

Utvärdering av injekteringsbruks egenskaper över tiden

Björn Stille och Jaana Vuorinen

2010-08-03

SBUF-projekt 12117

SBUF ®

Utvärdering av injekteringsbruks egenskaper över tiden

Björn Stille och Jaana Vuorinen

2010-08-03

Dokumenttyp	Dokumentidentitet	Rev. nr.	Rapportdatum 2009-08-13	Uppdragsnummer
Författare Björn Stille och Jaana Vuorinen		Uppdragsnamn Utvärdering av injekteringsbruks egenskaper över tiden		
Beställare SBUF, Svenska byggbranchens utvecklingsfond		Granskad av		
		Godkänd av		
Delgivning			Antal sidor 13	Antal bilagor

Utvärdering av injekteringsbruks egenskaper över tiden

SAMMANFATTNING

Två praktiska försök på injekteringsbruks egenskaper har genomförts på plats i befintliga tunneldrivningsprojekt i Stockholmsområdet. Ändamålet med studien har varit att undersöka hur viskositet, densitet och flytgräns ändras med tiden hos injekteringsbruk för att på så sätt få bättre kontroll på hur bruk åldras. Bättre förståelse leder i förlängningen till att injekteringsarbeten i tunnlar blir mer tids- och kostnadseffektiva. Testerna genomfördes för bruk med vct 0.8 och 1.0.

Resultaten från testerna (Brukets åldrande under omrörning och Simulering av stillastående bruk i borrhål) visar att omrörning av bruk i god utsträckning motverkar sedimentationsprocesser. Omrörning av injekteringsbruk visar dock en begränsad förmåga att motverka förändringar hos flytspänning och viskositet. Stillastående bruk visar en signifikant ändring i densitet redan efter kort tid (10-40 min). Vidare visar också stillastående bruk en betydande förändring av flytspänning över tiden. Injekteringsbruk som har stått länge i borrhål kommer således att ha egenskaper som skiljer sig ifrån de ursprungliga, och då flytspänning och viskositet påverkar brukets flytförmåga, så kommer inträngningen av bruket i sprickor sannolikt att variera över tiden. I slutändan påverkas bergmassans täthet.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	3
	1.1 Syfte.....	3
	1.2 Bakgrund	3
2	METODBESKRIVNING.....	3
3	RESULTAT	5
4	KOMMENTARER OCH SLUTSATSER	12
5	REFERENSER	13

1 INLEDNING

1.1 Syfte

Syftet med projektet var att undersöka hur injekteringsbruk beter sig och hur dess egenskaper (viskositet, densitet och flytgräns) förändras med tiden. Bättre förståelse för hur bruk åldras och nämnda parametrar ändras, ger bättre kontroll på och ökar förutsägbarheten av exempelvis spridning av och hållfasthetstillväxt hos bruk vid injekteringsarbeten. Ökad kontroll och förutsägbarhet i sin tur leder till en mer tid- och kostnadseffektiv injekteringsprocess samt höjer kvalitén på utfört arbete.

I projektet fanns ursprungligen även en provdel där en på SKB/Chalmers utvecklad vakuumsug för att säkerställa hålfyllnad skulle testas. Testet kunde inte utföras på grund av förseningar i entreprenadprojektet.

1.2 Bakgrund

Ökade krav på täthet hos tunnelkonstruktioner leder till ökade krav på resultaten vid injekteringsarbeten. För att säkerställa ett gott resultat vid tätning av tunnlar krävs att man ökar förståelsen för hur injekteringsbrukens egenskaper förändras under den tid som injekteringsarbetet pågår. Härdningsprocessen, som startar direkt när cement och vatten blandas, kommer att påverka brukets flytegenskaper och därmed också dess möjlighet till inträngning i öppna sprickor.

Tidigare studier i ämnet [1, 2, 3, 4] har adresserat problematiken kring hållfasthetstillväxt och härdningsförlopp hos bruk ute i produktion. Exempelvis observerade Bohlin och Urtel 2008 [3] långa uppehållstider i omröraren, 2h, med påföljande konsekvenser för hål med samband (härdande bruk) och trolig nedsatt förmåga till inträngning i sprickor.

Föreliggande rapport beskriver tester som bygger på tidigare erfarenheter [3] och visar på betydelsen av tiden i omröraren för egenskaperna hos injekteringsbruket, test 1.

Andra studier [5, 6] har visat på problematik och omfattning av hål med förbindelse. Ett enklare test för att simulera stillastående bruk i ett borrhål utfördes, test 2.

Samtliga tester utfördes i fält och med fältmässig utrustning. Kontraktsenliga mätmetoder t ex mud balance och marshkon användes.

2 METODBESKRIVNING

Mätning av brukens egenskaper utfördes vid två pågående tunnelprojekt i Stockholmsområdet (**Försök 1** och **Försök 2**). Både **Försök 1** och **2** gjordes med bruk IC30 med tillsats av 2% Setcontrol. Försöken gjordes med två olika vct 1.0 och 0.8. Båda försöken utfördes på en "vanlig" injekteringsrigg. Rotationshastigheten på mixern var ca 1700 varv/minut. Blandningsvolymen var ca 100 l i bägge fallen och mixertiden 2 min. Bruket pumpades efter mixning omedelbart över till omröraren där bruket förvarades i väntan på test.

Temperaturen i luften vid försökstillfällena var ca 10°C.

Vid mätningar av brukets egenskaper användes följande utrustning:

Yield stick– Användes för att mäta ett värde på flytspänningen (yield strength) hos bruket. Mätutrustningen består av en cylindrisk mätsticka med standardiserad form och vikt. Stickan sänks/släpps ned i bruket och värdet på nedsjunkningen tillsammans med vetskap om brukets densitet ger ett värde på flytspänningen (τ_0), [7].

Marsh funnel (Marshkon) – Används för att mäta viskositeten, μ , hos en vätska. Utrustningen består av en kon och ett utlopp med standardiserade mått, diameter 4,76 mm. Konen fylls med vätska och utloppet hålls stängt. När utloppet öppnas startas en klocka och tiden för att tömma ut en liter av vätskan är ett mått på vätskans viskositet.

Cylindriska mätglas – Användes för att mäta hur stillastående bruks egenskaper (densitet och flytgräns) förändrades med djup i behållaren och över tid.

Mud balance – Användes för att bestämma densiteten, d , hos bruket. Utrustningen består av en kopp med volym 1 dl som fylldes med bruk och vägdes. Densiteten beräknas ur sambandet mellan vikt och volym. Mätningar av densitet vid försök 1 (Norra Länken 101) utfördes med en okalibrerad utrustning. Vct 1.0 bör ha en densitet på ca 1,51 g/cm³. Avvikelsen, ca 0,06 g/cm³, bedöms inte påverka de relativa förhållandena eller testernas slutsats.

	Test 1 (Brukets åldrande under omrörning)	Test 2 (Simulering av stillastående bruk i borrhål)
Försök 1 (Norra Länken 101)	Marshkon, Yield stick, Mud balance	Mud balance, Yield stick
Försök 2 (Norra Länken 33,34)	Marshkon, Yield stick, Mud balance	

Test 1 gjordes för att analysera egenskaperna hos injekteringsbruket medan det befinner sig i omröraren. Försöket utfördes på bruk med vct 1.0 och 0.8. Mätningar av brukets flytspänning och densitet utfördes var 15:e minut, och viskositeten bestämdes genom mätning av marstiden. Totalt genomfördes 10 och 9 mätningar på respektive bruk. Residensiden för bruket i omröraren blev något över två timmar under genomfört test.

Test 2 gjordes för att kontrollera hur ett stillastående injekteringsbruks egenskaper förändrades med tiden, t. ex. stående i ett borrhål. Bruk med vct 1.0 blandades i en mixer och pumpades ut till omröraren. I omröraren samlades en del av materialet upp och fördes över i tre cylindriska behållare som fylldes upp till 50 cm. Vid $t=0$, dvs när behållarna precis hade fyllts, genomfördes mätningar av flytspänning och densitet i den första cylindern. Mätningar gjordes vid olika höjd i cylindern (50, 30 och 10 cm). De övriga två cylindrarna lämnades att vila en stund och efter 40 minuter genomfördes samma mätningar i cylinder nr 2. Efter ytterligare 30 minuter ($t=1h10min$) utfördes mätningar i cylinder nr 3.

3 RESULTAT

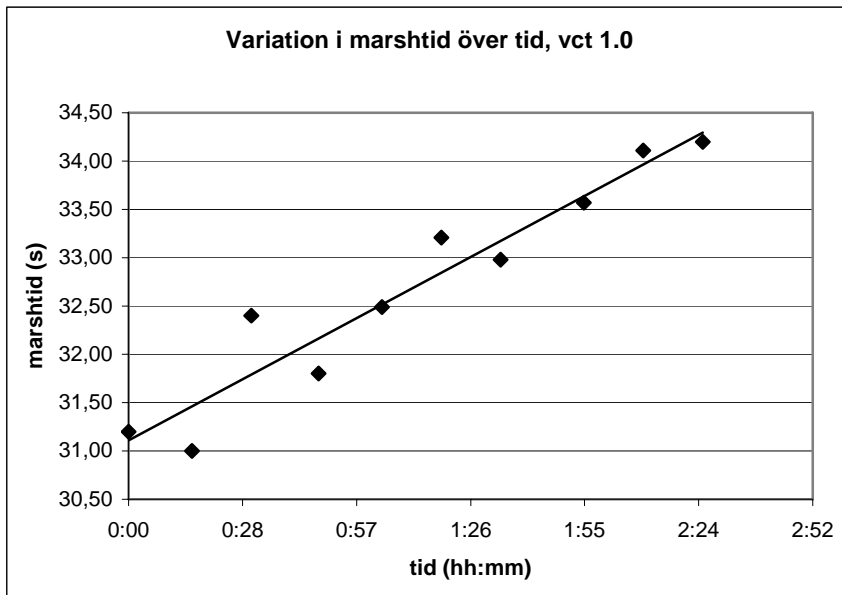
Resultaten från **Test 1** redovisas i Tabell 1 och 2 samt i Figurerna 1a-b, 2 och 3a-b. Försöken genomfördes både för injekteringsbruk med vct = 1.0 och 0.8. Båda försöken gav liknande resultat gällande marshtiden, som uppvisar ett linjärt samband med ökad residenstid i omröraren (Figur 1a och b). Densiteten var i stort sett konstant. De små variationerna som fanns var inte systematiskt för något av bruken (Figur 2), medan flytspänningen för bruk med vct 0.8 visar en ökning med ökad residenstid i omröraren (Figur 3a). Bruk med vct 1.0 visar ingen systematisk variation av flytspänningen. Värdena var dock generellt mycket små (Figur 3b) och mätmetoden bedöms inte tillämpbar på bruk med låg flytspänning.

Tabell 1. Egenskaper, efter viss tid i omröraren, hos injekteringsbruk med vct 1.0.

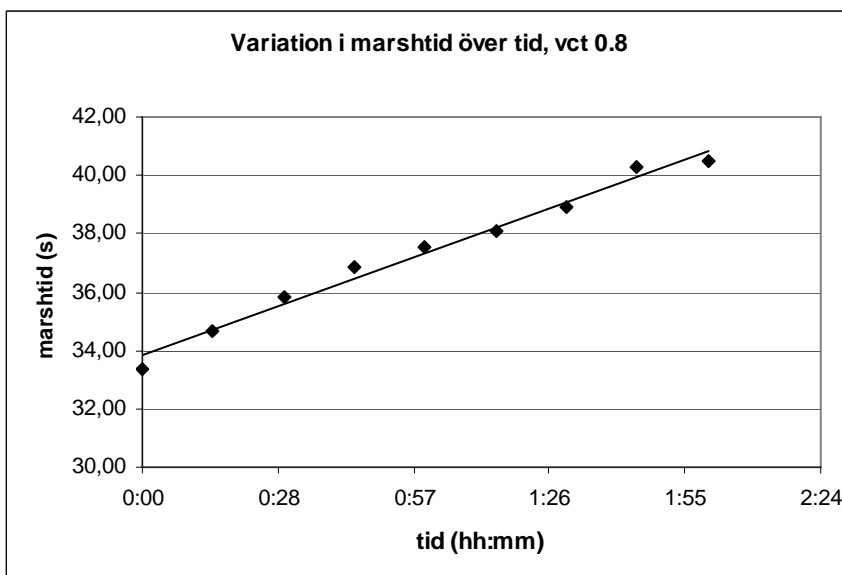
VCT 1,0				
Mätning nr	tid (hh:mm)	τ_0 (Pa)	d (g/cm³)	marshtid (s)
1	0:00	0,10	1,58	31,20
2	0:16	0,07	1,58	31,00
3	0:31	1,00	1,55	32,40
4	0:48	0,07	1,57	31,80
5	1:04	1,40	1,57	32,49
6	1:19	0,07	1,58	33,21
7	1:34	0,07	1,56	32,98
8	1:55	0,20	1,56	33,57
9	2:10	0,10	1,59	34,11
10	2:25	0,10	1,58	34,20

Tabell 2. Egenskaper, efter viss tid i omröraren, hos injekteringsbruk med vct 0.8.

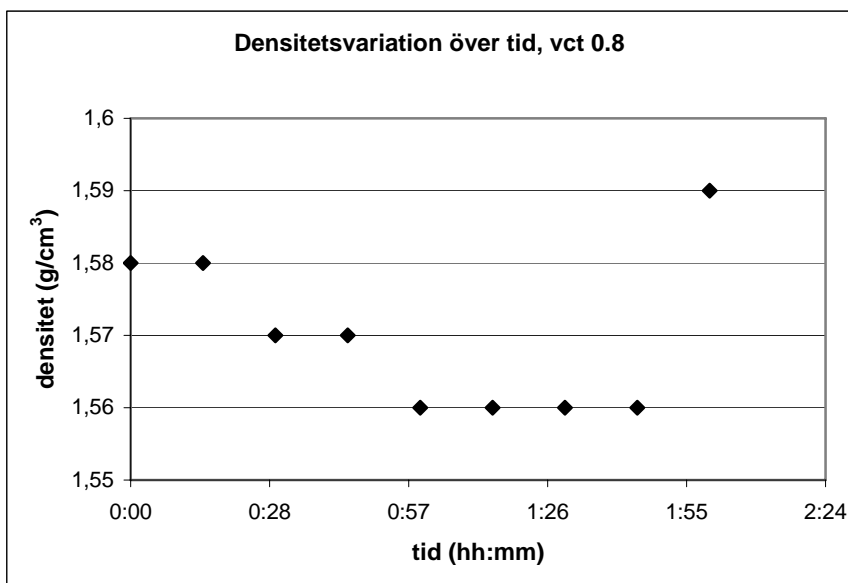
VCT 0,8				
Mätning nr	tid (hh:mm)	τ_0 (Pa)	d (g/cm³)	marshtid (s)
1	0:00	0,10	1,58	33,33
2	0:15	2,50	1,58	34,69
3	0:30	1,75	1,57	35,82
4	0:45	3,40	1,57	36,88
5	1:00	4,00	1,56	37,57
6	1:15	4,00	1,56	38,08
7	1:30	5,00	1,56	38,94
8	1:45	5,00	1,56	40,27
9	2:00	5,50	1,59	40,50



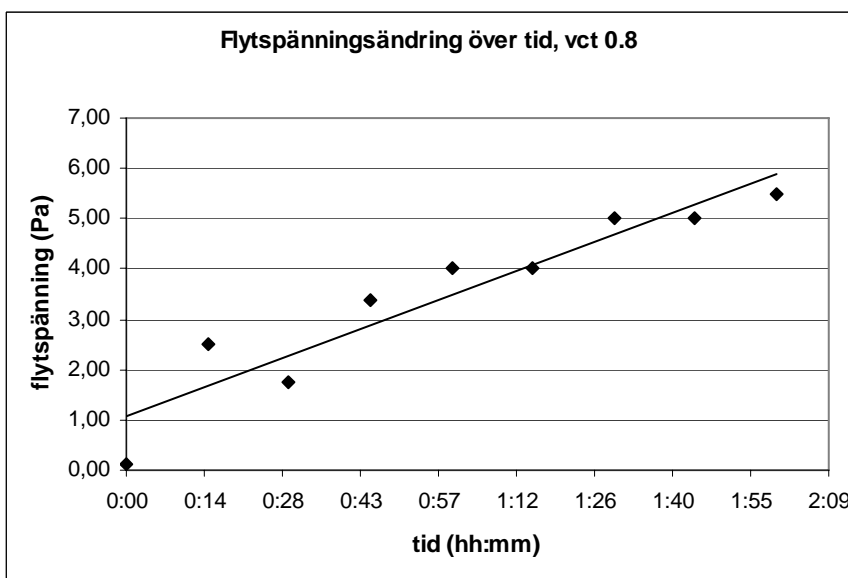
Figur 1a. Ökning av marshtid med ökad residenstid i omröraren för bruk med vct 1.0.



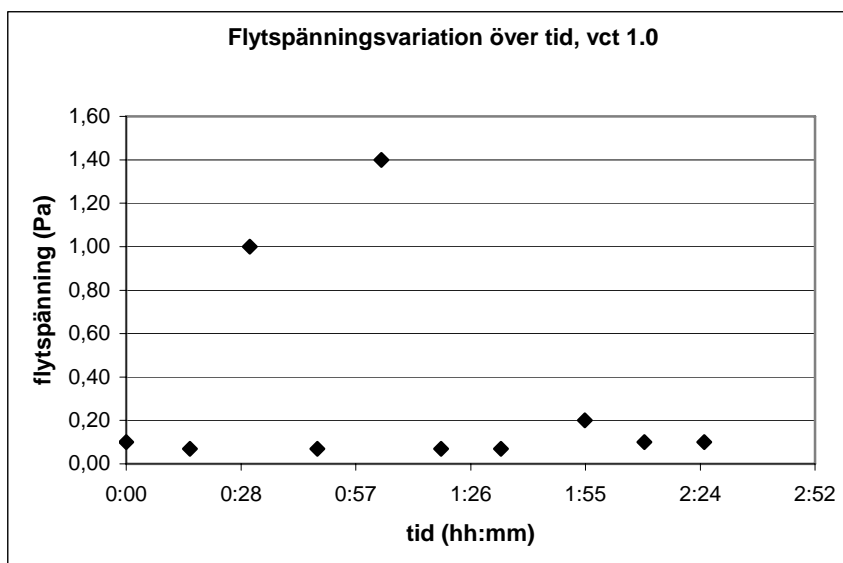
Figur 1b. Ökning av marshtid med ökad residenstid i omröraren för bruk med vct 0.8.



Figur 2. Variation av densitet med ökad residenstid i omröraren för bruk med vct 0.8.



Figur 3a. Variation i flytspänning med ökad residenstid i omröraren för bruk med vct 0.8.



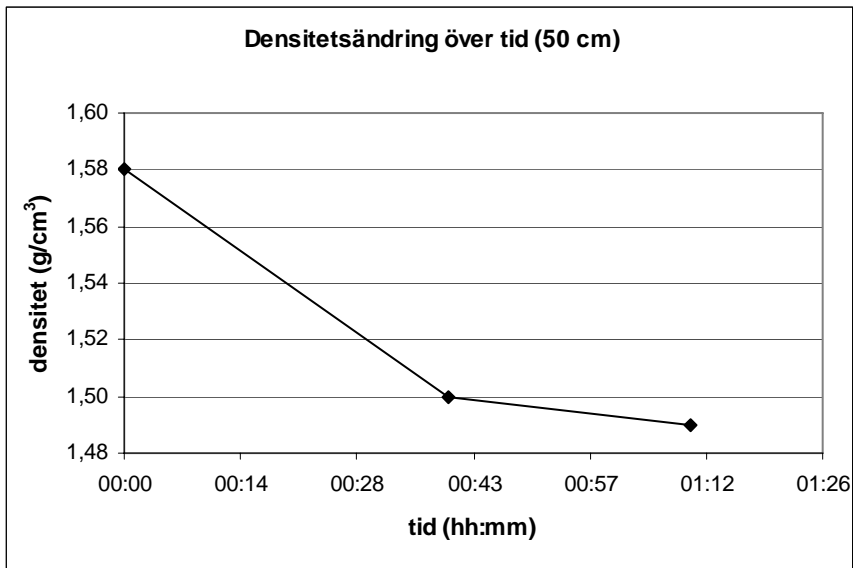
Figur 3b. Variation i flytspänning med ökad residenstid i omröraren för bruk med vct 1.0.

Resultaten från **Test 2** presenteras i Tabell 3 och Figurerna 4a-c, 5a-b och 6 nedan. Tabell 3 visar också mätningar av den vattenseparation som observerades när injekteringsbruket hade stått i cylindrarna en viss tid.

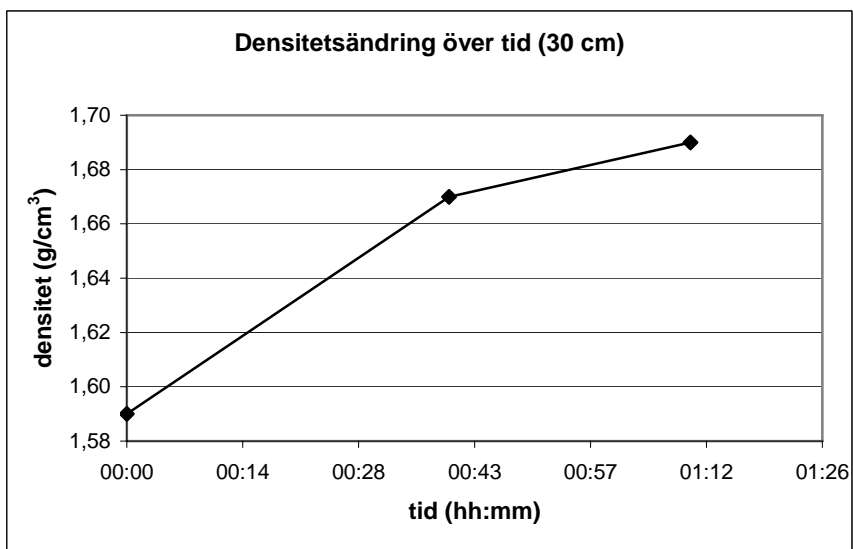
Tabell 3. Uppmätta egenskaper hos bruk i cylindriska behållare – Test 2.

	Tid (hh:mm)	Separation (mm)	50 cm		30 cm		10 cm	
			τ_0 (Pa)	d (g/cm ³)	τ_0 (Pa)	d (g/cm ³)	τ_0 (Pa)	d (g/cm ³)
Cylinder 1	00:00	0	0,1	1,58	0,1	1,59	0,4	1,62
Cylinder 2	00:40	10	0,1	1,50	3	1,67	6	1,68
Cylinder 3	01:10	20	1,3	1,49	10	1,69	---	1,67

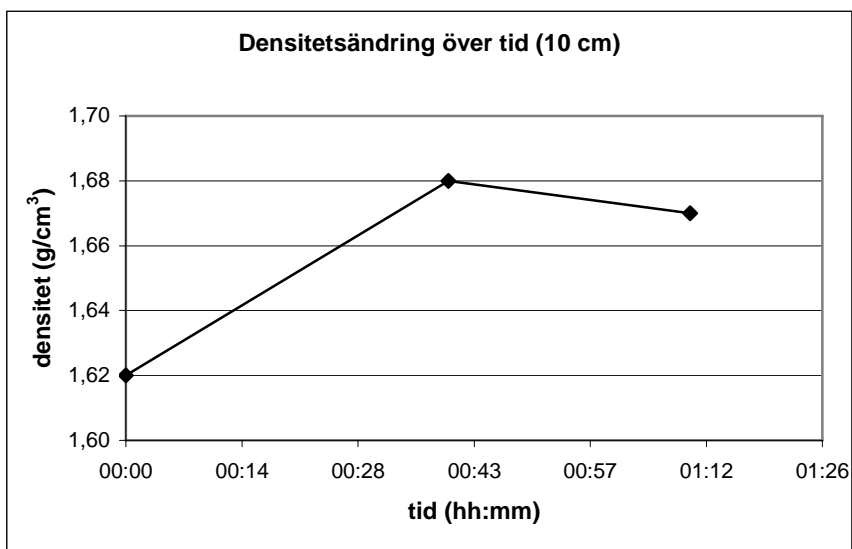
Resultaten från försöket visar att både densitet och flytspänning ändras med tiden. Densiteten minskar i de övre nivåerna (50 cm, Figur 4a) och ökar i de mellersta nivåerna (30 cm, Figur 4b) av cylindrarna. Sista mätningen i de nedersta nivåerna var behäftad med praktiska svårigheter och det mest sannolika är att densiteten kontinuerligt ökar med tiden också i de nedre 10 cm i mätglasen (Figur 4c).



Figur 4a. Densitetsändring med tiden uppmätt i de övre nivåerna (50 cm) av cylindrarna i Test 2.

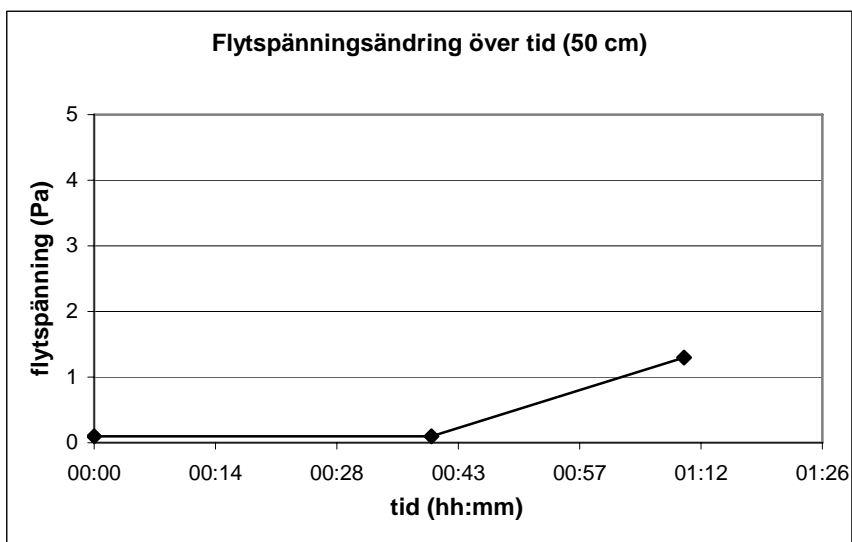


Figur 4b. Densitetsändring med tiden uppmätt i de mellersta nivåerna (30 cm) av cylindrarna i Test 2.

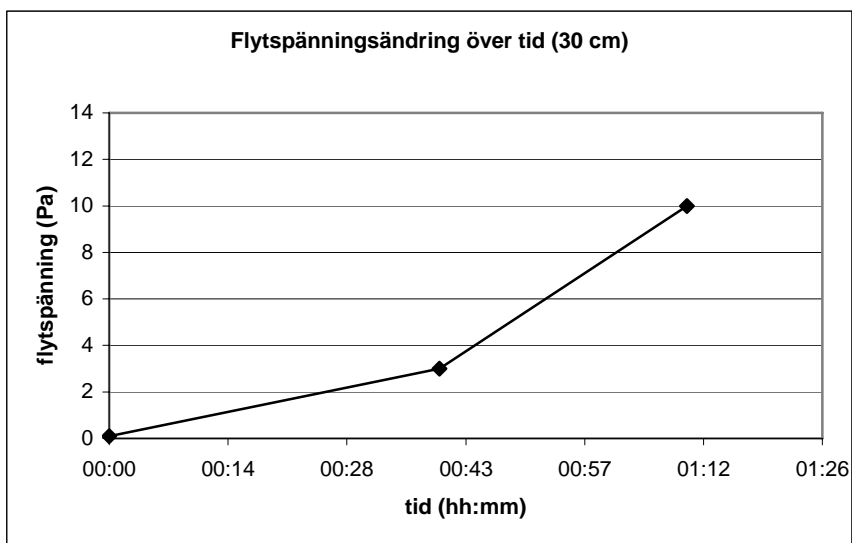


Figur 4c. Densitetsändring med tiden uppmätt i de nedre nivåerna (10 cm) av cylindrarna i Test 2.

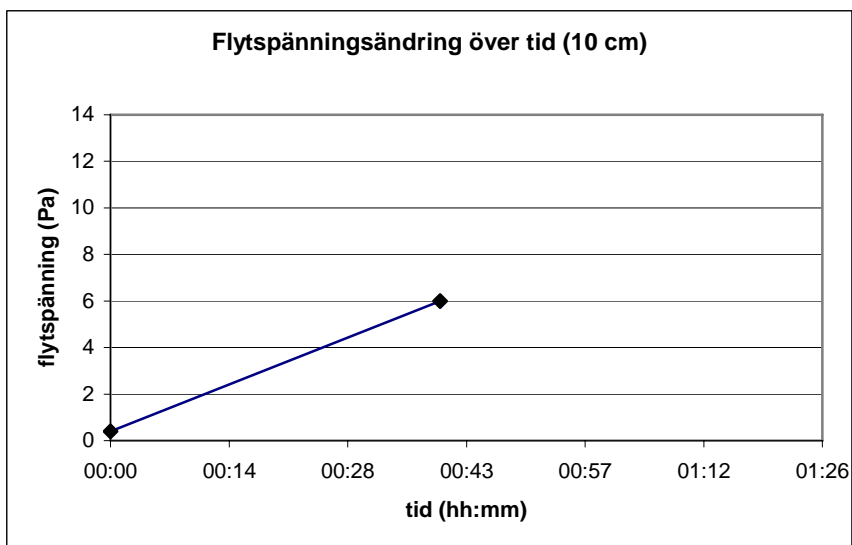
Flytspänningen visar sig konsekvent öka med tiden över alla nivåer (Figur 5a-c). Dock finns ingen kontroll på hur exakt flytspänningen beter sig i de nedersta (10 cm) nivåerna efter lång residenstid i cylindern, då ingen mätning kunde fås p.g.a. svårigheter vid sista mätningen.



Figur 5a. Variation hos flytspänningen över tid uppmätt i de övre (50 cm) nivåerna. Test 2.

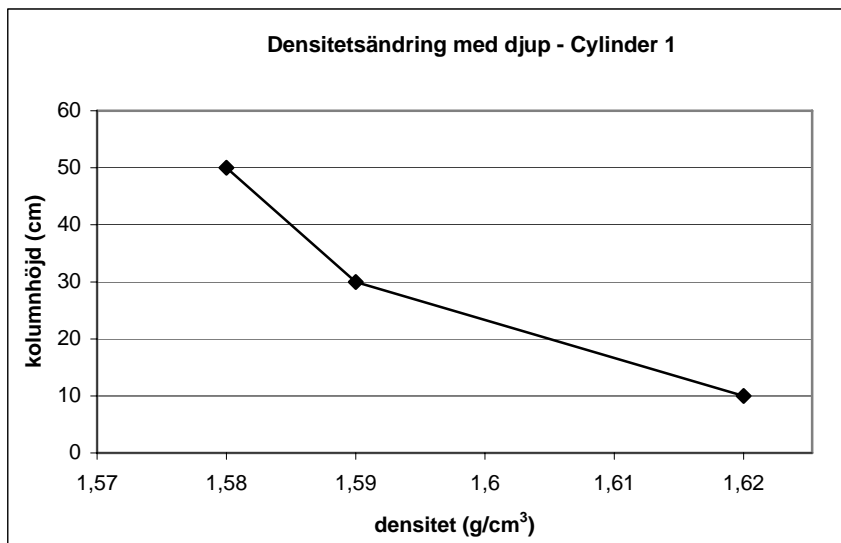


Figur 5b. Ändring av flytspänningen över tid uppmätt i de mellersta (30 cm) nivåerna. Test 2.



Figur 5c. Ändring av flytspänningen över tid uppmätt i de nedersta (10 cm) nivåerna. Test 2.

Vidare ses densiteten hos bruket öka också med djupet i cylindrarna (Figur 6).



Figur 6. Densiteten med ökat djup i Cylinder 1 vid t = 0. Test 2.

4 KOMMENTARER OCH SLUTSATSER

Resultaten från Yield stick-mätningen i vct 1.0 är tveksamma. Det är troligt att mätmetoden inte lämpar sig för mätning i bruk med låga flytgränser. Baserat på dessa mätningar verkar den gränsen ligga kring 1-2 Pa, i detta fall motsvande vct 1.0 eller större.

Under tiden bruket är i omröraren noterades inga systematiska variationer i densitet. Det troliga är att mätmetoden, mud balance mätningen, i sig verkar ha en noggrannhet på ca 0.01 g/cm³, se figur 2.

Test 1 (Brukets åldrande under omrörning). För vct 0.8 visar mätningarna en ökning av både flytspänning och marshtid med tiden. För vct 1.0 visar marshtiden ett tydligt tidsberoende medan flytspänningen inte är mätbar med den använda mätmetoden.

Resultaten (konstant densitet över tid) visar att omröraren i god utsträckning motverkar sedimentations- och konsolideringsprocesserna i bruket. Däremot motverkar omröraren inte hydrationsprocesserna som orsakar förändringar hos flytspänning och viskositet hos bruket. En slutsats härav blir att motståndet mot inträngning i sprickor kommer att öka med tiden, eftersom flytspänning och viskositet påverkar brukets flytförmåga och därmed dess inträngningsförmåga.

Test 2 (Simulering av stillastående bruk i borrhål). Testet utfördes för vct 1.0. Bruket i mätcylindern sedimenterade/konsoliderade mellan 10 och 40 min till en relativt stabil densitet i alla tre nivåerna. Förändringen i flytgräns var betydande för mellannivån (30 cm) och ännu större för nedre nivån (10 cm, särskilt om sista mätningen extrapoleras).

För vct 0.8 genomfördes endast ett enkelt test, efter 2 h kunde mätcylinder vändas upp och ner utan att bruket rann ur mätglaset.

En rimlig tolkning av resultaten är att ett bruk som legat i ett borrhål i längre tid än 40 min har egenskaper som kraftigt avviker från ursprungliga. Detta stämmer troligen även på andra egenskaper som penetrationsförmåga (ex. b_{crit}). Förändringen kommer att ha en stor negativ effekt på inträngningsförmågan när hålet senare trycksätts.

5 REFERENSER

- [1] Hässler L. Grouting of Rock – Simulation and Classification, Ph.D. thesis KTH 1991.
- [2] Håkansson U. Rheology of Fresh Cement based Grouts, Ph.D. Thesis KTH 1993.
- [3] Bohlin M. och Urtel K. Utvärdering av injekteringsutförande – Fallstudie av NL101 och Hornsberg. Examensarbete KTH 2008.
- [4] Almir D. Separations- och filtreringsstabilitet hos cementbaserat injekteringsbruk, Lic. Thesis KTH 2007
- [5] Stille B. Andersson F. Injektering - tillämpning av injekteringsforskning i fält, SveBeFo rapport 79 2008.
- [6] Bruno A. Grouting operation monitoring and analysis of the "Real time grouting control" method, Examensarbete KTH 2009.
- [7] Axelsson M. Prevention of erosion of fresh grout in hard rock, Ph.D Thesis Chalmers 2009