.2.2	Egenskaper hos den färska betongen	62
8.2.3	Sammanfattning av blandningsförsök, transportsimulering och pumptester	63
8.2.4	Erfarenheter och slutsatser	64
9	Sammanfattning och slutsatser	67
	Referenser	69
Bilaga A	Superplasticerare	71
Bilaga B	Inverkan av filler i betong	73

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, beläget i Forsmark, har varit i drift sedan 1988 och drivs sedan 1 juli 2009 av Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB. Förvaret är inrymt i berg-rum 50 meter under Östersjöns botten och här lagras driftavfall från svenska kärnkraftverk såväl som från sjukvården och industrin.

Den befintliga anläggningen är dimensionerad för slutförvaring av huvudsakligen driftavfall från de svenska kärnkraftverken. Nu planeras en utbyggnad av anläggningen för slutförvar även av det avfall som kommer att uppstå vid rivning av dessa, SFR3. I denna utbyggnad kommer en sal för medelaktivt avfall, 2BMA, att ingå. Förvarskonstruktionerna i 2BMA utgörs av oarmerade betongkassuner.

För att kunna visa att SKB kan uppföra kassunerna i enlighet med gällande krav under rådande förutsättningar har ett utvecklingsprogram omfattande ett antal olika verifieringssteg initierats. Detta utvecklingsprogram omfattar stegen från materialutveckling till och med provgjutning av en representativ sektion av en betongkassun i Äspölaboratoriet och uppföljning av dess egenskaper.

I denna rapport redovisas det inledande utvecklingsarbetet av en betong till kassunerna i 2BMA. Arbetet tar sin avstamp i vid inlämnande av ansökan om utbyggnad gällande referensutformning och förutsättningar, se SKB (2015) och referenser däri. Senare gjorda förändringar vad gäller anläggningens eller kassunernas utformning har dock inte kunnat beaktas inom utvecklingsarbetets tidsram.

1.2 Syfte och mål

Syftet med det utvecklingsarbete som beskrivs i denna rapport är att utifrån givna förutsättningar vad gäller anläggningens och kassunernas utformning utveckla en betong som uppfyller samtliga identifierade krav vad gäller färsk och härdad egenskaper. Arbetets mål är att rekommendera en betong med väl karakteriserade egenskaper inför efterföljande utvecklings- och verifieringssteg.

1.3 Metodik för utvecklingsarbetet

Arbetet tog avstamp i identifierade krav på både den färsk och den härdade betongens egenskaper, förutsättningar kopplade till tillverkning och transport av betong samt gjutningens storlek och miljöfaktorer.

Arbetet har omfattat följande huvudsteg:

- Karakterisering av ballast i området för det framtida SFR och identifiering av lämpliga täkter för ballast som kan användas under utvecklingsarbetet. Tidigare redovisat i Lagerblad et al. (2016) och sammanfattat i denna rapport.
- Utveckling av betong i laboratorieskala på betonglaboratorium och egenskapsundersökningar. Syftet med detta arbete var att identifiera ett lämpligt grundrecept inför det fortsatta arbetet.
- Blandningsförsök i laboratorieskala på betongstationer eller på betonglaboratorium med de på betongstationerna tillgängliga delmaterialen. Syftet med detta arbete var att undersöka möjligheterna att i efterföljande uppskalningsförsök utnyttja på betongstationerna befintliga delmaterial och därmed undvika materialtransporter inför fullskaleförsöken.
- Tillverkning av betong i fullskala på betongfabrik i Västberga och i Kalmar samt transportsimuleringar, pumptester och egenskapsundersökningar.

1.4 Rapportens struktur

Rapporten är indelad i 9 kapitel och 2 bilagor med följande innehåll:

Kapitel 1. I kapitel 1 presenteras projektets bakgrund, syfte och mål. Här presenteras även rapportens struktur och innehåll.

Kapitel 2. I kapitel 2 redogörs för de för betongutvecklingsarbetet gällande förutsättningarna. Med utgångspunkt i dessa förutsättningar identifieras sedan krav på egenskaperna hos den färska och den härdade betongen. Slutligen presenteras förutsättningar för val av delmaterial för utvecklingsarbetet.

Kapitel 3. I kapitel 3 ges en kortare introduktion kring generell proportionering av betong.

Kapitel 4. I kapitel 4 presenteras en översikt över kunskapsläget rörande användning av krossat berg som betongballast. Utöver detta ges en introduktion till testmetoder för betongballast och undersökningsmetodik.

Kapitel 5. I kapitel 5 presenteras geologi och förutsättningar för produktion av ballastmaterial från entreprenadberget från utsprängningen av SFR-utbyggnaden. Detta kapitel är en sammanfattning av en tidigare inom projektet genomförd studie.

Kapitel 6. I kapitel 6 analyseras betongens egenskapskrav och dessas inverkan på val av delmaterial och betongens sammansättning. Slutligen presenteras ett grundrecept för det inledande utvecklingsarbetet.

Kapitel 7. I kapitel 7 redovisas genomförande och resultat av den betongutveckling som genomförts i laboratorieskala på CBI och vid Swerocks betongstationer i Västberga och Kalmar.

Kapitel 8. I kapitel 8 redovisas genomförande och resultat av blandningsförsök genomförda i produktionsskala vid Swerocks betongstationer i Västberga (Stockholm) och Kalmar. I detta kapitel redovisas även resultat från transportsimuleringar och pumptester.

Kapitel 9. I kapitel 9 redovisas sammanfattning och slutsatser. Slutligen ges en rekommendation rörande sammansättningen av den betong som ska användas vid provgjutning av en för kassunerna representativ sektion i Äspölaboratoriet.

Bilaga A. I bilaga A redovisas en studie av inverkan av olika typer av superplasticerare på betongs egenskaper.

Bilaga B. I bilaga B redovisas en studie av inverkan av tillsats av olika typer av kommersiell filler på betongs hållfasthet. Utöver detta redovisas även en studie rörande inverkan av denna typ av material på hydratationskinetiken.

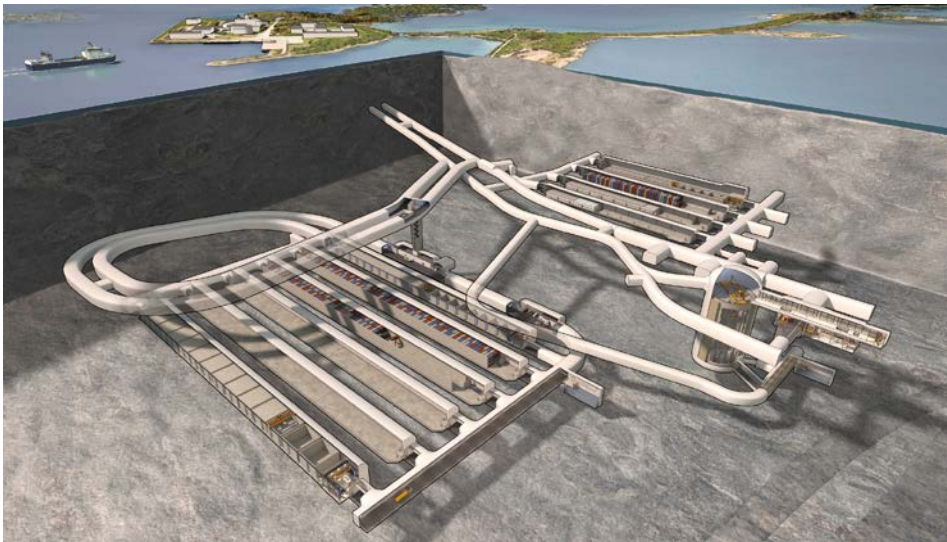
2 Förutsättningar och krav

2.1 Slutförvaret kortlivat radioaktivt avfall, SFR

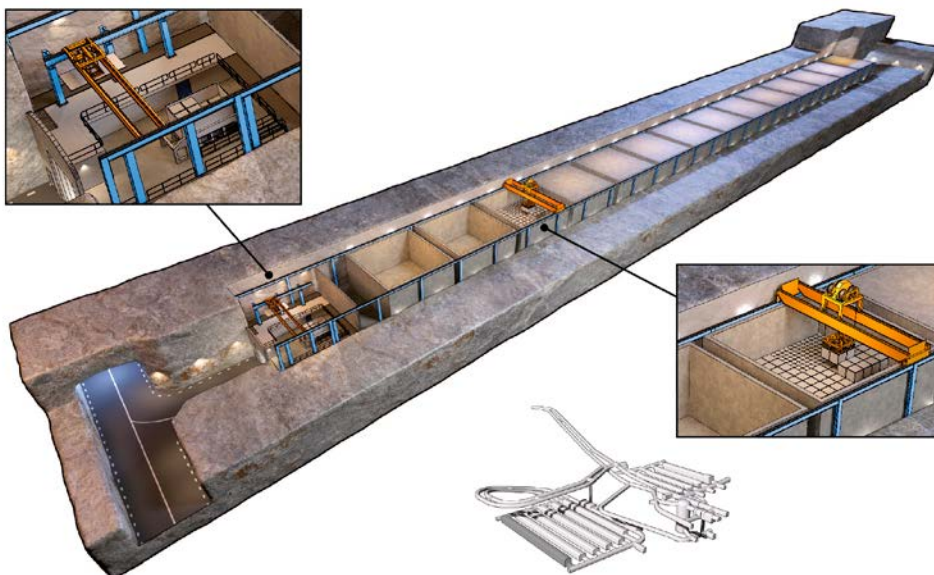
Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall, SFR, är inrymt i berggrum 50 meter under Östersjöns botten och omfattar de fyra bergsalar och den silo som visas i den övre högra delen av figur 2-1. Nu planeras en utbyggnad av anläggningen, SFR3, omfattande totalt sex bergsalar med en total deponeringsvolym om 117 000 m³ vilka visas i den nedre vänstra delen av figur 2-1. Den totala deponeringsvolymen i SFR efter utbyggnaden är 180 000 m³.

2.2 Bergssal för medelaktivt avfall, 2BMA

I SFR3 kommer en sal för medelaktivt avfall, 2BMA, att ingå, figur 2-2. I denna sal planeras ett antal oarmerade betongkassuner att uppföras.



Figur 2-1. Illustration över SFR. Utbyggd del av SFR till vänster och befintligt SFR till höger.



Figur 2-2. Illustration av 2BMA i utbyggd del av SFR.

Kassunerna grundläggs på packad makadam vilket tillåter en viss rörlighet i betongen under hydrata-tionen eller vid uttorkning och vilket därmed kan bidra till en minskad sprickrisk. För att ytterligare minska risken för uppkomst av sprickor bör en betong med en mycket låg krympning användas vid uppförandet.

2.3 Förutsättningar för utformning av betongrecept till kassunbetongen

Det utvecklingsarbete som redovisas i denna rapport tog avstamp i vid inlämnande av ansökan om utbyggnad av SFR gällande referensutformning och förutsättningar. Se SKB (2015) och referenser däri. Vid utveckling av betongen till kassunerna i 2BMA har därför följande förutsättningar beaktats:

- **Funktion:** Kassunerna utgör tekniska barriärer i slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall och ska bidra till att minimera utsläpp av radionuklider till omgivningen.
- **Dimensioner:** Kassunerna har dimensionerna $16,2 \times 16,2 \times 8,4$ m ($l \times b \times h$). Väggar och bottenplatta har en tjocklek av 500 mm.
- **Armering:** Kassunerna ska uppföras utan armering
- **Formsättning:** Kassunerna uppförs genom hängformsgjutning med flytbräda för att undvika gjutfogar.
- **Gjutning:** Betongen pumpas i formen.
- **Pumpning:** Betongen kan behöva pumpas 50 meter eller mer. Pumpslangens diameter är maximalt 4 tum.
- **Grundläggning:** Kassunens grundläggning ska ha sådana egenskaper att risken för tvång mellan grundläggningen och kassunens bottenplatta minimeras.
- **Lastfall:** Följande lastfall beaktas vid konstruktionen av kassunerna:
 - Inre gastryck på grund av gasbildning från nedbrytning av avfall
 - Last från återfyllnadsmaterial
 - Inre gjuttryck vid kringgjutning
 - Last av avfall
 - Last av tappad kokill
 - Oavsiktlig stöt från travers
 - Last från fallande block
 - Ensidigt yttre vattentryck vid ett tidigt skede efter förslutning
- **Gasgenomsläpplighet:** Krav på gasgenomsläpplighet beaktas ej.
- **Förvarsmiljö:** Betongkvalitet väljs utifrån den exponeringsklass som råder i förvaret. Förväntad miljö motsvarar marin miljö.
- **Lokalisering:** Kassunerna uppförs i en bergssal 120 meter under markytan vilken nås genom en nedfartstunnel.
- **Tillverkning av betong:** Betongen tillverkas i en betongstation i nära anslutning till tunnelpåslaget.
- **Transporter:** Betongen transporteras till gjutplatsen i vanlig betongbil. Förväntad transporttid från betongstationen till gjutplatsen är 30 minuter.
- **Miljö efter förslutning:** Efter förslutning av förvaret kommer bergssalen att fyllas med grundvatten vilket kan leda till lakning och omvandling av cementmineralerna.

2.4 Egenskapskrav

I detta avsnitt redovisas de egenskapskrav på den färska och den härdade betongen som identifierats utifrån de i avsnitt 2.3 angivna förutsättningarna.

2.4.1 Färsk betong

Följande egenskapskrav ställs på den färska betongen:

- **Öppethållandetid:** Betongens öppethållandetid ska vara minst 4 timmar. Den får dock inte vara så lång att höga gjuttryck vilka kan äventyra formens hållfasthet uppkommer vid uppförande av kassunväggarna.
- **Arbetbarhet:** Betongen måste fylla ut formen helt och inga hålrum får bildas efter vibrering.
- **Konsistens:** Betongens sättmått vid gjutning ska vara 150–200 mm. Självkompakterande betong kan ej användas.
- **Pumpbarhet:** Betongen ska vara pumpbar och inte separera vid pumpning.
- **Stabilitet:** Stenseparation får inte förekomma. Vattenseparation får förekomma endast i mycket begränsad omfattning.

2.4.2 Härdad betong

Följande egenskapskrav ställs på den härdade betongen:

- **Tryckhållfasthet:** Tryckhållfastheten vid 28 dygn ska vara minst 40 MPa och överstiga 50 MPa vid 90 dygn.
- **Draghållfasthet:** Draghållfastheten vid 28 dygn ska överstiga 2,5 MPa.
- **Krympning:** Betongen ska utformas på ett sådant sätt att krympningen minimeras för att undvika sprickbildning i samband med uppförande och drift.
- **Inre spänningar:** Inre spänningar ska minimeras i den färdiga konstruktionen för att begränsa risken för uppkomst av framtida sprickor.
- **Porositet:** Betongens porositet ska vara så låg som möjligt då detta ökar betongens kemiska stabilitet gentemot lakning samt ger låg diffusivitet för i porvattnet lösta ämnen.

2.5 Förutsättningar för val av betongens delkomponenter

Följande förutsättningar för val av betongens delkomponenter föreligger:

- **Cementtyp:** Cementet bör vara sulfatresistent, lågalkaliskt samt ha en låg värmeutveckling.
- **Cementhalt:** Cementhalten ska väljas så låg som möjligt men ej så låg att detta negativt påverkar betongens arbetbarhet.
- **Ballast:** Ballast tillverkad av entreprenadberg från utsprängningen av anläggningen bör utnyttjas i största möjliga utsträckning.
- **Vattencementtalet:** Vattencementtalet, vct, bör ej överstiga 0,50.
- **Tillsatsmedel:** Moderna karboxylatbaserade tillsatsmedel kan användas men mängderna ska begränsas så långt möjligt.
- **Tillsatsmaterial:** Tillsatsmaterial, exempelvis olika typer av filler, kan användas.

3 Konceptuell modell för proportionering av betong

3.1 Översikt

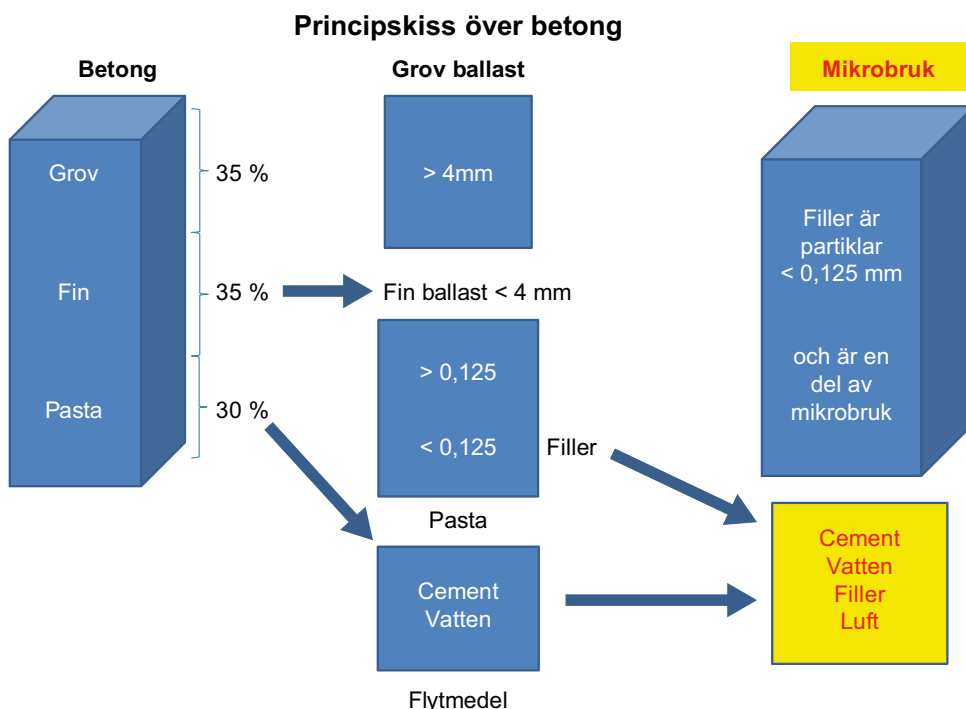
Färsk betong är en partikelsuspension innehållande partiklar med kornstorlek från mikrometer till ett tiotal millimeter samt en vätskefas. Betong utgörs till ungefär en tredjedel av grovballast (> 4 mm) och en tredjedel av finballast (< 4 mm). Den återstående tredjedelen utgörs av ungefär en tredjedel cement och två tredjedelar vatten, figur 3-1.

Definitionen av partikel respektive vätskefas kan väljas på olika sätt. I denna rapport används termen ”mikrobruk”. Mikrobruket innehåller både vatten, bindemedel, finmaterial från ballasten, tillsatsmedel, tillsatsmaterial (filler) samt små luftporer. Alla partiklar mindre än 0,125 mm anses tillhöra mikrobruket, cementet inräknat.

3.2 Partikelpackning vid proportionering av betong

Vid utformning av ett betongrecept eftersträvas att partikelpackningen skall vara så hög som möjligt för att minimera de hålrum som uppstår i den härdade betongen och därmed erhålla en tät betong med hög hållfasthet. En maximal partikelpackning utan hålrum mellan partiklarna medför dock att den färska betongen blir orörlig och inte kan pumpas eller fylla ut formen. Det gäller därför att optimera packning mot rörlighet för att erhålla en härdad betong med hög hållfasthet men i vilken partiklarna kan röra sig mot varandra under gjutningsförloppet.

Vid utformning av betongrecept har även ballastens kornform en stor inverkan på betongens rörlighet vid gjutning och särskild vikt fästs vid skillnaden mellan naturballast och ballast som tillverkats genom krossning av entreprenadberg. Krossballast har mera oregelbundna partiklar och en råare yta (Lagerblad et al. 2008) och därmed en sämre förmåga att röra sig i en partikelsuspension än naturgrus som är rundat av naturen (se även kapitel 4).



Figur 3-1. Principskiss över betong och dess sammansättning. Från Svensk byggtjänst (2017).

En betongs rörlighet i det färska tillståndet påverkas i mycket stor omfattning av sammansättningen av mikrobruket, dess egenskaper och mängd. Mikrobrukets uppgift i färsk betong är att lägga sig mellan och separera de större ballastkornen och därmed säkerställa att dessa kan röra sig under gjutningen. Detta innebär att olika typer av ballast kräver olika mängd mikrobruk. Exempelvis kräver användning av krossballast i allmänhet en större mängd mikrobruk än vid användning av naturballast vilken är mer lätttrörlig men även på grund av att den packas bättre. Till detta kommer även att grövre sten (d-max) i betongen generellt kräver en mindre mängd mikrobruk varför man vid optimering även behöver beakta ballastens kornstorlek och inte bara dess form.

Vid utformningen av såväl betongen i stort men även för mikrobruket gäller att det inte får finnas för många partiklar i en enskild storleksordning då friktionen mellan dessa kommer att ge en styv betong. Då en stor del av partiklarna i mikrobruket utgörs av cement måste därför övriga fillerpartiklar (antingen från ballasten eller tillsatt filler) vid en optimal proportionering antingen vara större eller mindre än cementet (Vogt 2011).

Även små luftporer betraktas vara en del av mikrobruket. Man kan därför öka mängden mikrobruk genom att tillsätta luftporbildare. Detta sänker dock styrkan hos betongen. Slutligen eftersträvas att mängden cement och vatten i mikrobruket är så låg som möjligt givet att kraven på arbetbarhet uppfylls då betongens krympning ökar med ökande vattenhalt.

3.3 Användning av fillermaterial i modern betong

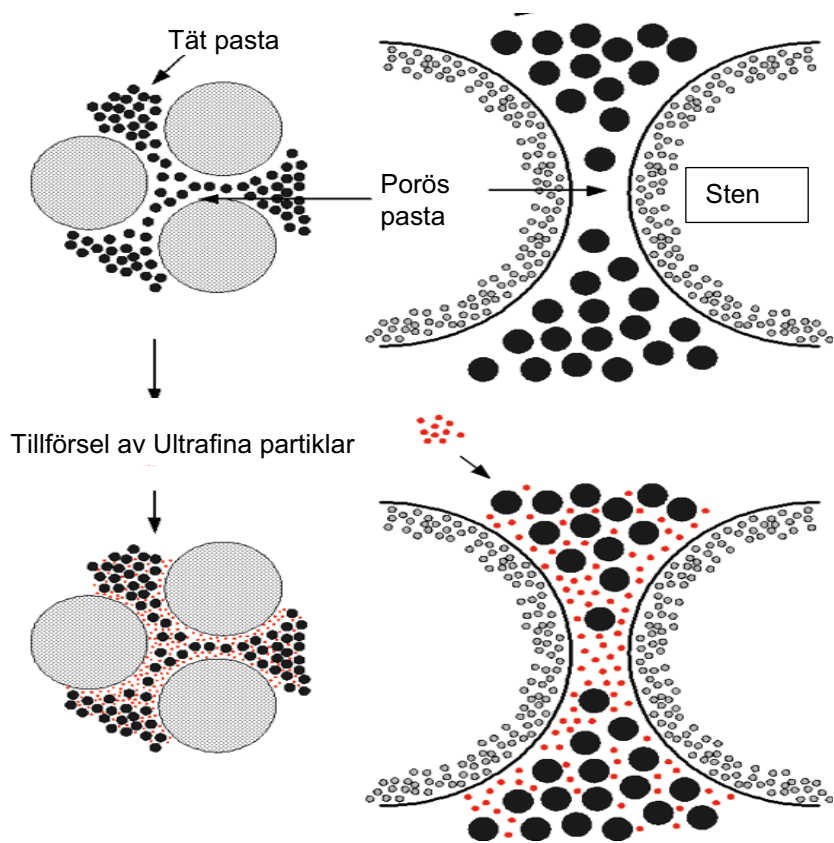
I modern betongteknologi arbetar man allt mer med olika kombinationer av fillermaterial, här definierade som partiklar med en kornstorlek $< 0,125$ mm. Av speciellt intresse är ultrafina fillermaterial vilka ger en tätare pasta och generellt höjer styrkan på betongen (Lagerblad och Vogt 2004). Dessa används ännu ej i normalbetong men kan användas för att ge speciella egenskaper.

Effekten av ultrafina fillermaterial visas i figur 3-2 vilken visar en skiss av partikelpackningen i normal betong. Vilket framgår av figuren ger grova och dåligt packade partiklar ett stort genomsnittligt avstånd mellan partiklarna vilka fylls ut av mikrobruket. Ett stort avstånd mellan cementpartiklarna ger här ett lokalt högre vct och en svagare pasta. Vid tillsats av ultrafiller kommer även hålrummen mellan cementpartiklarna i mikrobruket att fyllas med partiklar vilket ger en tätare packning i hela betongen och därmed en tätare betong med en högre hållfasthet.

Studier av effekten av fillermaterial på betongens hållfasthet och hydratationskinetiken presenteras i bilaga B.

3.4 Användning av puzzolaner i modern betong

Puzzolaner är finkorniga partiklar som reagerar med cementpastan där de förbrukar kalciumhydroxid (Portlandit) och bildar C-S-H-gel. Den aktiva komponenten i de vanligaste puzzolanerna är oftast amorft silika. I en del puzzolaner förekommer även aluminatkomponenter. Puzzolanerna och speciellt silikastoft ger betongen både ökad täthet och hållfasthet. Nackdelen med silikastoft är att den ökar den autogena krympningen (se avsnitt 7.7.2).



Figur 3-2. Principskiss över hur ultrafin filler fungerar och varför det ger en tätare hårdnad betong. Från föreläsningsbilder av B. Lagerblad.

4 Betongballast

Ballasten är ofta den kritiska variabeln vid betongtillverkning då egenskaperna hos denna komponent kan variera betydligt beroende på dess ursprung och – för ballast tillverkad genom krossning – krossnings- och siktningsmetoder. Egenskaperna hos cement, tillsatsmedel och tillsatsmaterial är däremot mer homogena. Av denna anledning beskrivs i detta kapitel hur man klassificerar och kvalitetsbedömer ballast.

4.1 Introduktion

Ett stenmaterials lämplighet som betongballast bestäms av dess kornstorleksfördelning (kornkurva) och kornform. Ett material huvudsakligen bestående av runda/kubiska korn är här mer lämpligt än ett material med stort innehåll av avlånga och stängliga korn på grund av dess fördelaktigare flödesegenskaper.

Kornformen bestäms av materialets ursprung där egenskaperna skiljer sig betydligt mellan naturgrus från exempelvis glacifluviala avsättningar och material som tillverkats genom krossning av berg. För krossat material påverkas kornens form efter krossning på bergartens textur och mineralogi samt av använd krossningsmetod.

Det finns en del mineral som är mindre lämpade eller direkt olämpliga för användning i betongballast, exempelvis glimmermineral såsom biotit, muskovit och klorit. Dessa mineral är flakiga och böjliga vilket medför att de inte påverkas av krossningsmetodiken. Vid krossning kommer de därför att bibehålla sin form och komma ut som fria mineral i den storleksordning som de har i berget. Mängden fri glimmer i ett stenmaterial kan analyseras genom en petrografisk analys och användas som ett kvalitetskriterium.

Andra komponenter som inte bör förekomma i en betongballast är leror. Dessa förekommer normalt i de finaste fraktionerna och man behöver speciella metoder för att identifiera dem. Exempelvis kan man identifiera leror med hjälp av lasersikt eller metylenblåmetoden. Enklart är dock att göra standardiserade bruks- och mikrobrukstester. Om dessa visar att ballasten ger ett bruk med dålig arbetsbarhet måste man genomföra en mer utförlig undersökning av ballasten för att få fram orsakssammanhanget (Lagerblad et al. 2008).

För att få en full förståelse för bergartens inverkan på ballastens kvalitet måste man även beakta effekten på de olika kornstorlekarna på betongens/brukets egenskaper. Stenen och de grövre partiklarna kan i allmänhet kubiseras genom användning av speciella krossningsmetoder. Kubisering av de finaste partiklarna är däremot betydligt svårare då dessa består av enskilda mineral som klyvs efter sina kristallografiska ytor, se ovan. De grövre partiklarna består av flera mineral och vid kubisering klyvs de grövre partiklarna i svaghetszonerna i fasgränserna mellan mineral. För en utförligare genomgång av inverkan av tillverkningsmetoder för krossballast på egenskaperna hos bruk och betong, se avsnitt 5.6.

4.2 Krossat berg som betongballast: kunskapsläge

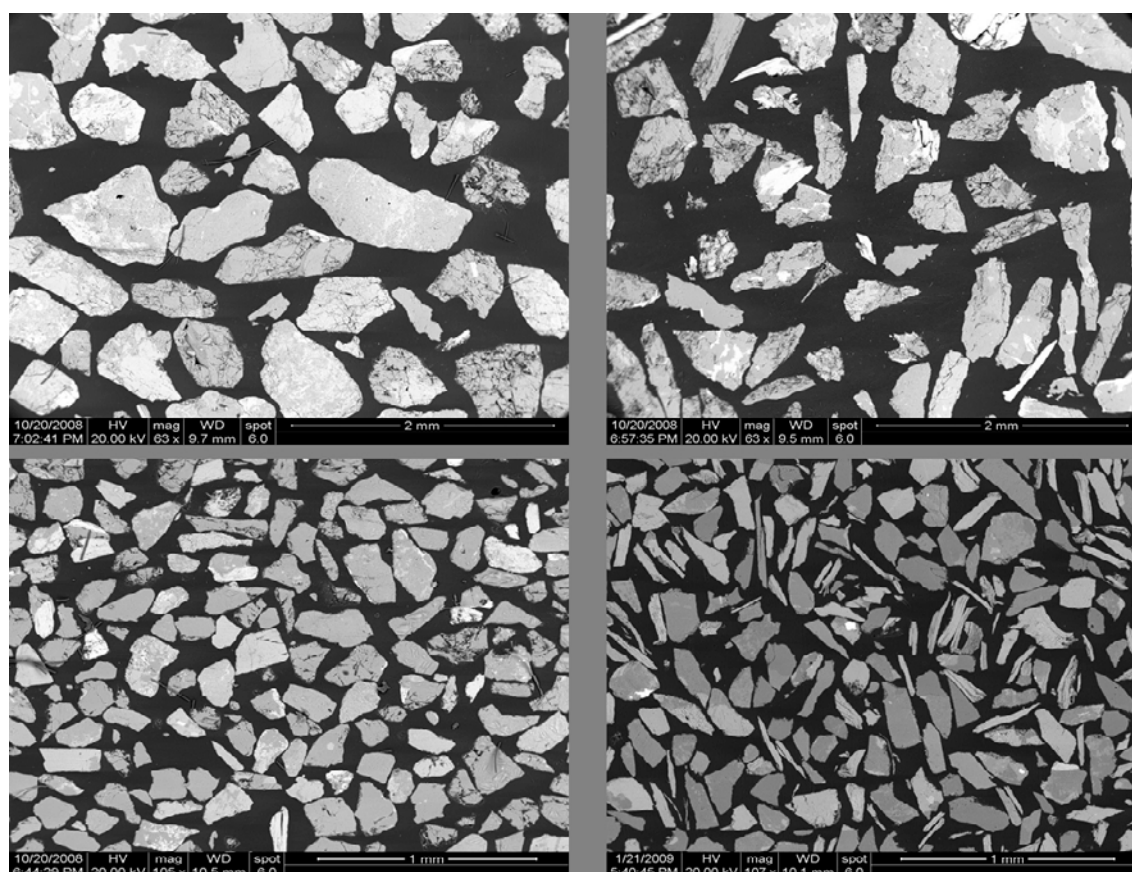
Betongindustrin har sedan länge använt krossat berg som ballast i fraktionen över 8 mm. I fraktionerna under 8 mm har man i stället använt naturgrus, framför allt glacifluvialt avsatt naturgrus från rullstensåsar. Av miljöskäl och lokal brist på naturgrus håller industrin nu på att övergå till krossat berg som ballast till betong. Detta arbete har dock påverkats av att de befintliga bergtäkterna huvudsakligen är optimerade för tillverkning av material med hög hållfasthet och slitstyrka för användning som exempelvis vägunderlag, och inte för produktion av betongballast och framför allt inte av finfraktionen av betongballast. Betong kräver inte ballast med hög hållfasthet då även relativt svagt berg har högre hållfasthet än cementpastan som binder samman ballastkornen. Erfarenheten av att använda krossat berg som ballast vid betongtillverkning är därför för närvarande begränsad.

Under de senaste tio åren har ett antal forskningsprojekt undersökt möjligheterna att använda krossberg som betongballast. Studierna har visat att krossprodukter från en del bergarter lätt kan ersätta naturgrus medan andra är mindre lämpliga.

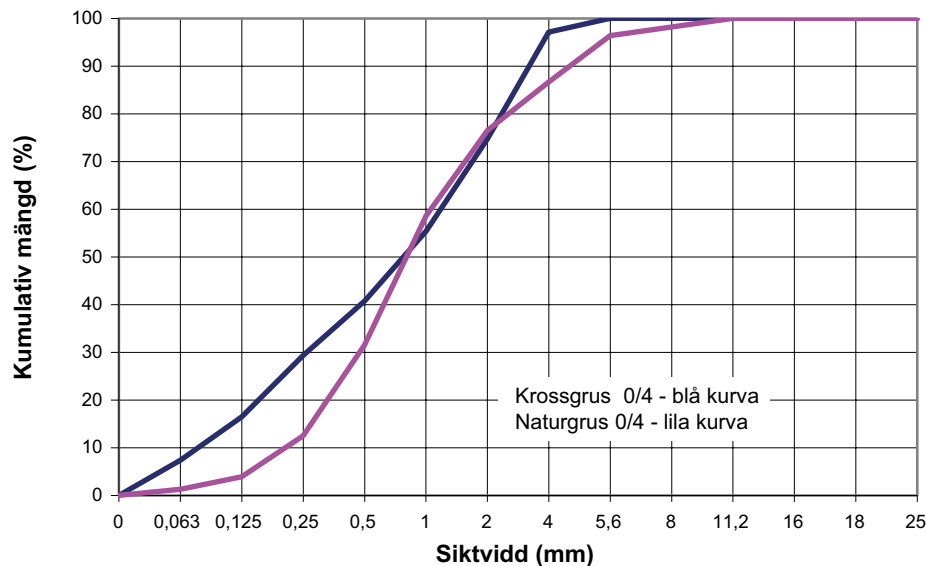
Undersökningar sammanfattade av Lagerblad et al. (2008) och Grahm et al. (2017) har visat att de huvudsakliga problemen vid användning av krossmaterial som betongballast kan hänföras till finmaterialet i fraktionen < 2 mm. Figur 4-1 visar skillnaden i kornform mellan naturgrus och krossberg i fraktionerna 0,5–1 mm och 0,125–0,25 mm. I krossberget är partiklarna mycket flakigare än naturgruset vilket har en mer rundad kornform. Orsaken till detta är dels att det krossade materialet inte är avrundade av naturen, exempelvis i strömmande vatten, och dels att det krossade berget innehåller flakiga fria glimmerkorn (oftast biotit). Naturgrus innehåller inte denna typ av material då svagare partiklar som biotit till stor del brutits ner när gruset avsattes och under tiden därefter.

En annan skillnad är att krossberg generellt innehåller en större mängd filler (material med en kornstorlek upp till 0,125 mm) och att fillern har en annan storleksfördelning (se figur 4–2). Om fillerfraktionen till stor del består av rundade korn (figur 4-1, nedre vänster bild) kan detta vara en fördel då detta ger en ökad mängd mikrobruk vilket förbättrar de reologiska egenskaperna. Om kornen däremot är mer avlånga (figur 4-1, nedre höger bild) kan åtgärder behöva vidtas, innefattande exempelvis vindsiktning för att avlägsna den naturliga fillern eller tillsats av tillsatsmedel eller ytterligare kommersiell filler. Den större mängden naturlig flakig/stänglig filler medför även att betong baserad på krossballast normalt kräver högre tillsatts av superplasticerare än då naturballast används.

För en mer detaljerad genomgång om det rådande kunskapsläget, se exempelvis Lagerblad et al. (2008), Grahm et al. (2017) och Svensk byggtjänst (2017).



Figur 4-1. Natur- och krossballast i svepelektronbilder på planpolerad yta. Bilderna till vänster visar naturballast och bilderna till höger krossad ballast från en granitisk täkt. Översta bilderna är från fraktionen 0,5–1,0 mm (huvudsakligen bergartsfragment). De undre bilderna är från fraktionen 0,125–0,25 mm (huvudsakligen enskilda mineral). (Lagerblad et al. 2008)



Figur 4-2. Principskiss som visar skillnad mellan natur- och krossgrus (torrsiktade prov). Från Svensk byggtjänst (2017).

4.3 Testmetoder och undersökningsmetodik

Då egenskaperna hos exempelvis entreprenadberg som ska användas vid ballastproduktion kan variera betydligt inom en bergvolym behövs ett program för selektering av berg med goda ballastegenskaper ur uttaget entreprenadberg. Utöver detta utgör ett väl fungerande kontrollprogram ett nödvändigt underlag för att betongens sammansättning ska kunna anpassas efter ballastens varierande egenskaper. De större ballastkornen (> 4 mm) kan studeras genom mätning eller siktning och är därför relativt enkla att kvalitetsbestämma medan metoder för de mindre fraktionerna är något mer krävande. Testmetoder för grovballast (> 4 mm) finns beskrivna i ballaststandarden (SIS 2010).

Det finns tre principiellt skilda metoder att bestämma kvalitén på betongballastens finfraktion vilka beskrivs i följande avsnitt:

1. Petrografisk undersökning av ballastmaterialet.
2. Indirekta metoder för karaktärisering av ballastmaterialet.
3. Reologiska undersökningar av bruksblandningar.

4.3.1 Petrografisk undersökning av ballastmaterialet

Den petrografiska undersökningen syftar till att finna sambandet mellan petrografi och ballastens egenskaper i färsk betong och behövs för att kunna selektera berg för tillverkning av betongballast vid brytning.

Vid den petrografiska undersökningen erhålls även information av materialets innehåll av komponenter som kan försämra materialets ballastegenskaper såsom smektit (svällare), sulfider och alkalireaktiva bergarter. Se även SIS (2010) och Lagerblad och Trägårdh (1995a).

Exempelvis kan mineraluppsättningen i en bergart beräknas med hjälp av punkträkning i tunnslip eller svepelektronmikroskop, SEM. Vid punkträkning identifieras vilken komponent/mineral som ligger i en specifik punkt varefter preparatet flyttas ett bestämt avstånd och komponenten i denna punkt klassificeras. Detta uppreppas ett stort antal gånger varefter resultaten sammanställs. Utifrån den erhållna mineraluppsättningen kan sedan en första värdering av det uttagna bergets lämplighet som betongballast genomföras.

4.3.2 Indirekta metoder för karaktärisering av ballast

Förutom petrografisk analys finns det indirekta metoder för karaktärisering av ballast vilka kan korreleras med petrografisk analys och bruksreologi, exempelvis mätning av materialets flödestal och hålrumsvolym.

Utöver detta kan kornens packningsegenskaper studeras. Den bästa av tillgängliga metoder är lös packning (Lagerblad et al. 2008, Grahm et al. 2017). Liksom vid mätning av materialets flödestal där flakiga och stängliga partiklar rör sig långsammare packas flakiga och stängliga partiklar sämre än runda på grund av ”Plockepinneffekt”.

Flödestal och hålrumsvolym

Flödestalet är den tid i sekunder det tar för en given mängd sandmaterial att rinna genom en tratt med definierade mått, se figur 4-3. Konens nedre öppning täpps till och materialet fylls därefter i konen. Med hjälp av ett tidtagarur mäts den tid det tar för sanden att rinna genom trattens öppning från det att den nedre öppningen öppnas till det att ljus syns i öppningen. Liksom för många andra metoder påverkas resultatet av materialets gradering varför jämförelser helst skall utföras med jämförbara siktcurvor eller på enskilda storleksfraktioner (Lagerblad et al. 2008, Grahm et al. 2017).

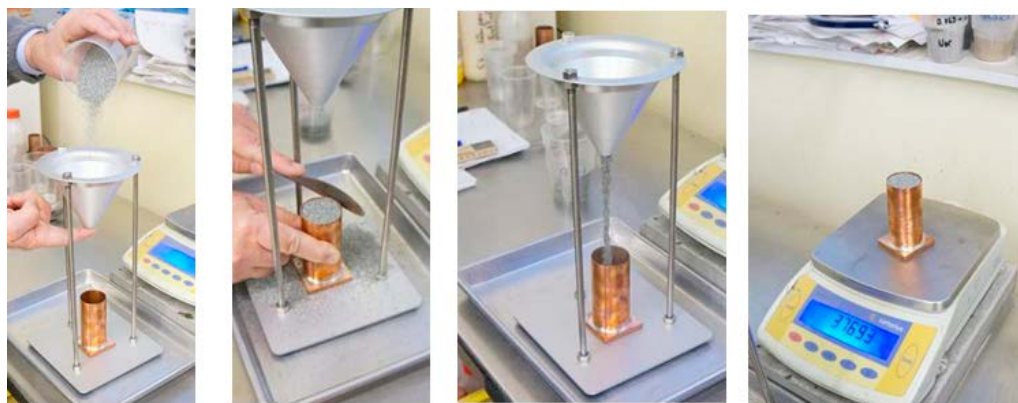
Sfäriska släta partiklar rinner lättare och snabbare igenom tratten än flakiga, stängliga eller råa partiklar. Likaså rinner stora partiklar långsammare igenom tratten än små partiklar vid samma diameter på trattens öppning. Ett material med högt flödestal indikerar således en flakigare/stängligare kornform och alltså att materialet är mindre lämpligt för användning som betongballast.

I samband med bestämningen av flödestalet samlas materialet upp i en liten cylinder under tratten för mätning av lös packning samt hålrumsvolymen. Sandens fallhöjd är då 110 mm och cylinderns mått mäter 85 mm i höjd och 39 mm i diameter. Hålrumsvolymen bestäms liksom flödestalet fem gånger per material och fraktion. Förfarandet kan göras med olika trattar och bågare som kalibrerats för ändamålet.

Löst packad ballast har en större total volym hålrum än hårt packad och ju snävare intervallet mellan fraktionsgränserna är desto högre blir hålrumandelen. Denna avtar dessutom med kornstorleken. Vid i övrigt lika förhållanden avspeglas en gynnsam kornform i tätare packning och därmed lägre hålrumandel.

Vattenbehov hos finmaterial och filler

Egenskaperna hos finfraktionen kan även studeras indirekt genom mätning av hur mycket vatten som behövs för att fillermassan skall börja flyta. Ett litet vattenbehov indikerar att fillern har en lämplig kornform. Det finns två speciella metoder för mätning av vattenbehovet hos filler och finmaterial. Metoderna bygger i princip på att man utvärderar materialet genom utflyt och packning i vatten. Den ena metoden benämns Puntke-test och den andra utflytstest eller Beta-p metoden.



Figur 4-3. Lös packning och flödestal (rinntid). Finballasten hälls i en tratt och får från en bestämd höjd rinna ner i en behållare med en bestämd volym.

Båda testerna bygger i princip på en pulvermassas vattenbehov eller vattenmättnadsgrad. De är beskrivna i Hunger och Brouwers (2009). De kan användas som enkel rutintest för att utvärdera finmaterialet (Graham et al. 2017).

4.3.3 Reologiska undersökningar av bruksblandningar

Reologiska undersökningar är i grunden de som bäst visar hur lämplig en ballast är för användning vid tillverkning av bruk eller betong. Mest tillförlitliga resultat erhålls när ballasten testas i ett material med den sammansättning och de egenskaper som så långt som möjligt motsvarar det material som sedan ska användas i den tänkta tillämpningen. Detta kräver dock större blandare och relativt stora mängder material. Man väljer därför i de fall där så är möjligt att genomföra testerna på delmängder av materialet.

Vid tillverkning av de bruk som används för att utvärdera lämpligheten hos entreprenadberget från SFR som betongballast har ballasten krossats i en laboratoriekross, en så kallad *spindelkross*. Denna typ av kross ger enligt erfarenhet ett något mer flikigt material än en kommersiell konkross vilket bör beaktas vid utvärderingen av ballastens egenskaper.

Standardiserade bruk för användning vid mätning av reologiska egenskaper

Vid de studier som redovisas i kapitel 5 i denna rapport har nedanstående två standardiserade bruk undersökts.

Standardiserat bruk (0–2 eller 0–4 mm)

Genomgående har Cementas Byggcement från Skövde, CEM II/A-LL, 42,5R, med den specifika ytan 430 m²/kg använts. Inga tillsatsmedel har använts, så förutom ballast och cement har endast vatten adderats.

Då provningarna utförs på 0–2 mm fraktionen avskildes överkorn genom siktning på en 2 mm hålsikt. Vidare anpassades materialens gradering till en referenskurva inför bruksförsöken. Det recept som använts hade följande sammansättning: cement: 634,6 g/dm³, ballast: 1 145 g/dm³, vatten: 361,7 g/dm³. Då olika typer av berg har olika densitet så justerades mängden så att det motsvarar volymen för en granit med en densitet på 2,65 kg/dm³.

Standardiserat mikrobruk (0–0,125 mm)

Den utprovade blandningen innehåller i basen 1 000 g cement (byggcement), 450 g vatten samt 5 g superplasticerare (Glenium 51). I undersökningen har sedan, på basis av volym, filler successivt tillsatts. I de utförda försöken har 40 volymprocent (baserat på cement) filler tillsatts.

Denna fraktion benämns ofta som filler även om definitionen på filler enligt norm är partiklar mindre än 0,063 mm.

Reometer: Översikt

De reologiska egenskaperna, flytgränsspänning och plastisk viskositet, mäts i en reometer (ibland även kallad viskometer) på standardiserade bruksblandningar. Vid testerna används främst relativa skalor då metoderna är operatörsberoende och det därför är svårt att bestämma exakta värden

Flytgränsspänningen ger teoretiskt ett mått på den spänning som måste överskridas i materialet innan det kan börja flyta, medan den plastiska viskositeten beskriver hur trögt bruket flyter när det väl är satt i rörelse. I praktiken relaterar flytgränsspänningen till hur långt ett Bingham-material kan deformeras eller flyta innan det stannar, d v s när det går från rörelse till vila. I den sättkon som man rutinmässigt använder för att mäta betongs arbetbarhet (SIS 2009) så bestäms sättmåttet av flytgränsspänningen.

Den plastiska viskositeten kan betraktas som ett mått på materialets inre friktion. Ett material med högre viskositet flyter långsammare än ett med lägre viskositet, under likvärdiga kraftförhållanden. Viskositeten påverkas av flera faktorer av vilka partiklarnas kornform och packningsförmåga är

av stor betydelse. En annan viktig faktor är partiklarnas specifika yta då denna parameter påverkar vattenbehovet. Ju mer vatten som adsorberas på partikelytorna desto mindre mängd vatten blir tillgängligt för suspensionen. Bruk som innehåller krossad ballast har därför oftast en högre viskositet än motsvarande bruk med naturgrus, beroende på såväl kornform som på packning och partikelfinhet.

Vid utvärdering av olika krossballastmaterial, speciellt med samma konstruerade partikelkurva, är den plastiska viskositeten därför en indikator på kornformen hos de olika materialen. Om ett ballastmaterial genererar bruk med hög viskositet kommer det sannolikt även ge en viskös betong. En alltför viskös betong är tung att arbeta med och svårvibrerad. Inverkan av partikelfinhet kan kvantifieras då även reologin för bruk med sammansatt ballast enligt standardsiktkurva mäts.

Reometer: Metodik

Vid reologiska undersökningar tillverkas ett bruk genom att den framsiktade ballastfraktionen blandas med cement och vatten enligt ett standardiserat recept. Det standardiserade receptet ligger nära det för naturgrus i vilket mängden filler är mindre än i ballast från krossat berg. Fillerens kvalitet utvärderas speciellt i en test av mikrobruket.

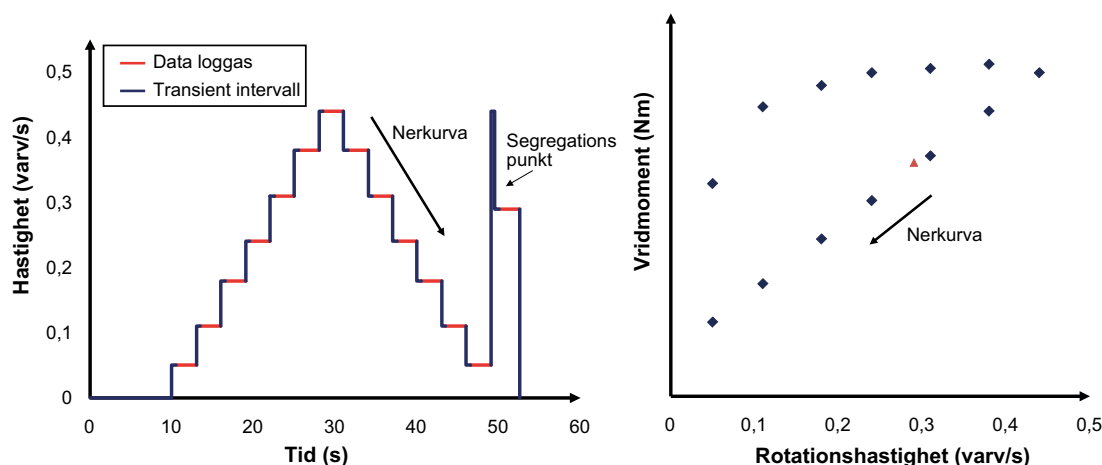
Då egenskaperna hos cementet kan variera mellan olika produkter men även över tid (åldring) är det inte möjligt att jämföra resultat från olika provomgångar med precision. Det säkraste resultatet erhålls därför i en sammanhållen omgång av provningar. Om man skall göra en säker sammanställd bedömning av resultat från olika provomgångar måste man därför använda sig av en referensballast och korrigera resultaten.

Vid mätning med en reometer skjuvas bruket mellan två cylindrar genom att yttercylindern roteras enligt en förbestämd hastighetsprofil, se figur 4-4. Det genererade vridmomentet som innercylindern utsätts för registreras kontinuerligt av en lastcell som ligger an mot cylindern. Rotationshastigheten och vridmomentet kan räknas om till skjuvhastighet (s^{-1}) respektive skjuvspänning (Pa) genom beaktande av mätsystemets geometri.

Genom att applicera Bingham's vätskemodell, ekvation 4-1, på flytkurvans nerkurva kan brukets flytgränsspänning (Pa) och plastiska viskositet (Pa s) beräknas.

$$\tau = \tau_0 + \gamma_{pl} \cdot \dot{\gamma} \quad (\text{Ekvation 4-1})$$

Reometern kan beroende på det mätsystem som väljs (cylindergeometrin) användas för mätningar på suspensioner med partikelstorlekar från de som förekommer i pastafasen ($< 1 \text{ mm}$) upp till betong med d_{\max} 16 mm. Mätsystemet som används vid bestämning av reologin hos bruk består av koncentriska cylindrar där innercylindern består av ribbor, medan den yttre är beklädd med vågformat gummi. Att de båda cylinderytorna inte är släta beror på att man måste kunna skjuva betongen utan att glidytor uppstår vid cylinderytorna.



Figur 4-4. Rotationshastighet vs. tid (vänster) samt så kallad flytkurva (höger) vid reologisk utvärdering av bruk med ConTec 4-SCC.

Vid bestämningar av brukens reologiska egenskaper som genomförts inom detta arbete där en stor mängd material funnits tillgängligt har en ConTec 4-SCC reometer, figur 4-5 vänster bild, använts. Denna utrustning passar därför vid undersökning av material som provtagits i bergtäkt eller ytberg som är lätt att provta.

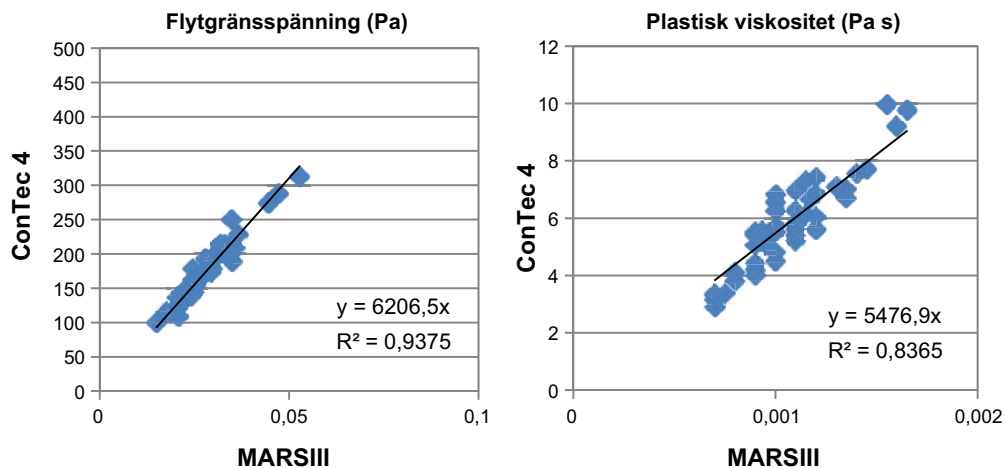
Dock, för undersökningar av material erhållet från borrhärdar där materialtillgången är begränsad är inte alltid ConTec 4-SCC lämplig då den kräver för mycket material. I stället användes vid dessa undersökningar en mindre reometer benämnd MARS III (figur 4-5, höger bild).

För pastaförsöken har en mindre viskometer (Physica MCR300) med en CC27/P cylinder uppställning använts.

I undersökningarna har prov parallellkörts i båda reometrarna. Resultaten visar att de ger liknande resultat (figur 4-6). I diagrammen senare har resultat från MARS III korrelerats med de från ConTec 4.



Figur 4-5. Reometer, ConTec 4-SCC, (t.v.) samt reometer, MARS III (t.h.).



Figur 4-6. Korrelation mellan ConTec4 och Mars III. Samma bruk har använts vid båda mätningarna.

Reometer: Bedömningskriterier

Vid bedömningen delas ballastmaterialen in tre olika klasser – Klass I, Klass II och Klass III – utifrån resultaten i de reologiska undersökningarna. Gränsområdena för de olika klasserna framgår av figur 4-7 och förklaras nedan.

Klass I: Inom detta område återfinns vanligtvis naturgrus och alternativa ballastmaterial med närliggande egenskaper. Alternativa ballastmaterial som faller inom detta område har goda möjligheter att ersätta naturgrus utan att vatten- och cementbehovet ökar signifikant. Naturgrus med lågt vatten- och cementbehov faller inom viskositet = 1–2 Pa s och flytgränsspänning = 100–150 Pa.

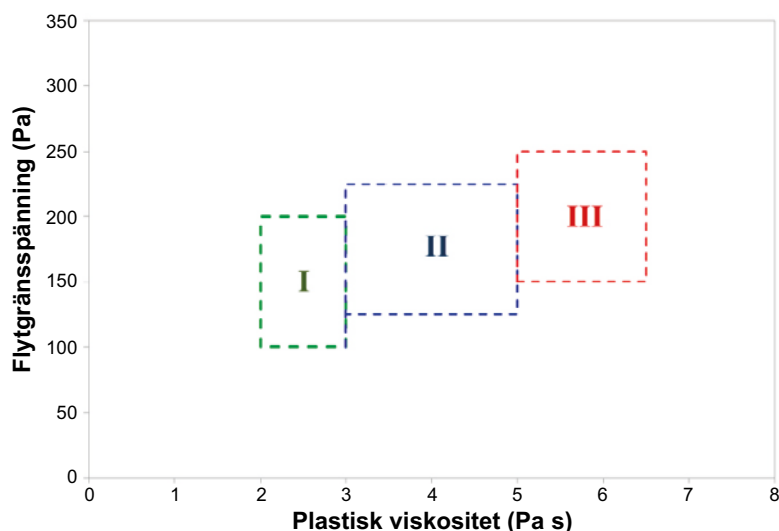
Klass II: Inom detta område återfinns medelbra alternativa ballastmaterial från krossat berg. Ballastmaterialen har ett större vatten- och cementbehov och kommer vid användning som betongballast ge betong med högre viskositet och sämre arbetbarhet än dito med naturballast. De utgör dock ett användbart alternativ till naturgrus vid betongtillverkning och kan med hjälp av superplasticerare ge liknande egenskaper som naturballast.

Klass III: Ballastmaterial vars reologi faller inom detta område har ett relativt stort vatten- och cementbehov vid användning som betongballast. Ballastmaterial inom denna klass kan resultera i viskös och svårbehandlad betong.

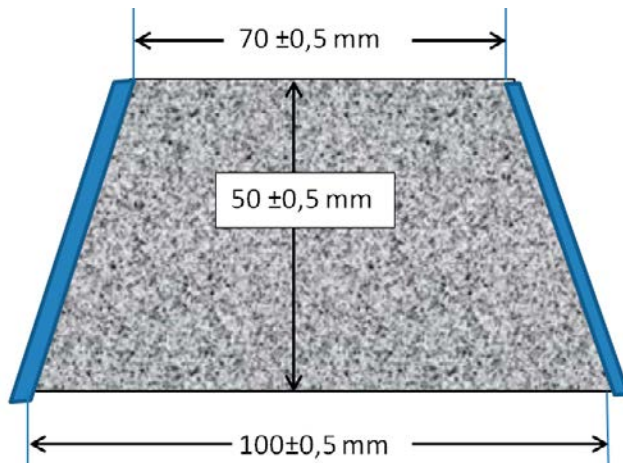
Mätning av reologiska egenskaper med sättkoner

Som alternativ till reometern kan även mindre sättkoner för mätning av materialets utflyt användas för både 0–2 mm bruk och mikrobruk. I grunden bygger dock båda dessa metoder på samma princip som vid mätning av sättmättet hos betong. Utflytet mäter huvudsakligen flytgränsspänningen men även den plastiska viskositeten kan uppskattas genom mätning av den tid det tar för bruket att nå ut till en bestämd gräns. Utflytet mäts på en glasskiva.

Figur 4-8 visar en illustration av en *Hägermankon*. Den används för mätning av bruk med en ballast upp till 4 mm. Figur 4-9 visar metodik för mätning av utflyt hos mikrobruk med en minikon.



Figur 4-7. Bedömningsklasser vid bedömning av 0/2 ballastmaterials lämplighet som betongballast.



Figur 4-8. Hägermankonens dimensioner.



Figur 4-9. Mätning av utflyt av mikrobruk. Utflytet görs på en glasplatta och diametern mäts. Utflytet ger en indikation på flytgränsspänningen. Genom att mäta tiden för att nå fullt utflyt får man en uppskattning av den plastiska viskositeten. Den använda minikonens har en toppdiameter av 19 mm, en basdiameter av 38 mm och en höjd på 57 mm.

5 Geologi och förutsättningar för ballastproduktion i SFR-området

5.1 Översikt

Vilket nämndes i inledningen till kapitel 4 så är ballasten ofta den kritiska variabeln vid betongtillverkning då dess egenskaper varierar betydligt mer än för övriga i betongen ingående komponenter. Av denna anledning är det viktigt att ha god kunskap om materialets sammansättning och egenskaper. Detta gäller både inför utveckling och tester av den betong som ska användas vid uppförande av anläggningen då material med likartade egenskaper från andra täkter måste identifieras och användas men även när entreprenadberget för ballasttillverkning vid uppförandet ska selekteras.

Vid selektering av entreprenadberget från SFR3 för ballasttillverkningen är det viktigt att dess egenskaper är likartade det material som används vid utvecklingsarbetet och av god kvalitet. Man måste här från små mängder material få fram så mycket information som möjligt. För att kunna selektera berg för tillverkning av betongballast är idealet att kunna få fram tillräcklig information från stenprover och borrhärdar så att man kan göra en preliminär selektering innan sprängning. Detta fordrar att man kan bestämma lämpligheten med utgångspunkt från petrografisk analys och/eller från mycket små bruksblandningar.

5.2 Bergartstyper i SFR-området och dess egenskaper som betongballast

I området för SFR3 finns ett antal olika typer av berg, se exempelvis (SKB 2008, 2013, Stephens et al. 2007). Den mest ingående undersökningen har gjorts av berget från platsen för Slutförvaret för använt kärnbränsle som ligger i en angränsande tektonisk lins omgiven av tektoniska zoner. SFR3 ligger i kanten av den tektoniska linsen och berget är där mer deformerat. Enligt de geologiska beskrivningarna dominerar området av metamorfiserade (omvandlade) granitiska bergarter med inslag av granodiorit. I SFR-området kan man även finna inslag av svekofenniska (cirka 1 800 miljoner år gamla) sura metamorfiserade vulkaniter (leptiter). Graniterna är gamla magmakammare som stelnat på djupet. Vulkaniter och vulkaniska sediment kan observeras i hållar i närområdet till SFR.

En studie av bergartstyperna i SFR-området och deras lämplighet för tillverkning av betongballast har nyligen genomförts (Lagerblad et al. 2016). I detta och följande avsnitt ges en kortare sammanfattning av detta arbete. För en mer detaljerad redogörelse hänvisas till nämnda studie.

5.2.1 Petrografisk undersökning av bergartstyperna

SFR3 kommer att ligga i anslutning till befintlig anläggning, SFR1 och det kan därför förväntas att berget vid SFR3 är liknande det vid SFR1. För undersökningen (Lagerblad et al. 2016) togs sju prover av till synes skiftande bergarter vid upplaget för utsprängt berg från SFR1 (här benämnda "SFR") och två från borrhärdar från tänkta utrymmet för SFR3 (här benämnda "BK").

Den av Lagerblad et al. (2016) genomförda petrografiska undersökningen visade att förutom den dominerande metamorfiserade graniten så innehåller berget i SFR-området amfibolit, pegmatit och metamorfiserad leptit. Även graniter med olika grovlek (kornstorlek) kunde observeras. Av de nio prover som studerats hade åtta en granitisk sammansättning medan det nionde var en basisk bergart. Visuell observation av borrhärdarna visade att delar av berget var sprucket och deformerat, figur 5-1.



Figur 5-1. Borrhärdar från berg i SFR3. BK 8 och 9.

Punkträkningen av mineral visade att även om kvartshalten och den kemiska sammansättningen av graniterna var ganska lika så skiljde sig graniterna i mineralogisk sammansättning när det gäller mineralogin i korn i fraktionen 0,125–0,250 mm. Av intresse för en eventuell framtida ballastproduktion var att vissa av proverna innehöll relativt höga mängder biotit vilket kan påverka de reologiska egenskaperna hos fillerfraktionen negativt.

Den av Lagerblad et al. (2016) identifierade variationen i bergartssammansättning gör att det vid uppkrossning av entreprenadberget kan komma ballast med olika egenskaper där visst berg på grund av höga halter biotit eller andra glimmermineral kan anses vara direkt olämpliga för ballastproduktionen. Detta pekar på vikten av en väl genomförd selektering av entreprenadberget så att endast det mest lämpliga berget används för ballasttillverkning.

5.3 Indirekta tester för karaktärisering av ballast

5.3.1 Packning-hålrums halt.

I de studier som genomfördes av Lagerblad et al. (2016) undersöktes siktfraktionerna 0,125–0,250 mm (huvudsakligen fria mineral) och 0,5–1,0 mm (huvudsakligen bergartsfragment). För en beskrivning av metoden, se avsnitt 4.3.2.

Packningen av de olika krossprodukterna från SFR visas i figur 5-2. Partiklarna i den finare fraktionen ger en lägre packningsgrad än bergartspartiklarna. Detta beror antagligen på att de enskilda mineralen har en flakigare/stängligare kornform än bergartskornen. Prov SFR 6 utmärker sig genom att ha en lägre packningsgrad i båda fraktionerna. De högre halterna av biotit i prov 5 och 8 verkar inte påverka packningen.

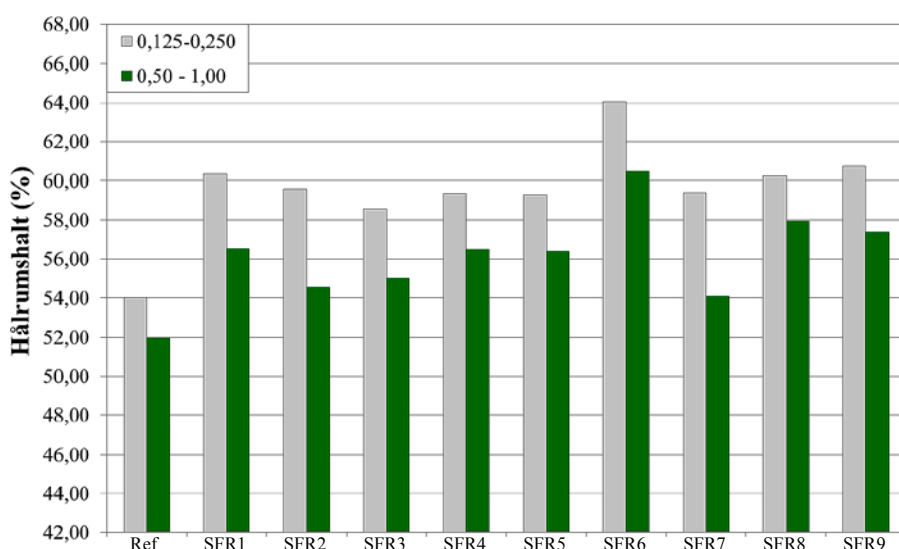
I beaktande av att proven är laboratoriekrossade i en spindelkvarn (se avsnitt 4.3.3) så ger alla proven utom SFR 6 relativt bra packningsvärde.

5.3.2 Flödestal-rinntid

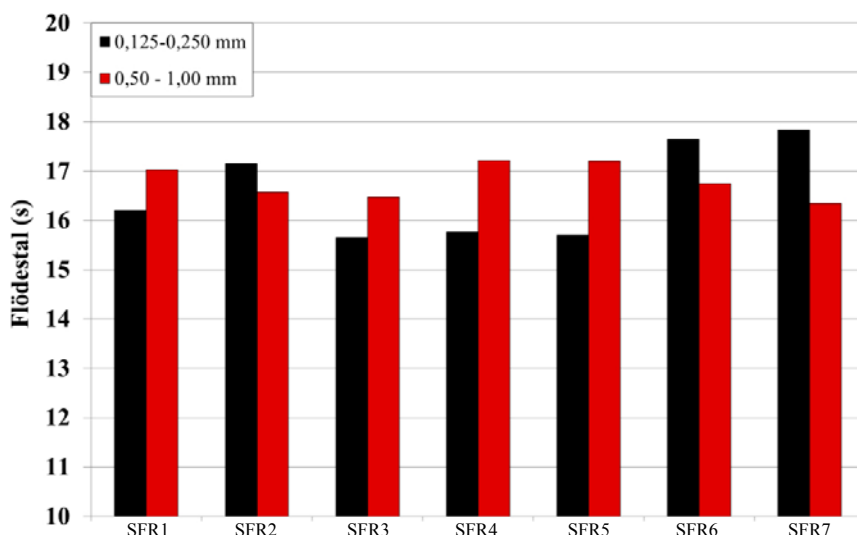
I de studier som genomfördes av Lagerblad et al. (2016) undersöktes siktfraktionerna 0,125–0,250 mm och 0,5–1,0 mm. För en beskrivning av metoden, se avsnitt 4.3.2.

Från figur 5-3 kan man observera att prov SFR 2, 6 och 7 ger sämre flöde i fraktionen 0,125–0,250 mm. Prov SFR 6 innehåller ganska rikligt med biotit vilket förklarar detta prov men denna förklaring kan inte appliceras på prov 2 och 7 vilka båda innehåller endast lite biotit.

När det gäller bergspartiklarna i fraktion 0,5–1,0 mm ger alla prov ganska liknande resultat. I beaktande av att proven är laboratoriekrossade, så ger alla proven relativt goda flödestal.



Figur 5-2. Lös packning-hålrums halt för prover från SFR. Laboratoriekrossat (Lagerblad et al. 2016)

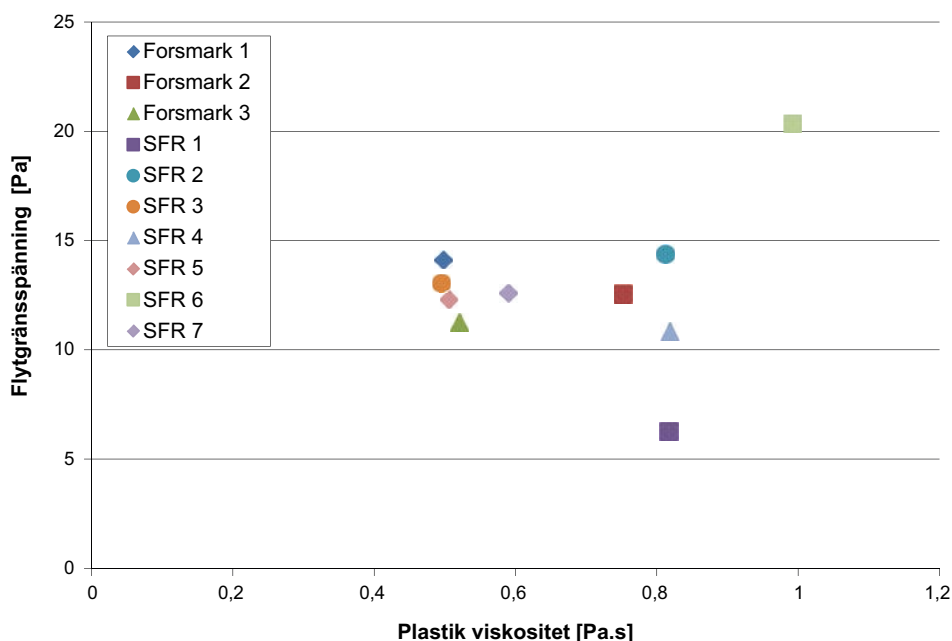


Figur 5-3. Flödestal för ballast prov från SFR-området. (Lagerblad et al. 2016).

5.4 Reologiska undersökningar av mikrobruk

Mikrobruket innehåller alla komponenter mindre än 0,125 mm inkluderande vatten, filler, cement, fina luftbubblor, tillsatsmaterial och tillsatsmedel. Mikrobruket är därför en väsentlig parameter speciellt om man vill tillverka en betong med en liten mängd cement och vatten, som den till kassunerna. Mikrobrukets egenskaper testas därför separat.

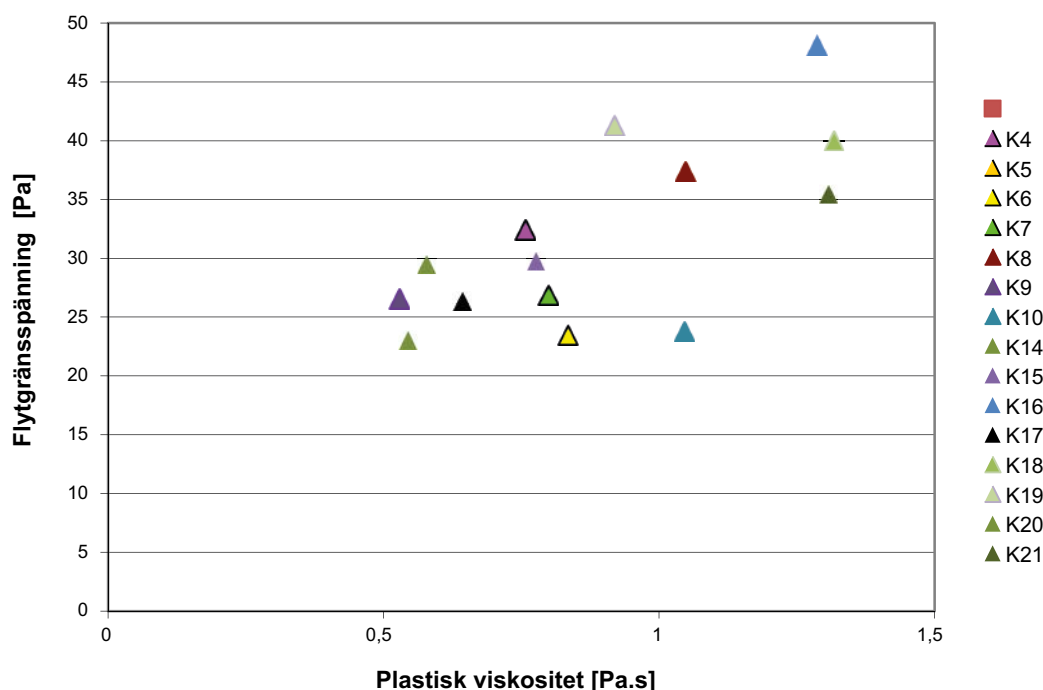
Figur 5-4 visar reologin för mikrobruk tillverkat av ballastprover från SFR-området och från området för det framtida Slutförvaret för använt bränsle, benämnda "Forsmark 1, 2, 3". Som tidigare utmärker sig prov SFR6 genom att ge både högre flytgränsspänning och plastisk viskositet. Detta indikerar att prov SFR 6 innehåller olämpligt material i fillerfraktionen. Generellt ger de granitiska bergarterna från SFR-området bra fillermaterial. Det bör noteras att fillern inte är viktad vilket medför att variationer i kornstorlek mellan 0–0,63 mm och ej 0,63–0,125 mm slår igenom.



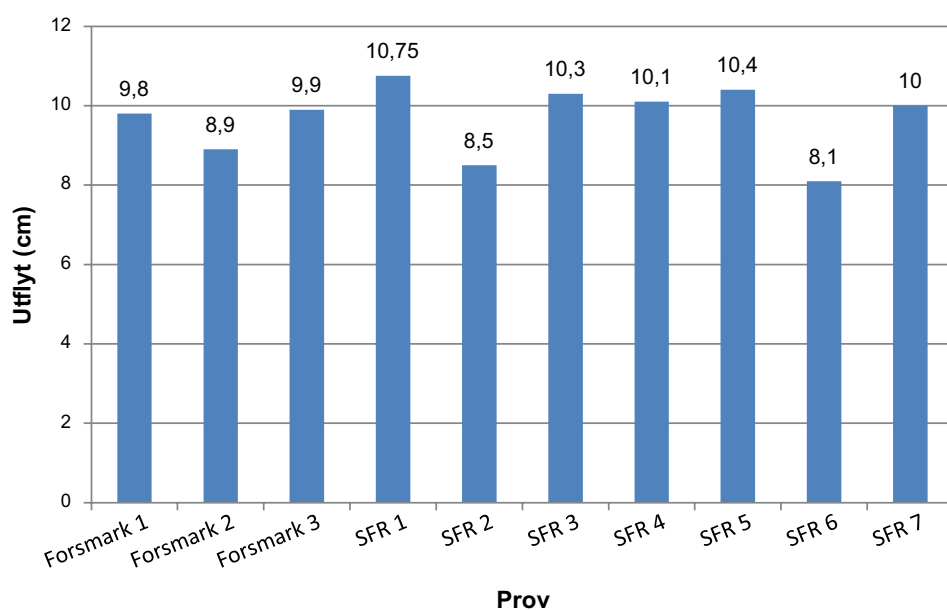
Figur 5-4. Flytgränsspänning och plastisk viskositet för mikrobruksblandningar med krossprodukter från SFR-sområdet och området vid det framtida Slutförvaret för använt bränsle, benämnda "Forsmark 1, 2, 3". Mätningarna har gjorts med en Physica MCR 300 vikometer med en CC27/P cylinder uppställning. (Lagerblad et al. 2016).

Figur 5-4 kan jämföras med de data som redovisas i figur 5-5 och vilka visar mikrobruksreologi från ett större urval konkrossade material. (figur 5-5 visar ett urval ur figur 5-14 vilken även visar bruksblandningar med VSI-krossade och vindsiktade material) Det framgår här att egenskaperna hos mikrobruket tillverkat av ballast från SFR-området står sig väl i denna jämförelse.

Figur 5-6 visar utflyt från en minikon (se avsnitt 4.3.3) och bekräftar tidigare observationer att bruk tillverkat av SFR6-provet har dåliga reologiska egenskaper. Även prov SFR 2 visar sämre utflyt vilket är i linje med vad som visas i figur 5-4 men även med undersökningen av flödestalet (figur 5-3). Prov SFR 2 är en pegmatit och ingen vanlig granit. Detta indikerar att den pegmatitiska bergarten innehåller något i fyllerfraktionen som försämrar dess egenskaper.



Figur 5-5. Mikrobruksreologi (0–0,125 mm) för bruksblandningar innehållande konkrossad ballast (Vinnova 2015). Figuren visar ett urval av de prover som visas i figur 5-14.



Figur 5-6. Utflyt av mikrobruk med krossballast från Forsmarksområdet uppmätt med minikon. Stort utflyt (diameter) indikerar bra mikrobruk. (Lagerblad et al. 2016).

5.5 Reologitester av bruksblandningar

5.5.1 Prover från SFR-området

Lagerblad et al. (2016) genomförde även reologitester av bruksblandningar innehållande ballast från de olika proverna från SFR-området. Vid provning användes ett standardiserat bruk där volymen ballast, cement och vatten hölls konstant. För en beskrivning av metodiken, se avsnitt 4.3.3. För att få bort effekten av kornfördelningen så är ballasten siktad och fraktionerna normaliserade till samma kornkurva baserat på volym.

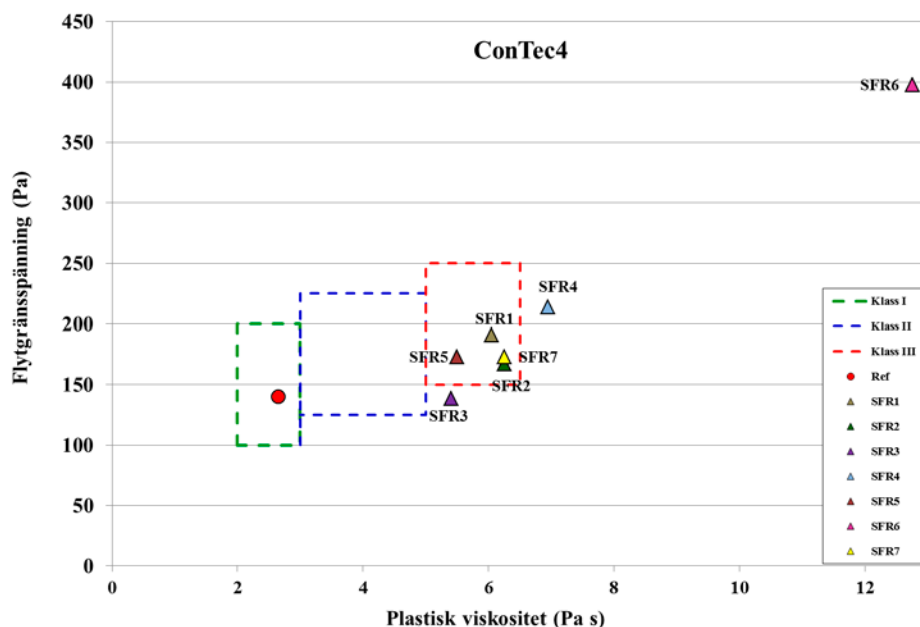
Figur 5-7 visar plastisk viskositet och flytgränsspänning för bruksprov innehållande laboratorie-krossad ballast från SFR-området undersökt med ConTec4. Samtliga bruksprover tillverkade med ballast från SFR-området klassas här som tillhörande klass 3, bortsett från SFR6 som ligger långt utanför gränserna. För bedömningskriterier, se avsnitt 4.3.3.

I figur 5-8 redovisas plastisk viskositet och flytgränsspänning för bruk tillverkat med ballast tillverkade från samma prover och borrhärnor som proverna i figur 5-7 vilka testats med MARS III. En jämförelse mellan figur 5-7 och 5-8 visar att de båda metoderna ger likvärdiga resultat.

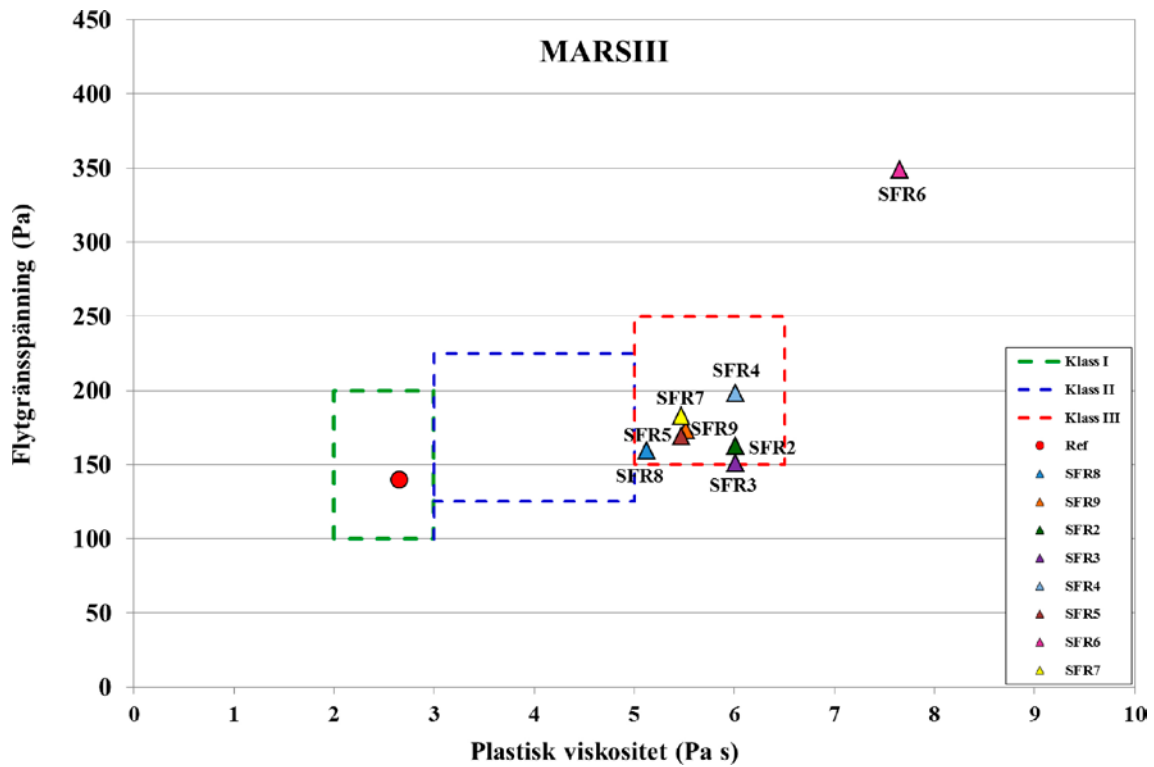
5.5.2 Jämförelse med material från likartat berg

I syfte att erhålla en mer heltäckande bild över egenskaperna hos det framtida entreprenadberget från SFR-området redovisade Lagerblad et al. (2016) egenskaperna från täkter med likartad berggrund från Mälardalsområdet, figur 5-9.

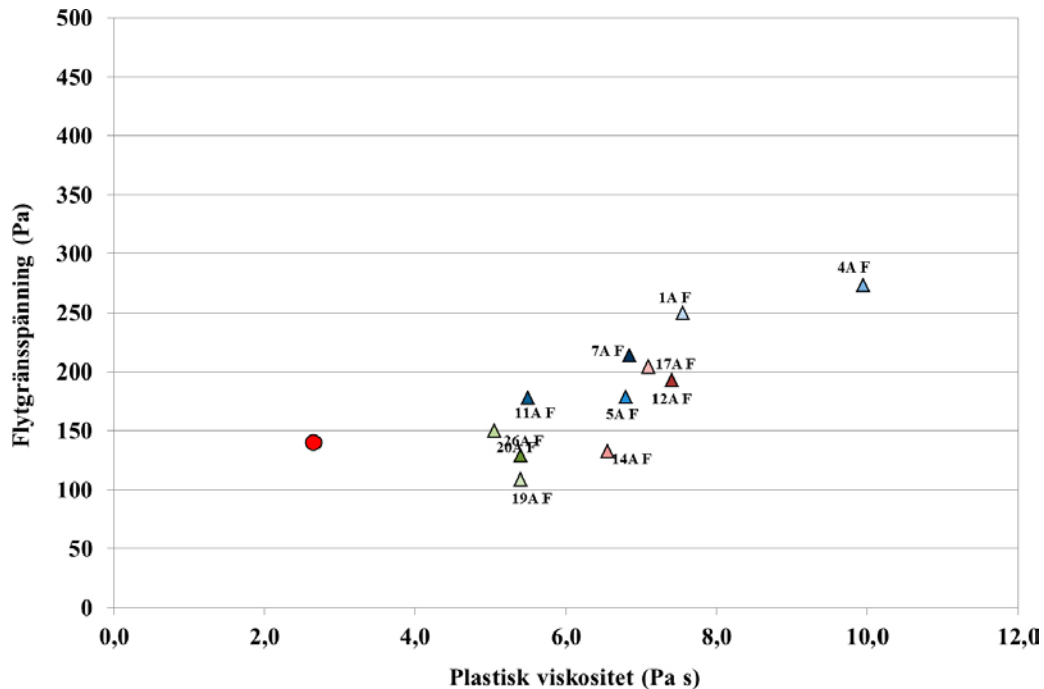
Figur 5-9 visar plastisk viskositet och flytgränsspänning för en serie bruk tillverkade av laboratorie-krossad granitisk ballast från Mälardalsområdet. En jämförelse med figur 5-7 och 5-8 visar att egenskaperna är likartade som de bruk som tillverkats av ballast från SFR-området. Detta innebär att det entreprenadberg som kan förväntas erhållas från utsprängningen av anläggningen kan förväntas motsvara det som kan erhållas från andra täkter i närområdet och att material från andra täkter därför kan användas vid betongutvecklingen.



Figur 5-7. Plastisk viskositet och flytgränsspänning mätt med ConTec4 för bruk tillverkade av ballast från SFR-området. Ballasten har krossats i en laborierkross. Ref-provet innehåller naturballast. (Lagerblad et al. 2016)



Figur 5-8. Plastisk viskositet och flytgränsspänning mätt med MARS III, för bruk tillverkade av ballast från SFR-området. Ballasten har krossats i en laboratoriekross. Ref-provet innehåller naturballast. (Lagerblad et al. 2016)



Figur 5-9. Plastisk viskositet och flytgränsspänning mätt med ConTec 4 för bruk innehållande ballast tillverkad av granitiska bergarter från Mälardalen. Ballasten har krossats i en laboratoriekross. Ref-provet (röd cirkel) innehåller naturballast. (Lagerblad et al. 2016)

5.5.3 Representativitet hos laboratoriekrossat material

Vilket nämndes i avsnitt 4.3.3 så har det material vars egenskaper som betongballast karakteriserats i denna studie tillverkats genom krossning i en laboratoriekross. I syfte att verifiera att ballast tillverkad med denna metod är representativ för det material som tillverkats genom krossning i större produktionsanläggningar jämförs här detta med material med likartad bergartssammansättning som krossats i en produktionsanläggning.

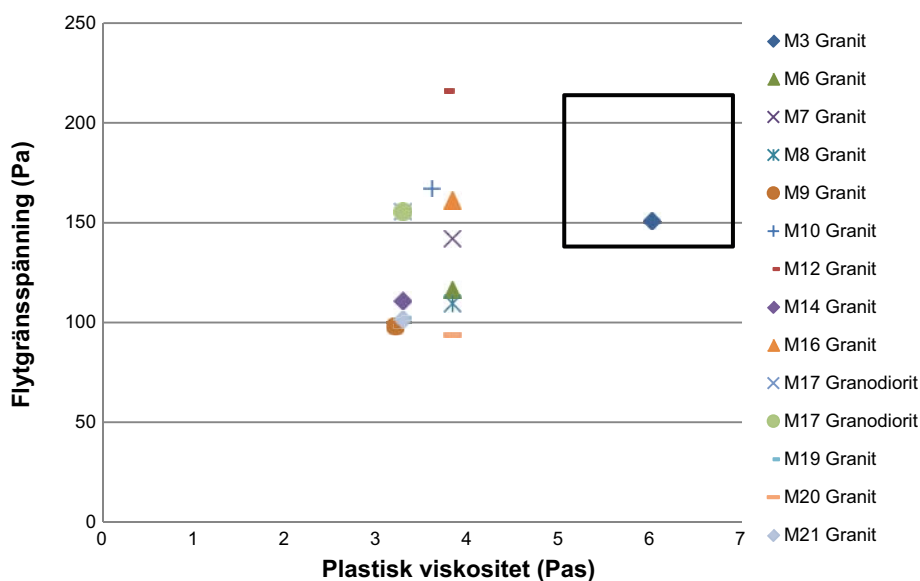
Figur 5-10 visar resultat från en tidigare studie där bruk innehållande kommersiellt konkrossade graniter av likartad typ som de som identifierats vid SFR har testats, här benämnda ”M-” (Vinnova 2015). Vilket framgår av figur 5-10 har dessa prover generellt sett lägre flytgränsspänning och lägre plastisk viskositet än de prover från SFR-området som visas i figur 5-7 och 5-8 och vilka markerats med en svart fyrkant i figur 5-10. Detta antyder att den laboratoriekrossade ballasten i bruksblandningarna från SFR-området ger bruk med högre flytgränsspänning och plastisk viskositet än vad som skulle förväntats om ballasten krossats i en storskalig produktionsanläggning. Möjligen kan prov SFR6 här utgöra ett undantag.

5.5.4 Undersökning av ballast från till SFR närliggande täkter

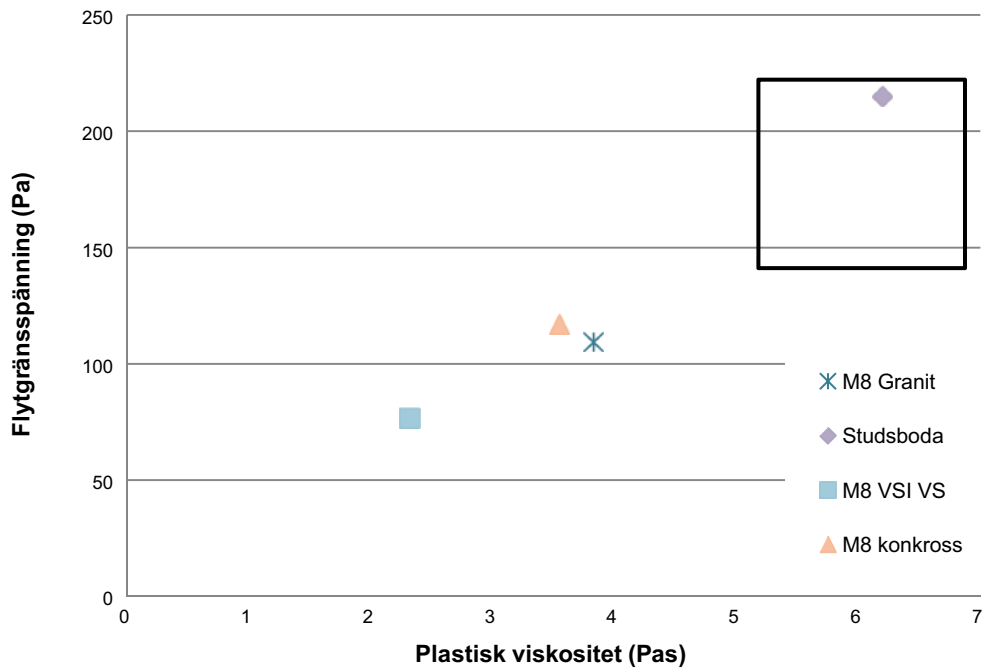
Som en del i det förberedande arbetet inför utvecklingen av en betong till kassunerna i 2BMA genomförde Lagerblad et al. (2016) även karakterisering av ballastegenskaperna hos material från närliggande täkter, figur 5-11. Syftet med detta var att identifiera täkter med en bergartssammansättning som skulle kunna ge en ballast med likartade egenskaper som ballast tillverkad av entreprenadberget från SFR3.

Det material som mest liknar berget vid SFR-området är från en täkt belägen vid Sälgsjön. Berg från denna täkt testades i Vinnova-projektet (Vinnova 2015) och är här benämnd ”M8 granit”. Detta material fanns tillgängligt både som konkrossat samt VSI-krossat och vindsiktat och testades åter inför de nya försöken. Studien visade att ballasten från Sälgsjön var mer lämplig för användning vid utvecklingen av betongen till 2BMA än materialet från Studsboda vilket gav dåliga värden till stor del beroende på att det innehöll rikligt med biotit (Lagerblad et al. 2016).

Om man jämför gamla M8, benämnt ”M8 granit”, med nya körningen med M8, benämnt ”M8 konkross” så framgår att reologivärdena har förändrats en aning, dock ej markant. Den troliga anledningen till uppmätt skillnad är den att det tidigare använda byggcementet har bytts ut mot bascement av Cementa vilket innebär att proverna inte är helt identiska. Detta visar att man alltid måste köra med en referensballast eller göra jämförelse inom en testsekvens. Resultaten visar även den positiva effekten av VSI-krossning (VSI: Vertical Shaft Impactor) och vindsiktning, prov benämnt ”M8 VSI VS”.



Figur 5-10. Reologiska egenskaper för bruk tillverkade av olika bergartsmaterial som krossats i konkross i ordinarie produktion (Vinnova 2015). Den infällda rutan markerar SFR-provernans egenskaper (figur 5-7 och 5-8).



Figur 5-11. Reologiska egenskaper för prover tillverkade av berg från Sälgsjön (benämnda M8) och Studsboda (Vinnova 2015 och Lagerblad et al. 2016). De två nedersta M8-proverna kommer från det material som använts vid betongprovningarna i detta projekt. Den infällda rutan markerar SFR-provernas egenskaper (figur 5-7 och 5-8).

5.6 Effekt av krossningsteknik och vindsiktning

Ett krossat materials lämplighet som betongballast beror på en kombination av bergartstyp, bergartstextur och krossningsteknik. Man kan även förändra dess lämplighet genom siktning, exempelvis vindsiktning. En studie rörande effekten av krossningsteknik redovisas i Vinnova (2015).

5.6.1 Krossningsteknik

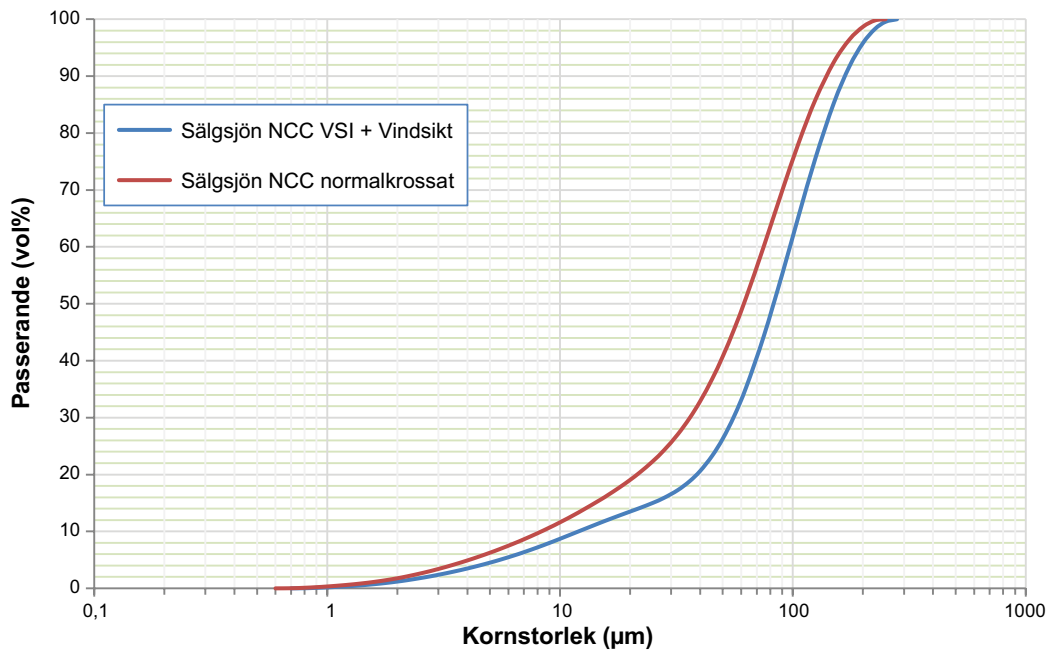
Normalt sker produktion av krossballast genom att berget efter sprängning krossas och siktas i ett flertal olika steg. Vanligtvis följs en första siktning av krossning av de största blocken i en så kallad käftkross vilken trycker sönder stenen vilket ger ett flisigt material. I efterföljande steg används oftast en konkross vilken består av en kon som roterar mot en mantelyta. Detta ger en kombination av tryck och nötning som ger mera kubiska korn än käftkrossen.

En ny metod som kommer i allt större utsträckning är VSI-krossning. Principen bakom VSI-krossning är att stenmaterialet slungas ut mot en mantelyta av stenmaterial vilket ger en avrundning av kanter och därmed minskar flisigheten. Ofta används VSI-krossning i ett sista steg för att få mera kubiska fragment. Effekten är bäst i de grövre fraktionerna medan den är sämre hos finmaterialet då detta som tidigare påpekats består av enskilda mineralkorn vilka inte enkelt sönderdelas.

5.6.2 Vindsiktning

Vid vanlig siktning kan antalet glimmerpartiklar per viktenhet i en siktfraktion vara mångfalt högre än antalet kubiska partiklar. Då alltför stort innehåll av glimmer i ballasten kan påverka betongens arbetsbarhet negativt vill man ofta avlägsna denna. Som ett komplement till konkrossning, VSI-krossning och vanlig siktning kan därför även vindsiktning av ballasten genomföras. Vid vindsiktning lyfts partiklarna av en luftström och på detta sätt kan glimmerpartiklarna avskiljas då de är flakiga och därför har relativt högre lyftkraft än kubiska partiklar. Vindsiktning ger därmed en liknande sortering som vid vanlig siktning men är betydligt känsligare för skillnader i ballastkornens form.

Vindsiktning kan också användas för att justera kornkurvan och speciellt för att minska mängden filler där vindsikten framför allt tar bort partiklar mindre än 60 μm (se figur 5-12).

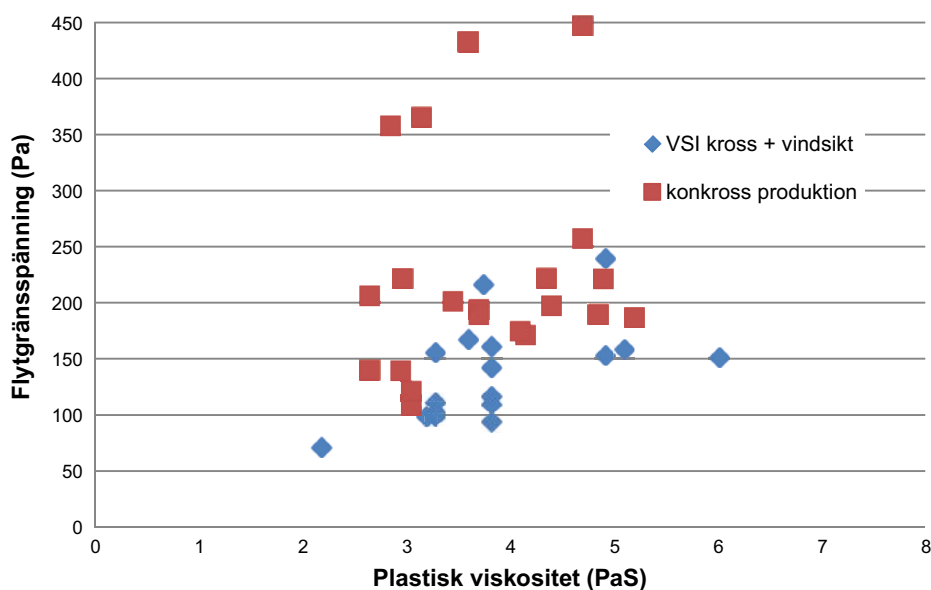


Figur 5-12. Effekten av vindsiktning på konkurvan studerat med lasersikt (Vinnova 2015).

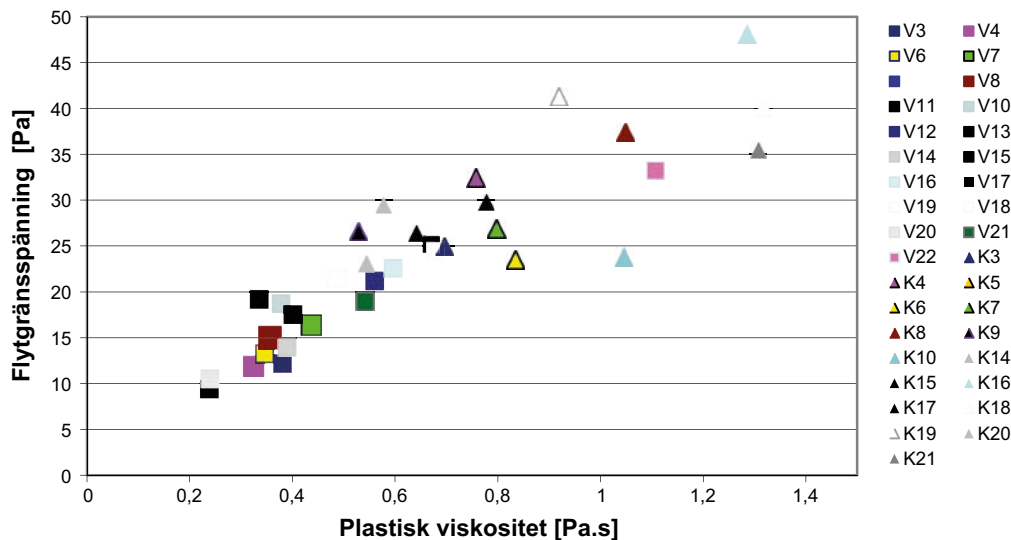
5.6.3 Inverkan av krossningsteknik och vindsiktning på bruksreologin

Effekten av VSI-krossning och vindsikt av ballasten på brukets rörlighet visas i figur 5-13. Här kan noteras att det främst är flytgränsspänningen som förbättras men en viss effekt kan även observeras för den plastiska viskositeten. Man måste dock skilja på VSI och vindsikt och vad som förbättrar reologin. VSI-krossning ger framför allt en bättre kornform på bergartsfragmenten men påverkar de fria materialen i de finare fraktionerna mindre.

Figur 5-14 visar reologin på mikrobruk tillverkat med vindsiktat material (betecknade V) respektive mikrobruk tillverkat med konkrossad ballast från ordinarie produktionen (betecknade K). Vilket framgår av figur 5-14 så sjunker både den plastiska viskositeten och flytgränsspänningen i bruket när finmaterialet har avlägsnats.



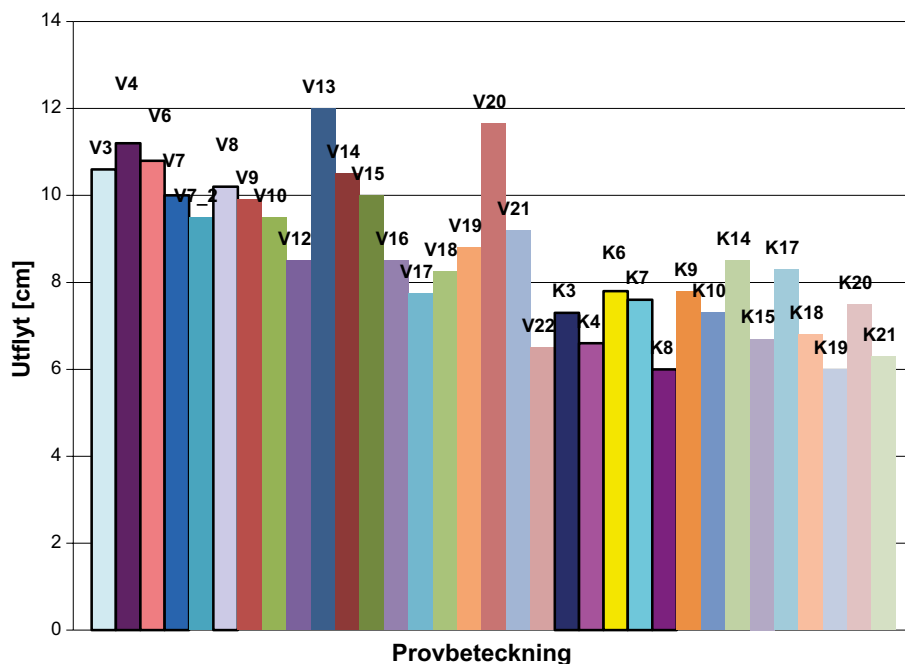
Figur 5-13. Plastisk viskositet och flytgränsspänning studerat med ConTec 4 för prov från VSI-krossad och vindsiktad krossballast jämfört med konkrossad från produktion (Vinnova 2015). För sammansättning av standardbruk se avsnitt 4.3.3.



Figur 5-14. Mikrobruksreologi (0–0,125 mm) med blandningar som dels har vanlig konkrossad ballast betecknade K (trianglar) dels VSI-krossat och vindsiktat material betecknat V (kvadrater). (Vinnova 2015)

Man måste dock här beakta att vindsiktning medför att mängden mikrobruk minskar vilket kan medföra att betongens arbetbarhet påverkas negativt. Vid proportionering av betong med krav på låg cementhalt, såsom i detta arbete, kan en alltför låg halt finmaterial medföra att mängden mikrobruk blir alltför låg och betongens arbetbarhet därmed inte tillräcklig. Av denna anledning kan kompletterande fillermaterial, företrädesvis väl karakteriserat material i noga specificerade kornstorleksfördelningar och med lämplig kornform behöva tillsättas.

Mikrobruket har även testats i en minikon (figur 5-15). Se avsnitt 4.3.3 för beskrivning. En närmare granskning av de stora dragen i figur 5-14 och 5-15 visar att det finns en korrelation mellan reometern och utflyt. Det framgår tydligt att de konkrossade materialens högre flytgränsspänning och plastiska viskositet avspeglas i ett lägre utflyt. Det material som VSI-krossats och vindsiktats uppvisar i stället ett längre utflyt i kombination med lägre flytgränsspänning och plastisk viskositet. Detta innebär att minikonen kan användas som en relativt enkel metod för produktionskontroll av fillerfraktionen.



Figur 5-15. Minikontester av fillerprov som kommer från material som dels varit VSI krossat och vindsiktat (betecknade V) och dels varit konkrossat från normalproduktion (Betecknade K). (Vinnova 2015)

5.7 Slutsatser ballast och rekommendation

De i Lagerblad et al. (2016) redovisade och här sammanfattade undersökningarna har visat att berget i den bergsvolym i vilken utbyggnaden av SFR planeras att förläggas kan utgöra ett lämpligt utgångsmaterial för produktion av betongballast. Det finns emellertid bergarter som kan ge material som är mindre lämpligt som betongballast, exempelvis en här påträffad basisk bergart.

Rekommendationen är att entreprenadberget från utsprängningen av slutförvarsanläggningen selekteras så att det som krossas till betongballast framför allt utgörs av relativt homogena bergarter med granitisk sammansättning med låg halt av glimmer, här ofta förekommande som biotit. De basiska bergarterna liksom pegmatiterna bör undersökas närmare om dessa skall tas med vid krossningen. Det deformerade berget bör undvikas då detta kan vara alkalireaktivt och även ger relativt flakiga partiklar.

Som en del i provningarna av ballastens lämplighet bör försökskrossning av utbrutet berg genomföras. Försöksblandningar av bruk bör utföras med standardiserat bruk och undersökas antingen i reometer eller med Hägermankon. Rutinmässig kontroll kan göras på plats med Hägermankon.

Fillerfraktionen i ballasten bör undersökas separat. För att begränsa krympningen måste mängden vatten i kassunbetongen begränsas och mängden mikrobruk är därför viktig. En hög halt filler är positivt under förutsättning att denna håller en bra kvalitet. Fillern kan innehålla olika typer av leror eller finkornig glimmer som kan medföra en försämrad arbetbarhet. Fillerns egenskaper undersöks lämpligen med minikon. Om fillern innehåller större mängder flakiga/stängliga mineral bör dessa avlägsnas genom vindsiktning.

För att få den bästa betongballasten, med kubiska korn, bör berget slutligen krossas med VSI-teknik. För utvecklingen av kassunbetongen bör initialt ballast från Sälgsjön användas. I senare skeden av utvecklingsarbetet bör dock även ballast från andra täkter undersökas för att skapa en bild över betongreceptets robusthet gentemot variationer i ballastens egenskaper.

6 Identifiering av grundrecept för kassunbetongen

I detta kapitel diskuteras den grundläggande proportioneringen av betongen med utgångspunkt i de krav som identifierats för betongen till kassunerna i 2BMA, avsnitt 2.4. Genom en analys av egenskapskraven identifieras först ett baskoncept för betongen. Detta följs av att en lämplig kornkurva beräknas och slutligen presenteras ett grundrecept inför laboratorieutvecklingsarbetet.

6.1 Analys av egenskapskrav

6.1.1 Hållfasthet

Tryckhållfastheten 28 dygn ska vara minst 40 MPa och ska vid 90 dygn överstiga 50 MPa. Detta fordrar normalt ett vct ej överstigande 0,5. Hållfastheten kan dock även ökas genom tillsats av inert filler eller en puzzolan, se även bilaga B.

En betong med en högre tryckhållfasthet än 50 MPa ger generellt en högre draghållfasthet än kravet på 2,5 MPa (Svensk byggtjänst 2017) varför detta krav inte påkallar några specifika receptjusteringar.

För att nå önskad hållfasthet bör i detta arbete en kombination av lågt innehåll av cement och vatten i kombination med tillsats av finmald kalkstensfiller användas.

6.1.2 Krympning

Det finns olika typer av krympning varav autogen krympning, temperaturkrympning och uttorkningskrympning alla måste beaktas vid utformning av en betong med krav på låg krympning.

Autogen krympning

Den autogena krympningen – i (Svensk byggtjänst 2017, avsnitt 9.4.2) definierad som ”den yttre observerade krympningen utan fuktutbyte och vid konstant temperatur (även benämnd baskrympning), (som således sker på grund av de kemiska reaktionerna)” – beror på att den totala volymen av cement och vatten i den färska betongen är större än den härdnade cementpastan. Den autogena krympningen sker huvudsakligen under det första dygnet innan betongen är så hård att den kan motstå krympningen. Den senare autogena krympningen ger i motsats till uttorkningskrympning volymändring utan gradienter, d v s hela kroppen minskar i volym. I den färska flytande betongen ger den autogena krympningen endast en sättning och inga sprickor uppstår.

För att minska den autogena krympningen bör mängden cement vara så liten som möjligt. Dock, vilket diskuterats tidigare så medför en minskad cementmängd under krav på konstant vct att mängden mikrobruk kommer att minska och därmed betongens arbetbarhet att försämrats. Som komplement till cement och vatten kan mängden mikrobruk ökas genom tillsats av inert filler.

Temperaturkrympning

Temperaturkrympning sker under de första veckorna efter gjutning när betongen svalnar efter den temperaturökning som sker under hydratationen och vilken är en konsekvens av att cementreaktionerna är exoterma. Temperaturökningen sker i färsk betong och då denna är plastisk bildas inga sprickor under denna fas. Däremot sker en expansion i den plastiska betongen.

När den varma betongen efter hårdnandet svalnar uppstår en krympning. Konsekvensen av denna krympning beror på mothåll och beräknas med utgångspunkt från konstruktionens utformning. För att motverka värmesprickor skall mängden cement vara liten och cementet avge så lite värme som möjligt.

För att begränsa temperaturstegringen under hydratationen bör därför ett cement med en låg eller medelhög värmeavgivning användas. Cementhalten bör vidare väljas så låg som möjligt givet att krav på betongens arbetbarhet kan uppfyllas. För att kompensera för en låg cementhalt kan mängden mikrobruk ökas genom tillsats av inert filler.

Uttorkningskrympning

Uttorkningskrympning är en konsekvens av att betongen krymper när vattnet i kapillärsystemet avdunstar och sker under lång tid efter gjutningen. Krympningen beror därför på den lokala miljön på platsen för gjutning och vatteninnehållet i betongen. Uttorkningskrympningen är avhängig betongens kapillärporositet som i sin tur är ett resultat av att det överskott vatten som ingår i betongen men som inte deltar i hydrationsprocesserna bildar kapillärer efter cementshydratationen och hårdnandet.

För att minska uttorkningskrympningen bör den färska betongen därför innehålla så lite vatten som möjligt i beaktande av dess övriga egenskapskrav. Dock, för att uppnå önskad rörlighet (färsk betong) och styrka (härdad betong) bör inte vct förändras vilket innebär att en minskad vattenmängd måste kompenseras med en i samma omfattning minskad cementmängd. Konsekvensen av detta är dock att pastamängden minskar och att betongens arbetbarhet försämras. Detta kan kompenseras för genom tillsats av inert filler.

6.1.3 Arbetbarhet

Kraven på betongens arbetbarhet relaterar huvudsakligen till konstruktionens form, mängd armering samt formens utformning och möjlighet till vibrering av den färska betongen. I fallet med kassunerna till 2BMA kommer formen att vara vid och öppen. Detta i kombination med att ingen armering kommer att användas och att det därför finns goda möjligheter att vibrera betongen innebär att en relativt styv betong kan användas, dock under förutsättning att den är pumpbar.

Möjligheten att använda en mer lättflytande betong, en självkompakterande betong, kan också beaktas men för kassungjutningen bör då risken för att en långsam hydratation ger mycket höga formtryck även beaktas. En självkompakterande eller mycket lättflytande betong kan dock inte användas i det fallet att kassunerna ska uppföras genom hängformsgjutning, se avsnitt 2.3. Då krävs i stället en styvare betong med ett relativt snabbt tillstyvnande (kort öppettid).

Även det faktum att betongen ska pumpas i formen ställer krav på dess arbetbarhet. Vid pumpning transporteras betongen i pumpröret som en plugg och en skjuvning uppstår därför i betongen i kontaktzonen med röret. Detta medför att cementpasta dras mot skjuvzonen och smörjer ”pluggen”. Detta medför i sin tur att mängden mikrobruk behöver vara relativt stor för att förhindra att förlusten av pasta medför att betongens pumpbarhet kraftigt försämras med risk för pumpstopp. Dessutom bör betongen ha en bra sammanhållning så att den håller samman även under pumpning.

För att säkerställa att betongen har en tillräckligt god arbetbarhet måste mängden mikrobruk vara tillräckligt hög men inte så stor att betongen blir för lättflytande då detta kan leda till separation.

I beaktande av övriga egenskapskrav bör därför en låg cementmängd i kombination med ett vct på cirka 0,5 samt tillsats av inert kalkstensfiller användas. Detta förväntas ge en betong med en tillräckligt stor mängd mikrobruk vilken är pumpbar och har en god gjutbarhet.

Utöver detta tillsätts superplasticerare för att ytterligare förbättra betongens arbetbarhet.

6.1.4 Öppethållandetid

Kraven på betongens öppethållandetid härrör huvudsakligen från behovet att kunna pumpa betongen i formen efter en viss transporttid samt att kunna vibrera ihop på varandra efterföljande pallar på ett tillfredsställande sätt så att inga valkar eller gjutfogar uppstår. Öppethållandetiden får dock inte vara så lång att den försenade tillstyvnaden medför att ett alltför högt gjuttryck uppstår. Detta är särskilt viktigt vid gjutning av höga konstruktioner såsom väggar till kassunerna i 2BMA.

Öppethållandetiden är framför allt avhängig temperatur och typ av cement men även olika typer av tillsatt filler kan påverka denna. Öppethållandetiden kan ökas genom tillsats av en retarder, alltså kemikalier som under en tid försenar cementshydratationen.

I detta arbete föreligger inget behov av att korrigera cementhydratationen i det inledande laboratorieutvecklingsarbetet och någon retarder används därför inte där. Retarder bedöms inte heller nödvändig vid de inledande testblandningarna i laboratorieskala på betongstationerna i Västberga och Kalmar då fokus i dessa tester huvudsakligen ligger på betongens arbetbarhet.

I det sista skedet i detta arbete, innefattande pumptest samt transportsimulering inför den planerade provgjutningen i Äspölaboratoriet, bedöms däremot användning av retarder nödvändig för att säkerställa en tillräckligt lång öppethållandetid. I detta arbete valdes därför att använda den på fabriken i Kalmar tillgängliga retardern, Master Set RT 401. Denna användes även vid de laboratorieundersökningar som genomfördes på CBI som en del i inkörningsprocessen.

6.1.5 Beständighet

Efter förslutning av SFR kommer anläggningen att sakta fyllas med grundvatten och betongkonstruktionerna till slut helt mättas med detta grundvatten. Under de mycket långa perioder som kassunernas funktion måste kunna upprätthållas kommer betongen att interagera med grundvattnet och med de joner som finns lösta i detta. Dessa interaktioner kan påverka betongen genom exempelvis följande processer:

- **Lakning av lösliga cementmineral:** Initialt lakas porvattnets innehåll av lösliga alkalihydroxider. Detta följs av lakning av portlanditen och sist CSH-gelen.
- **Sulfatreaktioner:** Grundvattnet kan även innehålla sulfatjoner vilka kan reagera med cementmineralerna och bilda svällande mineral vilka kan påverka betongens beständighet.
- **Alkali-silikareaktioner:** Under de mycket långa tidsperioder som är aktuella i detta fall finns även en viss risk att den granitiska ballasten kan komma att reagera med cementporlösningarna och att en svällande gel bildas.

För att säkerställa betongens långsiktiga beständighet valdes i detta arbete att använda Degerhamn anläggningscement. Detta är ett lågalkaliskt cement vilket medför att risken för alkali-silikareaktioner begränsas. Det har även ett lågt innehåll av tricalciumaluminat, C3A, vilket minskar risken för bildning av svällande sulfatinnehållande mineral såsom ettringit. Slutligen förväntas användning av en låg cementmängd i kombination med ett vct runt 0,5 och användning av finmalda fillermaterial att ge en tät betong vilken lakas endast mycket långsamt.

6.2 Baskoncept för kassunbetongen

Med bakgrund i diskussionen och analysen i avsnitt 6.1 utformades ett baskoncept för kassunbetongen vilket sammanfattas i punktform nedan.

- **Cement:** Anläggningscement från Cementsa (CEM I, 42,5 N LA MH SR3) vilket är lågalkaliskt, sulfatresistent och ger moderat värmeutveckling används. Som en första ansats valdes en cementmängd på 300 kg/m³.
- **Vct:** För att uppnå tillräcklig täthet och styrka används ett vct runt 0,5 vilket ger vattenmängden 150 kg/m³.
- **Ballast:** Ballasten skall likna den som kan förväntas komma från entreprenadberget från Forsmark. Det förväntas bli ett granitiskt berg och att berget har selekterats så att allt skiffrikt berg eller berg med mycket glimmer och med besvärlig filler undviks.
- **Filler.** I de fall krossproduktens fillerfraktion är otillräcklig eller av dålig kvalitet kan fillerfraktionen ersättas eller kompletteras med kommersiell filler.
- **Superplasticerare:** Superplasticerare används för att justera betongens arbetbarhet.
- **Retarder.** Retarder tillsätts vid uppskalningsförsök på betongstation inför den planerade provgjutningen i Äspö. Inget behov av retarder anses föreligga vid de inledande laboratorieexperimenten.

6.3 Arbetsgång

Följande arbetsgång förutses:

- Framtagning av så kubisk ballast som möjligt. Här antas att den ballast som kommer att användas vid uppförande av anläggningen är selekterad och kubiserad.
- Ballastens storleksfördelning optimeras så att så lite mikrobruk som möjligt behövs.
- Mängden erforderligt mikrobruk beräknas. Mikrobruket beräknas initialt på 300 kg/m³ cement, 150 kg/m³ vatten och filler material under 0,125 mm.
- Mikrobruket proportioneras genom variationer i mängden cement men även genom tillsats av filler, exempelvis finmald kalksten. Utöver detta kan även luftporbildare utnyttjas, men detta minskar betongens hållfasthet.
- Testblandningar görs med olika mängd och typer av superplasticerare så att rätt sättmått erhålls.
- Vid behov tillsätts retarder för att förlänga öppethållandetiden.

6.4 Använda delmaterial

Med utgångspunkt i den egenskapsanalys som redovisades i avsnitt 6.1 valdes delmaterial till de inledande blandningsförsöken. I senare skeden av utvecklingsarbetet användes även andra material för att undersöka den utvecklade betongens robusthet gentemot förändringar av egenskaperna hos de ingående delmaterialen. I detta avsnitt presenteras de olika delmaterial som användes vid de olika delarna av utvecklingsarbetet.

6.4.1 Cement

I samtliga fall användes Degerhamn Anläggningscement från CEMENTA AB. (CEM I, 42,5 N, LA, MH, SR3).

6.4.2 Ballast

Följande ballast användes vid de olika stegen i utvecklingsarbetet.

Ballast använd vid laboratorieutveckling

Under laboratorieutvecklingsarbetet på CBI har konkrossad samt VSI-krossad och vindsiktad finballast från en granitisk täkt vid Sälgsjön söder om Gävle använts. Utöver detta har även konkrossad finballast från Gladö i Huddinge söder om Stockholm använts. Som grovballast (> 4 mm) valdes granitisk ballast från Gladö.

Ballast använd vid blandning på Swerocks betongstation i Västberga

För betongblandningarna i Västberga användes den på fabriken befintliga ballasten från Gladö. Finballasten var VSI-krossad men inte vindsiktad. Detta gällde både de förberedande blandningarna i laboratorieskala och i fullskaleförsöket.

Ballast använd vid blandning på Swerocks betongstation i Kalmar

För försöken i Kalmar valdes på fabriken befintlig ballast. Finballasten kom från en granitisk bergtäkt vid namn Rolsmo ägd av PEAB. En besiktning av Rolsmotäkten som ligger söder om Lessebo i Småland, visade att täkten innehåller en homogen medelkornig granit med relativt lågt glimmerinnehåll. Den var dock inte kubiserad och kornen över 0,5 mm var relativt flakiga och avlånga. Den gav dock relativt bra värde i bruksblandningar och bedömdes vara relativt bra.

Som alternativ valdes också en ballast från en täkt strax utanför Kalmar (Rockneby). Ballasten i denna täkt var granitisk med ett relativt lågt glimmerinnehåll och var VSI-krossad men däremot inte vindsiktad.

Grovballasten kom från en täkt i Runtorp (Nybro grus) väster om Kalmar.

Mängden filler är viktig för att kunna minska mängden cement (och vatten). Figur 6-1 visar mängden filler i de olika grusorterna. Störst mängd filler har gruset från M8 Konkross och Gladö, medan gruset från Rolsmo och M8 VSI kross innehåller minst. Om man jämför de två olika typerna av M8 så ger det VSI-krossade materialet bättre mikrobruk se figur 5-12 och 5-13. Materialet från Gladö har inte testats inom denna studie men erfarenheter från tidigare arbeten visar att detta material ger ett mikrobruk med goda reologiska egenskaper. Fillern från Lessebo testades inte men från visuell observation i stereomikroskop ser fillern bra ut med små mängder glimmer.

6.4.3 Filler

För att expandera mikrobruket har filler tillsatts till de flesta blandningarna.

I blandningsförsöken och vid fabriksförsöken genomförda inom detta arbete har kombinationer av OmyaCarb 2GU, BetoCarb 10, Myanit 10 och Limus 25 tillsatts. Alla dessa kommersiella filler-material är baserade på finmald kalksten eller dolomit som ger en bra partikelform. OmyaCarb 2GU är finast med en medelkornstorlek på 2 µm. BetoCarb 10 och Myanit 10 har en medelkornstorlek på 8 µm och Limus 25 har en medelkornstorlek på 23 µm. Det använda cementet (Degerhamn Anläggningcement) har en medelstorlek på cirka 20 µm.

Silika (Elkem 920D) användes vid några av försöken. Denna produkt har en medelkornstorlek på 0,15–0,25 µm.

6.4.4. Superplasticerare

Vid försöken har superplasticerare använts för att reglera betongens rörlighet och gjutbarhet.

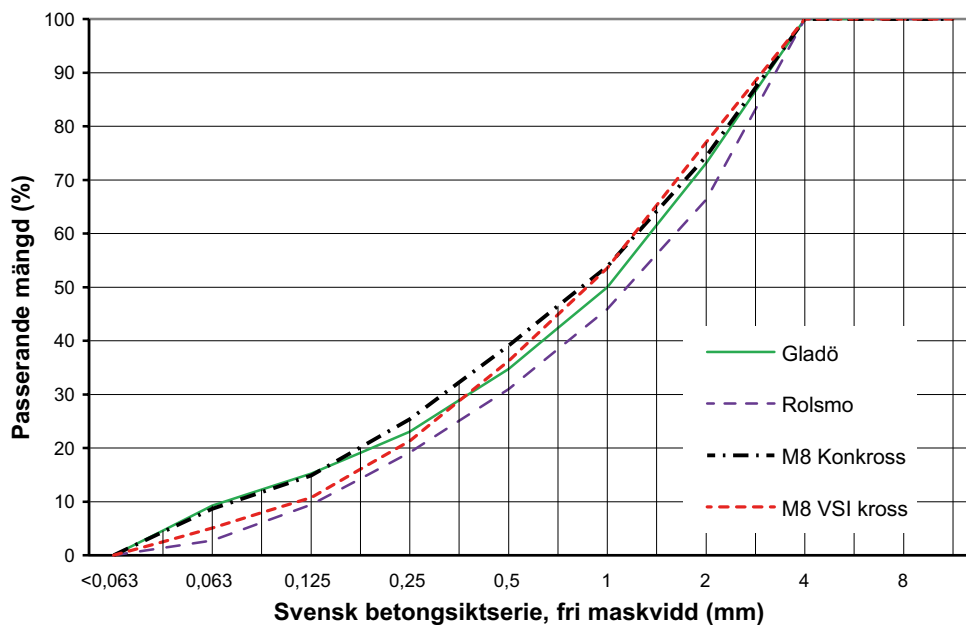
Följande superplasticerare har använts vid de olika stegen i utvecklingsarbetet:

Inledande laboratorieutvecklingsarbete på CBI: Glenium Sky 812.

Arbete kopplat till Swerocks betongstation i Västberga: Master Ease 3500, Master Sure 910.

Arbete kopplat till Swerocks betongstation i Kalmar: Glenium Sky 558, Master Sure 910, Master Ease 3500.

En studie av inverkan av olika typer av superplasticerare redovisas i bilaga A.



Figur 6-1. Siktcurvor för de olika sorterna av finballast.

6.4.5 Retarder

Retarder användes endast vid försöken vid Swerocks betongstation i Kalmar och i de laboratorieförsök som genomfördes på CBI med material från Kalmar. I dessa försök användes Master Set RT 401.

6.5 Grundrecept vid betongförsöken

Grundreceptet för försöken beräknades utifrån användning av konkrossad M8 med 15 procent partiklar < 0,125 mm, se tabell 6-1. Då mängden cement och vatten (300 kg/m³ respektive 150 kg/m³) medför att mängden naturlig filler är för liten för att ge en tillräcklig mängd mikrobruk tillsattes även 30 kg BetoCarb 10. För att förbättra sammanhållningen och ge bättre pumpbarhet tillsattes även 15 kg silikastoft per m³ betong. I mikrobruket lägger man en uppskattad mängd finluft på 20 liter. Detta ger en volym mikrobruk på 331,7 liter per kubikmeter betong.

En lämplig kornkurva baserad på kornform hos krossat berg räknades fram av Hans-Erik Gram vid Cementa AB med ett ännu ej kommersiellt tillgängligt proportioneringsverktyg. Proportioneringsverktyget är baserat på optimal packning av de olika fraktionerna (Svensk byggtjänst 2017, kapitel 11 och 12). Beräkningarna gjordes med utgångspunkt från lös packning av de olika ballastfraktionerna. Lös packning ger ett relativt mått på ballastens korn, så ballastens kornform har indirekt inkluderats i proportioneringen.

Den använda grovballasten i alla försöken är kubiserad genom VSI-krossning. Maximal kornstorlek för ballasten valdes till 25 mm.

Tabell 6-1. Grundrecept baserat på 1 m³ betong använt vid betongbladningarna*.

Komponent	Densitet (kg/dm ³)	Vikt (kg)	Volym (dm ³)
Cement (Cementa Anläggningscement)	3,2	300	94
Silikastoft (Elkem 920 D, (granulerad))	2,2	15	7
Kalkfiller (BetoCarb 10, Omya AB)	2,8	30	11
Vatten (kranvatten)	1,0	150	150
Ballast 16–25 mm	2,65	490	185
Ballast 8–16 mm	2,65	490	185
Ballast 4–8 mm	2,65	100	38
Ballast 0–4 mm	2,65	875	330
Luft	0	0	20

* Receptet är framräknat av H-E Gram, Cementa.

7 Blandningsförsök i laboratorieskala

I detta avsnitt redovisas genomförande och betongens färska egenskaper för samtliga blandningsförsök som genomförts i laboratorieskala – motsvarande en blandarvolym mellan 50 och 250 dm³ – på CBI och Swerocks betongstationer i Västberga och Kalmar. De försök som genomförts i produktionsutrustning på betongstation redovisas i kapitel 8.

7.1 Inledande blandningsförsök på CBI

De inledande blandningsförsöken på CBI gjordes i en mindre tvångsblandare med en volym av 50 liter. Alla blandningar var på 20 liter och recepten redovisas i tabell 7-1 och 7-2 och egenskaperna hos den färska betongen i tabell 7-3.

Observationer vid blandningsförsöken

Nedan följer en redovisning av observationer gjorda under blandningsförsöken.

Recept 1: Betongen var stabil men nära gränsen till instabil. Betongen satt hårt fast i sättkonen och bedömdes inte pumpbar.

Recept 2: Detta recept är samma som recept 1, men med den skillnaden att ballasten tvättats och att den därför innehåller en mindre mängd naturlig filler. Denna betong var inte stabil och bedömdes ej pumpbar. Orsaken till detta bedöms vara att mängden filler och därmed mängden mikrobruk blev för liten. Mängden mikrobruk var 304 liter.

Recept 3 och 4: I recept 3 och 4 ökades mängden cement och vatten (konstant vct) jämfört med recept 2 men i övrigt var recepten i princip identiska. Resultaten visade att betongen blev stabil först när cementmängden ökades till 344 kg per m³. Detta innebär en ökning av mängden mikrobruk till 341 liter. Detta visade att betongens egenskaper är tydligt beroende av mängden mikrobruk.

Recept 5 och 6: I recept 5 och 6 användes konkrossad M8 från ordinarie produktion. Recepten var i övrigt lika recept 1 och 2 bortsett från att ingen kommersiell filler tillsattes. Trots att ballasten var tvättad så blev betongen stabil. Detta visar att mängden mikrobruk är kritisk och att vindsiktningen av M8-ballasten som användes i försök 1–4 tog bort en för stor andel av den naturliga fillerfraktionen i finballasten.

Recept 7–9: I recept 7 ökades mängden filler jämfört med recept 2 för att kompensera för vindsiktning och tvättning men den blev trots detta instabil. Mängden filler ökades därför ytterligare i recept 8 och 9 och betongen blev därmed stabil. I recept 8 är mängden mikrobruk 342 liter d v s samma som i recept 4 där 344 kg cement/m³ användes. Recept 8 gav en något för lättflytande betong varför mängden flytmedel minskades i recept 9.

Recept 10: Recept 10 var likartat recept 5 och 6 med den skillnaden att luftporbildare tillsats för att minska den plastiska viskositeten. Betongens lufthalt blev 6 % vilket medförde att hållfastheten blev alltför låg.

Recept 11 och 12: I recept 11 och 12 testades blandningar mellan konkrossat och VSI-krossat och vindsiktat. Ingen betong blev bra då fillermängden var för liten.

Recept 13: Recept 13 innehöll finballast från Gladö och tillfört filler i form av Limus 25. Limus 25 är grövre än de andra fillerna. Finballasten från Gladö är VSI-krossad men inte vindsiktad vilket medför en relativt hög halt filler (se figur 6-1). Betongen var stabil och innehöll 327 dm³ mikrobruk. Detta visar att man även kan använda filler som är grövre.

Sammanfattning av blandningsförsöken på CBI

De genomförda blandningsförsöken på CBI visade att val av utgångsmaterial och tillverkningsmetoden för ballasten är viktig för att egenskaperna hos den färska betongen ska uppfylla ställda krav på arbetbarhet. Arbetbarheten kan dock justeras genom tillsats av superplasticerare och/eller kommersiella fillermaterial. Av de recept som testats i denna försöksserie bedöms recept 8 vara det som ger bäst egenskaper. Av denna anledning valdes detta recept för de efterföljande blandningsförsöken på Swerocks betongstation i Västberga, avsnitt 7.2.

7.2 Blandningsförsök på Swerocks betongstation i Västberga inför uppskalning till produktionsskala

Inför uppskalning av recept till produktionsskala genomfördes ett antal blandningsförsök vid Swerocks betongstation i Västberga. Blandningsförsöken genomfördes i en tombolablandare (IMER S-250) med en blandningsvolym på 250 liter vilken är något mindre effektiv än en tvångsblandare. Vid försöken tillverkades 20 liter betong i varje sats. 5 stycken försök genomfördes enligt recept 14–18 (tabell 7-2) med utgångspunkt i recept 8. Experimenten kommenteras kortfattat nedan.

Observationer vid blandningsförsöken

Recept 14: Detta är i princip samma som recept 8 med den skillnaden att flytmedlet byttes till de som används vid Västbergafabriken. Inga förändringar i betongens egenskaper noterades jämfört med recept 8.

Recept 15: I recept 15 byttes finballasten mot en från Gladö och mängden filler minskades. Det gav en instabil betong.

Recept 16: I detta recept ökades mängden filler jämfört med recept 15 vilket gav en stabil betong.

Recept 17: Receptet modifierades i recept 17 genom att den grövre fillern, Limus 25, togs bort.

Recept 18: I recept 18 ändrades flyttillsatsförhållandena. Betongen hade en god sammanhållning med ett sättmått efter blandning på 160 mm. Mängden mikrobruk är här 372 liter till stor del beroende på stora mängder filler.

Sammanfattning av blandningsförsöken

Blandningsförsöken vid Swerocks betongstation i Västberga visade att det var möjligt att ersätta vissa av de delmaterial som använts vid de inledande blandningsförsöken på CBI med de på betongstationen befintliga och genom mindre justeringar erhålla en betong med god arbetbarhet. Med utgångspunkt från gjorda observationer beslöts att recept 18 ska användas vid uppskalningen till produktionsskala vid Swerocks betongstation i Västberga, avsnitt 8.1.

7.3 Blandningsförsök på CBI med material från Swerocks betongstation i Kalmar inför inkörning av recept inför provgjutning i Äspö.

Inför uppskalningsförsöken på Swerocks betongstation i Kalmar gjordes en serie blandningsförsök på CBI med den finballast som användes på betongstationen (Rolsmo) vilken transporterats till CBI för ändamålet. Som alternativ testades en finballast från Rockneby. Grovballasten (> 4 mm) var från Gladö.

Observationer vid blandningsförsöken

Recept 19: Recept 19 var i princip identiskt med recept 18 med den skillnaden att en annan finballast användes. Här användes samma superplasticerare som i de inledande blandningsförsöken, avsnitt 7.1. Betongen blev stabil.

Recept 20: I recept 20 tillsattes en betydligt mindre mängd filler än i recept 19 och betongen blev därför på gränsen till instabil. Den var även mycket viskös och bedömdes inte pumpbar.

Recept 21 och 22: Efter recept 20 byttes superplasticerare till den som används vid standardproduktion på betongstationen. Det hade ingen större inverkan förutom att mängden behövde ökas för att få samma reologi. Det uppfattades dock som betongens konsistens blev något bättre.

Recept 23 och 24: I recept 23 och 24 testades inverkan av val av finballast. I recept 23 användes finballast från Rolsmo och i recept 24 från Rockneby. I övrigt var recepten identiska. I dessa blandningsförsök tillsattes även en retarder. Både recept 23 och 24 gav betong med god arbetbarhet. Möjligen gav recept 23 ett något högt sättmått. Detta kan dock lätt justeras genom att sänka mängden flytmedel. De två finballasterna kan anses likvärdiga. I recept 23 är mängden mikrobruk 344 liter.

Sammanfattning av blandningsförsöken

Blandningsförsöken på CBI med material från Swerocks betongstation i Kalmar visade att det var möjligt att använda lokal ballast samt de på betongstationen tillgängliga tillsatsmedlen vid det fortsatta utvecklingsarbetet inför uppskalningsförsöken inför provgjutningen i Äspö och genom mindre justeringar erhålla en betong med god arbetbarhet. Med utgångspunkt från gjorda observationer konstaterades att recept 18 utgör en lämplig startpunkt för det vidare arbetet inför uppskalningen till produktionsskala på Swerocks betongstation i Kalmar, avsnitt 8.2.

Tabell 7-1. Recept 1–12. Alla värden i kg/m³.

Komponent	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Anläggningscement	293	293	320	344	293	294	293	293	293	281	298	298
Elkem 920 D (MS)	17	17	17	17			17	17	17			
OmyaCarb 2 GU							78	130	130			
BetoCarb 10	29	29	32	34			36	35	35			
Limus 25												
Vatten	147	147	160	172	147	147	146	143	143	140	148	149
16–25 mm	479	479	465	465	480	480	456	432	432	459	486	486
8–16 mm	479	479	465	465	480	480	456	432	432	459	486	486
4–8 mm	98	98	96	91	98	98	93	93	93	94	100	100
0–4 mm M8 VSI, VS	856	856	829	799			815	817	817		435	217
0–4 mm M8 KK					902	902				864	435	652
0–4 mm Gladö												
0–4 mm Rolsmo												
0–4 mm Rockneby												
Glenium SKY 812	3,0	2,5	2,0	1,5	3,5	3,5	2,0	3,0	2,7	2,9	3,1	3,1
Tvättad ballast	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Kommentar										6 % Luft		
Stabil/Instabil	Stabil	Instabil	Instabil	Stabil	Stabil	Stabil	Instabil	Stabil	Stabil	Stabil	Instabil	Instabil

Förkortningar: VSI (Vertical shaft impactor), KK = Konkross, VS = vindsikt, MS = silikastoft.

Tabell 7-2. Recept 13–24. Alla värden i kg/m³.

Komponent	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Anläggningscement	293	292	291	292	292	293	286	293	284	294	289	289
Elkem 920 D (MS)		17	14,6	17	17	17						
OmyaCarb 2 GU		129		129	129	130	130		64	131	128	128
BetoCarb 10		35	29	35	35	35	34		35	35	35	35
Limus 25	45			45			20	45				
Vatten	146	145	145	145	143	143	171	147	142	147	144	144
16–25 mm	478	430	475	430	381	381	421	479	428	434	426	426
8–16 mm	478	430	475	430	431	431	421	479	428	434	426	426
4–8 mm	98	93	97	93	93	93	90	98	92	93	92	92
0–4 mm M8 KK												
0–4 mm Gladö	855	813	855	813	866	866						
0–4 mm Rolsmo							796	858	921	840	861	
0–4 mm Rockneby												861
Glenium SKY 812	4,0						2,9	4,0				
Master Ease 3500		3,0	3,0	3,0	3,0	4,5					3,0	3,0
Master Sure 910		4,0	4,5	4,0	4,0	3,0			2,6	4,3	4,5	4,5
Master Set R 401											2,8	2,8
Tvättad ballast	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej
Stabil/Instabil	Stabil	Stabil	Instabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil	Instabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
Kommentar								Viskös				

Förkortningar: VSI (Vertical shaft impactor), KK= Konkross, VS = vindsikt, MS = silikastoft, Master Set R 401 är en retarder, de övriga olika typer av karboxylatbaserade superplasticerare. Master Sure 910 användes för att minska viskositeten.

Tabell 7-3. Sammanställning av egenskaperna hos den färska betongen tillverkad enligt recept 1–24. Sättnått enligt SIS (2009).

Recept	Sättnått (mm)			
	Efter blandning	Efter 60 min.	Efter 120 min.	Efter 180 min.
1	60	Satt fast i konen	–	–
2	180	Separation efter 1:a mätning	–	
3	80	Separation efter 1:a mätning	–	
4	90	–	–	–
5	210	–	–	–
6	200	90 + extra SP **	50 + extra SP	0
7	50	Separation efter 1:a mätning	–	–
8	180	–	–	–
9	170	0 + extra SP	0	0
10	210	50 + extra SP	70	0
11	170	Separation efter 1:a mätning	–	–
12	180	Separation efter 1:a mätning	–	
13	210	85	30	0
14	–	260/600	150	
15	–	210	–	–
16	–	240/580*	–	–
17	–	210/480*	–	–
18	160	50	–	0
19	130	–	–	–
20	180	Hög plastisk viskositet	–	–
21	200	180	0	0
22	200	210	20	0
23	180	220	230	200
24	150	170	170	140

* = Utbredningsmått.

** + extra SP innebär att lite extra superplasticerare tillsats. Detta gjordes i några fall då sättnåttet var väldigt lågt.

7.4 Blandningsförsök i tombolablandare på Swerocks betongstation i Kalmar

Inför uppskalningen en betongreceptet till produktionsskala vid Swerocks betongstation i Kalmar genomfördes blandningsförsök där recept utformade vid CBI (avsnitt 7.3) överfördes och testades i på betongstationen.

I ett första blandningsförsök gjorde personal från Swerock ett 30 liters blandningsförsök i en 50 liters tombolablandare (Kalmar 1 i tabell 7-4) med 0–4 mm ballast från Rolsmo. En försöksblandning gjordes även med 0–4 mm ballast från Skanska (Rockneby) med i övrigt samma recept.

Tabell 7-4. Recept testat i tombolablandare på Swerocks betongstation i Kalmar. Angivna mängder i kg/m³. Vattenhalt i tillsatsmedel borträknad.

Komponent	Recept 18*	Kalmar 1
Anläggningscement	293	280**
OmyaCarb 2GU	130	124
BetoCarb 10	35	33
Vatten	140,5	131**
16–25 mm	404	451
8–16 mm	437	451
4–8 mm	94	89
0–4 mm Rolsmo	863	851
Master Ease 3500	3	
Glenium Sky 558		2,91
Master Sure 910	4	4,31
M. Set RT 401	4	3

* Recept 18 är det inför detta arbete stipulerade receptet och redovisas här som referens.

** Notera att cement- och vattenhalten är betydligt lägre i recept Kalmar 1 än i recept 18.

Sannolikt förorsakad av en kommunikationsmiss användes en lägre vatten- och cementhalt än tidigare. Mängden mikrobruk blev endast 302 liter, vilket är för lite för att ge en bra betong. Även ballastgraderingen skiljde sig från tidigare försök. Resultatet blev att betongen var i princip oanvändbar ("stenhög") med stipulerad mängd tillsatsmedel. Vid ökad dosering flytmedel separerade betongen. Betongens egenskaper påverkades ej av huruvida ballasten kom från Rolsmo eller Rockneby. Den färskas betongens egenskaper redovisas i tabell 7-7.

För att säkerställa en bra och robust betong beslöts att utökade tester med ökad vatten- och cementmängd med bibehållet vct skulle genomföras på CBI innan fortsatt arbete på betongstation.

7.5 Uppföljande blandningsförsök på CBI

För att närmare se vad som gick fel vid den första blandningen i Kalmar gjordes tre blandningar på laboratoriet på CBI i 20-literssatser i tvångsblandare, benämnda CBI 1, 2 och 3 i tabell 7-5. Blandningarna innehöll finballast (< 4 mm) från Rolsmo och olika kombinationer av superplasticerare samt olika doseringar av retarder testades.

Betongen visade i princip ingen tendens till konsistenstapp under 180 minuter. Sättnmättet var dock något för högt antagligen beroende på att doseringen av flytmedel var något hög i förhållande till betongtemperaturen. Den färskas betongens egenskaper redovisas i tabell 7-7.

Slutsatserna från dessa experiment var att receptet är känsligt för variationer av mängden mikrobruk. För att säkerställa att det finns en viss marginal för variationer i egenskaperna hos de ingående komponenterna beslöts att öka cementmängden i de följande testerna.

Tabell 7-5. Recept testade i tvångsblandare på CBI med material från Swerocks betongstation i Kalmar. Angivna mängder i kg/m³. Vattenhalt i tillsatsmedel borträknad.

Komponent	Kalmar 1*	CBI 1	CBI 2	CBI 3
Anl. cement	280	320	320	320
OmyaCarb 2GU	124	130	130	130
BetoCarb 10	33	35	35	35
Vatten	131*	155	156	155
16–25 mm	451	393	393	393
8–16 mm	451	425	425	425
4–8 mm	89	92	92	92
0–4 mm Rolsmo	851	839	840	840
Master Ease 3500		2,65		–
Glenium Sky 558	2,91		4	3
Master Sure 910	4,31	4	4	4
M. Set RT 401	3	4	4	4

* Recept Kalmar 1 är det recept som användes vid det misslyckade blandningsförsöket på Swerocks betongstation i Kalmar och redovisas här som referens.

7.6 Fortsatta blandningsförsök i tombolablandare vid Swerocks betongstation i Kalmar

Efter testerna vid CBI gjordes en ny 30-liters försöksblandning i Kalmar (Kalmar 2 i tabell 7-6) i en tombolablandare.

Tabell 7-6. Recept testat i tombolablandare på Swerocks betongstation i Kalmar. Angivna mängder i kg/m³. Vattenhalt i tillsatsmedel borträknad.

Komponent	Kalmar 1*	Kalmar 2
Anl. cement	280	320
OmyaCarb 2GU	124	130
BetoCarb 10	33	35
Vatten	131*	154
16–25 mm	451	393
8–16 mm	451	425
4–8 mm	89	92
0–4 mm Rolsmo	851	839
Master Ease 3500	2,91	
Glenium Sky 558	2,91	2,7
Master Sure 910	4,31	3
M. Set RT 401	3	2,2

* Recept Kalmar 1 är det recept som användes vid det misslyckade blandningsförsöket på Swerocks betongstation i Kalmar och redovisas här som referens.

Betongen uppvisade en god arbetbarhet och det bedömdes att den skulle kunna tillverkas utan problem i fabriken frifallsblandare (produktionsutrustning). Den färska betongens egenskaper redovisas i tabell 7-7.

Tabell 7-7. Sammanställning av egenskaper hos den färska betongen för de recept som testats i samband med överföring och inkörning av recept på Swerocks betongstation i Kalmar.

Komponent	Recept 18*	Kalmar 1	CBI 1	CBI 2	CBI 3	Kalmar 2
Kommentar	Seg	Instabil	Stabil	Stabil	Stabil	Stabil
Temp.	22	–	22	23	23	23
Sättmått 10 min	190	160	210	650**	210	195
Sättmått 90 min	190			640**	215	160
Sättmått 180 min	–		205			

* Recept 18 är det recept som användes vid gårdsgjutningen på CBI och redovisas här som referens.

** Utbredningsmått.

7.7 Egenskaper hos härdad betong tillverkad med recept 1–24

I detta avsnitt redovisas egenskaperna hos härdad betong tillverkad enligt recept 1–24.

7.7.1 Tryckhållfasthet

Resultaten från mätning av tryckhållfasthet (28 dygn) redovisas i tabell 7-8. Värdena kan jämföras med kravet vilket är 40 MPa efter 28 dygn.

Tabell 7-8. Tryckhållfasthet efter 28 dygn enligt SIS (2012a).

Recept	Tryckhållfasthet (MPa)	Recept	Tryckhållfasthet (MPa)	Recept	Tryckhållfasthet (MPa)
1	Knappt stabil	10	34,7	18	70,8
2	62,6	11	Ej stabil	19	56,9
3	63,6	12	Ej stabil	20	66,7
4	64,9	13	59,2	21	70,5
5	60,4	14	85,7	22	71,0
6	60,4	15	Ej stabil	23	69,1
7	68,3	16	90,8	24	70,1
8	76,4	17	96,3		
9	76,4				

Nedan följer några kommentarer där kopplingar mellan tryckhållfasthet och sammansättning diskuteras.

Recept 2–4: Recept 2–4 med VSI-krossad och vindsiktad ballast innehöll BetoCarb 10 som filler (cirka 30 kg/m³) och silikastoft 920D från Elkem (17 kg/m³). Cementmängden ökade från cirka 290 kg/m³ upp till cirka 345 kg/m³ vid konstant vct. Tryckhållfastheten efter 28 dygn ökade med mindre än 3 MPa från 62,6 till 64,9 MPa.

- Resultaten visar att en ökad cementhalt med konstant vct inte ökar styrkan.

Recept 5 och 6: Recept 5 och 6 innehöll konkrossad 0–4 mm men fillern och silikastoft togs bort. Cementmängden var 290 kg/m³. Tryckhållfastheten sjönk något ner till cirka 60 MPa, antagligen beroende på att silikastoft togs bort.

- Silikastoft höjer hållfastheten något. Krossningsmetod har liten påverkan på tryckhållfastheten.

Recept 7–9: Recept 7 innehöll BetoCarb 10 (36 kg/m³), OmyaCarb 2GU (78 kg/m³) och silikastoft (17 kg/m³). I recept 8 och 9 ökades mängden OmyaCarb 2GU till 130 kg/m³. Stenvolymen reducerades. Tryckhållfasthet efter 28 dygn blev 68,3 MPa (recept 7) och 76,4 MPa (recept 8 och 9). OmyaCarb 2GU ökade tryckhållfastheten signifikant.

- Filler och då speciellt ultrafin filler höjer tryckhållfastheten signifikant.

Recept 10: Recept 10 var ett modifierat recept 5/6 med tillsatt luftporbildare och hade en lufthalt på 6 procent. Den ökade lufthalten sänkte tryckhållfastheten från drygt 60 MPa till 34,7 MPa.

- Luftporbildare sänker tryckhållfastheten då det ger en ökad lufthalt.

Recept 13: Recept 13 innehöll enbart Limus 25 som filler. Den är grövre än OmyaCarb 2GU och BetoCarb 10. Silikastoft togs också bort. Tryckhållfastheten blev 59,2 MPa.

- Detta visar att grövre filler kan vara bra ur reologisk synpunkt, men att det inte höjer styrkan på samma sätt som finkornigare filler.

Recept 14–18: Recept 14–18 utfördes vid betongfabriken i Västberga i en tombolablandare. Tryckhållfastheten ökade markant till mellan 70–96 MPa. Detta beror antagligen på att ultrafin OmyaCarb 2GU tillsats.

- Tillsats av ultrafin filler kan användas för att höja tryckhållfastheten hos betong. Denna egenskap kan användas för att ytterligare minska cementmängden.

Recept 19–22: I recept 19–22 testades användning av ballast från täkter i angränsning till Swerocks betongstation i Kalmar. Undersökningarna visade att detta endast påverkade tryckhållfastheten i liten omfattning jämfört med när ballast från stockholmstrakten eller Uppland användes.

- Typen av granitisk krossballast har liten påverkan på tryckhållfastheten.

Recept 23–24: Recept 23–24 var de första med inblandningen av retarder MasterSet R 401. (1 % av cementvikt). I recept 24 användes även en kubiserad 0–4 mm ballast från Rockneby. Ballasttypen och användning av retarder påverkade inte tryckhållfasthet som blev 69,1–70,1 MPa.

- Retarder påverkar inte tryckhållfastheten.
- Typen av superplasticerare verkar inte heller påverka tryckhållfastheten.

7.7.2 Krympning

Översikt

Krympning av betong orsakas av tre huvudsakligen processer: Autogen krympning temperaturkrympning, samt uttorkningskrympning, avsnitt 6.1.2. Sprickbildning kan ske om krympspänningen överstiger betongens draghållfasthet.

I denna studie har den autogena krympningen och uttorkningskrympningen studerats för betong tillverkade enligt recept 6, 8, 10, 13 och 18 (tabell 7-1 och 7-2). Temperaturkrympning har däremot inte studerats explicit.

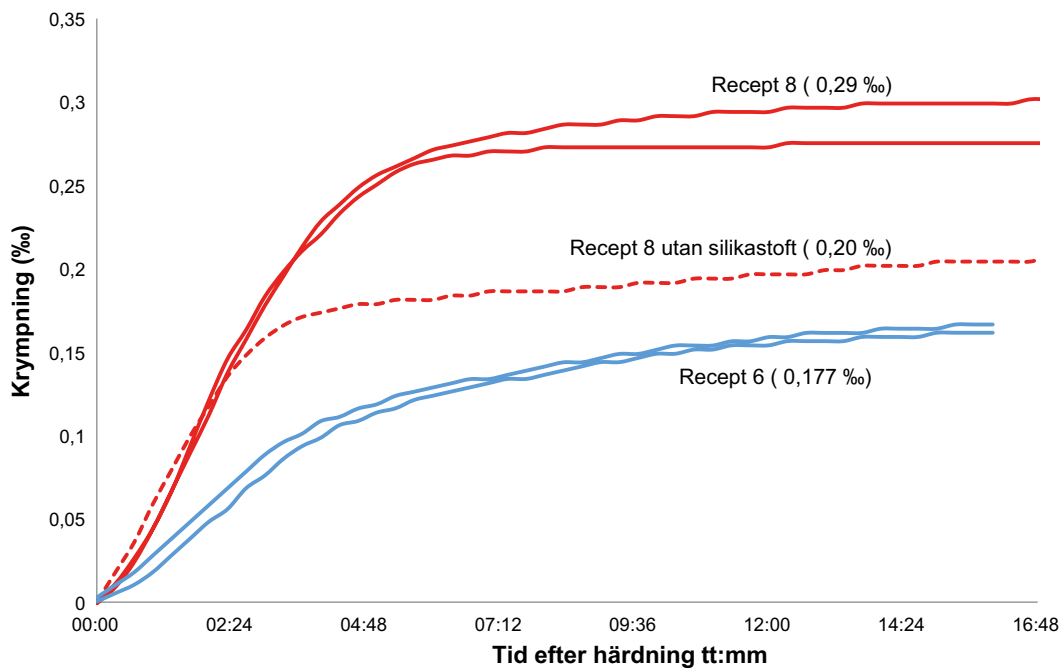
Autogen krympning

Autogen krympning kan utgöra en stor andel av den totala krympningen som inte fångas upp av mätning enligt SIS (2000). I stället kan autogen krympning mätas i färsk betong genom kontinuerlig loggning av längdförändringen i ett slutet system se figur 7-1. Betongen gjuts i en elastisk och cylindrisk form som är fastspänd mot ena sidan och fri på den andra och förändringar i betongens inre volym kan mätas som en längdförändring.

I figur 7-2 visas resultat från mätning av den autogena krympningen för 3 olika prover från tidpunkten då betongen tillstyvnat till 17 timmar efter tillstyvnad. Blandning av betongen genomfördes cirka 7 timmar före tillstyvnad. Av dessa redovisas i figur 7-2 den autogena krympningen för en modifierad variant av recept 8 där silikan tagits bort och ersatts med samma volym 0–4 mm ballast.



Figur 7-1. Utrustning för mätning av autogen krympning. Mätning genomförs på en horisontellt placerad provkropp.



Figur 7-2. Autogen krympning från tillstyvnad till 17 timmar efter blandningen.

Vilket visas i figur 7-2 uppvisar recept 6 den lägsta autogena krympningen, 0,177 ‰. I detta recept ingår varken filler eller silika. Störst autogen krympning uppvisas av recept 8 med 0,29 ‰ medan recept 8 utan tillsatt silika ligger mellan dessa på 0,20 ‰.

Av denna studie kan man dra följande slutsatser:

- Silika ökar den autogena krympningen signifikant.
- Inert kalkstensfiller påverkar den autogena krympningen endast något.

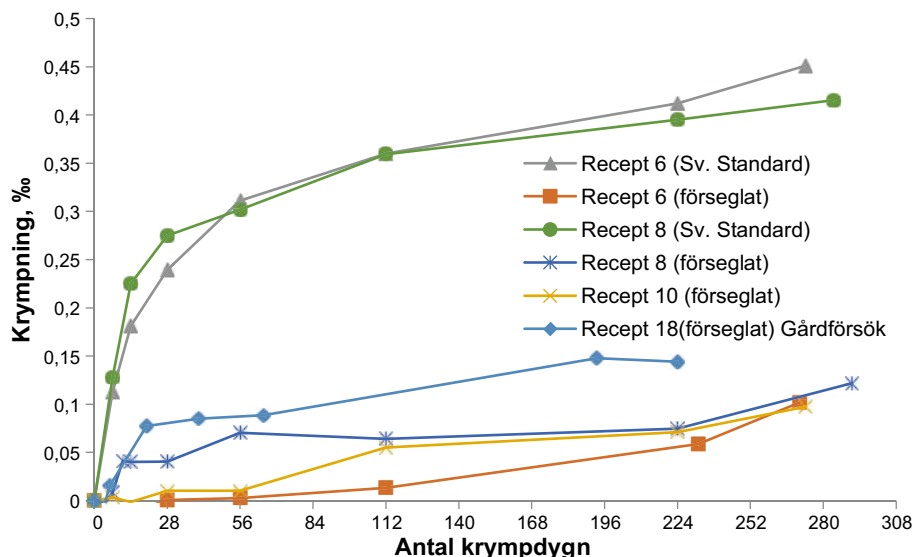
Eftersom cement- och vattenmängden bevaras i receptutvecklingen gjordes bara dessa tre experiment. Vid beräkning av den totala krympningen för betong med motsvarande mängd cementpasta som recept 8 och vilken inte innehåller silika bör en autogen krympning om 0,20 ‰ adderas till uppmätt uttorkningskrympning för att få fram totalkrympningen. För betong med silika adderas i stället 0,29 ‰ för att få den totala krympningen.

Uttorkningskrympning

Uttorkningskrympning är miljöberoende och beror på fukten i omgivningen där en torrare miljö ger en större uttorkningskrympning än en fuktig. I 100 % RF sker ingen uttorkningskrympning. 50 % RF anses vara en lämplig referensmiljö enligt SIS (2000).

Betongen i recept 6 och 8 provades enligt SIS (2000), d v s vattenhärdning i sju dygn och därefter lagring i ett klimatrum med 20 °C och 50 % RF. Utöver detta provades även krympningen enligt en modifierad version av SIS (2000) för att bättre efterlikna miljön bergrumsanläggning med hög luftfuktighet. Prismorna avformades dagen efter gjutningen och förseglades med bitumentejp. Mätningar började strax efter förseglingen och betongprismorna placerades i klimatrum (20 °C, 50 % RF). I figur 7-3 betecknas den modifierade (SIS 2000) ”(förseglat)”.

Vilket framgår av figur 7-3 och tabell 7-9 hade provkropparna som provades enligt SIS (2000) en betydligt större uttorkningskrympning än de förseglade proverna oberoende av om de innehöll silika eller ej. Efter 224 dygn har båda krympt cirka 0,4 ‰ vilket är den förväntade för en betong med 150 liter vatten per m³ (jämför Ljungkrantz et al. 1994, kapitel 15)



Figur 7-3. Uttorkningskrympning i klimatrums 20 °C 50 % RH. Proven benämns "Gårdförsök" kommer från den gjutning som gjordes på CBL:s gård och vilken redovisas i avsnitt 8.1.

Tabell 7-9. Uppmätt uttorkningskrympning.

Recept	Metod	Krympning efter 224 dygn (‰)	Viktförlust efter 224 dygn (g)	Viktförlust efter 224 dygn (%)
6	Sv Standard	0,41	242	25,2
6	Förseglat	0,06	8,6	0,9
8	Sv Standard	0,40	196	20,3
8	Förseglat	0,07	4,9	0,3
10	Förseglat	0,07	11,3	1,2
13	Förseglat	0,07	8,6	0,9
18	Förseglat	0,14	4,4	0,4

Provkropparna som förseglades hade ingen eller liten vattenavgång under mätperioden. Låga krympningsvärden erhöles. I de förseglade proverna innehållande silika (recept 8 och recept 18) noterades en ökad krympning i början vilken avtog efter cirka 14 dygn. Detta är antagligen autogen krympning. Efter 224 dygn hade samtliga förseglade prismor en krympning på cirka 0,07 ‰ bortsett från recept 18 vilken hade en krympning på 0,14 ‰.

- Uttorkningskrympningen är främst avhängig mängden vatten och uttorkningen i betongen. I fuktig miljö där vatten inte avdunstar blir uttorkningen liten.

I tabell 7-10 har resultat från autogen och uttorkningskrympning sammanställts och den totala krympningen beräknats.

Tabell 7-10 Totalkrympning efter 224 dygn (autogen- och uttorkningskrympning).

Recept	Metod	Uttorkningskrympning efter 224 dygn (‰)	Autogen krympning (‰)	Total krympning efter 224 dygn (‰)
6	Sv Standard	0,41	0,18	0,59
6	Förseglat	0,06	0,18	0,24
8	Sv Standard	0,40	0,29	0,69
8	Förseglat	0,07	0,29	0,36
10	Förseglat	0,07	0,20	0,27
13	Förseglat	0,07	0,20	0,27
18	Förseglat	0,14	0,29	0,43

7.8 Diskussion blandningsförsök i laboratorieskala

I detta kapitel har en redovisning av genomförda blandningsförsök i laboratorieskala presenterats. De genomförda blandningsförsöken har visat att den stora utmaningen vid proportioneringen av kassunbetongen är att sänka vattenmängden vid bibehållet vct för att på så sätt minska krympningen utan att detta samtidigt leder till en minskad styrka eller försämrad arbetbarhet.

Proportioneringen av grovballast har inte utgjort några problem. Proportionerna mellan de olika fraktionerna ändrades något under blandningsförsöken utan att någon signifikant skillnad noterades.

Experimenten har visat att egenskaperna hos den färska betongen blir tillfredsställande i de fall då en större mängd cement och vatten används (recept 4) men mindre bra då dessa halter minskas (recept 2). Större mängder cement och vatten leder dock till en oacceptabelt hög krympning varför ett recept baserat på detta koncept inte kan accepteras. Ett recept där mängderna cement och vatten är begränsade behöver i stället utvecklas.

För att kompensera för minskade mängder cement och vatten och på så sätt erhålla en tillräckligt stor mängd mikrobruk för acceptabel arbetbarhet har i stället kommersiell filler tillsatts. Behovet av kommersiell filler styrs här av mängden filler i ballasten där en större mängd filler av god kvalitet i finballasten kräver en lägre tillsats av kommersiell filler. Även filler som sitter som damm på ballasten är viktig. Tvättförsök visade att det satt cirka 9 kg damm på grovballasten i ett normalrecept. Lasersikt visade att medelstorleken på kornen var cirka 32 μm . Om man antar att stendammet har samma densitet som stenen, cirka 2,65 kg/dm^3 , så ökar stendammet mängden mikrobruk med 3–4 dm^3 .

För att skapa en bild över behovet av mikrobruk i betong baserad på krossballast genomfördes beräkningar av mängden mikrobruk i ett urval av de recept som blandats inom denna studie, tabell 7-11. Det kan noteras att i grundreceptet antogs 331,7 liter mikrobruk för att få en lagom arbetbarhet.

Tabell 7-11. Beräkning av mikrobruksmängd för ett urval recept*. Alla mängder angivna i kg/m^3 utom mikrobruket som anges i dm^3/m^3

Komponent	1	4	6	8	13	18	23	Kalmar 1	Kalmar 2
Cement	293	344	294	293	293	293	289	280	320
Silika	17	17		17		17			
Filler	29	34		165	45	165	163	157	165
Vatten	147	172	147	143	146	143	144	131	154
0–4 mm	856	799	902	817	855	866	861	851	839
Typ	M8	M8	M8 kk	M8	Gladö	Gladö	Rolsmo	Rolsmo	Rolsmo
< 0,125 mm	22,6	21,1	46,6	21,1	45,7	45,8	27,9	27,6	27,2
Tvättad	Nej	Ja	Ja	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej
Damm	9		9			9	9	9	9
Luft	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Mikrobruk	332	341	309	342	327	372	344	326	364

* Densiteter för de olika komponenterna (kg/dm^3). Cement = 3,2. Silika = 2,2. Ballast inklusive filler och damm=2,65. Kalkfiller=2,8. Vatten = 1. Otvättad grovballast innehåller cirka 9 kg filler vilket ger 3–4 liter volym till mikrobruket. Mängden luftporer i mikrobruket i en normalbetong uppskattas till totalt cirka 20 dm^3/m^3 .

Tabell 7-11 visar att mängden mikrobruk överstiger det antagna värdet (331,7 dm^3/m^3) i ett flertal recept medan andra ligger mer eller mindre långt under detta. Av de recept som redovisas i tabell 7-11 är det endast betong tillverkad med recept 1 som är så trög att den inte skulle kunna gå att pumpa, avsnitt 7.1, medan övriga bedömdes mer eller mindre styva men ändå pumpbara.

För att betongen skall kunna pumpas så bör halten mikrobruk antagligen överstiga 320 liter per m^3 betong. För att vara på den säkra sidan och för att få en bra pumpbarhet bör volymen mikrobruk ligga runt 330–340 dm^3/m^3 betong.

Om man ökar mängden mikrobruk för mycket finns dock en risk för att betongen blir för lättflytande, en självkompakterande betong (se Svensk byggtjänst 2017, avsnitt 8.5). Tillsätter man för mycket superplasticerare finns det risk för att betongen separerar.

I de blandningar där ganska stora mängder filler, speciellt den ultrafina OmyaCarb 2GU, tillsattes erhöles en stabil betong med god sammanhållning och arbetbarhet. I princip ökades volymen mikrobruk med ultrafinkornig filler. Användning av filler kräver dock noggrann justering av betongens innehåll av superplasticerare för att undvika att betongen separerar.

Slutsatsen är därför att kassunbetongen måste tillföras filler för att kompensera för en låg cementhalt. Dock är det här av stor vikt att fillern är av bra kvalitet, här främst innebärande att den har en lämplig kornform, för att betongens egenskaper ska bli de eftersökta. Filler från krossballast kan innehålla sericit (finkornig muskovit), biotit, klorit eller något annat (Lagerblad et al. 2008) som ger dåligt mikrobruk och därmed en betong med undermålig arbetbarhet.

8 Uppskalning av recept till produktionsskala

Inför den slutliga provgjutningen av en för kassunerna representativ sektion i Äspölaboratoriet genomfördes med försöken laboratorieskala som grund (kapitel 7) uppskalningsförsök vid betongstationer vilka även inkluderade transportsimuleringar och pumptester. Arbetet genomfördes vid Swerocks betongstationer i Västberga (Stockholm) och i Kalmar vilken även ska leverera betongen till den slutliga provgjutningen i Äspölaboratoriet.

8.1 Swerocks betongstation i Västberga

Detta blandningsförsök innefattade blandning av betong, två timmars transportsimulering i en vanlig betongbil samt pumpning av betong och gjutning av en monolit med måtten $2 \times 0,5 \times 1$ m ($1 \times b \times h$) på CBI:s gård.

8.1.1 Blandning av betongen

Vid blandningsförsöket användes recept nummer 18 (tabell 8-1). Blandning skedde i fabriken produktionsutrustning. OmyaCarb 2GU, BetoCarb 10, silikastoft Elkem 920 D samt superplasticerare tillfördes manuellt. Blandningstiden var totalt sju minuter.

Tabell 8-1. Recept för betong som användes vid produktionstest och provgjutning av monolit på CBI:s bakgård.

Komponent	Mängd (kg/m ³)
Anläggningscement	293
Elkem 920 D	17
OmyaCarb 2GU	130
BetoCarb 10	35
Vatten	143 (Vattenhalt i tillsatsmedel borträknad)
16–25 mm	381
8–16 mm	431
4–8 mm	93
0–4 mm Gladö	866
Master Ease 3500	4,5
Master Sure 910	3,0

8.1.2 Transportsimulering

Efter blandning tippades betongen i en betongbil i vilken transportsimuleringen genomfördes. Efter 20 minuter uppmättes betongens temperatur till 24 °C och sättmättet till 160 mm. Detta var en oväntat hög temperatur och sättmättet var något lågt. En timme efter blandning då betongbilen började åka mot CBI hade sättmättet sjunkit till 80 mm.

8.1.3 Gjutning av monolit

När pumpning inleddes efter cirka 2 timmar var sättmättet nära 0 och det var problem att lasta ur betongen ur bilen och in i betongpumpen, figur 8-1. Extra superplasticerare (1 dm³ Master Ease 3500) tillsattes och betongen kunde därefter pumpas in i formen. Pumpningen var dock stötvis och ojämn. Vid denna tidpunkt var temperaturen i betongen 32 °C.

Den betong som kunde avlastas räckte endast för att fylla formen till en höjd cirka 80 cm. Resten av betongen hade fastnat i betongbilen. Betongen gick knappt att vibrera då den tillstuvnat ordentligt. Vibreringen påverkades även av att endast en mindre vibrator för laboratoriebruk fanns tillgänglig.



Figur 8-1. Betongen överförs till pumpbilen och pumpas i formen. Notera i den vänstra bilden hur en hög med styv betong ansamlats på gallret över pumpbaljan samt betongens begränsade utflytning i den högra bilden.

Betongen täcktes slutligen med plast och ett skikt med vatten. I samband med gjutning tillverkades även kuber och krympprismor för test av tryckhållfasthet och krympning. Kuberna och krympprismorna avformades dagen efter och provades för tryck (SIS 2012a) och förseglad krympning, d v s en modifierad (SIS 2000).

8.1.4 Resultat

Avformning av stora gjutformen skedde en vecka efter gjutning och ytorna inspekterades. Runt kanterna märktes att betongen hade krympt cirka 1 mm inåt. Gjutytorna var utan gjutveck. Den översta decimetern var dåligt komprimerad och porig, se figur 8-2.

Efter 25 dygn borrades sex stycken $\varnothing 100$ mm borrkärnor ut cirka 40 cm ner från överytan. Borrkärnorna förbereddes enligt SIS (2012b) och sågades för att få en provkropp med längd cirka 100 mm för mätning av tryck- och spräckhållfasthet.

Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten mättes dels på kuber vilka tillverkades i samband med gjutningen och dels på borrkärnor vilka borrats ur monoliten, tabell 8-2.

Tabell 8-2. Uppmätt tryckhållfasthet (SIS 2012a)*.

Provkropp	Tryckhållfasthet (MPa)			Densitet (kg/m ³)
	1 dygn	7 dygn	28 dygn	28 dygn
Gjutna kuber	29,6	54,3	72,8	2440
Utborrade cylindrar	–	–	65,5	2400

* Resultaten är medelvärde av 3 gjutna kuber och 6 utborrade cylindrar.

Vilket framgår av tabell 8-2 är tryckhållfastheten mycket hög och överstiger 50 MPa redan efter 7 dygn.

Spräckhållfasthet

Spräckhållfastheten mättes efter 28 dygn på borrkärnor vilka borrats ur monoliten, tabell 8-3.

Tabell 8-3. Uppmätt spräckhållfasthet (SIS 2011) och densitet efter 28 dygn.

Provkropp	Spräckhållfasthet (MPa)	Densitet (kg/m ³)
Utborrade cylindrar	5,43	2363



Figur 8-2. Betongmonoliten efter avformning.

Vilket framgår av tabell 8-3 så är spräckhållfastheten 5,43 MPa efter 28 dygn. Det finns dock inget fastlagt krav kopplat till spräckhållfastheten utan endast för draghållfasthet. Vanligtvis genomförs en omräkning från spräck- till draghållfasthet men valet har här varit att inte göra detta då omräkningsfaktorn för denna typ av betong ännu inte korrekt har definierats. För normal betong understiger dock omräkningsfaktorn ej 0,6 vilket applicerat på denna betong skulle ge en draghållfasthet på 3,2 MPa.

Uttorkningskrympning

Uttorkningskrympningen mättes på förseglade betongprismor vilka tillverkades i samband med gjutning av monoliten och redovisas i figur 7-3 och tabell 7-9. Efter 193 dygn var krympningen av provet från denna gjutning 0,14 %. Detta kan jämföras med recept 8 vilket är det enda av de övriga som innehåller silika och vilket har en krympning på 0,07 %, efter 224 dygn. Orsaken till dessa skillnader är inte klarlagd.

8.1.5 Erfarenheter och slutsatser

Det genomförda uppskalningsförsöket visade att det går bra att skala upp det utvecklade receptet till produktionsskala. Transportsimuleringen och provgjutningen visade dock att betongen styvnade mycket snabbare än vad som förutsågs. Utöver det faktum att tillstyvnandet började tidigare än förväntat så gick processen även betydligt snabbare än för standardbetong. Orsakerna till detta kan härledas till följande faktorer:

- Lufttemperaturen var hög för årstiden, 23,5 °C enligt data från SMHI. Detta medförde att delmaterialerna och främst då ballasten hade en hög temperatur redan vid tillverkning av betongen.
- Det tillverkades endast 2 m³ betong vilken lastades i betongbilen. Med en liten mängd betong i en bil med en stor och varm mantelyta ökade temperaturen ytterligare i betongen
- Den stora mantelytan i förhållande till den begränsade mängden betong medförde även att betongen tappade pasta som fastnade på mantelns insida. I och med detta tappade betongen i rörlighet och styvnade.
- Betongen innehöll en stor mängd mycket finkornig kalkstensfiller vilken fungerade som en accelerator och påskyndade tillstyvnandet, se bilaga B.
- Ingen retarder tillsattes.

För att säkerställa betongens arbetbarhet bör därför retarder användas i framtida försök och hänsyn tas till den rådande väderleken. Utöver detta kan betongens temperatur justeras genom kylning med is vid tillverkning alternativt användning av flytande kväve. Som ytterligare åtgärder kan ballasten täckas med solskydd alternativt kylas med kallt vatten innan betongen tillverkas.

8.2 Blandningsförsök på Swerocks betongstation i Kalmar

Detta blandningsförsök innefattade blandning av betong, upp till 4 timmars transportsimulering i en vanlig betongbil samt test av betongens pumpbarhet. Någon gjutning genomfördes dock inte.

8.2.1 Blandning av betongen

Tre blandningsförsök med olika recept (tabell 8-4) genomfördes i fabriken produktionsutrustning. För de två första (Kalmar 3 och Kalmar 4) tillsattes all kalkfiller manuellt från säckar direkt på vågbandet. I Kalmar 5 tillsattes dock endast BetoCarb 10 från säck medan övriga delmaterial tillsattes genom fabriken styrsystem från silo eller ballastfickor. Retarder tillsattes genom fabriken styrsystem medan Master Sure 910 och Glenium Sky 558 tillsattes manuellt.

Tabell 8-4. Recept använda vid blandningsförsök i produktionsutrustning vid Swerocks betongstation i Kalmar.

Komponent	Kalmar 3	Kalmar 4	Kalmar 5
Anläggningscement	320	320	320
OmyaCarb 2GU	130	130	130
BetoCarb 10	35	33,3	33,3
Vatten	154	154,8	157
16–22 mm	393	393,3	393
8–16 mm	425	426	426
4–8 mm	92	92	92
0–4 mm Rolsmo	839	841	841
Glenium Sky 558	1,8 (Recept: 2,7)	1,5 (Recept: 2,7) Totalt med justering 2,4	1,45
Master sure 910	3	1,68 (Recept. 3) Totalt med justering 2,37	1,70
Master Set RT 401	2,2 (0,7 %)	1,0 (0,3 %)	1,0 (0,3 %)
Fukthalt 0–4 mm	4,6	8,5	4 % första mätning, 6,2 % andra mätning.

8.2.2 Egenskaper hos den färska betongen

Den färska betongens egenskaper från de olika blandningsförsöken sammanfattas i tabell 8-5.

Tabell 8-5. Egenskaper och kommentarer för blandningsförsök genomförda i produktionsutrustning vid Swerocks betongstation i Kalmar. Sättnmätt enligt SIS (2009).

Tid efter blandning	Kalmar 3	Kalmar 4	Kalmar 5
15 minuter			Sättnmätt: 215 mm Lufthalt 2,9 %
30 minuter	Separerar	Sättnmätt: 90 mm	
75 minuter		Sättnmätt 70 mm 0,25 liter sky/Sure tillsatt	
90 minuter	Separerar	Sättnmätt: 190 mm 0,5 liter sky/Sure tillsatt	
180 minuter		Sättnmätt: 190 mm (175 min) Lufthalt: 3,6 % 15 liter vatten tillsatt	

8.2.3 Sammanfattning av blandningsförsök, transportsimulering och pumptester

Kalmar 3

Det första experimentet, Kalmar 3, misslyckades helt och betongen separerade trots att inte allt flytmedel användes, figur 8-3. Anledningen till detta är att ett felaktigt värde på grusfukten användes varför alltför mycket vatten tillsats. Vilket framgår av tabell 8-4 var grusfukten uppmätt till 4,6 %, ett värde som sedan användes för justering av mängden tillsatt vatten. En senare mätning visade dock att grusfukten i fickan för 0–4 mm var 8,5 %. Varken transportsimulering eller pumptest genomfördes med denna betong då den inte ansågs pumpbar.

Kalmar 4

I det andra experimentet, Kalmar 4, bestämdes fukthalten i finballasten till 8,5 % och vattendoseringen sänktes därför i motsvarande grad. Även halten retarder minskades jämfört med recept Kalmar 3. Betongen var till en början för styv, figur 8-4, men kunde justeras till avsedd konsistens genom tillsats av mera superplasticerare.

Pumpbarheten testades med en 4-tumssläng med en längd av åtta meter efter närmare tre timmar i betongbil. Slangen förbereddes som brukligt med en cementslurry, ”sluring”. Mot förväntan blockerades betongen direkt i slangen. Betongen kändes för torr och kletig (seg) antagligen beroende på tillstyvnad.

Som åtgärd tillsattes därför 20 liter vatten direkt i betongbilen. Kvar i betongbilen fanns då cirka 1,2–1,4 m³. Betongen blandades ytterligare några minuter. Sättnmättet var oförändrat, men betongen kändes mera lättbearbetad och rörligare. Lufthalten bestämdes till 3,6 % vilket kan vara orsaken till förbättringen. Nu kunde betongen pumpas problemfritt, figur 8-5. Sättnmättet mäter inte plastisk viskositet (segnet) vilket indikerar att det var att den plastiska viskositeten sjönk som underlättade pumpningen.



Figur 8-3. Bilderna visar betong tillverkad med recept Kalmar 3. Det syns tydligt hur betongen separerar både när den tippas ur betongbil och när den hälls ut på en platta på marken.



Figur 8-4. Bilderna visar mätning av sättnmätt för betong tillverkad med recept Kalmar 4 direkt efter blandning samt efter 2 timmars transportsimulering.



Figur 8-5. Betongen överförs till pumpbilen (t.v.) och pumpas (t.h.)

Tryckhållfasthetsprov på gjutna kuber togs efter sju dygn, tabell 8-6. Tryckhållfastheten efter 28 dygn bedöms ligga runt 50 MPa även efter vattentillsatts.

Tabell 8-6. Uppmätt tryckhållfasthet för betong tillverkad med recept Kalmar 4 (SIS 2012a).

Provkropp	Tryckhållfasthet 7 dygn (MPa)	Densitet (kg/m ³)
Innan vattentillsatts	48,4	2460
Efter vattentillsatts	42–45	2400

Kalmar 5

Vid det sista blandningsförsöket vid fabriken i Kalmar (Kalmar 5) tillverkades 2 m³ betong i fabriken produktionsutrustning. På grund av leveransproblem ersattes kalkfillern BetoCarb 10 med en enligt leverantören likvärdig produkt, Myanit 10. Pumpstestet gjordes cirka 30 minuter efter blandning. Pumpningen gick problemfritt även med relativt lågt pumptryck (cirka 5 bar). Pauser i pumpningen på upp till 15 minuter, med betong kvar i slangen, skapade inga problem. Betongens sättmått bedömdes dock vara något för högt varför flytmedelsdosen sänktes något inför gjutningen i Äspö, tabell 8-7.

8.2.4 Erfarenheter och slutsatser

De olika tester som genomfördes vid Swerocks betongstation i Kalmar bekräftade tidigare erfarenheter att den inom detta projekt utvecklade betongen är mer känslig för sammansättningsvariationer än standardbetong där inte kalkstensfiller används. Utöver detta är tillstyvnadsförloppet snabbare och betongen kan gå från lätt pumpbar till mycket seg under en relativt kort tidsperiod.

Slutsatserna från genomförda tester är trots detta att denna betong uppfyller kraven (avsnitt 2.4) och att den kan användas vid provgjutning av en representativ sektion av en kassun i Äspölaboratoriet.

Rekommendation inför gjutning av kassunsektioner i Äspö

Med bakgrund i genomförda tester rekommenderas att det i tabell 8-7 redovisade receptet ska användas vid uppförande av en för de tänkta kassunerna i 2BMA representativ sektion i Äspölaboratoriet.

Tabell. 8-7: Rekommenderat recept för gjutning av representativ sektion av betongkassun till 2BMA i Äspölaboratoriet.

Komponent	Material	Mängd (kg/m ³)
Cement	Degerhamn anläggningscement	320
Inert filler	OmyaCarb 2GU	130
Inert filler	Myanit 10	33,3
Vatten		156,8
Ballast 16–22 mm		393,3
Ballast 8–16 mm		425,7
Ballast 4–8 mm		92,0
Ballast 0–4 mm		840,9
Superplasticerare	MasterGlenium Sky 558	1,30
Superplasticerare	Master Sure 910	1,70
Retarder	Master Set RT 401	0,96 (0,3 % av cementvikten)

9 Sammanfattning och slutsatser

I denna rapport redovisas det inledande utvecklingsarbetet av en betong till kassunerna i 2BMA.

Arbetet tog avstamp i identifierade krav på både den färska och den härdade betongens egenskaper, förutsättningar kopplade till tillverkning och transport av betong samt gjutningens storlek och miljöfaktorer och har omfattat följande huvudsteg:

- Karaktärisering av berggrunden i området för det framtida SFR och identifiering av lämpliga täkter för tillverkning av ballast som kan användas under utvecklingsarbetet. Tidigare redovisat i Lagerblad et al. (2016) och sammanfattat i denna rapport.
- Utveckling av betong i laboratorieskala på betonglaboratorium och egenskapsundersökningar. Syftet med detta arbete var att identifiera ett lämpligt grundrecept inför det fortsatta arbetet.
- Blandningsförsök i laboratorieskala på betongstationer eller på betonglaboratorium med de på betongstationerna tillgängliga delmaterialen. Syftet med detta arbete var att undersöka möjligheterna att i efterföljande uppskalningsförsök utnyttja på betongstationerna befintliga delmaterial och därmed undvika materialtransporter inför fullskaleförsöken.
- Tillverkning av betong i fullskala på betongfabrik i Västberga och i Kalmar samt transport-simuleringar, pumptester och egenskapsundersökningar.

De olika undersökningarna har visat följande:

- Det entreprenadberg som uppkommer vid utsprängningen av anläggningen är relativt lämpligt för tillverkning av betongballast. Dock, för att få så bra ballast som möjligt så måste det berg som skall användas som betongballast tas ut selektivt. Bäst ballast fås om berget VSI-krossas så att partiklarna får en mer kubisk form.
- Genom noggrann proportionering av betongens delkomponenter kan en betong som uppfyller samtliga här gällande egenskapskrav tillverkas.
- Betongens arbetbarhet är känslig för mängden mikrobruk. För att erhålla en betong med god arbetbarhet men samtidigt låg krympning och låg värmeavgivning har en kombination av låg cement- och vattenhalt och tillsats av kommersiella kalkstensfiller använts.
- Kalkstensfillern fungerar som en accelerator och påskyndar hydratationsförloppet. För att erhålla en betong med tillräckligt lång öppettid behöver retarder användas.

Nedan sammanställt betongreceptet uppfyller samtliga egenskapskrav och rekommenderas för användning vid provgjutningen av en för kassunerna representativ sektion i Äspölaboratoriet.

Komponent	Material	Mängd (kg/m ³)
Cement	Degerhamn anläggningscement	320
Inert filler	OmyaCarb 2GU	130
Inert filler	Myanit 10	33,3
Vatten		156,8
Ballast 16–22 mm		393,3
Ballast 8–16 mm		425,7
Ballast 4–8 mm		92,0
Ballast 0–4 mm		840,9
Superplasticerare	MasterGlenium Sky 558	1,30
Superplasticerare	Master Sure 910	1,70
Retarder	Master Set RT 401	0,96 (0,3 % av cementvikten)

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

- Damineli B L, Vanderley M J, Lagerblad B, Pileggi R G, 2016.** Viscosity prediction of cement-filler suspensions using interference model: a route for binder efficiency enhancement. *Cement and Concrete Research* 84, 8–19.
- Grahm H-E, Lagerblad B, Westerholm M, 2017.** Betong med krossat bergmaterial som ballast – Kvalitetskriterier och proportionering. CBI rapport 2017:2, RISE CBI Betonginstitutet.
- Horta A, 2011.** Impacts of using crushed rocks in concrete. Examensarbete. Kungliga Tekniska högskolan.
- Hunger M, Brouwers H J H, 2009.** Flow analysis of water–powder mixtures: application to specific surface area and shape factor. *Cement and Concrete Composites* 31, 39–59.
- Kjellsen K O, Lagerblad B, 1995.** Influence of natural minerals in the filler fraction on the hydration and properties of cement-filler mortars. CBI-rapport 95:3, Cement- och betonginstitutet.
- Lagerblad B, Fjällberg L, 2008.** Tidig hydratation – styrande mekanismer och modell. CBI rapport 2008:2, Cement- och betonginstitutet.
- Lagerblad B, Kjellsen K O, 1994.** Effect of mineralogy of fillers on the cement hydration. I Jennings H, Kropp J, Scrivener K (red). *The modelling of microstructure and its potential for studying transport properties and durability*. Dordrecht: Springer, 157–165.
- Lagerblad B, Trägårdh J, 1995a.** Ballast för betong: egenskaper, karaktärisering beständighet och provningsmetoder. CBI rapport 95:4, Cement- och betonginstitutet.
- Lagerblad B, Vogt, C, 2004.** Ultrafine particles to save cement and improve concrete properties. CBI rapport, 2004:1, Cement- och betonginstitutet.
- Lagerblad B, Westerholm M, Fjällberg L, Gram H-E, 2008.** Bergkrossmaterial som ballast i betong. CBI rapport 2008:1, Cement- och betonginstitutet.
- Lagerblad B, Oettel W, Gram H-E, 2015.** How to evaluate and produce optimal filler for use in concrete production. I Evertsson M, Hulthén E, Quist J (red). *ESCC 2015 : proceedings of the 14th European Symposium on Comminution & Classification, Gothenburg, Sweden, 7–11 september 2015*. Gothenburg: Chalmers, 245–249.
- Lagerblad B, Golubeva M, Cirera Rui J, 2016.** Lämplighet för krossberg från Forsmark och SFR att användas som betongballast. SKB P-16-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Ljungkrantz C, Möller G, Petersons N (red), 1994.** Betonghandbok. Material. 2. utg. Solna: Svensk byggtjänst.
- SIS, 2000.** SS 13 72 15: Betongprovning – hårdnad betong – krympning. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS, 2009.** SS-EN 12350-2:2009: Provning av färsk betong – Del 2: Sättnått. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS, 2010.** SS-EN 12620: Ballast för betong. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS, 2011.** SS-EN 12390-6:2009: Provning av hårdnad betong – Del 6: Spräckhållfasthet hos provkroppar. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS, 2012a.** SS-EN 12390-3:2009: Provning av hårdnad betong – Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SIS, 2012b.** SS-EN 12504-1:2009: Provning av betong i färdiga konstruktioner – Del 1: Borrkärnor – Uttag, undersökning och tryckprovning. Stockholm: Swedish Standards Institute.
- SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2013. Site description of the SFR area at Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-PSU Forsmark. SKB TR-11-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2015. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. Revised edition. SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Stephens B, Fox A, La Pointe P, Simeonov A, Isaksson H, Hermanson J, Öhman J, 2007. Geology Forsmark. Stage descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Svensk byggtjänst, 2017. Betonghandbok. Material. D 1, Delmaterial samt färsk och hårdnande betong. 3. rev. utg. Solna: Svensk byggtjänst.

Vinnova, 2015. Uthållig produktion av finkorniga produkter från bergmaterial. Slutrapport. Projekt 2012-01196, 2015. Tillgänglig: <http://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/36ab42a2-f0a4-41c5-92d8-393d5dbfc9a1/FinalReport/SBUF%2013035%20Slutrapport%20Uthållig%20produktion%20av%20finkorniga%20produkter%20från%20bergmaterial.pdf>

Vogt C, 2011. Ultrafine particles in concrete: influence of ultrafine particles on concrete properties and applications to concrete mix design. Doktorsavh. Kungliga Tekniska högskolan.

Superplasticerare

För att kunna tillverka betongen till kassunerna behöver superplasticerare användas för att kraven på egenskaperna hos den färska och den härdade betongen ska kunna uppfyllas. Då endast begränsade mängder superplasticerare tilläts genomfördes en inledande studie där effekten av några olika kommersiella på marknaden år 2016 förkommande superplasticerare undersöktes. Syftet med denna var att identifiera vilken av ett antal utvalda superplasticerare som gav bäst effekt vid låg dosering.

Funktionen hos plasticerare, ofta benämnt vattenreducerare, är att säkerställa en god dispergering av cement och finpartiklar i den färska betongen även vid låga vatteninnehåll. De första plasticerarna utgjordes av lignosulfonater och sulfonerade formaldehydkondensat men i dag används huvudsakligen polykarboxylater eller polyakrylater. De senare, som är mycket effektivare, benämns ofta som superplasticerare. Superplasticerarna baseras på långa grenade polymerkedjor på vilka det sitter karboxylmolekyler.

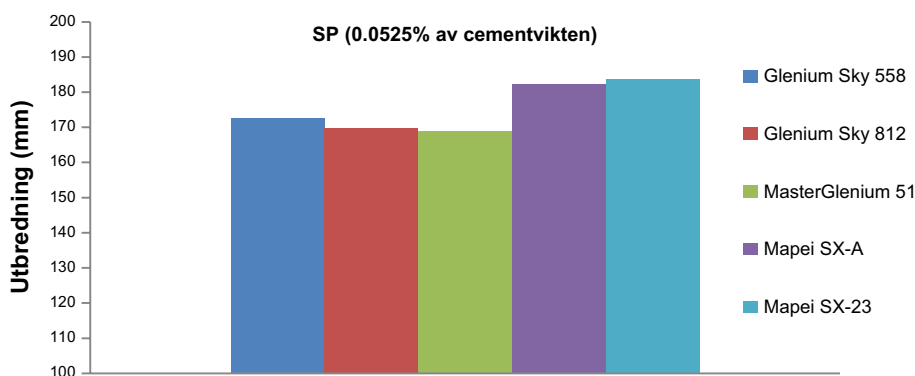
Superplasticerarnas funktion baseras på två egenskaper. Dels på att molekyler sätter sig på partikelytorna så att de får en negativ laddning i det höga pH som råder i betongen vilket ger en laddningsrepulsion. Dels på en sterisk funktion där de förgrenade molekylerna förhindrar att partiklarna kommer i kontakt.

För de olika blandningarna har ett grundrecept baserat på 0–4 mm ballast använts. Ballasten är vind-siktad helkross från Sälgsjön (M8). De flesta av superplasticerarna har en torrsvikt runt 24 procent, utom Master Glenium 51 som har en torrhalt på 35 viktprocent och Glenium Sky 558 som har en torrhalt på 28 viktprocent. I försöken anges superplasticerarnas mängd i torrsvikt.

Tabell A-1. Recept på 0–4 mm bruk. Vattenmängden är korrigerad med hänsyn till vatten i superplasticerarna. När silikastoft eller mikrofiller tillsatts så har 0–4 mm ballast korrigerats för att få en konstant volym.

Komponent	Vikt (g)	Vikt (g) (Med silika och BetoCarb)
0–4 mm (M8 VSI)	1 580	1 332
Cement (Anläggningscement från Cementa)	720	720
Vatten	416	416
Silika (Elkem 920)		78,6
BetoCarb 10		157,1
Superplasticerare	0,0525 % av cementvikten	0,0088–0,0700 % av cementvikten

Figur A-1 visar utbredningsmått mätt med en Hägermankon för standardblandningar med olika typer och fabrikat av superplasticerare.



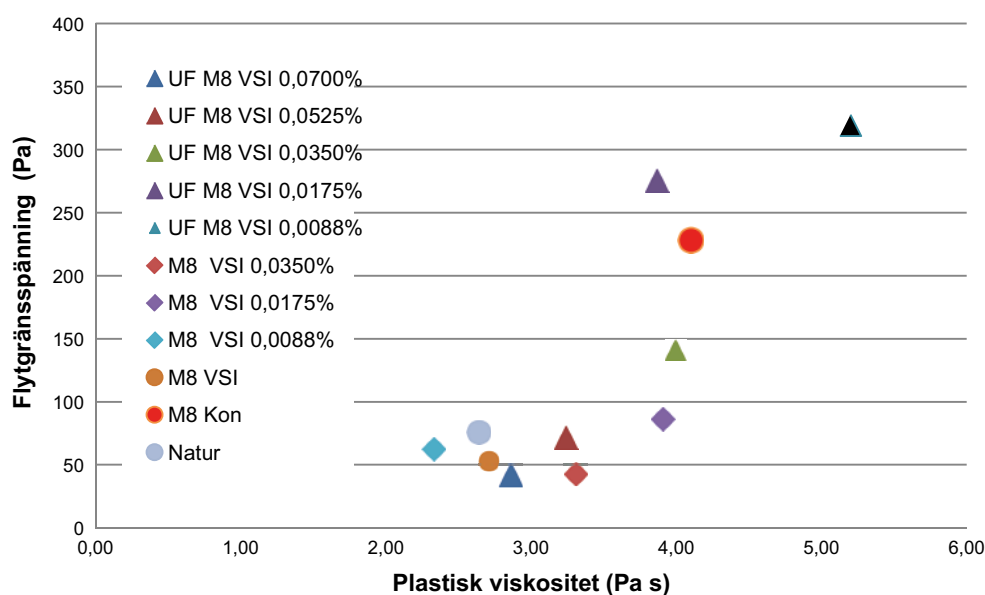
Figur A-1. Utbredningsmått mätt med Hägermankon för standardiserade bruksblandningar 0–4 mm (tabell A-1) innehållande olika typer av superplasticerare.

Vilket framgår av figur A-1 är effekten av de olika superplasticerarna likvärdig med endast små skillnader i utbredningsmättet.

Figur A-2 visar effekten av ballast och superplasticerare på plastisk viskositet och flytgränsspänning för 0–4 mm bruk blandat i en Hobartblandare och mätt med reometer (MarsIII). Beteckningen UF markerar att delar av gruset har ersatts av ultrafint kalkfiller (BetoCarb 10) och silikastoft (se tabell A-1).

Av figur A-2 framgår att tillsats av silika och ultrafin kalkstensfiller ger en sämre reologi än om inte dessa material tillsätts. I figur A-2 visas dock även att reologin hos en betong innehållande dessa två fillermaterial kan förbättras betydligt och genom tillsats av superplasticerare motsvarande 0,07 % av cementvikten kan reologiska egenskaper motsvarande de för en betong utan filler erhållas.

Slutligen visar figur A-2 även att det VSI-krossade och vindsiktade materialet ger en bättre reologi än det konkrossade. Det VSI-krossade och vindsiktade materialet har liknande egenskaper som naturgrus. Liknande resultat redovisas i Lagerblad et al. (2015).



Figur A-2. Plastisk viskositet och flytgränsspänning för standardiserade bruksblandningar (tabell A-1) uppmätt med Mars III. **M8 VSI** är VSI-krossat och vindsiktat material från NCC Sälgsjön. **M8 kon** är konkrossat material från normalproduktion.

Inverkan av filler i betong

I denna bilaga redovisas mer utförliga studier rörande inverkan av tillsats av fillermaterial på egenskaperna hos betong.

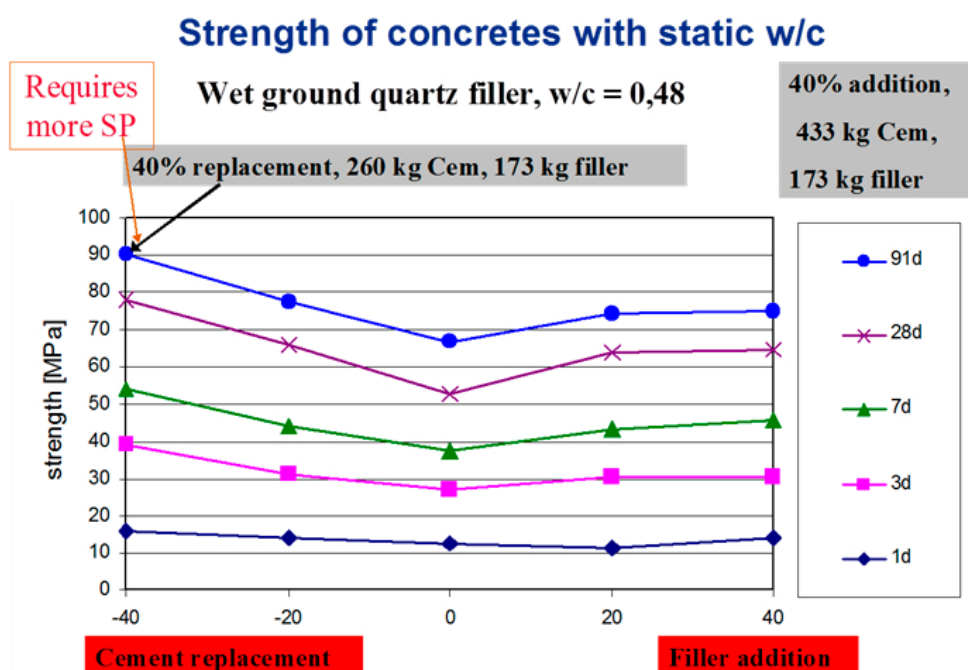
B1 Översikt

För att minska uttorkningskrympningen måste mängden vatten i betongen begränsas. Vid ett krav på att vct ska hållas konstant måste även mängden cement sänkas. Detta leder dock till att mängden mikrobruk minskar och därmed till att betongens arbetbarhet försämras. För att kompensera för en minskad cementshalt och därmed öka mängden mikrobruk kan i stället inert filler tillsättas.

Filler är dock inte någon enhetlig produkt. Den kan ha olika kornform, kornkurva och finhet beroende på utgångsmaterial och tillverkningsmetod. I princip vill man att fillern liksom övriga partiklar i betongen ska ha en kontinuerlig kornkurva (Vogt 2011). Då även cementet betraktas som en partikel i det färska mikrobruket måste övrig tillsatt filler vara antingen större eller mindre än cementkornen (Vogt 2011, Damineli et al. 2016, Lagerblad et al. 2016). Fillermaterialiets kornform skall vara så rund/kubisk som möjligt (Damineli 2016).

B2 Effekt av fillertillsats på betongens hållfasthet

Undersökningar har visat att ersättning av cement med filler vid konstant vct kan ge en högre tryckhållfasthet och täthet hos betongen (Horta 2011). Lagerblad och Vogt (2004) har även visat att tillsats av partiklar som är mindre än cementet (ultrafiller) ger en signifikant högre tryckhållfasthet vid konstant vct (figur B-1). Medelkornstorleken hos den våtmalda kvartsen som användes vid denna studie var 3 μm (Lagerblad och Vogt 2004). Ej publicerade resultat med OmyaCarb 2 GU med samma betongrecept och cementsättning har visat att man får samma resultat med denna filler.



Figur B-1. Effekt av ultrafinkornig kvarts på hållfasthet hos betong. Naturballast 0–16 mm. Fillern är tillverkad genom våtmalning av kvarts på CBI. Betongen innehåller 433 kg/m³ anläggningscement och har ett vct på 0,48. I det ena fallet ersattes cement med filler och vct hölls konstant. I det andra fallet tillsattes filler. Från Lagerblad och Vogt (2004).

B3 Effekt på hydratationskinetik

B3.1 Inverkan av typ av filler

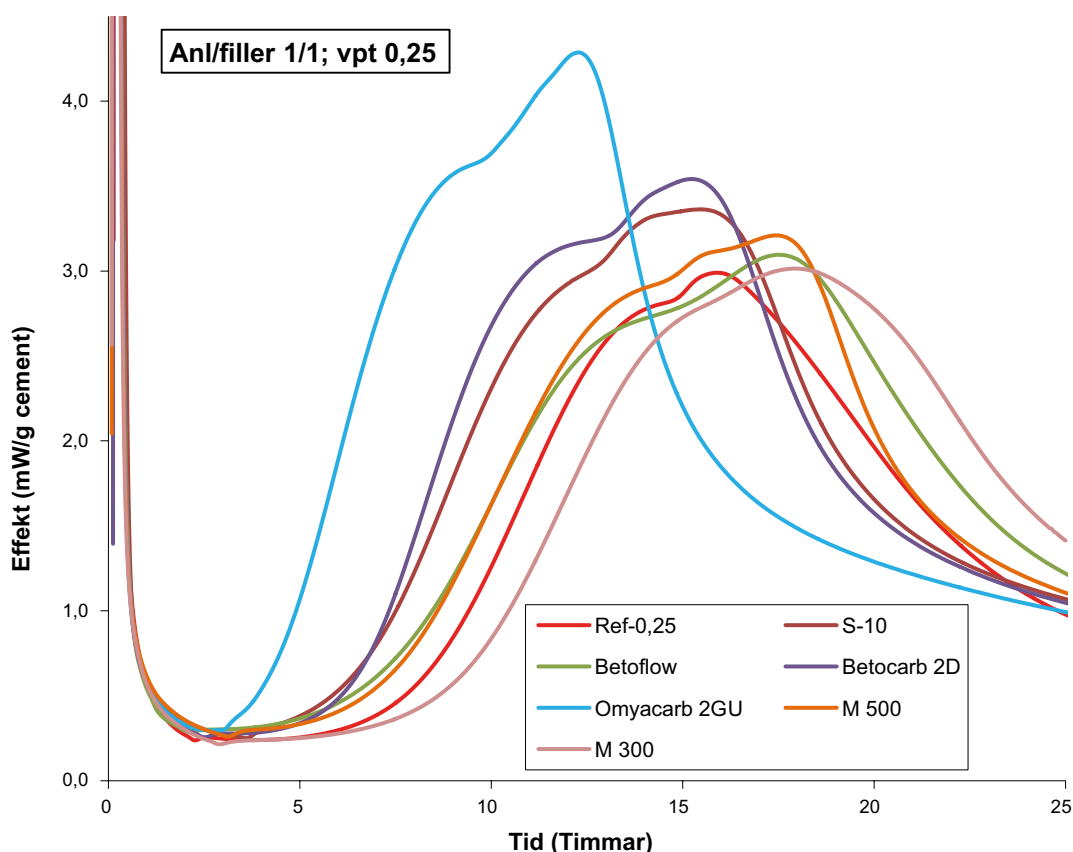
Det är sedan tidigare känt att kalkfiller kan påskynda cementets hydratation (Lagerblad och Kjellsen 1994, Kjellsen och Lagerblad 1995, Lagerblad och Fjällberg 2008).

Figur B-2 visar mätningar med isotermisk kalorimetri på en mikrobruksblandning där cement ersatts med olika mineraliska filler.

I blandningarna har hälften av cementet ersatts med filler (i vikt). Grundreceptet innehåller 30 g cement, 30 g filler, superplasticerare och 15 g vatten. Mängden superplasticerare (Glenium 51) varierade från 0,229 (% av cementvikt) till 0,450. Referensblandningen innehöll 60 gram cement och 15 gram vatten. Detta medför att vattenpulvertalet (vpt) är 0,25 i alla blandningar.

Resultaten visar klart att tillsats av kalkfiller både påverkar tiden till dess att cementshydratationen påbörjas (öppethållandetid) men även reaktionshastigheten, figur B-2. Den mest finkorniga kalkfillern (OmyaCarb 2GU) ger inte bara en kortare öppethållandetid utan även ett snabbare reaktionsförlopp när accelerationsperioden börjat. De övriga fillermaterialen, kvartsen och nefelinsyeniten ger liknande effektutveckling som referensblandningen. Liknande studier har genomförts av Lagerblad och Kjellsen (1995) och Lagerblad och Fjällberg (2008).

Studier av inverkan av blandningar av fillermaterial på inverkan på utvecklingen av materialets plastiska viskositet och flytgränsspänning över tid har också genomförts.

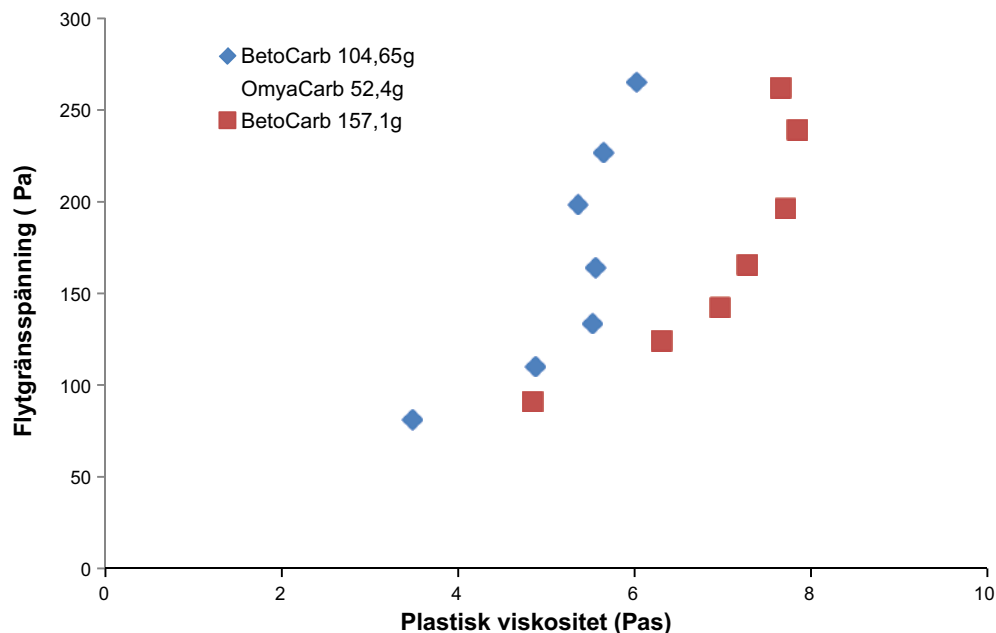


Figur B-2. Mätning med isoterm kalorimetri av bruksblandningar innehållande cement och olika filler. Betoflow, BetoCarb 2D och OmyaCarb 2GU är kalkstensfiller där OmyaCarb 2GU är mest finkornig. M500 och M300 är kvartsfiller där M500 är mest finkornig med en medelkornstorlek på 2 μ m. S markerar ultrafintmald nefelinsyenit. Analyserna av Leif Fjällberg CBI Betonginstitutet.

Tabell B-1. Recept på 0–4 mm bruk för studie av inverkan av tillsats av filler på brukets reologiska egenskaper över tid.

Komponent	Vikt (g) (Med BetoCarb 10)	Vikt (g) (Med Omya Carb 2GU och BetoCarb 10)
0–4 mm (M8 VSI)	1423	1423
Cement (Anläggningscement från Cementa)	720	720
Vatten	416	416
Omya Carb 2GU		52,4
BetoCarb 10	157,1	104,65

Figur B-3 visar utvecklingen över tid för två bruk, det ena innehållande endast BetoCarb 10 och det andra en blandning av BetoCarb 10 och OmyaCarb 2GU, tabell B-1. Mätning har genomförts direkt vid blandning och sedan efter 30, 60, 90, 120, 150 och 180 minuter. Diagrammet visar att en blandning av de två fillerna med olika storlek ger en initialt bättre reologi, men att bruket efter 90 minuter snabbt börjar styvna (högre flytgränsspänning). Diagrammet läses från nedre vänstra punkten för bägge serierna.



Figur B-3. Plastisk viskositet och flytgränsspänning för 2 olika typer av cementpasta (tabell B-1). Mätning har genomförts vid tid 0 och efter 30, 60, 90, 120, 150 och 180 minuter där den första punkten i respektive serie är den längst ner till vänster.

B3.2 Inverkan av tillsats av retarder

För att närmare undersöka effekten av kalkfillern gjordes en serie försök med den plasticerare-kombination och den retarder som använts vid blandningsförsöken i Kalmar, se avsnitt 8.2.

I tabell B-2 visas blandningarna utförda vid 20 °C med och utan retarder. Blandningarna gjordes i en Hobartblandare. Vattenbindemedelstalet (vbt) var 0,35.

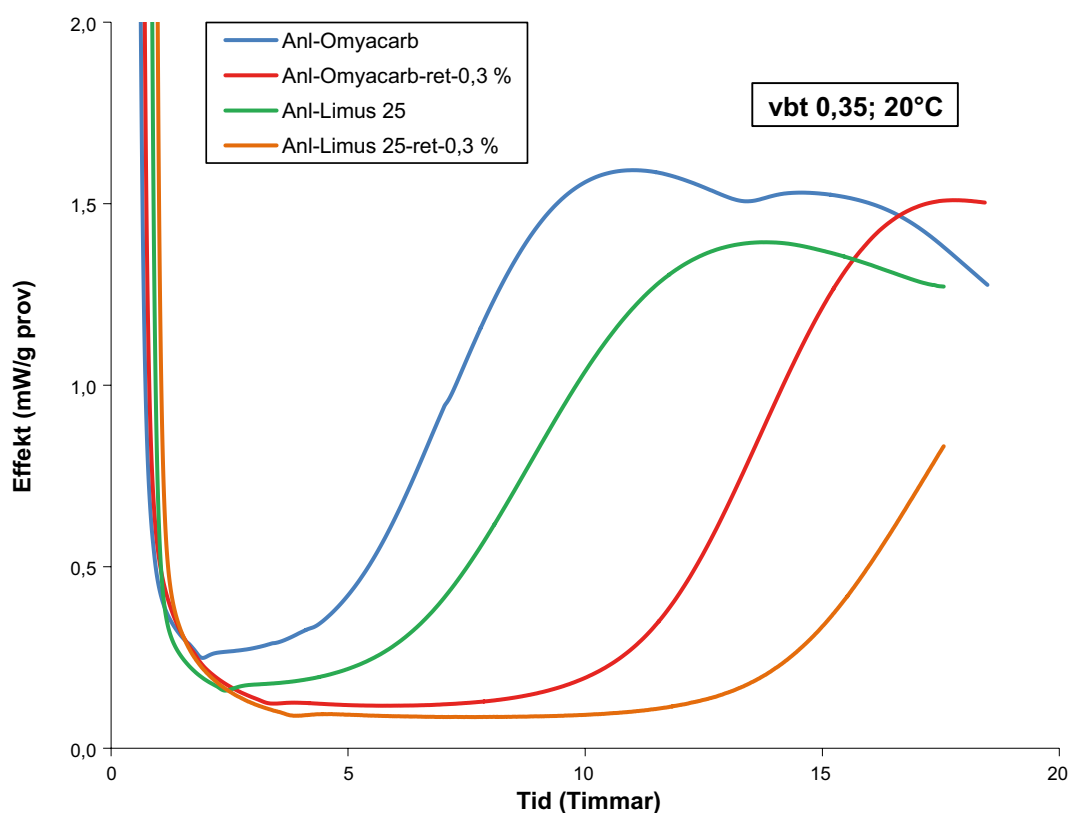
Tabell B-2. Recept för studie av inverkan av typ av filler och retarder på hydratationskinetiken

Recept Komponent	Utan/med retarder Vikt (g)	Utan/med retarder Vikt (g)
Anläggningscement.	320	320
OmyaCarb 2GU	130	
Limus 25		130
Vatten	156,8	156,8
Master Glenium 51	1,8	1,1
Master Sure 910	1,7	1,7
Master Set RT 401	0/0,96	0/0,96

Förhållandet cement: kalkfiller = 1:0,41. Vattenbindemedelstalet (vbt) var 0,35.

I figur B-4 visas värmeutvecklingen vid 20 °C utan respektive med retarder för cementpasta innehållande OmyaCarb 2GU respektive Limus 25.

Resultaten visar att den ultrafinkorniga kalkfillern OmyaCarb 2GU ger en distinkt snabbare och även kraftigare reaktion än den grövre Limus 25. Retardern påverkar båda på ungefär samma sätt.



Figur B-4. Värmeutvecklingen vid 20 °C utan respektive med retarder för 2 olika typer av cementpasta (tabell B-2).

B3.3 Inverkan av temperatur

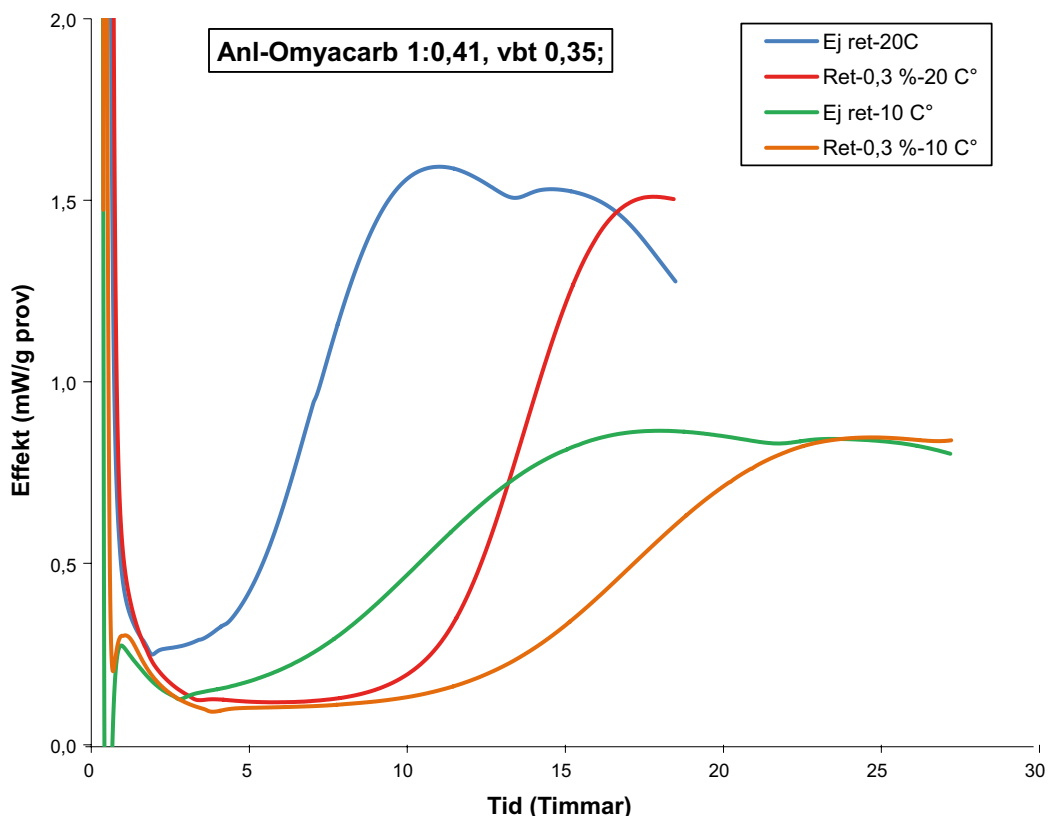
För att ytterligare öka kunskapen rörande inverkan av extremt finkornig kalkstensfiller på hydrationsförloppet undersöktes effekten av den omgivande temperaturen på blandningarna med OmyaCarb 2 GU, tabell B-3.

Tabell B-3. Recept för studie av inverkan av temperatur på hydrationskinetiken.

Recept Komponent	Utan retarder Vikt (g)	Med retarder Vikt (g)
Anläggningscement	320	320
OmyaCarb 2GU	130	130
Vatten	156,8	156,8
Master Glenium 51	1,3	1,3
Master Sure 910	1,7	1,7
Master Set RT 401	0	0,96

Förhållandet Cement/OmyaCarb 2GU = 1/0,41.

I figur B-5 visas värmeutvecklingen vid 10 °C respektive 20 °C. Resultaten visar som förväntat att reaktionerna sker långsammare vid lägre temperatur, d v s man får en längre öppethållandetid och en långsammare reaktion när accelerationsperioden börjat. Retardern ger ungefär samma effekt vid båda temperaturerna.



Figur B-5. Värmeutvecklingen vid 10 °C respektive 20 °C utan respektive med retarder. Förhållandet Cement: OmyaCarb 2GU var 1:0,41. Recept enligt tabell B-3.

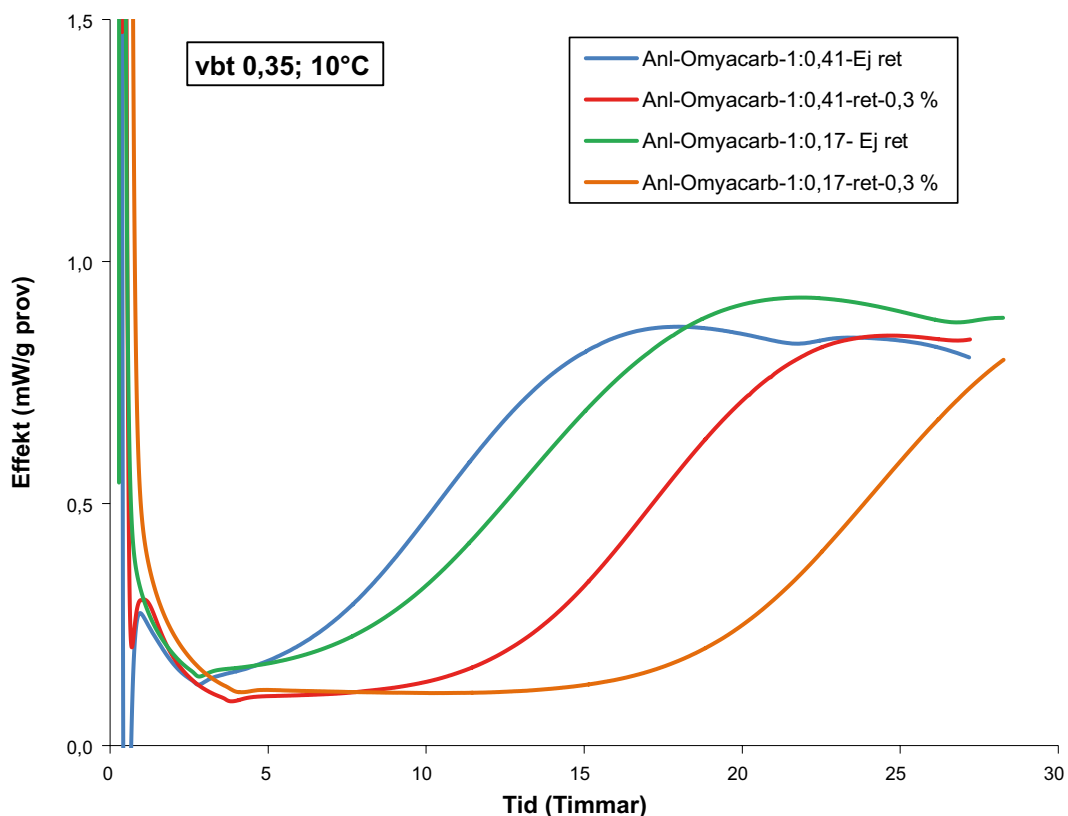
B3.4 Inverkan av förhållandet cement: filler

Slutligen undersöktes inverkan av en ökad cementhalt i kombination med en minskad halt OmyaCarb 2GU, tabell B-4, alltså förhållandet Cement: Omya Carb 2GU.

Tabell B-4. Recept för undersökning av inverkan av förhållandet Cement: OmyaCarb 2GU.

Recept Komponent	Utan/med retarder Vikt (g)	Utan/med retarder Vikt (g)
Anläggningscement	385	320
OmyaCarb 2GU	65	130
Vatten	156,8	156,8
Master Glenium 51	1,3	1,3
Master Sure 910	1,7	1,7
Master Set RT 401	0/1,155	0/0,96
Cement:OmyaCarb 2GU	1: 0,17	1: 0,41

I figur B-6 visas värmeutvecklingen vid 10 °C och två olika blandningsförhållanden för cement och OmyaCarb 2GU. Resultaten visar att reaktionsförloppet relaterar till mängden kalkfiller där en större mängd kalkfiller ger en kraftigare reaktion. Detta i sin tur indikerar att reaktionshastigheten är relaterad till storleken på den aktiva ytan.



Figur B-6. Värmeutvecklingen vid 10 °C med två olika blandningsförhållanden för cement och OmyaCarb 2GU. Recept enligt tabell B-4.

B4 Sammanfattning och slutsatser

I denna bilaga har inverkan av tillsats av finmalda fillermaterial, främst kalkstensfiller, på egenskaperna hos hårdnad betong samt på hydratationskinetiken undersökts. Följande slutsatser kan dras:

- Tillsats av filler ökar betongens hållfasthet. Omfattningen av effekten är dock beroende av vilken typ av filler som används och på vilket sätt som betongens grundrecept förändras.
- Ultrafinmalad filler ger högre hållfasthetstillväxt än vanlig kalkfiller.
- Tillsats av kalkstensfiller förkortar tiden till dess att cementshydratationen startar och ger ett kraftigare reaktionsförlopp. Detta ger ett kortare öppethållande än för material utan filler. Andra typer av filler påverkar inte reaktionsförloppet i samma utsträckning.
- Påverkan på cementreaktionen relaterar till mängd och malningsgrad av kalken, d v s den reaktiva ytan.
- Förhållandet cement: kalkstensfiller påverkar reaktionsförloppet. En större andel filler ger ett snabbare reaktionsförlopp.
- Retardern fungerar även i blandningarna med kalkfiller. Med mer kalkfiller måste dock mängden retarder dock ökas för att nå en viss öppethållandetid.

SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

skb.se