SBUF

ID: 13534

DISPERGERING AV MIKROCEMENT-BASERAT BRUK MED ULTRALJUD OCH MED KONVENTIONELLA LABORATORIEBLANDARE

Almir Draganović, KTH
Antranik Karamanoukian, KTH
Peter Ulriksen, LTH
Stefan Larsson, KTH

2020-06-01

FÖRORD

Bruk baserat på mikrocement används huvudsakligen för tätning av bergsprickor i undermarkskonstruktioner med höga tätningskrav. Detta bruk är känt som svårblandat jämfört med bruk baserat på vanlig Portlandcement. Denna forskning undersöker möjligheten att använda ultraljud för att förbättra blandning och dispergering av mikrocementbaserat injekteringsbruk och därmed förbättra brukets inträngningsförmåga och tätningseffektivitet.

Projektet har genomförts på KTH, Avdelningen för Jord- och bergmekanik. Arbetsgruppen bestod av projektledare Almir Draganović (KTH) och medarbetare Peter Ulriksen (LTH) och Stefan Larsson (KTH). Mastersstudenten Antranik Karamanoukian (KTH) medverkade också i projektet. Stort stöd har vi fått från referensgruppen som bestod av Tommy Ellison (Besab), Thomas Dalmalm och Linnea Muje (Trafikverket) och Per Tengborg (BeFo).

Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) har finansierat projektet. Ett stor tack till dem.

SAMMANFATTNING

Bruk baserat på mikrocement används huvudsakligen för tätning av bergsprickor i undermarkskonstruktioner med höga tätningskrav. Detta bruk är känt som svårblandat jämfört med bruk baserat på vanlig Portlandcement. Denna forskning undersöker möjligheten att använda ultraljud för att förbättra dispergering av mikrocementbaserat injekteringsbruk.

Ultraljudsdispergering jämfördes med effektiviteten hos en vanlig laboratorieblandare utrustad med disk och rotor-statorteknik. For att testa dispergeringen hos de tre metoderna valdes två olika cement. INJ30 är ett relativt lättdispergerat cement med d_{95} = 30 µm och UF12 är ett mycket svårdispergerat cement med d_{95} = 12 µm. Dispergeringen kontrollerades med filterpump.

Denna studie visade att ultraljudsteknik var den bästa av de tre testade dispergeringsmetoderna. Den kan användas för dispergering av bruk baserade på mycket finmalda cement ner till d_{95} = 12 µm, som de konventionella metoderna inte klarar av. Den uppnådda dispergeringen av bruk baserat på cement med d_{95} = 12 µm var cirka 54 µm. Det indikerar att detta bruk har en kapacitet att täta sprickor ner till cirka 54 µm sprickvidd, vilket är en betydande förbättring jämfört med 70 till 80 µm som man klarar av idag.

Studien visade att en konventionell laboratorieblandare utrustad med disk inte alls är lämplig för dispergering av bruk baserat på mycket finmalda cement. En laboratorieblandare utrustad med rotor-statorsystem är bättre än disk och kan användas för dispergering av bruk baserat på cement med d_{95} ner till 30 µm. För en effektiv dispergering av bruk baserat på cement med d_{95} <30 µm krävs en blandare som använder ultraljudsteknik.

Nyckelord: mikrofin cement; injekteringsbruk; dispergering; ultraljudsdispergering; laboratorieblandare

SUMMARY

Grout based on microfine cement is mainly used for sealing of rock fractures in underground construction with high sealing requirements. This grout is known to be hard to disperse, compared to grouts based on ordinary Portland cement. This study investigated the possibility of using ultrasound to improve the dispersion of microfine cement grouts.

Ultrasonic dispersion was compared to the efficiency of conventional laboratory mixers equipped with a disk and rotor-stator system. To test the dispersion achieved by these three methods, two different cements were selected. INJ30 is a relatively easily dispersed cement, with d_{95} = 30 µm, and UF12 is very difficult to disperse, with d_{95} = 12 µm. The dispersion was controlled by a filter pump.

The study showed that ultrasound was the best of the three tested dispersion methods. Ultrasound can be used for dispersion of grouts based on very finely milled cement down to d_{95} = 12 µm, which conventional methods are unable to disperse. The achieved dispersion of grout based on cement with d_{95} = 12 µm was approximately 54 µm. This indicates that this grout has the capacity to seal fractures down to about 54 µm aperture, which is a significant improvement on the 70 to 80 µm that is managed today.

The study showed that a conventional laboratory mixer equipped with disk is not at all suitable for the dispersion of grout based on microfine milled cement. A laboratory mixer equipped with a rotor-stator system is better than the disk system and can be used for dispersion of grouts based on cement with d_{95} down to 30 µm. The efficient dispersion of cement-based grouts based on cement with d_{95} <30 µm requires mixers using ultrasonic technology.

Keywords: microfine cement; grout; dispersion; ultrasonic dispersion; laboratory mixer

INNEHÅLL

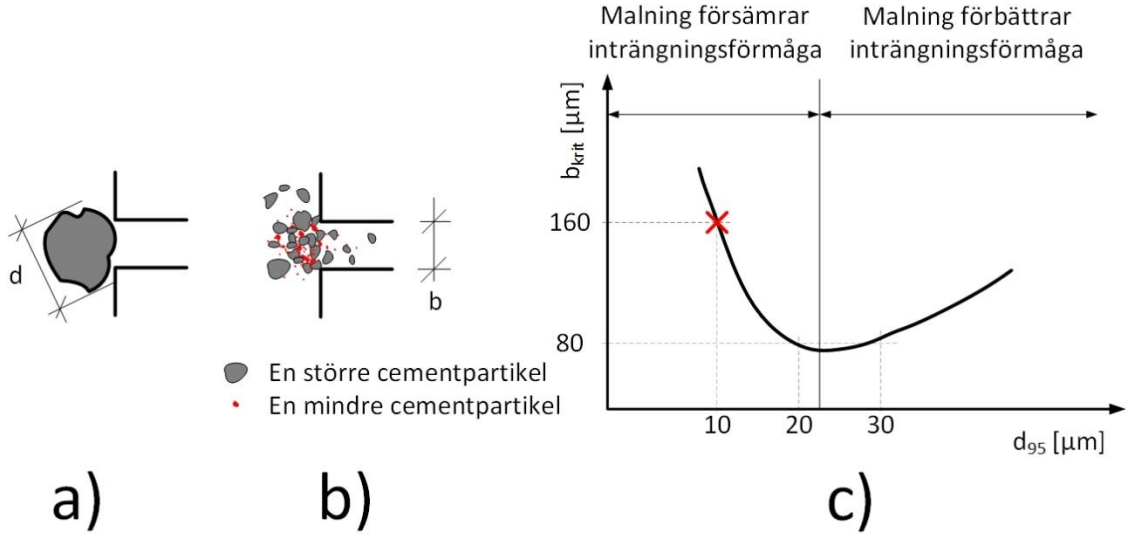
1. INTRODUKTION 1
2. MATERIAL OCH METODER 3
2.1 Bruk 3
2.2 Dispergering med konventionell blandare utrustad med en 90-mm disk 3
2.3 Dispergering med konventionell blandare utrustad med ett R/S system 5
2.4 Dispergering med ultraljud 6
2.5 Filterpump, en metod att testa dispergering av bruket 8
3. RESULTAT 10
3.1 Dispergering av bruk baserade på cement med d_{95}=30 µm 10
3.2 Dispergering av bruk baserade på cement med d_{95} = 12 µm 16
3.3 Sammanfattning av resultaten 21
4. DISKUSSION 23
4.1 Uppnådd dispergering med olika dispergeringsmetoder jämfört med ”trendkurva” och inert material 23
4.2 Uppnådd dispergering jämfört med tidigare studier 24
4.3 Frågor för framtida forskning 24
5. SLUTSATSER 26
6. REFERENSER 27

1. INTRODUKTION

Injektering är en vanlig teknik för att täta berg kring undermarkskonstruktioner, som tunnlar och kaverner, och oftast används cementbaserade injektionsbruk som injekteringsmaterial. De ökade kraven på tätning driver utvecklingen av inträngningsförmågan hos cementbaserade bruk. Inträngningsförmågan kan förbättras genom finare malning av cementen, genom utveckling av olika tillsatser och bättre blandning (dispergering). Tidigare forskning visade (Eklund och Stille, 2008; Draganović och Stille, 2011; Pantazopoulos m.fl. 2012) att cement kan malas till en viss kornstorlek för att förbättra inträngningsförmåga. Ytterligare malning minskar däremot inträngningsförmågan betydligt, vilket illustreras i Figur 1. Anledningen är en mer intensiv hydrering och flockulering av finmalda partiklar (Zingg m.fl. 2008; Yang m.fl. 1997). Dessa finmalda partiklar bygger större agglomerat som stoppar brukets flöde i bergsprickor. Flockuleringsproblemet har man också försökt att lösa genom utveckling av olika cementtillsatser. Men nu existerande tillsatser är inte tillräckligt effektiva för dispergering av dessa injekteringsmedel. De är mest effektiva för att förbättra reologin (Draganović m.fl. 2020) vilket också är viktigt för en längre nående spridning av injekteringsbruket i sprickor.

Figur 1 illustrerar problematiken kring flockulering av mikrocementbaserade bruk och **Figur 1c)** visar nuvarande uppnådd inträngningsförmåga relaterad till cementmalningsgrad. Cementens finhet eller malningskvalitet representeras i figuren med parametern d_{95} vilket betyder att 95 % av cementmassan har en partikeldiameter mindre än det givna värdet. Brukets inträngningsförmåga representeras med parametern b_{krit}. Parametern b_{krit} definieras som den minsta sprickköppning som en viss mängd av injekteringsbruk kan passera utan filtrering och mäts i µm (Eriksson och Stille, 2003; Eriksson m.fl. 2004). Ju lägre b_{krit} desto bättre inträngningsförmåga. Som framgår av **Figur 1 c)** är förbättringarna genom malning effektiva ner till 20–25 µm. En finare malning försämrar inträngningsförmågan. Exempelvis halverar en malning av cement till d_{95} på 10 µm inträngningsförmågan – från en b_{krit} kring 80 µm till 160 µm.

För att ytterligare illustrera flockuleringsaffiniteten hos bruk baserade på finmalda cement uttryckte Eklund och Stille (2008) flockuleringsaffinitet som relation mellan b_{krit}/d_{95}. Bruk baserade på cement med d_{95} på 12 och 8 µm ger en relation runt 13,5 och 20 hos olika cement. Detta visar att finare malda cement har en större flockuleringsaffinitet och är svårare att dispergera.



Figur 1: Illustration av inträngningsförmågan hos mikrocementbaserat bruk. Diagrammet som visas i figur c) är modifierat från Eklund och Stille (2008).

Olika blandningstekniker har testats för att lösa detta problem. Idag är en konventionell blandare utrustad med disk den vanligaste tekniken för blandning av cementbaserade bruk i laboratoriet. En konventionell blandare utrustad med rotor-statorsystem (R/S) är också en teknik som ofta används i laboratoriet. Ultraljud är en existerande teknik som är relativt oprövad för dispergering av cementbaserade bruk och som också kan användas för att förbättra blandning. I fält används idag blandare som baseras på virvelprincipen, så kallade kolloidala blandare . Principen är mest liknade disk-teknik där bruket dispergeras mest med skjuvning fast ett mycket större flöde och brukhastighet åstadkoms.

Syftet med denna studie är att testa effektiviteten hos konventionell mixer- och ultraljudsteknik för dispergering av injekteringsbruk baserade på mycket finmalda cement med d_{95} på 30 och 12 µm. En framgångsrik dispergering av detta bruk skulle kunna förbättra inträngningsförmågan betydligt och man borde kunna täta bergsprickor ner till 30 eller 40 µm sprickvidd jämfört med det idag möjliga 70 eller 80 µm. Dessutom kan inträngningsförmågan hos finmalda cementbruk förbättras ytterligare genom fortsatt finmalning. Användningen av kemiska injekteringsmedel – som är relativt dyra och sannolikt mindre miljövänliga – kan då minskas.

2. MATERIAL OCH METODER

2.1 Bruk

For att testa dispergeringen hos de tre metoderna valdes två olika cement. INJ30 är ett relativt lättdispergerat cement med d_{95} = 30 µm och UF12 är ett mycket svårdispergerat cement med d_{95} = 12 µm. Dessa finmalda cement är framställda av Cementas Anläggningscement, som är en Portlandcement CEM I 42,5 N –SR 3 MN / LA. Dessa cement har samma kemiska sammansättning med undantag av en liten skillnad i mängden av sulfat. Mängden sulfat i Anläggningscement är 2,3 till 2,5 % cementvikt. Under produktionen av UF12 och INJ30 tillsätts ytterligare 1 % sulfat.

Recepten på testade bruk visas i Tabell 1. Dessa brukrecept valdes eftersom de representerar de bruk som är vanligast i Sverige för tätning av undermarkskonstruktioner, och därför mest relevanta att studera. Temperaturen på kranvattnet var mellan 13 och 14° C. Tillsatsen som användes i denna studie var iFlow som produceras av Sika. Enligt tillverkaren har denna produkt både elektrostatisk och sterisk effekt på cementpartiklar för att förbättra reologi och dispergering.

Tabell 1: Brukrecept

Cement	vct	Tillsatser [%][a]
INJ30	0,8	0,4
UF12	1,2	0,5

a= procent av cementvikt.

2.2 Dispergering med konventionell blandare utrustad med en 90-mm disk

En Dispermat CV-3-blandare utrustad med disk visas i Figur 2 a) och dispergeringsprocessen illustreras i Figur 2 b) och c). Disken roteras med relativt hög hastighet. Under rotationen dras vätska och fasta partiklar ner till disken genom sugkrafter. Detta skapar två strömningsområden, det ena ovanför och det andra under disken. Varje strömningsområde består av två individuella virvlar. Majoriteten av dispergeringen sker i kontakten mellan disk och fast material respektive vätska på grund av en omedelbar hastighetsförändring. Dispergeringen uppnås delvis också genom skjuvning mellan olika brukskikt som flyter med olika hastigheter.

Bruket för dessa provningar blandades i en 10 l hink och satsvolymen var ungefär 4,2 l. Hinkens diameter och avståndet mellan disken och botten av provet visas i Tabell 2. Tabell 2 visar också en jämförelse mellan den geometri som rekommenderas av VMA-Getzmann och den som används i denna studie. Som man kan se låg den använda geometrin inom de rekommenderade gränserna. Bruket förblandades också med blandningsstav på en skruvdragare under cirka 30 sekunder.

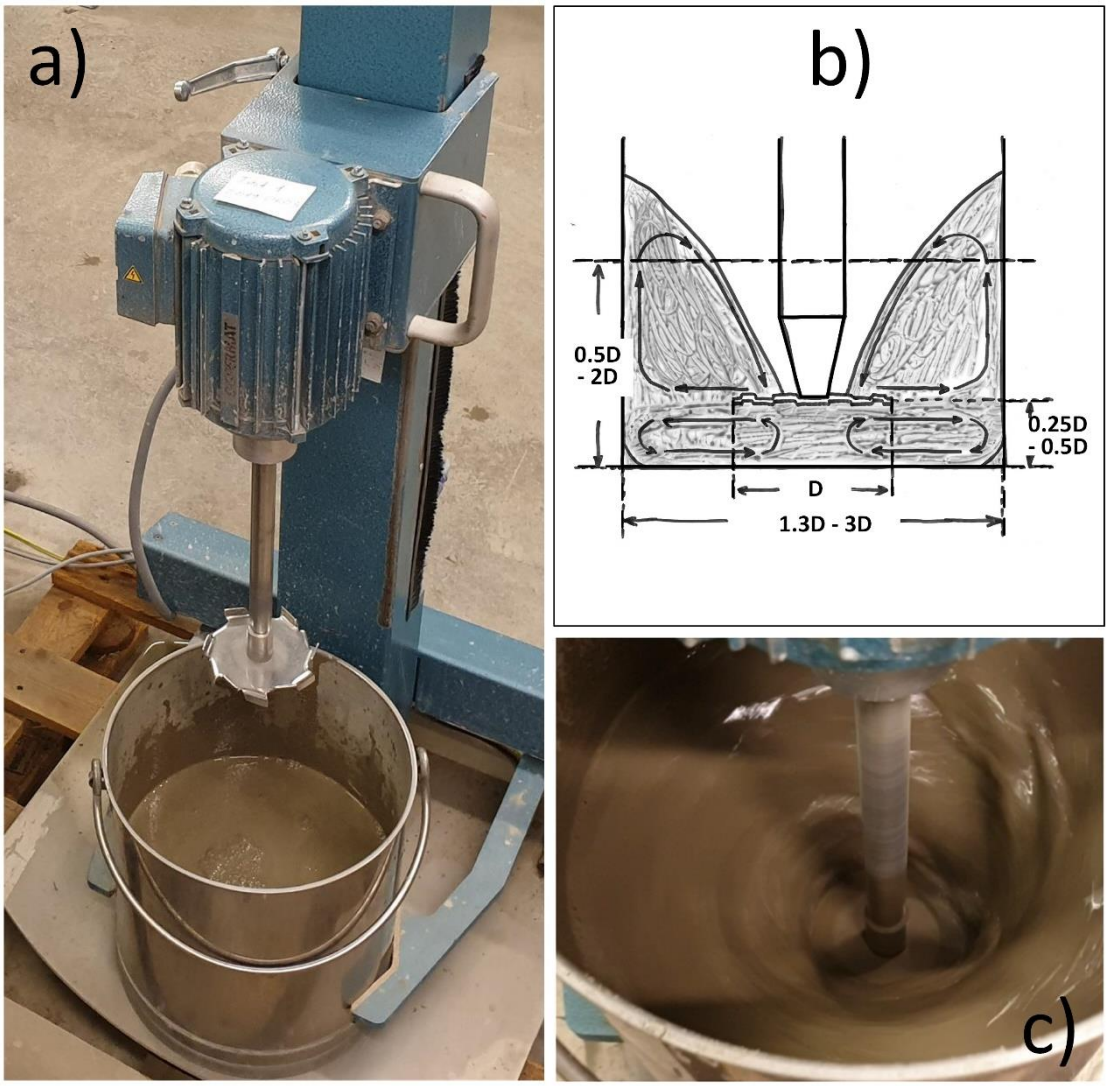
Blandningsproceduren bestod av en dispergeringsprocess på 4 minuter och omrörning under 0 minuter. Detta är ungefär den minimitid som normalt krävs i fältet från produktionen av injekteringsbruk till injekteringen. Uppmätta egenskaper efter cirka 15

minuter är mer representativa än om mätningar utförs direkt efter blandningen, dvs. direkt efter dispergeringsprocessen utan någon omrörning. I provningar med tillsatser tillsattes dessa efter en minut av dispergering.

Diskens rotationshastighet är också viktig och bör vara tillräckligt hög för att uppnå flödesrörelse för allt bruk i hinken. Draganović och Björk (2014) utförde provningar där man jämförde disk och R/S-systemet med samma utrustning, satsstorlek och recept. De fann att allt bruk var i rörelse när det blandades med disk vid en axelrotation av 1 030 rotationer per minut (rpm), varvid ett donutliknande flöde uppnåddes. I denna studie blandades bruket med en axelrotationshastighet av 2 000 och 6 000 rpm.

Tabell 2: Jämförelse mellan geometri rekommenderad av VMA-Getzmann och den som har använts i denna studie vid blandning med blandare utrustad med disk. V_{hink} = 10 l. Diskens diameter, D_{disk} = 90 mm.

		Geometri rekommenderad av VMA-Getzmann	Geometri använd i studien
Hinkdiameter	D_{hink} = 240 mm	1,3 D_{disk} – 3,0 D_{disk}	2,7 D_{disk}
Avstånd mellan disk och provbotten	L = 32 mm	0,25 D_{disk} – 0.5 D_{disk}	0,35 D_{disk}
Brukets höjd i hinken	H≈ 98 mm	0,5 D_{disk} – 2,0 D_{disk}	1,1 D_{disk}



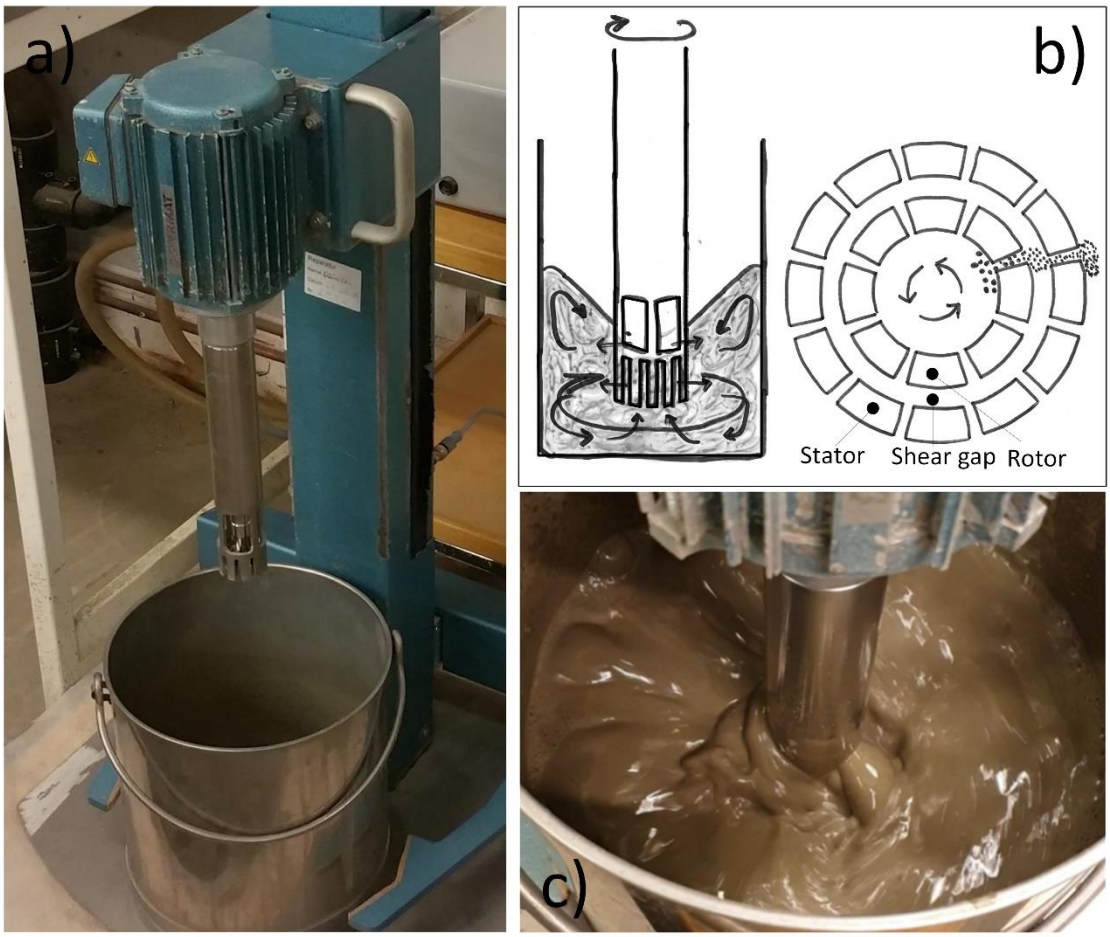
Figur 2: a) VMA-Getzmann Dispermat CV-3-blandare utrustad med en 90 mm disk. b) Geometri rekommenderad av VMA-Getzmann och c) dispergeringsprocess av bruket.

2.3 Dispergering med konventionell blandare utrustad med ett R/S system

Dispergeringsprocess med rotor-stator (R/S)-system illustreras i Figur 3. Flödet av bruket i detta system är svårare att beskriva jämfört med disk. I allmänhet dras vätska och fasta partiklar axiellt underifrån och pressas ut radiellt mellan R/S-tänderna (Figur 3 b). Resultatet är en hög acceleration och turbulens hos vätskor och fasta partiklar under flödet genom R/S-tänderna. Agglomeraten förstörs fysiskt i kontakten med rotorn och genom skjuvning. Detta är den plats där huvudsaklig dispergering sker.

Bruket i dessa provningar blandades i samma hink och med samma satsstorlek som vid diskblandning. Avståndet mellan R/S-axeln och provets botten var 17 mm. Bruket

förblandades också med en blandstav på en skruvdragare under cirka 30 sekunder. Blandningsproceduren delades också upp i en dispergeringsprocess på 4 minuter och omrörning under 10 minuter. Rotorns rotationshastighet under dispergeringen var 10 000 rpm och 4 000 eller 3 000 rpm under omrörningen i bruket utan tillsatsmedel respektive med tillsatsmedel. Omrörningen i bruket med tillsatsmedel skedde vid något lägre hastighet på grund av en bättre reologi. Det fanns inget behov av högre omrörningshastighet.



Figur 3: a) VMA-Getzmann Dispermat CV-3-blandare utrustad med ett rotor-statorsystem (R/S); b) och c) illustrerar och visar en bild av dispergeringsprocessen av bruket.

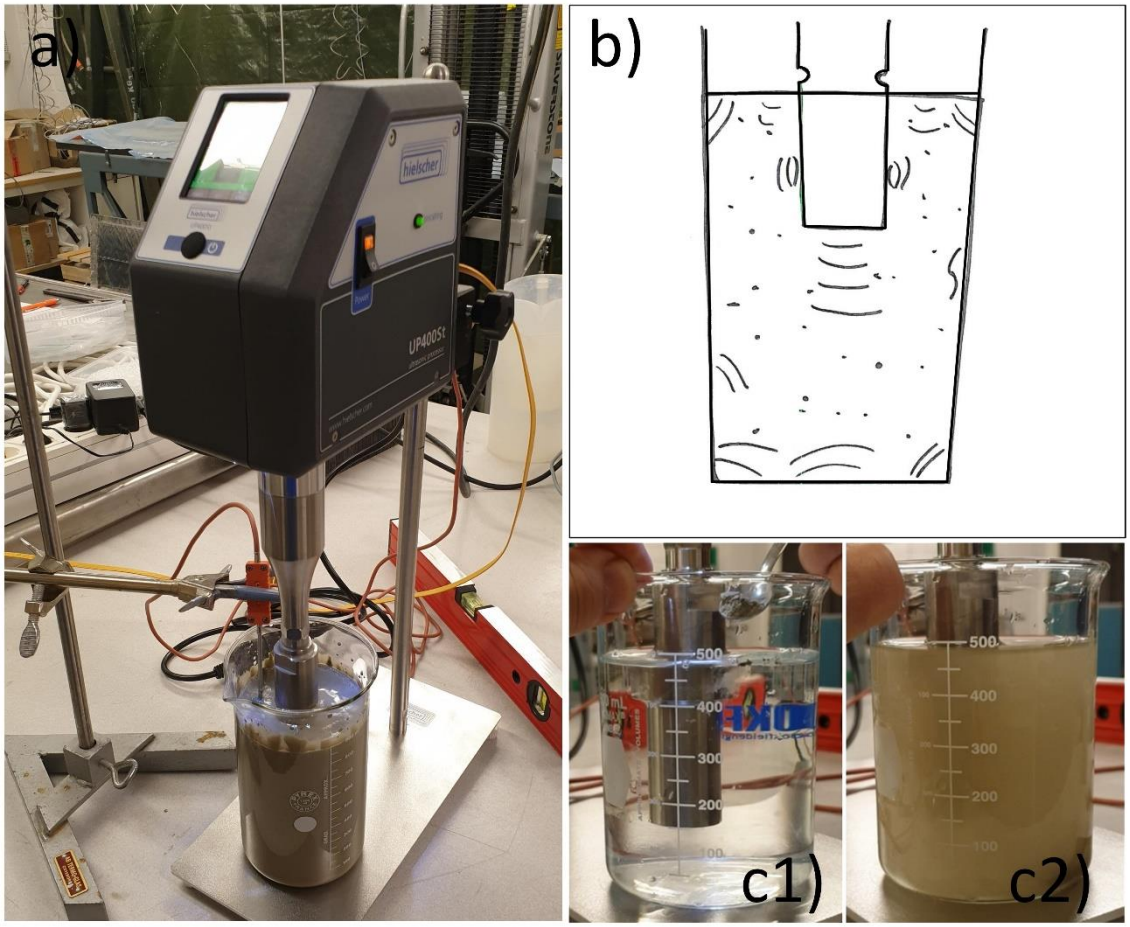
2.4 Dispergering med ultraljud

Dispergering med ultraljud baseras på en process som kallas akustisk kavitation (Suslick, 1998). Det är en process i vätska eller en blandning av vätska och fast material som orsakas av ultraljudsvågor. Ultraljudsvågorna skapar luftbubblor i vätskan. Luftbubblorna växer och imploderar vid en viss storlek med ett intensivt ljud. Denna implosion skapar höghastighetsjetströmmar. Jetströmmarna och tillhörande chockvågor

i en blandning kan användas för olika ändamål i olika material (Schilde m.fl. 2011; Garg m.fl. 2009; Adio m.fl. 2016; Suslick, 1998). Ultraljud kan också appliceras på cementbaserade material för att förbättra olika egenskaper. En bra genomgång av tillämpningen av ultraljud i betongindustrin har nyligen publicerats av Ganjian m.fl. (2018) . Enligt Hielscher (2005) är ultraljud särskilt lämpligt för dispergering av agglomererade partiklar i en suspension. Det finns ett fåtal publicerade artiklar om användning av ultraljud vid dispergering av cementbaserade bruk (Toumbakari m.fl. 1999; Miltiadou-Fezans och Tassios, 2013). De visade att dispergering av injekteringsbruk baserat på vanlig Portlandcement med d_{95} omkring 60 µm kunde förbättras genom en kombination av ultraljud och mekanisk omrörare.

Jämfört med dispergering med konventionella blandare har blandningen med ultraljud ingen generell flödesrörelse. Blandningen är utsatt för stress med chockvågor och jetströmmar och fasta partiklar i blandningen dispergeras på detta sätt. I denna studie användes en UP400St-apparat utrustad med en H22 sonotrod (**Figur 4** a)). Denna apparat arbetar med en frekvens på 24 kHz och amplitud, effekt och sonikeringstid kan kontrolleras. I detta system kan amplituden hos ultraljudsvågorna kontrolleras mellan 20 och 100 µm. Det finns inga referenser som kan användas som hjälp vid valet av provstorlek, amplitud och sonikeringstid för dispergering av mikrofint cementbruk. För att få en bra och optimal försökuppställning för provningen studerades också kavitationsprocessen i vatten. I ett test med vatten kunde man observera skapandet av luftbubblor, jetströmmar och vattenrörelse under sonikering vid olika amplituder och olika djup av sonotrod. Sonikering utfördes också i vatten med en liten mängd cement tillsatt för att observera cementets rörelse under processen. **Figur 4 c1)** och **c2)** visar två bilder från detta experiment. En liten sked cement dispergerades jämnt i vattnet efter bara några sekunder.

I denna studie testades ultraljudsdispergering i tre olika provvolymer. De testade provvolymerna var cirka 435 ml i ett 600 ml provkärl, 860 ml i ett 1 l provkärl och 2 l i ett 2,5 l provkärl. Sonotrodsdjupet var 45 mm för alla tre provstorlekarna. Den provade amplituden och sonikeringstiden visas i respektive resultattabell.



Figur 4: a) Hielscher UP400St ultraljudsapparat utrustad med en H22 sonotrod; b) illustration av dispergeringsprocessen; c1) kavitation i vatten och c2) dispergering av en liten cementmängd i vatten.

2.5 Filterpump, en metod att testa dispergering av bruket

I många publicerade studier mättes effektiviteten hos ultraljudsdispergering för olika material genom att mäta siktkurvan före och efter sonikering. Toumbakari m.fl. (1999), Miltiadou-Fezans och Tassios (2013), använde alla en sandkolonn för att testa blandningseffektivitet och inträngning. Toumbakari m fl. (1999) använde sandpartiklar mellan 1 och 2 mm i sandkolonnen, vilket gav porer i sanden på mellan 0,15 och 0,3 mm diameter. Dessa porer är mycket större än de filterstorlekar som användes i denna studie. Dessutom är en noggrann uppskattning av storleken på porer i en sandkolonn svår jämfört med att mäta filterstorlekar.

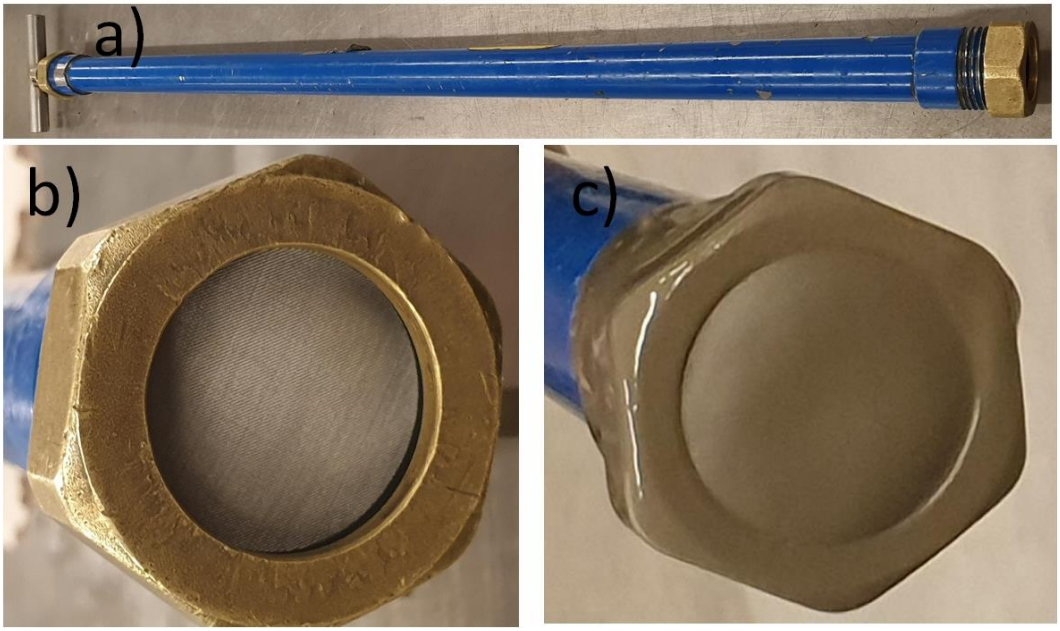
I denna studie testades effektiviteten av dispergeringen enligt europeisk standard EN 14497: 2004/AC: 2006 med filterpump och filter i olika storlekar. **Figur 5** visar en filterpump med ett monterat filter. Denna metod möjliggör direkt mätning av dispergeringen av fina cementpartiklar i ett injekteringsbruk. Dåligt dispergerade och

stora partiklar kan inte passera genom filtret, medan väl dispergerade och mindre partiklar kan.

I provningen med Dispermat-blandaren blandades cirka 4,4 l injekteringsbruk. Bruket hälldes sedan i fyra olika provkärl med 1 l bruk vardera och provades med fyra olika filterpumpar med olika filterstorlekar. I experimentet användes fyra olika filterpumpar för att effektivisera provningen och minimera testtiden. Hela volymen av blandat bruk hälldes ut och bottnen av blandningshinken observerades för att kontrollera blandningskvaliteten. Ett eventuellt sediment på botten är ett tecken på dålig blandning.

I provningarna med ultraljud testades dispergering med filterpumpen direkt från provkärlet. I vissa provningar med ultraljud var provvolymen cirka ½ liter och enligt den europeiska standarden bör volymen vara 1 l. Pumpens maximala sugvolym är 300 ml vilket är lägre än ½ l och inga störningar under användning av filterpumpen på dessa prover har observerats. Efter provningen hälldes det återstående bruket ut och provkärlets botten observerades för eventuell närvaro av sediment.

Filterpumpen rengjordes och smörjdes före varje test och ett nytt filter monterades för att säkerställa samma kvalitet på mätningarna varje gång. Det var lätt att dra pumpen när bruket passerade genom filtret utan uppbyggnad av filterkakan eller stopp av flödet. När en filterkaka började byggas var motståndet mot dragning större och vanligtvis byggdes filterkakorna mycket snabbt. I detta fall fanns det dock inget behov att använda överdriven dragkraft vid provningen.



Figur 5: Filterpump a); med ett rent filter b); och filterkaka c) uppmätt med ett 62 µm filter. Filterdiametern är 30 mm.

3. RESULTAT

3.1 Dispergering av bruk baserade på cement med d_{95}=30 µm

3.1.1 Dispergering med laboratorieblandare utrustad med en 90-mm disk och R/S-system

Tabell 3 visar resultaten från dispergeringsförsök med laboratorieblandare utrustad med en 90-mm disk. Såsom framgår från resultatet var denna metod inte alls effektiv för att dispergera detta bruk. I försöken utan tillsatser inträffade flödesstopp direkt även i tester med 154 µm-filter. Tillsatsmedel förbättrade inte dispergeringen och ökningen av blandningshastigheten till 6 000 rpm förbättrade dispergeringen endast marginellt.

Tabell 3: Dispergering av cementbruk blandade med en Dispermat CV-3 laboratorieblandare utrustad med en 90-mm disk.

Bland-ning	Tillsatser	Dispergering		Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter.							
		Blandningstid 4 min	Omrörning 10 min	54 µm	62 µm	77 µm	91 µm	104 µm	122 µm	132 µm	154 µm
nr.	[%][a]	[rpm]	[rpm]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
1	ingen	2 000	700	-	-	≈0	≈0	≈0	-	-	-
2	ingen	2 000	700	-	-	-	-	-	≈0	≈0	≈0
3	0,4	2 000	700	-	-	-	≈0	≈0	≈0	≈0	-
4	0,4	2 000	700	-	-	-	-	≈0	≈0	≈0	≈0
5	0,4	2 000	700	-	-	-	-	≈0	≈0	≈0	≈0
6	0,4	6 000	700	-	-	-	-	25	25	25	75
7	0,4	6 000	700	-	-	-	-	20	60	60	100

[a]= Procent av cementvikt

3.1.2 Dispergering med laboratorieblandare utrustad med R/S-system

Tabell 4 visar resultaten från dispergeringsförsöken med laboratorieblandare utrustad med ett R/S-system. Denna metod var mycket effektivare. I två av de fem mätningarna utan tillsatsmedel passerade maximalt 300 ml bruk genom 77 µm filter och i alla fyra mätningarna passerade den maximala mängden av bruk, 300 ml, genom 91 µm filter. Detta är en betydande förbättring jämfört med 90-mm disk.

Tillsatsmedel förbättrade inte dispergeringen. Resultatet blev faktiskt något sämre. Maximalt 300 ml bruk passerade i alla mätningar med 104 µm filtret, men i endast två av sex mätningar passerade den maximala mängden av bruk genom 91 µm filtret. Man måste notera att en betydande mängd av bruk passerade i de andra fyra mätningarna.

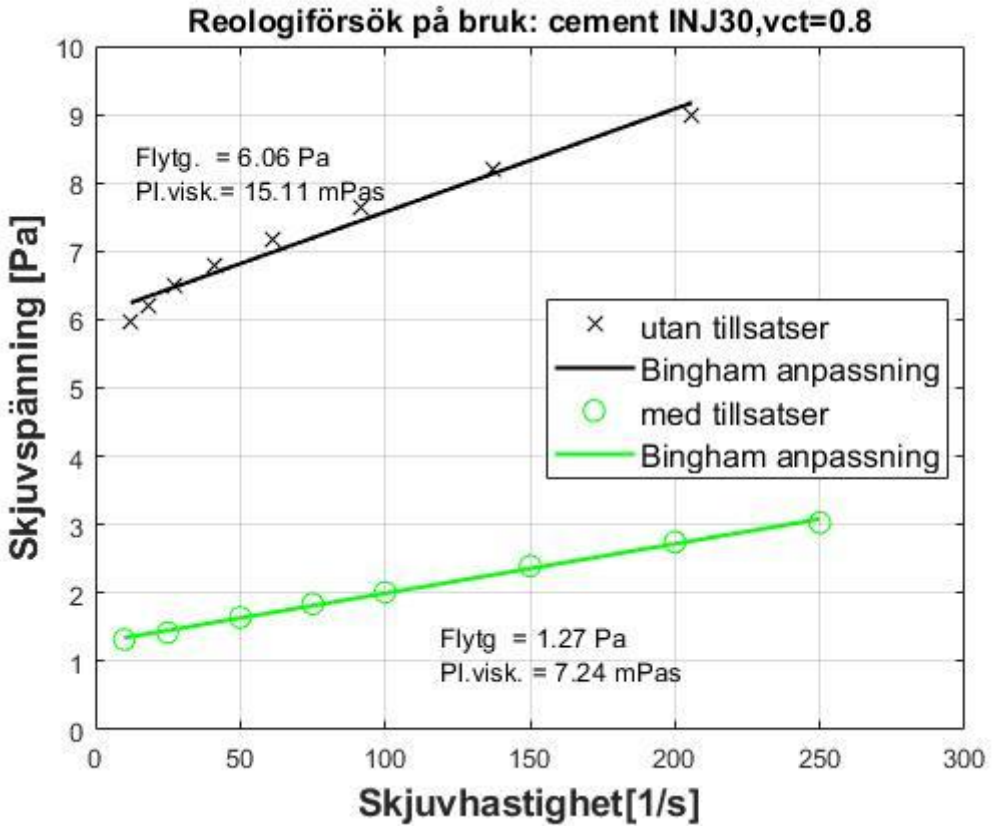
Reologin hos detta bruk provades också och resultaten som presenteras i **Figur 6** visade att tillsatsmedel hade ett betydande inflytande på reologin. Flytgränsspänning och

plastisk viskositet, utvärderad med Bingham-metoden, var 6 Pa och 15 mPas för bruk utan tillsatsmedel, och 1,3 Pa och 7 mPas för bruk med tillsatsmedel. Tillsatsmedel förbättrade reologin betydligt.

Tabell 4: Dispergering av cementbruk blandat med en Dispermat CV-3 laboratorieblandare utrustad med ett R/S system

Bland-ning	Tillsatser	Dispergering		Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter.							
		Blandningstid 4 min	Omrörning 10 min	54 µm	62 µm	77 µm	91 µm	104 µm	122 µm	132 µm	154 µm
no.	[%][a]	[rpm]	[rpm]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
1	ingen	10 000	4 000	-	-	200	300	300	300		
2	ingen	10 000	4 000	-	-	300	300	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	300	300	-	-	-	-
3	ingen	10 000	4 000	-	20	260	300	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	220	-	-	-	-	-
4	0,4	10 000	3 000	-	-	-	-	300	300	300	300
5	0,4	10 000	3 000	≈0	40	150	300	-	-	-	-
6	0,4	10 000	3 000	-	-	50	150	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	50	125	-	-	-	-
7	0,4	10 000	3 000	-	-	75	210	300	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	210	-	-	-	-
8	0,4	10 000	3 000	-	20	300	300	300	-	-	-

[a] Procent av cementvikt



Figur 6: Reologimätningar för blandning nr 3 (utan tillsats) och nr 8 (med tillsatsmedel) presenterade i **Tabell 4** och mätta enligt DIN-53019 med en TA AR2000-reometer. Geometri (kopp r = 15 mm, spindel r = 14 mm). Flytgränsspänning och plastisk viskositet utvärderades med Bingham-modellen.

3.1.3 Dispergering med ultraljud

I studien med ultraljud utfördes ett antal försök på bruk i tre olika provvolymer (435 ml, 860 ml och 2 l). I dessa tester varierades amplituden och sonikeringstiden och man mätte sonikeringsenergi och volymen av bruk som har passerat genom filterpumpen. Amplitud och sonikeringstid varierades inte bara för att hitta den bästa dispergeringen utan också för att hitta den mest effektiva försöksuppställningen med det minsta energibehovet för att dispergera bruket så bra som möjligt. **Tabell 5**, **Tabell 6** och **Tabell 7** visar resultaten av dispergeringen för respektive provvolymer.

I försöken med 435 ml-prover (**Tabell 5**) uppnåddes ett bra resultat även vid en amplitud av 20 µm och 2 minuters sonikeringstid (blandning nr 3, 4 och 5). I dessa försök passerade maximalt 300 ml bruk genom 77 µm filter i 2 av 3 mätningar. Den uppmätta specifika energin var cirka 19 Ws/ml. Resultaten var ännu bättre när amplituden ökades till 30 och 50 µm med bibehållen sonikeringstid av 2 minuter (blandning nr 6–15). I dessa försök passerade 300 ml bruk 77 µm filter i 7 av 9 mätningar. Detta visar metodens repeterbarhet och stabilitet. Ökningen av amplituden

till 30 µm gav bara en marginell ökning av energi, från 19 till 20 Ws/ml. **Figur 7** visar två bilder av bruk från blandning nr 12 i **Tabell 5**. **Figur 7 a)** visar bruk efter förblandning med en sked, och **Figur 7 b)** visar bruk efter sonikering. Skillnaden är uppenbar. Efter sonikeringen observerades ingen partikelagglomeration i bruket, till skillnad från då förblandning bara gjordes med skeden.

Fyra försök (blandning nr 9, 18, 23 och 24 i **Tabell 5**) utfördes också med ett 62 µm filter och amplituder på 30, 50, 75 och 90 µm och en sonikeringstid på upp till 3,5 minuter. Att öka tiden eller amplituden räckte inte för att uppnå en bättre dispergering. Endast en liten mängd bruk passerade ett 62 µm filter. I de flesta försöken var flödesstoppet omedelbart.

Tabell 5: Dispergering av cementbruk med ultraljudsapparaten UP400St och H22 sonotrod. Provvolym 435 ml.

Blandning	Tillsatser	Dispergering						Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter.	
		Sonotrodsdjup	Ampl.	Tid	Total-energi	Spec.-energi	Bruk-temp.[b]	62 µm	77 µm
nr	%[a]	mm	µm	min.	Wh	Ws/ml	°C	ml	ml
1	0,4	45	20	1	1,13	9,34	18	-	190
2	0,4	45	20	1,5	1,76	14,59	19	-	250
3	0,4	45	20	2	2,32	19,26	20	-	300
4	0,4	45	20	2	2,34	19,40	21	-	300
5	0,4	45	20	2	2,30	19,07	21	-	230
6	0,4	45	30	2	2,41	19,96	21	-	300
7	0,4	45	30	2	3,15	26,10	23	-	300
8	0,4	45	30	2	2,48	20,54	23	-	300
9	0,4	45	30	2	2,49	20,60	23	10	-
10	0,4	45	30	2	2,47	20,46		-	160
11	0,4	45	50	2	3,88	32,12		-	175
12	0,4	45	50	2	4,06	33,59	26	-	300
13	0,4	45	50	2	4,03	33,39	29	-	300

14	0,4	45	50	2	4,13	34,16	26	-	300
15	0,4	57	50	2	5,97	49,43		-	300
16	0,4	45	50	2,75	5,59	46,25	30	-	300
17	0,4	45	50	3,5	7,37	61,00	32	-	300
18	0,4	45	50	3,5	7,55	62,53	31	50	-
19	0,4	45	50	5	9,90	81,98	37	-	300
20	0,4	45	65	2	5,23	43,26	27	-	300
21	0,4	57	75	2	7,45	61,71	38	-	300
22	0,4	45	75	2	5,90	48,87	28	-	300
23	0,4	45	75	3,5	14,93	123,53	45	50	-
24	0,4	45	90	3,5	17,83	147,55	51	45	-

a = procent av cementvikt; b= vid slutet av sonikeringen.

Figur 7: Bruk efter förblandning med en sked (a) och efter sonikering (b).

I försöken med 860 ml-prover (**Tabell 6**) uppnåddes repeterbar dispergering vid 60 µm amplitud och 2 minuters sonikeringstid. I tre av tre mätningar passerade 300 ml bruk ett 77 µm filter. Den uppmätta specifika energin var cirka 20 Ws/ml, vilket är mycket nära den uppmätta dispergeringsenergin i försök med 430 ml-prover. En mätning utfördes också med 30 µm amplitud. I denna mätning passerade 250 ml bruk genom ett 77 µm filter före flödesstopp. Detta visar en något sämre dispergering jämfört med 60 µm amplituden, men det behövs ytterligare mätningar för att undersöka om det är möjligt att minska amplituden från 60 µm och ytterligare reducera dispergeringsenergin men med bibehållen dispergering i större prover.

Tabell 6: Dispergering av cementbruk med ultraljudsapparaten UP400St och H22 sonotrod. Provvolym 860 ml.

Blandning	Tillsatser	Dispergering						Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter.
		Sonotrods -djup	Ampl.	Tid	Total-energi	Spec.-energi	Bruk-temp.[b.]	77 µm
nr.	[%][a]	mm	µm	min	Wh	Ws/ml	°C	ml
1	0,4	45	30	2	3,66	15,34	21	250
2	0,4	45	60	2	4,76	19,93	23	300
3	0,4	45	60	2	4,76	19,93	22	300
4	0,4	45	60	2	4,96	20,78	22	300

a = procent av cementvikt; b= vid slutet av sonikeringen.

I försöken med 2 l prover (**Tabell 7**) behövdes en större amplitud på 90 µm och en längre sonikeringstid på 7 minuter för att uppnå en bra dispergering – dvs. när 300 ml bruk kan passera 77 µm filtret (försök nr 4 och 5, **Tabell 7**). Den uppmätta specifika energin i dessa mätningar var cirka 43 Ws/ml, vilket var mer än dubbelt så mycket energi för en bra dispergering, jämfört med 430 ml- och 860 ml-proverna, där det behövdes cirka 20 Ws/ml. Detta större energibehov är förmodligen ett resultat av ett ändrat avstånd mellan sonotrod och provkärlbotten och väggar. Det är troligt att ett längre avstånd mellan sonotrod och provbotten och väggar kräver en längre sonikeringstid, vilket utgör en fråga för vidare forskning.

Tabell 7: Dispergering av cementbruk med ultraljudsapparaten UP400St och H22 sonotrod. Provvolym 2 l.

Blandning	Tillsatser	Dispergering						Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter.		
		Sonotrods-djup	Ampl.	Tid	Total-energi	Spec.-energi	Bruk-temp[b]	77 µm	91 µm	102 µm
nr	[%][a]	mm	µm	min	Wh	Ws/ml	°C	ml	ml	ml
1	0,4	45	60	2	4,76	8,57	23	20	-	-
2	0,4	45	80	3	9,30	16,76	22	-	150	300
3	0,4	45	90	4	13,72	24,70	25	-	250	300
4	0,4	45	90	7	23,99	43,20	28	300	300	-
5	0,4	45	90	7	23,89	43,02	30	300	300	-

a = procent av cementvikt; b= vid slutet av sonikeringen.

3.2 Dispergering av bruk baserade på cement med d_{95} = 12 µm

3.2.1 Dispergering med laboratorieblandare utrustad med en 90 mm disk

De uppmätta dispergeringsresultaten för den konventionella blandaren utrustad med 90 mm disk presenteras i **Tabell 8**. Den uppnådda dispergeringen med denna metod var inte tillfredställande. I ingen av de sju mätningarna med 154 µm filter eller de sex mätningarna med 200 µm filter passerade den maximala mängden av bruk av 300 ml. I provningar med 200 µm filter utan tillsatser (blandning nr 1 och 2) passerade cirka 150 ml bruk före flödesstopp. Dispergeringen av bruket förbättrades inte heller genom att använda tillsatser. Provningarna med 154 och 200 µm filter (blandning nr 3, 4 och 5) visade en ännu sämre dispergering. Resultaten visade att blandning med disk inte alls är effektiv för dispergering av detta bruk.

Tabell 8: Dispergering av cementbruk blandat med en Dispermat CV-3 laboratorieblandare utrustad med en 90 mm disk. Cement Uf12, w/c=1.2.

Bland-ning	Tillsatser	Dispergering		Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter							
		Blandningstid 4 min	Omrörning 10 min	62 µm	77 µm	91 µm	104 µm	122 µm	132 µm	154 µm	200 µm
nr	[%][a]	[RPM]	[RPM]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
1	ingen	6 000	700	-	-	-	-	-	-	80	150
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	175
2	ingen	6 000	700	-	-	-	-	-	-	60	125
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75	105
3	0,5	6 000	700				20	20	40	26	-
4	0,5	6 000	700					40	50	70	110
5	0,5	6 000	700					30	40	50	75

[a]= Procent av cementvikt

3.2.2 Dispergering med laboratorieblandare utrustad med R/S-system

De uppmätta dispergeringsresultaten för den konventionella blandaren utrustad med R/S-systemet presenteras i **Tabell 9**. Resultaten är mycket bättre jämfört med dispergering uppnådd med disk. I alla tester utan tillsatser med 104 µm filter (blandning nr 1, 2, 3) passerade den maximala mängden av 300 ml bruk genom filtret. En betydande mängd av bruk passerade till och med ett 91 µm filter. Den uppnådda dispergeringen för detta finmalda cement är cirka 100 µm, vilket är ungefär 8 x d_{95}.

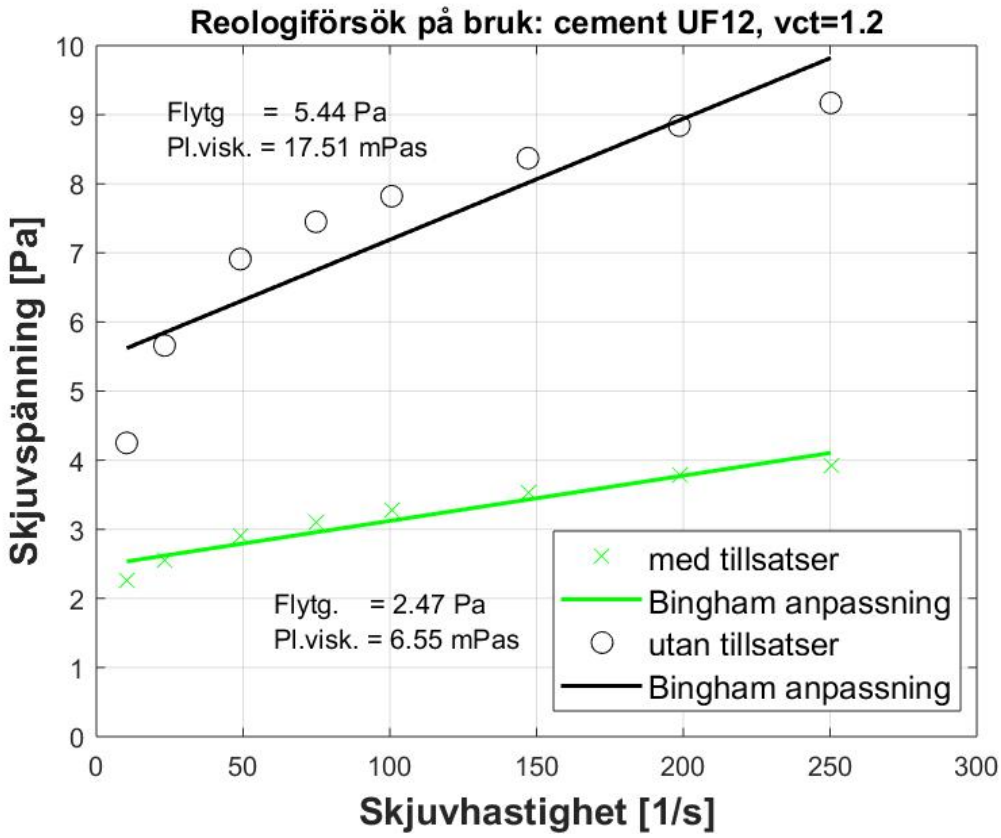
Användning av tillsatserna förbättrade inte dispergeringen i detta system heller. Dispergeringen var till och med något lägre. I provning med ett 104 µm filter inträffade flödesstopp i tre (blandning nr 4, 5, 8) av sex provningar och i provning med ett 122 µm filter i två (blandning nr 4 och 8) av sex provningar.

Två reologiprovningar utfördes också på UF12-bruk som var baserat på ett mycket finare malt cement (d_{95} = 12 µm), för att testa påverkan av samma tillsatsmedel. Resultaten visas i **Figur 8**. Flytgränsspänningen minskade från 5,4 Pa till 2,4 Pa och den plastiska viskositeten minskade också från 17,5 mPas till 6,5 mPas i bruket med tillsatser jämfört med bruket utan tillsatser. Dispergeringsprovningar visade att detta tillsatsmedel har ett relativt lågt inflytande på dispergeringen men reologiprovningar visade att det har ett stort inflytande på brukets reologi. Detta var alltså samma resultat som uppmättes för INJ30-baserat bruk.

Tabell 9: Dispergering av cementbruk blandat med en Dispermat CV-3 laboratorieblandare utrustad med ett R/S-system.

Bland-ning	Tillsatser	Dispergering		Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter.							
		Blandningstid 4 min	Omrörning 10 min	54 µm	62 µm	77 µm	91 µm	104 µm	122 µm	132 µm	154 µm
nr	[%][a]	[rpm]	[rpm]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]	[ml]
1	ingen	10 000	4 000	-	-	-	260	300	300	300	-
2	ingen	10 000	4 000	-	-	100	260	300	300	-	-
3	ingen	10 000	4 000	-	-	-	260	300	300	300	-
4	0,5	10 000	3 000	-	-	-	-	75	240	290	300
5	0,5	10 000	3 000	-	-	-	-	225	300	300	300
6	0,5	10 000	3 000	-	-	-	-	300	300	300	300
7	0,5	10 000	3 000	-	-	80	250	300	300	-	-
8	0,5	10 000	3 000	-	-	100	160	210	260	-	-
9	0,5	10 000	3 000	-	-	175	300	300	300	-	-

[a]= Procent av cementvikt



Figur 8: Reologimätningar på blandning nr 1 (utan tillsatsmedel) och nr 7 (med tillsatser) presenterade i **Tabell 9**, uppmätta enligt DIN-53019 med en Brookfield LV-II + programmerbar reometer. Geometri (DIN-87 spindel: koppradie = 6,41 mm, spindelradie = 5,91 mm). Flytgränsspänning och plastisk viskositet utvärderades med Bingham-modellen.

3.2.3 Dispergering med ultraljud

De uppmätta dispergeringsresultaten med ultraljud hos bruk med tillsatser presenteras i **Tabell 10**. Provningar utfördes med olika amplituder och sonikeringstider med syfte att uppnå den bästa dispergeringen vid minimal specifik energi. Den bästa och mest energieffektiva dispergeringen uppnåddes med en amplitud på 60 µm och 2 minuters sonikeringstid. Blandningarna nr 1–7 dispergerades med dessa inställningar. I provningen med 54 µm filter har den maximala mängden av 300 ml bruk passerat i tre (blandning nr 4, 5, 6) av fem provningar och i provningen med 62 µm filter i fyra (blandning nr 2, 4, 5, 6) av fem provningar. Dessa resultat är betydligt bättre än den uppnådda dispergeringen med en konventionell blandare.

En ökning av amplituden och sonikeringstiden (blandning 8–11) resulterade inte i bättre dispergering. Bruket passerade 54 µm filter i alla fyra provningarna utan filtrering men

inte i provningar med 43 µm filter. Den uppnådda dispergeringen var i princip samma, men specifik energi var betydligt högre jämfört med dispergeringen av blandning nr 1–7. En minskning av amplituden till 40 µm med bibehållen sonikeringstid på 2 minuter (blandning nr 12 och 13) gav något lägre dispergering. Bruket passerade ett 62 µm filter utan filtrering men inte ett 54 µm filter. Dessa mätningar visade att den optimala dispergeringen uppnås med en 2 minuter lång sonikeringstid och 60 µm amplitud.

En majoritet av provningarna utfördes på bruket med tillsatser eftersom, som tidigare nämnts, de behövs för att förbättra reologin hos bruket även om de inte är så effektiva för dispergering. Men ett antal provningar utfördes också med bruket utan tillsatser. Resultaten från dessa mätningar presenteras i **Tabell 11**. Den uppnådda dispergeringen var 62 µm (blandning nr 5 och 6), vilket är ett något sämre resultat jämfört med provningarna med tillsatser, där bruket passerade ett 54 µm filter.

Tabell 10: Dispergering av cementbruk med ultraljudsapparaten UP400St och H22 sonotrod. Provvolym 865 ml. Tillsatser 0,5 % cementvikt.

Blandning	Ultaljudsdispergering					Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter.					
	Ampl.	Tid	Total Energi	Spec. Energi	Bruk-temp.[b]	43 µm	54 µm	62 µm	77 µm	91 µm	122 µm
nr.	µm	min	Wh	Ws/ml	°C	ml	ml	ml	ml	ml	ml
1	60	2	6,42	26,72	23	-	-	-	-	300	300
2	60	2	6,22	25,90	23	-	-	300	-	300	-
3	60	2	5,79	24,11	23	-	25	200	-	-	-
4	60	2	6,27	26,09	23	-	210	300	-	-	-
5	60	2	6,14	25,57	23	-	300	300	-	-	-
6	60	2	6,14	25,58	24	-	300	300	-	-	-
7	60	2	6,13	25,52	25	120	300		-	-	-
8	60	4	12,44	51,80	31	125	300	-	-	-	-
9	80	2	7,61	31,69	26	120	300	-	-	-	-
10	80	4	15,90	66,19	35	130	300	-	-	-	-

11	95	5	21,87	91,04	41	130	300	-	-	-	-
12	40	2	4,05	16,87	22	-	150	300	-	-	-
13	40	2	4,50	18,74	23	-	180	300	-	-	-

b= vid slutet av sonikeringen.

Tabell 11: Dispergering av cementbruk med ultraljudsapparaten UP400St och H22 sonotrod. Provvolym 865 ml. Bruk utan tillsatser.

Blandning	Ultaljudsdispergering					Resultat från filterpumpmätningar. Bruk passerat genom filter.							
	Ampl.	Tid	Total Energi	Spec. Energi	Bruk-temp.[b]	43 µm	54 µm	62 µm	77 µm	91 µm	122 µm	132 µm	154 µm
nr	µm	min	Wh	Ws/ml	°C	ml	ml	ml	ml	ml	ml	ml	ml
1	60	2	6,15	25,61	22	≈0	≈0		-	-	-	-	-
2	60	2	6,19	25,78	21		≈0	≈0	-	-	-	-	-
3	60	2	5,99	24,95	25	-	-	-	-	-	-	300	300
4	60	2	5,88	24,49	24	-	-		300	300	-	-	-
5	60	2	6,28	26,13	23	-	230	300	-	-	-	-	-
6	60	2	5,82	24,22	25	-	250	300	-	-	-	-	-

b= vid slutet av sonikeringen.

3.3 Sammanfattning av resultaten

Tabell 12 visar de sammanfattade resultaten av den uppmätta dispergeringen för bruk baserade på cement INJ30 med d_{95} = 30 µm och UF12 med d_{95} = 12 µm som har uppnåtts med respektive metod. Som resultaten visar var ultraljudet den mest effektiva metoden för att dispergera båda dessa bruk. Uppnådd dispergering för INJ30- och UF12-baserade bruk var 77 µm respektive 54 för respektive bruk. En konventionell blandare utrustad med R/S-system var relativt effektiv för bruk baserat på cement med d_{95} = 30 µm men inte särskilt effektivt for bruk baserat på cement med d_{95} = 12 µm.

En konventionell blandare utrustad med disk var inte alls lämplig för dispergering av vare sig d_{95} = 30 µm eller d_{95} = 12 µm cementbaserade bruk.

Tabell 12: Sammanfattade resultat av uppmätt dispergering med olika metoder för bruk baserade på cement INJ30 med d_{95} = 30 µm och UF12 med d_{95} = 12 µm.

Dispergeringsmetod		Tillsatser	Uppmätt dispergering med filterpump [µm]	
			INJ30 (d_{95} = 30 µm)	UF12 (d_{95} = 12 µm)
Dispermat CV-3 / 90 mm disk	Blandning 4 min vid 2 000 och 6 000 rpm Omrörning 10 min vid 700 rpm	utan tillsatser	> 154	> 200
		med tillsatser	> 154	> 200
Dispermat CV-3 / R-S-system	Blandning 4 min vid 10 000 rpm Omrörning 10 min vid 3 000 eller 4 000 rpm	utan tillsatser	77-91-104	104
		med tillsatser	77-91-104	104
UP400St utrustad med H22 sonotrod	1 l prov, amplitud 60 µ, tid = 2 min, sonotrod djup= 45 mm, uppmätt spec. energi = 20 Ws/ml	utan tillsatser	-	62
		med tillsatser	77	54

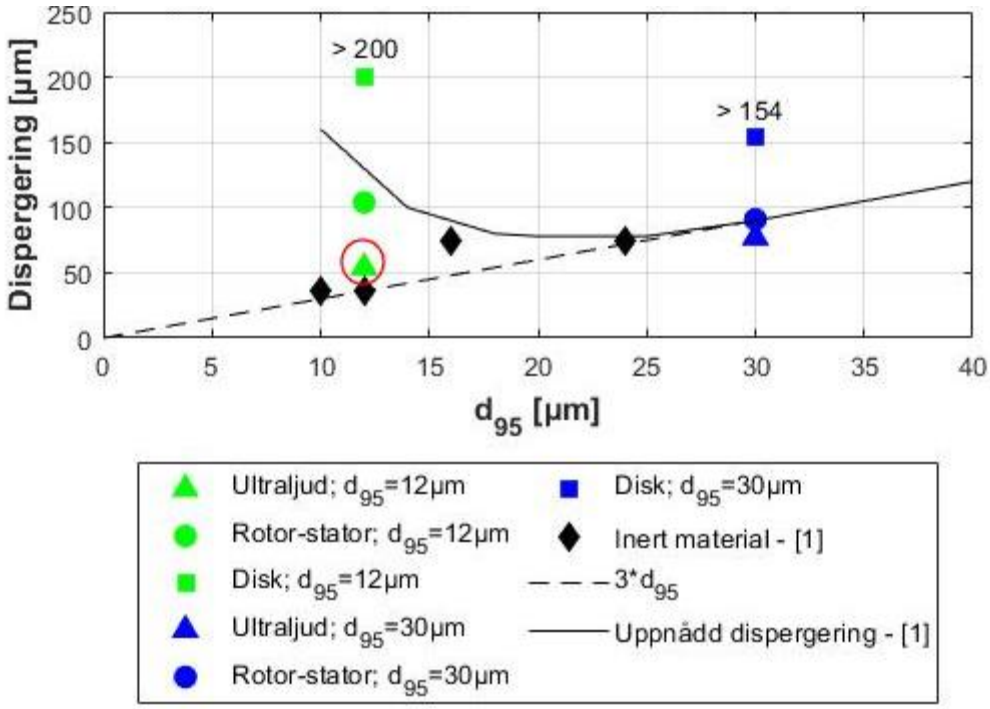
4. DISKUSSION

4.1 Uppnådd dispergering med olika dispergeringsmetoder jämfört med ″trendkurva″ och inert material

En jämförelse av den uppnådda dispergeringen för provade metoder och bruk i denna studie presenteras i Figur 9. Den uppnådda dispergeringen hos ”d_{95}=30µm”-bruk med ultraljud var något bättre jämfört med R/S och mycket bättre jämfört med disk. Den bästa uppnådda dispergeringen hos detta injekteringsbruk var 77 µm, vilket är något under 3xd_{95}. 3xd_{95}-linjen indikerar förhållandet mellan partikelstorlek och filterstorlek där bara tre stora partiklar i en suspension kan initiera valv- och pluggbildning. Denna linje indikerar också på sätt och vis den maximala möjliga inträngningsförmågan hos ett bruk som är en suspension. Mätningarna med inerta material, som i huvudsak alla ligger på denna linje, bekräftar detta. Det inerta materialet hydratiserar inte och flockuleringstendensen är betydligt lägre jämfört med cement. Valv- och pluggbildning i inerta material påverkas mest av partikelkoncentration, flödeshastighet och mätinstrumentets geometri. Provningar på bruk dispergerat med disk visade de sämsta resultaten. Detta bruk kunde inte passera 154 µm filter vilket är > 5xd_{95}.

Provningar på ”d_{95}=12µm”-bruk visade också att ultraljud är den bästa metoden för dispergering av detta mycket finmalda cement. Den uppnådda dispergeringen var 54 µm eller 4,5xd_{95}. Jämfört med den uppnådda dispergeringen presenterad i Eklund och Stille (2008) (den svarta heldragna linjen i grafen ”trend-kurvan”), är detta en tydlig trendförändring. Det tyder på att ultraljud kan bryta agglomerat hos de finmalda cement som de konventionella metoderna inte klarar.

En konventionell blandare utrustad med R/S kunde dispergera detta bruk till en viss del men en konventionell blandare utrustad med disk var helt ineffektiv. Bruket kunde inte heller passera 200 µm filter vilket är > 16 x d_{95}.



Figur 9: Uppnådd dispergering av bruk med olika dispergeringsmetoder.

4.2 Uppnådd dispergering jämfört med tidigare studier

Toumbakari m fl. (1999) provade dispergering av bruk med ultraljud i kombination med mekanisk blandning vid låg och hög hastighet. De visade att dispergeringen och reologin hos bruket var bättre när det dispergerades med ultraljud i kombination med mekanisk blandning vid låg hastighet, särskilt när man tillsatte mycket fin silika till bruket. Dispergeringen av bruket provades med en sandkolonn med porer med en pordiameter på cirka 0,3 mm. Det använda cementet med en d_{95} omkring 60 µm var mycket grövre än det cement som användes i denna studie. Dispergeringsförbättringen som uppnåddes i Toumbakari m fl. (1999) är svår att kvantifiera och relatera till förbättringen som uppmätts i denna studie, men huvudsaken är att båda studierna visar att ultraljudsteknik förbättrar dispergeringen av cementbaserade bruk.

4.3 Frågor för framtida forskning

Är ultraljudsmetoden robust och fungerar den på olika sorters cement och tillsatsmedel?

Denna studie är det första försöket att testa ultraljud för att förbättra dispergering av bruk baserat på mycket finmalda cement med d_{95} = 30 och 12 µm. I denna studie testades två cement som har samma kemiska samansättning och bara ett tillsatsmedel. Det finns ett behov att testa robustheten hos ultraljudsmetoden, dvs. man behöver testa metoden med olika cement och tillsatser eftersom den kemiska sammansättningen av cement och tillsatser varierar.

Är ultraljudsmetoden effektiv på cementbruk baserat på cement med d_{95} = 6 µm?

Den effektiva dispergeringen av finmalda cement med ultraljud innebär också att man kan använda malning för vidareutveckling av cementbaserat injekteringsbruk. I denna studie var den uppnådda dispergeringen hos mycket finmalda cementbruk 54 µm eller 4,5xd_{95}. Detta är nära 3xd_{95}-linjen men det finns utrymme att ytterligare förbättra dispergeringen av detta bruk. Nästa steg kan vara att också testa dispergering med ultraljud på en ännu mer finmald cement, till exempel cement med d_{95} = 6 µm.

Kan ultraljudsmetoden anpassas för fält?

En viktig fråga är också anpassning av denna metod för fält, där man måste dispergera mycket större volymer av bruk, ungefär 50 till 100 l åt gången. Det finns mycket större och starkare ultraljudsapparater på marknaden som kan behandla större volymer av bruk i en sats på liknande sätt som i denna studie. Flera ultraljudsapparater kan kopplas samman för att öka kapaciteten och de kan också arbeta i en annan uppställning där materialet cirkulerar kontinuerligt i stället för att behandlas i en behållare. Dispergering i större behållare är förmodligen mer lämpad för cementbruk, eftersom sådana är enkla att använda och rengöra. Vid uppskalning av systemet för fält, effektbehov och energiförbrukning måste också beaktas. En annan viktig fråga blir också arbetsmiljön. Hur vibrationer och ljudnivå kommer att påverka operatörer måste också tas upp?

Är filterpumpen en relevant metod att mäta inträngningsförmåga?

Dispergeringen uppmätt med filterpumpen är inte detsamma som inträngningsförmågan. Sambandet beror på definitionen, dvs. mätmetod och utvärdering av resultaten, men de är nära relaterade. Ett bättre dispergerat bruk borde ha en bättre inträngningsförmåga, men relationen är oklar. Därför borde man också testa dispergeringen av bruket med spaltmetoden (Draganović och Stille, 2011) där man testar inträngningsförmåga med ett högre tryck och en annan geometri på öppningen. Det kan visa sig att inträngningsförmågan uppmätt med spaltmetoden, som också mäts i µm, är bättre än dispergeringen uppmätt med filterpumpen. Detta skulle betyda att bruket är mer effektivt för injektering än vad filterpumpen visar.

Dispergeringseffektivitet hos kolloidal fältblandare?

Brukets flödesmönster under blandning med disk liknar mest flödet vid blandning med en kolloidal fältblandare. Bruket blandas när det kommer i kontakt med mixerns propeller, genom skjuvning mellan skikten av bruk som flödar med olika flödeshastigheter och genom skjuvning mot behållarväggen. Eftersom denna metod visade den sämsta dispergeringen finns det ett behov att undersöka dispergeringseffektiviteten hos kolloidala fältblandare.

5. SLUTSATSER

Denna studie visade att ultraljudsteknik var den bästa av de tre testade dispergeringsmetoderna. Den kan användas för dispergering av bruk baserade på mycket finmalda cement ner till d_{95} = 12 µm, som de konventionella metoderna inte klarar av. Den uppnådda dispergeringen av bruk baserat på cement med d_{95} = 12 µm var cirka 54 µm. Det indikerar att detta bruk har en kapacitet att täta sprickor ner till cirka 54 µm sprickvidd, vilket är en betydande förbättring jämfört med 70 till 80 µm som man klarar av idag.

Studien visade att en konventionell laboratorieblandare utrustad med disk inte alls är lämplig för dispergering av bruk baserat på mycket finmalda cement. En laboratorieblandare utrustad med rotor-statorsystem är bättre än disk och kan användas för dispergering av bruk baserat på cement med d_{95} ner till 30 µm. För en effektiv dispergering av bruk baserat på cement med d_{95} <30 µm krävs en blandare som använder ultraljudsteknik.

6. REFERENSER

Adio S. A., Sharifpur M., Meyer J.P., Influence of ultrasonication energy on the dispersion consistency of Al_2O_3–glycerol nanofluid based on viscosity data, and model development for the required ultrasonication energy density. *Journal of Experimental Nanoscience*. 11 (2016) 630–649. http://dx.doi.org/10.1080/17458080.2015.1107194.

Bras A., Henriques F.M.A., The influence of the mixing procedures on the optimization of fresh grout properties, *Materials and Structures*. 42 (2009) 1423. https://doi.org/10.1617/s11527-008-9461-z.

Draganović A., Stille H., Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 26 (2011) 548–559. https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.02.007.

Draganović A., Björk C., *Penetrability of cement-based grouts dependent on the PSD-curve and cement chemistry*. BeFo Report 134. Stockholm. 2014. http://www.befoonline.org/UserFiles/Archive/413/BeFo_Rapport_134_webb.pdf.

Draganović A., Karamanoukian A., Ulriksen P., Larsson S. Dispersion of microfine cement grout with ultrasound and conventional laboratory dissolvers. *Construction and Building Materials* 251 (2020) 19068. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119068

Eklund D., Stille H., Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts, *Tunnelling and Underground Space Technology*. 23 (2008) 389–398. https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.06.011.

Garg P., Alvarado J. L., Marsh C., Carlson T.A., Kessler D.A., Annamalai K., An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heat transfer performance of multi-wall carbon nanotube-based aqueous nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52 (2009) 5090–5101. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.029.

Ganjian E., Ehsani A., Mason T. J., Tyrer M. Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives. *Materials & Design* 160 (2018) 503-513. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.043

Hielscher T., *Ultrasonic Production of Nano-Size Dispersions and Emulsions*. ENS 2005. Dec 2005. Paris. TIMA Editions. 2005 138-143.

Miltiadou-Fezans A., Tassios T.P., Penetrability of hydraulic grouts, *Materials and Structures*. 46 (2013) 1653–1671. DOI 10.1617/s11527-012-0005-1.

Pantazopoulos I.A., Markou I.N., Christodoulou D.N., Droudakis A.I., Atmatzidis D.K., Antiohos S.K., Chaniotakis E., Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements, *Cement and Concrete Composites*. 34 (2012) 593–603. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.009.

Schilde C., Mages-Sauter C., Kwade A., Schuchmann H.P., Efficiency of different dispersing devices for dispersing nanosized silica and alumina, *Powder Technology*. 207 (2011) 353–361. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.11.019.

Sumitomo S., Koizumi H., Uddin M.A., Kato Y., Comparison of dispersion behavior of agglomerated particles in liquid between ultrasonic irradiation and mechanical stirring, *Ultrasonics Sonochemistry*. 40 (2018) 822–831. http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.08.023.

Suslick K.S., Sonochemistry, *Science*. 247 (1990) 1439–1445. DOI: 10.1126/science.247.4949.1439.

Suslick K.S., Sonochemistry, *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*; 4th Ed. J. Wiley & Sons: New York. 26 (1998) 517–541.

Suslick K.S., Price G.J., Application of ultrasound to materials chemistry, *Annual Review of Material Science*. 29 (1999) 295–326. https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.29.1.295.

Toraman O.Y., İnal H., Preparation of submicron calcite particles by combined wet stirred media milling and ultrasonic treatment. *Particulate Science and Technology*. 35 (2017) 627631. http://dx.doi.org/10.1080/02726351.2016.1192571.

Toumbakari E., Van Gemert D., Tassios T.P., Tenoutasse N., Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts, *Cement and Concrete Research*. 29 (1999) 867–872. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00054-X.

Zingg, A., Holzer, L., Kaech, A., Winnefeld, F., Pakusch, J., Becker, S. Gauckler. L. The microstructure of dispersed and non-dispersed fresh cement pastes — New insight by cryomicroscopy. *Cement and Concrete Research* 38 (2008), 522–529. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.007

Zou B., Chen S.J., Korayem A.H., Collins F., Wang C.M., Duan W.H., Effect of ultrasonication energy on engineering properties of carbon nanotube reinforced cement pastes, *Carbon*. 85 (2015) 212–220. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.12.094.

Yang, M., Neubauer, C., & Jennings, H. (1997). Interparticle Potential and Sedimentation Behaviour of Cement Suspensions - Review and Results From Paste.

Advanced Cement Based Materials , 5 (1), 1-7. https://doi.org/10.1016/S1065-7355(97)90009-2

Webbreferenser

VMA-Getzmann GMBH, Introduction to Dispersion Technology with the DISPERMAT® Dissolver. http://www.vma-getzmann.com/english/dispersing_&_grinding_know-how/dispersing_with_dissolvers/dispersing_with_dissolvers_0_935_987_1809.html

Standarder

European standard EN 14497:2004/AC:2006. Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of the filtration stability.

DIN 53019-3. Viscometry – Measurement of viscosities and flow curves by means of rotational viscometers. Part 1: Principles and measuring geometry.