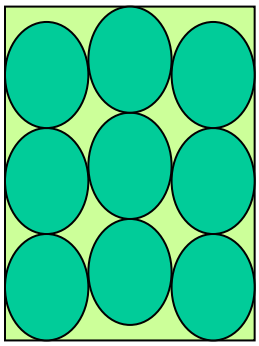
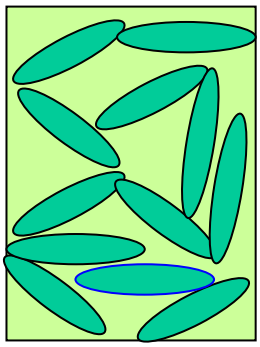
MinBaS **Område 2** **Rapport nr 2:17**

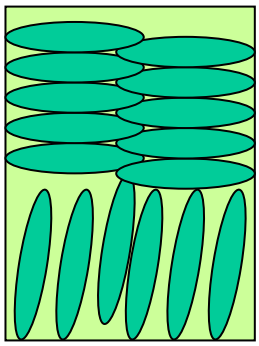
Alternativ ballast i betong - Krossat berg som ballast till betong - Packningsstudie av krossgrus

Hans-Erik Gram

Eva Attenius







CEMENTA
HEIDELBERGCEMENT Group

Alternativ ballast i betong - Krossat berg som ballast till betong - Packningsstudie av krossgrus

Sammanfattning: Packningsegenskaper hos betongens fasta delmaterial kan ge information om partiklarnas kornform och vattenbehov i betong. Packningen kan göras på olika sätt: I detta delprojekt har vi valt att studera grus i fraktioner mellan 0 och 2 mm med hjälp av lös packning. Ju mer en partikel avviker från rund kornform, desto större skillnader kan man förväntas få i packningsgraden beroende på hur packningen görs. Vid lös packning låter man partiklarna falla ner i ett mätkärl. Andra packningsförfaranden involverar tillförd energi i form av stötning med stång, vibrering eller vibrering med påförd last. Lös packning är en mycket lätt genomförbar metod och den kan lämpligen göras i samband med siktningen av torkat grus. I denna studie har naturgrus haft störst packningsgrad jämfört med 9 undersökta krossgrus. Ett visst samband råder mellan packningsgrad och sättmått hos betong tillverkad med undersökta 0-2 grus. Samband mellan packningsgrad och kornform och bruksreologi har också studerats, men korrelationerna har varit svaga.

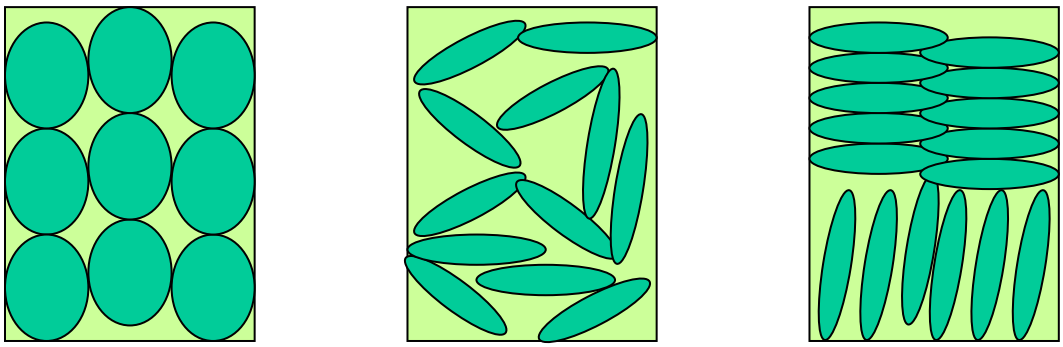
Abstract: The packing properties of the dry constituents of concrete, cement and aggregates can be used to predict the necessary water content in workable concretes. The way to pack the particles is governing the packing result. The packing result is also influenced by the particle shape. In this investigation we have used loose packing to investigate differences in packing properties of 9 different crushed granite aggregates between 0 and 2 mm. Comparison is made with the packing properties of natural sand 0-2 mm. Crushed aggregates have a lower degree of packing compared to natural sands and this may explain why the workability of concrete made with crushed granite sand is lower than the workability of concrete made with natural sand.

Nyckelord: Ballast, grus, packning, betong

1. Bakgrund och omfattning

Denna delrapport beskriver en studie av packningsegenskaperna hos de olika utvalda ballastmaterialen från de olika täkterna. Ballasten har huvudsakligen bestått av fraktionen 0-2 mm. Studien har genomförts för att ta reda på om packningsförsök är en lämplig metod för att analysera och kontrollera krossballastens kvalitet. Resultaten från packningsförsöken hos de olika storleksfraktionerna skall också användas som ingångsvärden i ett proportioneringsprogram, Concrete Mix Design. Programmet, som är under utveckling, skall bland annat underlätta utvärderingen av olika delmaterial, främst vad gäller ballasten. Med hjälp av packningsgraderna kommer man genom en partikel-matrismodell kunna bestämma betongens reologiska egenskaper i form av sättmått och utbredning.

Packningsgrad kan bestämmas på olika sätt: lös packning med eller utan vibrering, packning med pålagd vikt under vibrering eller också packning där partiklarna knådas ihop. Packningsmodellerna baseras allmänt på att kornformen är relativt kubisk eller rund. När kornformen är mer flakig, vilket är fallet när man arbetar med krossat material, kan tillförd energi i form av vibrering med eventuell pålagd vikt skapa en packning som kan bli bättre än om partiklarna varit runda. Se Figur 1.1. Detta är motivet till att lös packning har valts att arbeta med.



Figur 1.1 Packningen av flisiga partiklar är starkt beroende av hur packningen görs.

Förutom packningsegenskaperna, redovisas även kornkurvor. Jämförelser mellan packningsvärdena och resultat från materialkarakteristiken/bildbehandlingen och reologistudierna, som har utförts inom ramen av denna rapport, har även genomförts.

2. Metod

Packningsförsöken har utförts på ballastmaterial från täkterna N1, K6, K5, K3, K9, K2, K7, K8, K4 och K1. Materialet torkades först för att därefter siktas. För varje täkt bestämdes packningsgraden för dels varje uppsiktad fraktion, dels för totala fraktionen. Kornkurvorna redovisas i **bilaga 1**. Ballastfraktionerna vägdes upp i mått med en bestämd volym; 19,44 och 40,35 cm^3 för respektive fraktion

och 209,93 cm^3 för den totala. Uppvägningen gjordes tre gånger och ett medelvärde användes för att beräkna packningsgraden. För fraktionerna ≥ 0,5 mm bestämdes densiteten genom att fylla upp vatten i resterande volym efter att måttet fyllts med ballast. Densiteten bestämd vid 0,5 mm-fraktionen användes vid beräknings av packningsgrad för fraktionerna < 0,5 mm. För beräknings av totala packningsgraden användes ett medelvärde av de framräknade densiteterna. Packningsgraden, P beräknades enligt:

$$P = \text{Vikt ballast} / (\text{densitet ballast} \times \text{Volym})$$

I **bilaga 2** finns bilder som beskriver metoden samt ett exempel på hur värdena ser ut för materialet från täkten K5.

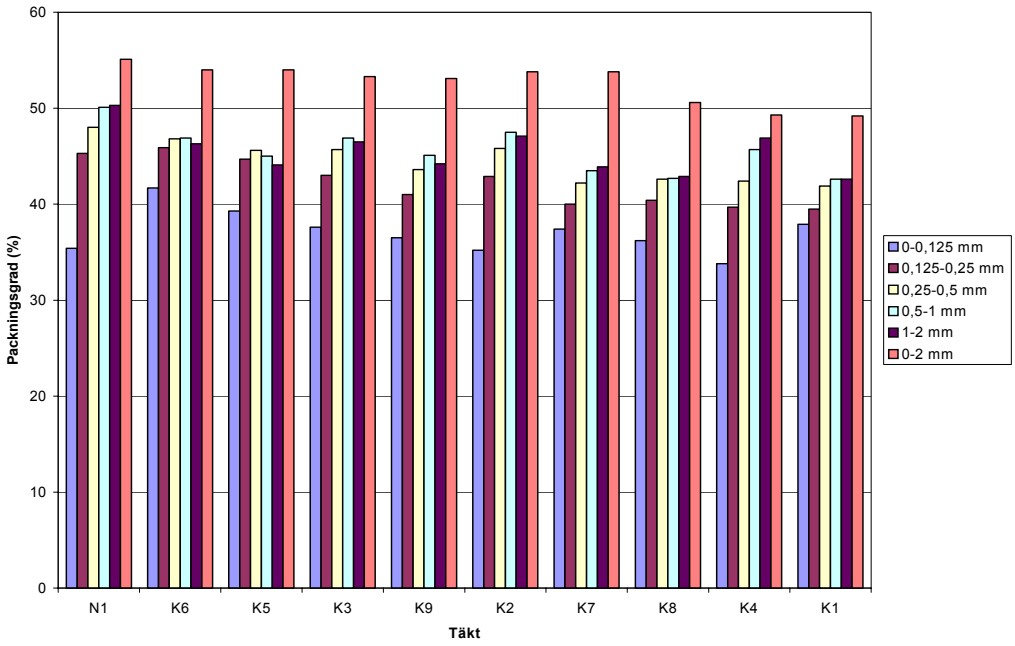
3. Resultat

3.1 Redovisning av packningsvärden

I tabell 3.1.1 och figur 3.1.1 redovisas packningsvärden för hela 0-2 mm fraktionen samt för delfraktionerna 0-0,125 mm; 0,125-0,25 mm; 0,25-0,5 mm; 0,5-1 mm samt 1-2 mm.

Tabell 3.1.1 Tabellen visar medelvärden av packningsvärden framräknad från uppvägda vikter och densiteter för volymerna 19,44, 40,35 och 209,93 cm^3. Summan för alla packningsvärden finns också redovisade.

Täkt	0-0,125 mm	0,125-0,25 mm	0,25-0,5 mm	0,5-1 mm	1-2 mm	0-2 mm	Summa P
N1	35,4	45,3	48	50,1	50,3	55,1	284,2
K6	41,7	45,9	46,8	46,9	46,3	54	281,6
K5	39,3	44,7	45,6	45	44,1	54	272,7
K3	37,6	43	45,7	46,9	46,5	53,3	273
K9	36,5	41	43,6	45,1	44,2	53,1	263,5
K2	35,2	42,9	45,8	47,5	47,1	53,8	272,3
K7	37,4	40	42,2	43,5	43,9	53,8	260,8
K8	36,2	40,4	42,6	42,7	42,9	50,6	255,4
K4	33,8	39,7	42,4	45,7	46,9	49,3	257,8
K1	37,9	39,5	41,9	42,6	42,6	49,2	253,7



Figur 3.1.1 Stapeldiagram utifrån tabell 3.1.1

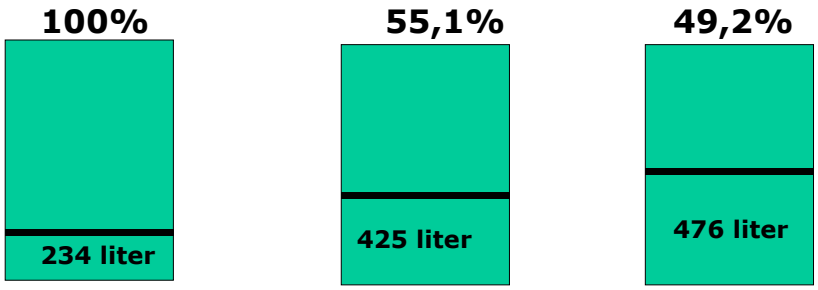
3.2 Funderingar kring den lösa packningsgradens betydelse för betongens cementpastabehov

Enligt partikel-matris-modellen kan betong betraktas som ett tvåkomponent-system, en partikelfas och en matrisfas. Partikelfasen utgörs av alla partiklar större än en vald kornstorlek och matrisfasen således av alla ballastpartiklar mindre än den valda kornstorleken, vatten, cement, tillsatsmedel, luft, tillsatsmaterial och filler. Partikelfasen kan lämpligen studeras med hjälp av partikelpackning, siktkurvor, finhetsmodul, l/d-förhållanden och exempelvis packnings-egenskaperna kan utnyttjas i datorprogram för optimering av packningen. Matrisfasen studeras lämpligen med någon reologisk metod.

Vid packning av finare fraktioner deltar många fler korn i packningen och inverkan av olika kornform i partikelsamlingen kan påverka packningen. Skillnaden mellan ett korn som nästan tar sig igenom 0,063 mm sikten och ett korn som just lyckas ta sig igenom 0,125 mm sikten kan vara mycket stor. Låt oss anta att kornet som lyckats ta sig igenom 0,125 mm sikten har dimensionen 0,125*0,125*0,25 – således ett stängligt korn. Låt oss också anta att det korn nära på lyckades passera den nedre sikten har dimensionen 0,065*0,065*0,001 mm – således ett flakigt korn så som exempelvis glimmer. Vad skiljer dessa båda korn? Till att börja med volymerna – det stängliga kornet har volymen 390 625* 10^{-9} mm^3 och det flakiga har volymen 4225 mm^3*10^{-9} mm^3. Det går 92 flakiga korn på ett stängligt. Hur packar sig dessa 92 korn – vilken volym kan de tänkas ta upp? I en rörlig matrisfas kommer de 92 flakiga kornen att behöva en mycket större cementpastavolym, eftersom hålrummet som bildas mellan dem skall fyllas ut. Diskussionen ovan illustrerar konsekvensen av att partiklarnas kornform avviker från den runda formen. Den kornkurva vi tar etablerar med hjälp av mekanisk

siktning ger inte alltid en rättvisande bild av förväntat partikelyta och inverkan på vattenbehov.

I delrapporten Betongprovningar (Westerholm, Gram) redovisas betongrecept som använts i laboratorieförsöken. I standardreceptet ingick 620 kg/m3 av grusfraktionen 0-2 mm. Låt oss för enkelhetens skull anta att alla grus har samma kompaktdensitet, 2 650 kg/m3. Låt oss jämföra naturgrusets lösa packningsgrad med det krossgrus som hade den lägsta packningsgraden, material från täkt N1 respektive täkt K1 i tabell 3.1.1. Packningsgraderna var 55,1% respektive 49,2%.



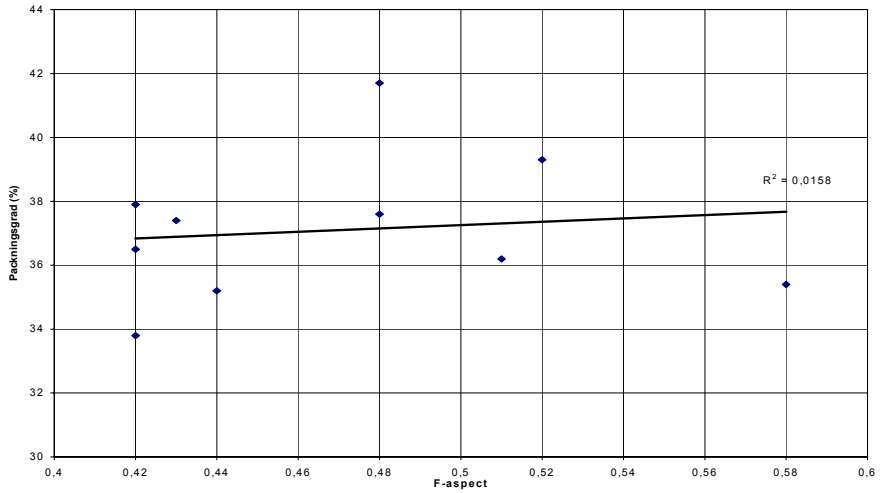
Figur 3.2.1 Volym som fraktionen 0-2 mm tar upp vid packningsgraderna 100% (kompakt), 55,1% och 49,2%. Hålrummet i de löst packade grusen upptar volymerna 191 respektive 242 liter.

Som framgår av figur 3.2.1 har gruset från naturtäkten ett hålrum på 191 liter och gruset från krosstäkten 242 liter – en skillnad på 51 liter. Antag att detta hålrum skall fyllas med extra vatten. En tumregel säger att det krävs cirka 11 liter vatten extra för att öka konsistensen en konsistensklass. Skillnaden i sättmått hos betongerna i Liljeholmsförsöken var säkert 5 konsistensklasser emedan sättmåtten var 5 mm respektive 200 mm. Vid bibehållet vct motsvarar detta 57 kg Byggcement och 32 l vatten per kubikmeter betong.

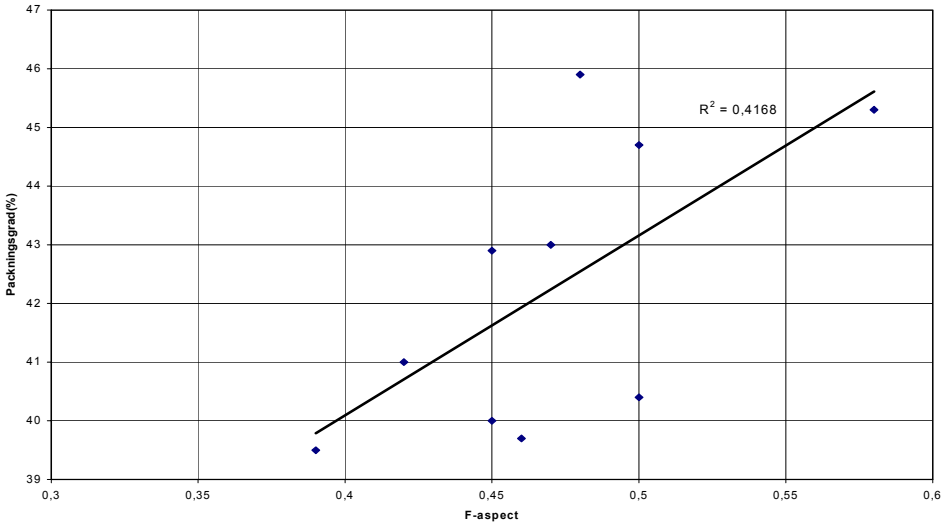
Lös packning av en 0-2 mm fraktion utförd enligt bilaga 2 är en enkel och snabb metod för att ge en första indikation på om ett alternativt grus kan vara intressant i jämförelse med det man för närvarande använder. Istället för provbehållare på 2 eller 4 cl bör man använda en större behållare som rymmer åtminstone 10 cl.

3.3 Undersökning av packningsgradens samband med kornformen

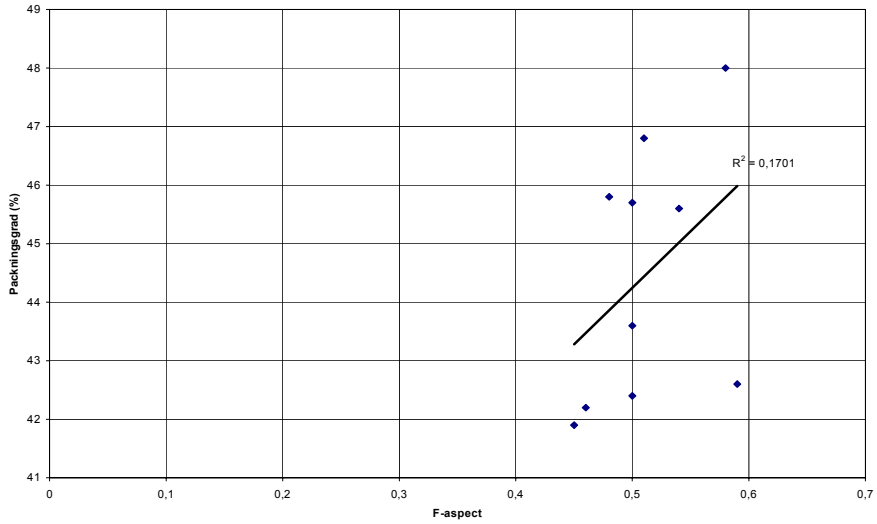
Kornens olika flakighet bör sannolikt påverka hur bra materialet packar sig. Den variabel som ger bäst information om kornens flakighet och som redovisas i en tidigare utarbetad arbetshandling med titeln Framtida Betong, Krossad ballast i betong, CBI 2004 är F-aspekt. Denna parameter jämfördes med packningsgraden för de olika materialen hos fraktionerna 0-0,125 mm; 0,125-0,25 mm; 0,25-0,5 mm och 0,5-1 mm. I figur 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 och 3.3.4 redovisas packningsgraden avsatt mot F-aspect för respektive fraktion. Värdena för F-aspect är hämtade från Appendix 1C Statistik data från bildbehandling i Arbetshandlingen ”Framtida Betong, Krossad ballast i betong” och är medelvärden för snittade korn.



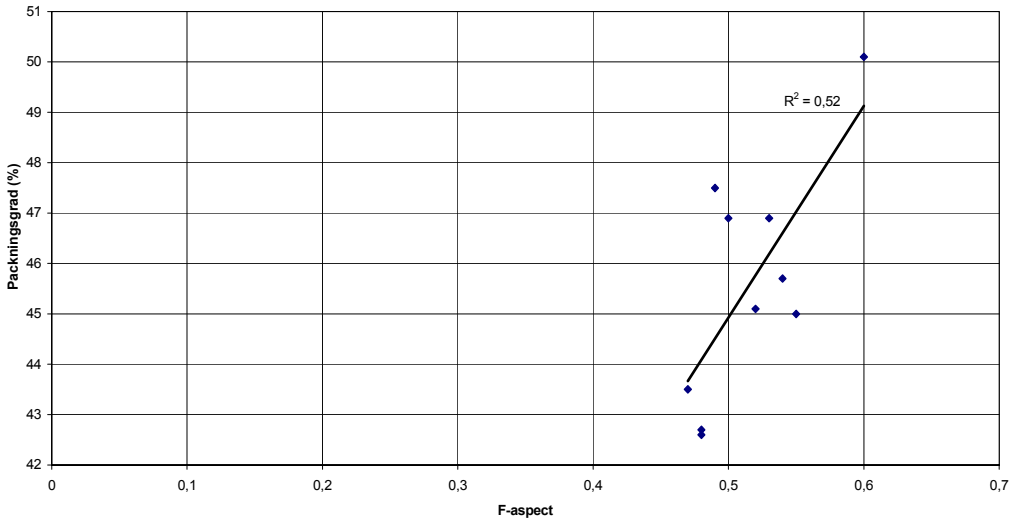
Figur 3.3.1 Packningsgraden för fraktionen 0-0,125 mm för de olika materialen avsatt mot F-aspect värden hos fraktionen 0,075-0,125 mm.



Figur 3.3.2 Packningsgraden för fraktionen 0,125-0,25 mm för de olika materialen avsatt mot F-aspect värden hos motsvarande fraktion.



Figur 3.3.3 Packningsgraden för fraktionen 0,25-0,5 mm för de olika materialen avsatt mot F-aspect värden hos motsvarande fraktion.



Figur 3.3.4 Packningsgraden för fraktionen 0,5-1 mm för de olika materialen avsatt mot F-aspect värden hos motsvarande fraktion.

Enligt resultaten verkar det inte finnas någon större korrelation mellan F-aspect och packningsgraden. Den fraktion som ändå ger den bäst korrelation är 0,5-1 mm med ett r^2-värde på 0,52.

3.4 Undersökning av packningsgradens samband med bruksreologi

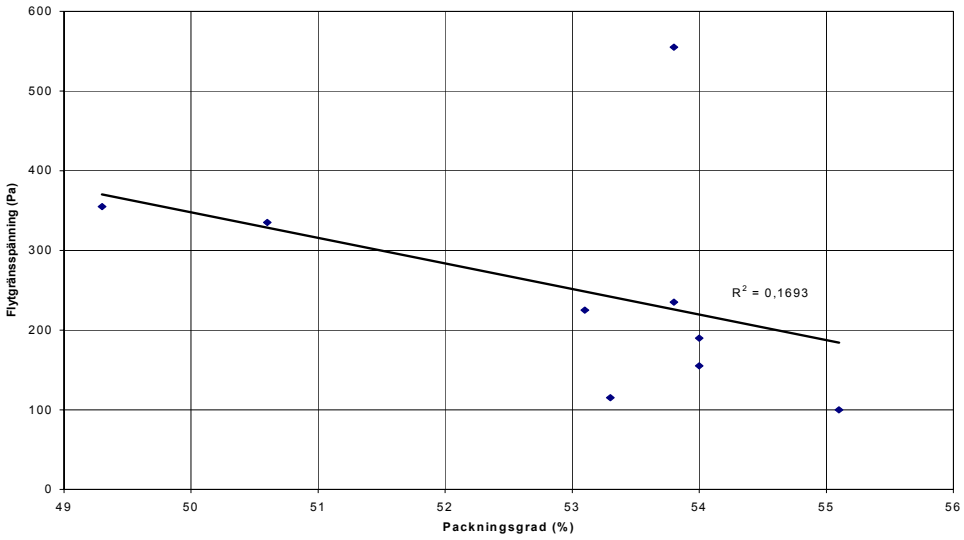
Krossballastens reologiska egenskaper i bruk har utvärderats och återvinns i en tidigare utarbetad arbetshandling med titeln Framtida Betong, Krossad ballast i betong, Betongprovning av Mikael Westerholm, CBI 2004. Studien har gjorts med hjälp av en bruksviskometer (Contec 4). Flytgränsspänning och plastisk viskositet hos bruk innehållande olika 0-2 mm ballast jämfördes med packningsgraden för motsvarande fraktion hos de olika ballasttyperna. De

reologiska värdena är tagna från figur 3.2.1.1 i arbetshandlingen. I figur 3.4.1 har korrelationen mellan packningsgrad och flytgränsspänning undersökts. Punkterna i figuren motsvarar värdena i tabell 3.4.1.

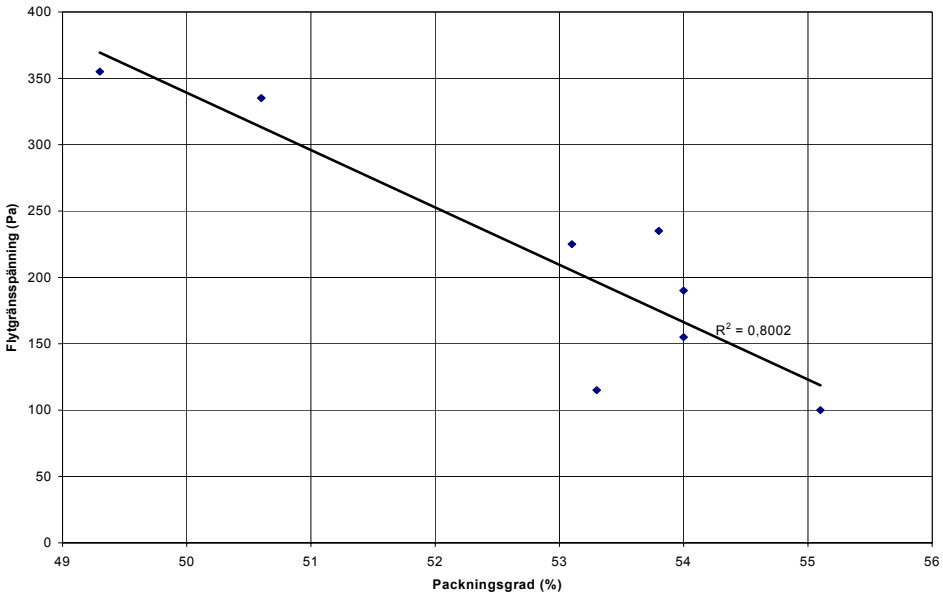
Tabell 3.4.1 Värden tillhörande figur 3.4.1.

Täkt	Packningsgrad 0-2 mm (%)	Flytgränsspänning (Pa)
N1	55,1	100
K6	54,0	155
K5	54,0	190
K3	53,3	115
K9	53,1	225
K2	53,8	235
K7	53,8	555
K8	50,6	335
K4	49,3	355

Något värde för K1 är inte med i denna jämförelse då bruk innehållande denna ballast inte är genomförd i den aktuella studien. Av figuren framgår att det inte finns någon korrelation mellan packningsgraden och flytgränsspänningen. Värdet på K7 avviker från de andra genom att ha ett mycket högt värde på flytgränsspänningen. Den troliga förklaringen till detta är enligt arbetshandlingen dess höga andel finmaterial. Om K7:s värden exkluderas fås istället en korrelationsfaktor på 0,80, se figur 3.4.2.



Figur 3.4.1 Flytgränsspänning avsatt mot packningsgraden hos olika 0-2 mm fraktioner. (Värden enligt tabell 3.3.1)



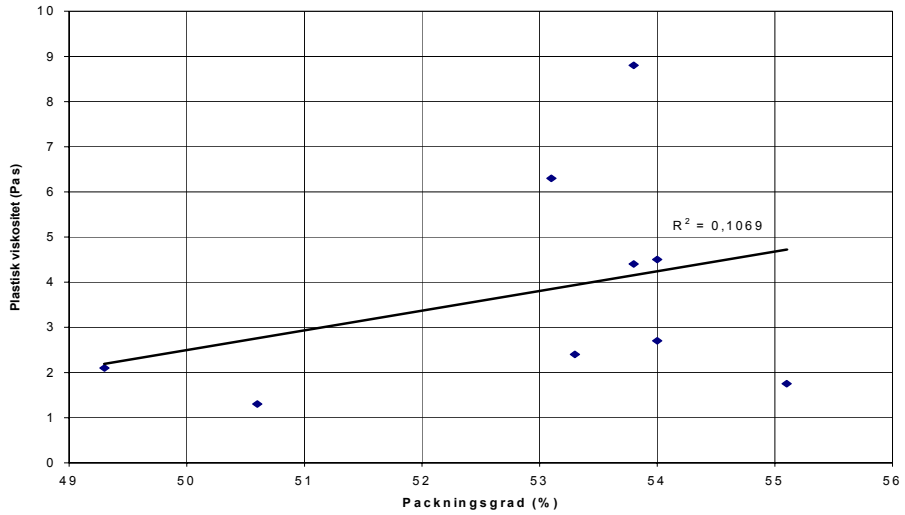
Figur 3.4.2 Flytgränsspänning avsatt mot packningsgraden hos olika 0-2 mm fraktioner då K7 har utlämnats.

I figur 3.4.3 har korrelationen mellan packningsgrad och den plastiska viskositeten undersökts. Punkterna i figuren motsvarar värdena tabell 3.4.2.

Tabell 3.4.2 Värden tillhörande figur 3.4.3.

Täkt	Packningsgrad 0-2 mm (%)	Plastisk viskositet (Pa s)
N1	55,1	1,75
K6	54,0	2,7
K5	54,0	4,5
K3	53,3	2,4
K9	53,1	6,3
K2	53,8	4,4
K7	53,8	8,8
K8	50,6	1,3
K4	49,3	2,1

Enligt figuren finns det inget samband alls mellan packningsgraden och den plastiska viskositeten. K7 sticker även här ut men ingen bättre korrelation uppnås då denna exkluderas.



Figur 3.4.3 Plastiska viskositeten avsatt mot packningsgraden hos olika 0-2 mm fraktioner. (Värden enligt tabell 3.4.2)

På Cementas Research laboratorium på Liljeholmen har betongförsök genomförts med de olika ballastmaterialens 0-2 mm fraktioner. Betong enligt ett fast recept utfördes och sättmått bestämdes. Resultaten redovisas i tabell 3.4.3.

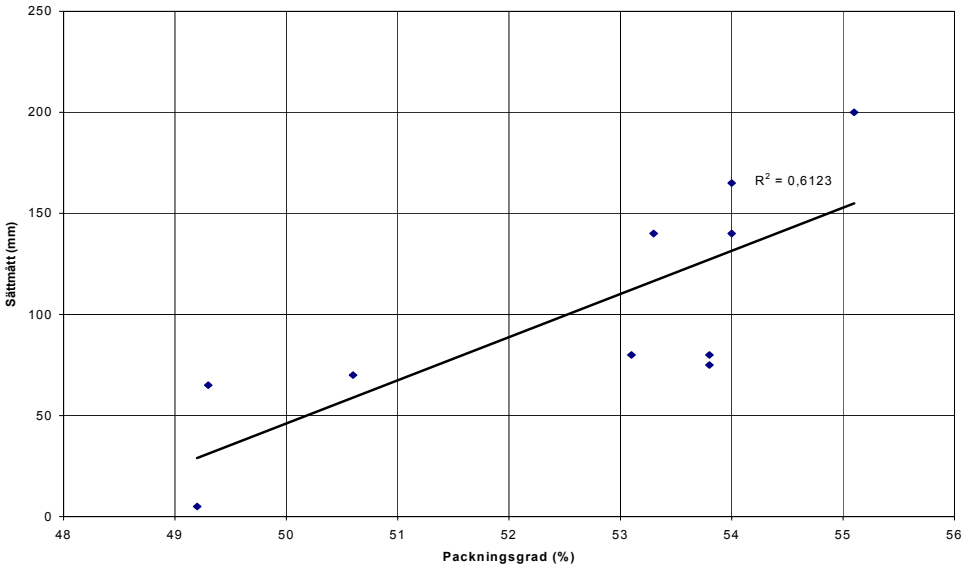
Tabell 3.4.3 Sättmått taget 5 minuter efter vattentillsatsen hos betong med fraktionen 0-2 mm.

Täkt	Sättmått (mm)
N1	200
K6	165
K5	145
K3	140
K9	85
K2	85
K7	80
K8	75
K4	65
K1	5

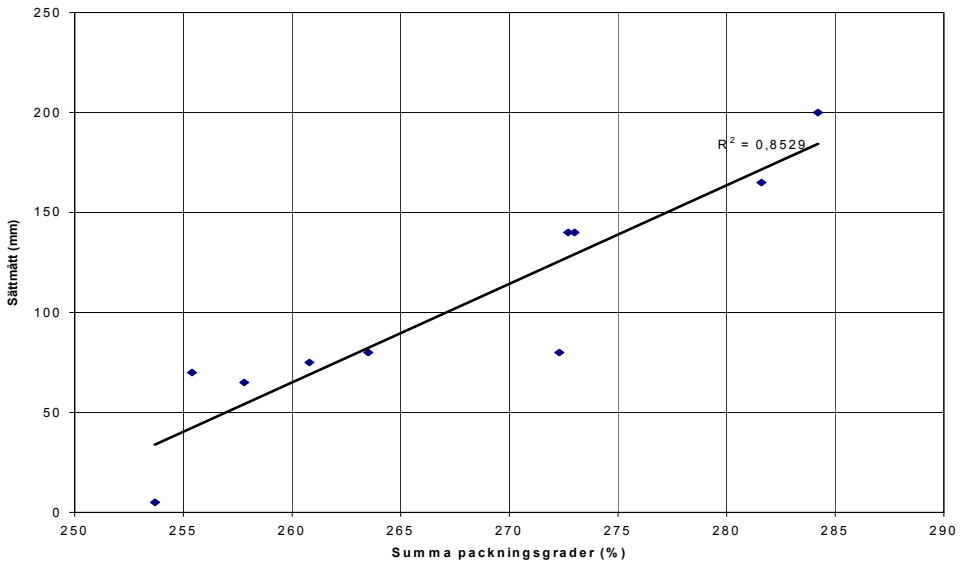
I figur 3.4.4 är värdet på sättmåttet avsatt mot packningsgraden hos ballastmaterialens 0-2 mm fraktioner. Resultatet ger en korrelationsfaktorn på 0,61 vilket visar på att det finns, om ett svagt, samband mellan hur bra ett material packar sig och hur det beter sig i betong vad gäller konsistens. Om summan av packningsvärdena för varje fraktion och hela fraktionen 0-2 mm (se tabell 3.1.1) jämförs med sättmåttet blir korrelationen bättre med ett r^2värde på 0,85. Resultat enligt figur 3.4.5.

Sättmåtten blev mycket skiftande då ballast från de olika täkterna varierades medan betongreceptet för övrigt var det samma. Med hjälp av flyttillsats gick det dock att förbättra betongens utgångskonsistens, i dessa fall i form av sättmåttet. För betongerna undersöktes hur stor mängd flytdos som behövdes för att uppnå

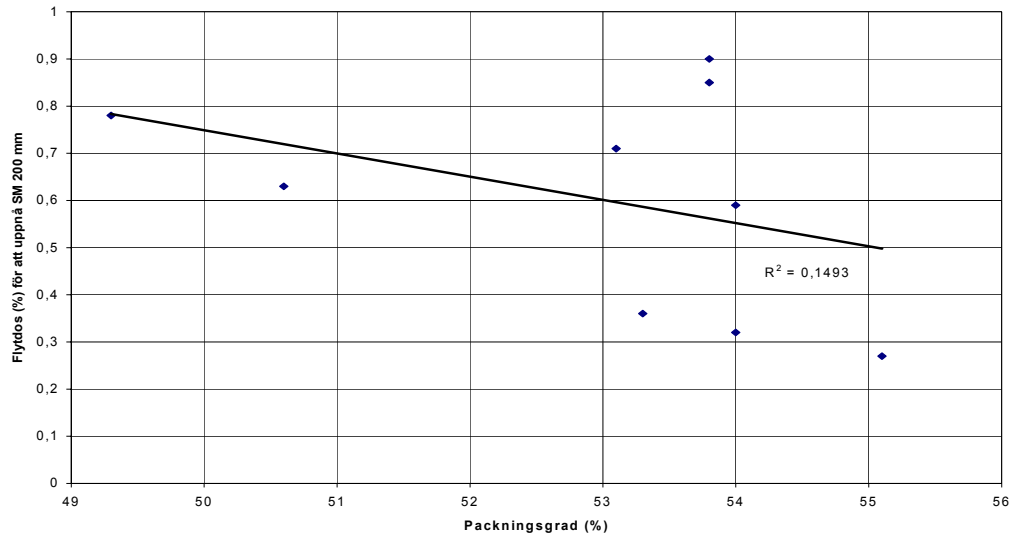
sättmåttet 200 mm. Denna flytdos avsattes mot packningsgraden för respektive täkts 0-2 mm fraktion. Detta visas i figur 3.4.6. En korrelationsfaktor på 0,15 visar på att det i detta fall inte finns något samband mellan packningsgraden och halten flytdosering för att uppnå en viss konsistens.



Figur 3.4.4 Sättmått avsatt mot packningsgraden hos olika 0-2 mm fraktioner.

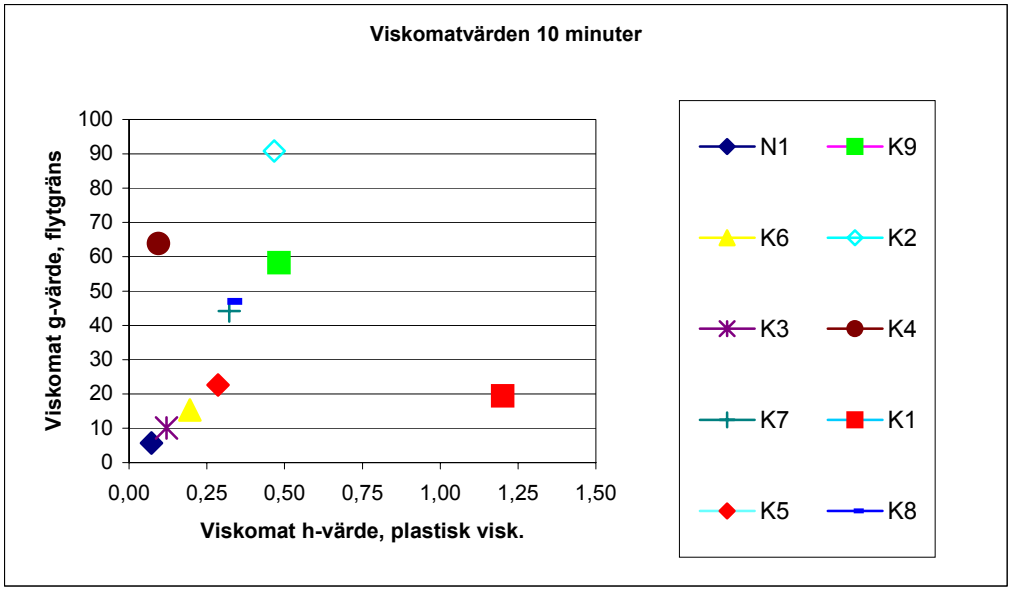


Figur 3.4.5 Sättmått avsatt mot summan av packningsgraderna hos olika 0-2 mm fraktioner.



Figur 3.4.6 Flytdosering (med hänsyn tagen till torrhalt) för att uppnå ett sättmått på 200 mm avsatt mot packningsgraden hos olika 0-2 mm fraktioner.

Bruksförsök har genomförts på Cementa Research och dess reologi studerades med hjälp av en viskomat. Resultaten redovisas i figur 3.4.7.

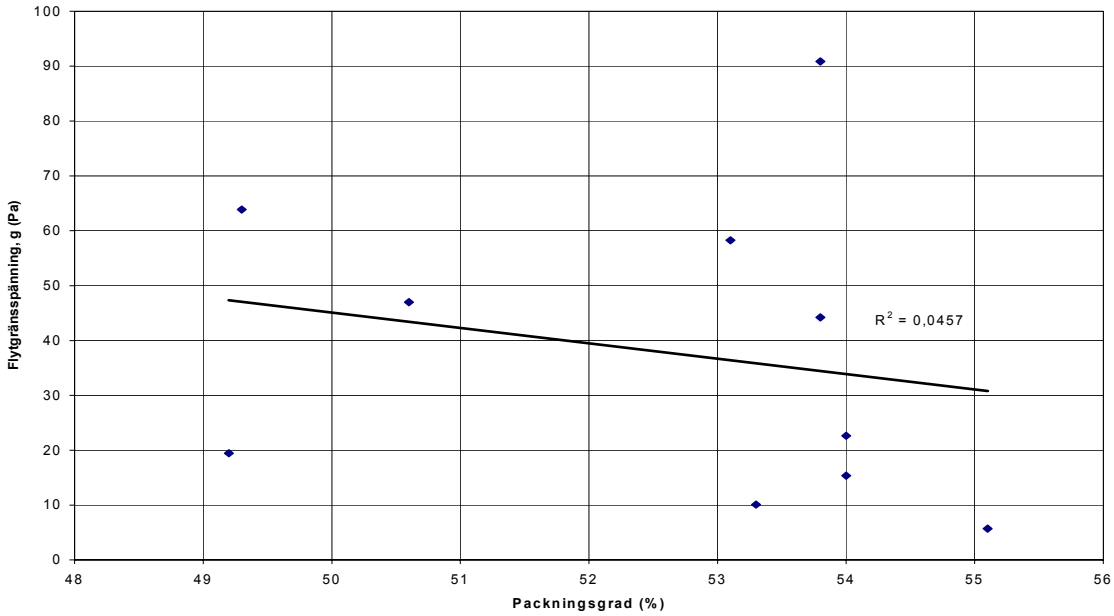


Figur 3.4.7 Flytgränsspänning och plastisk viskositet för bruk innehållande 0-2 mm ballastfraktioner.

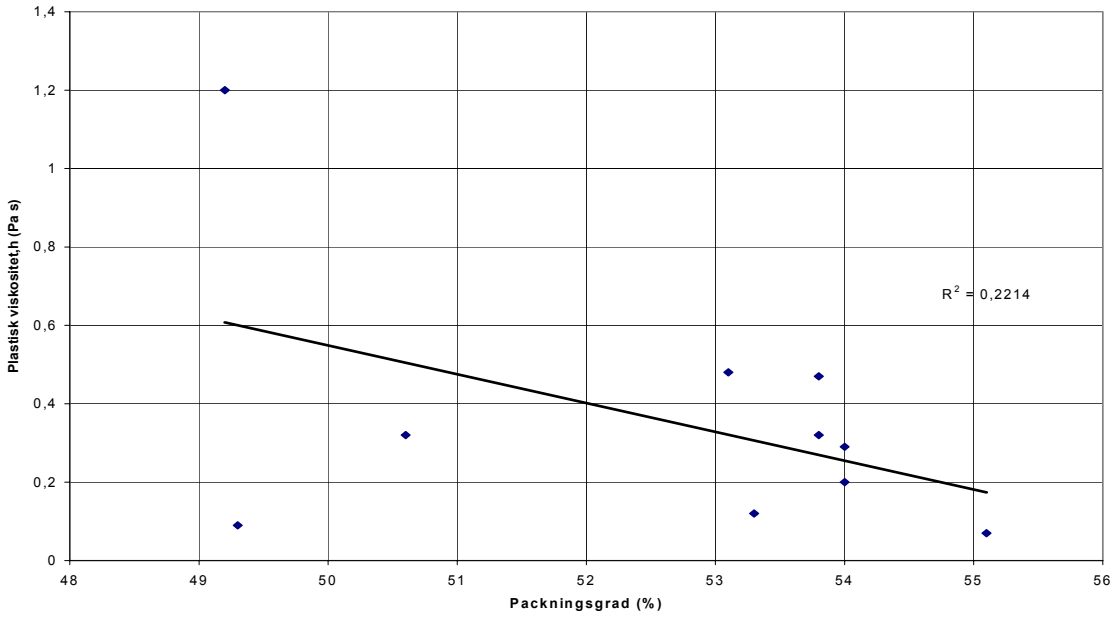
I figur 3.4.8 och 3.4.9 redovisas packningsgraden för 0-2 mm fraktionen avsatt mot flytgränsspänning respektive den plastiska viskositeten för bruk innehållande 0-2 mm ballastfraktioner. Punkterna i figurerna motsvarar värdena tabell 3.4.4.

Tabell 3.4.4 Värden från Cementa Research tillhörande figur 3.4.8 och 3.4.9.

Täkt	Packningsgrad 0-2 mm (%)	Flytgränsspänning (Pa)	Plastisk viskositet (Pa s)
N1	55,1	5,7	0,07
K6	54,0	15,4	0,20
K5	54,0	22,6	0,29
K3	53,3	10,1	0,12
K9	53,1	58,3	0,48
K2	53,8	90,9	0,47
K7	53,8	44,2	0,32
K8	50,6	47,0	0,32
K4	49,3	63,9	0,09
K1	49,2	19,4	1,20



Figur 3.4.8 Flytgränsspänning avsatt mot packningsgraden hos olika 0-2 mm fraktioner. (Värden enligt tabell 3.4.4)

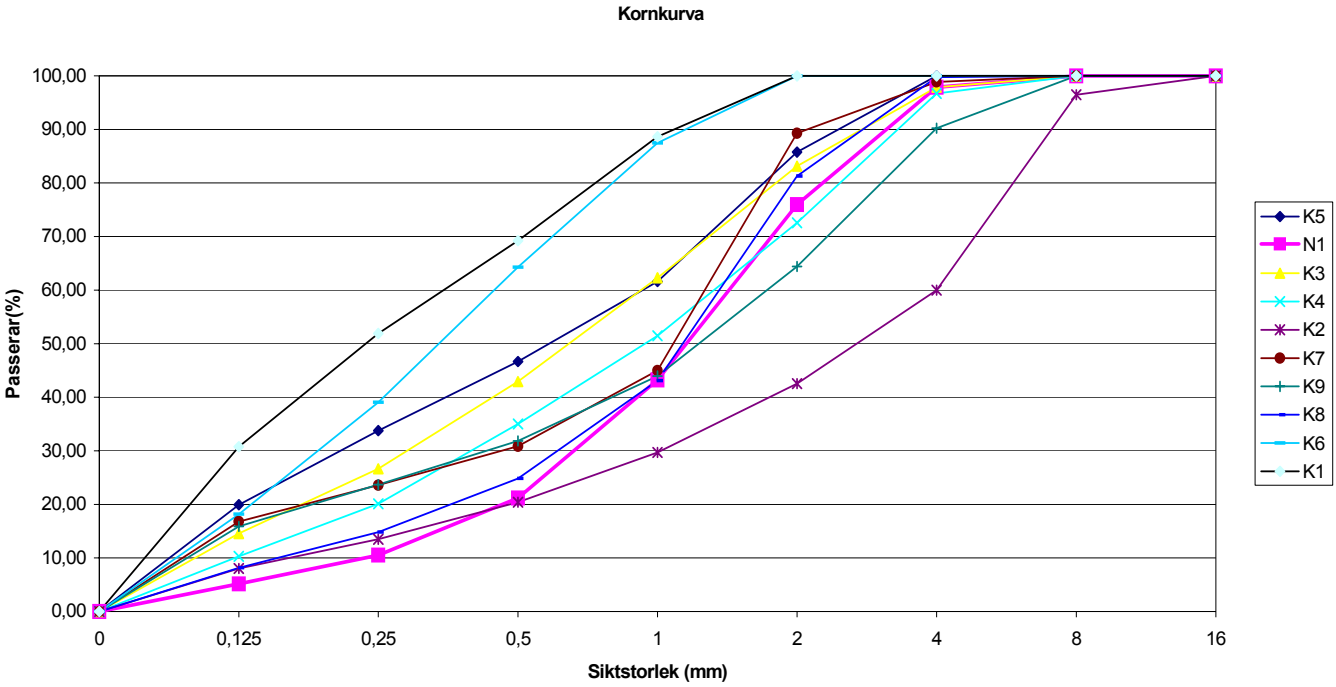


Figur 3.4.9 Plastiska viskositeten avsatt mot packningsgraden hos olika 0-2 mm fraktioner. (Värden enligt tabell 3.4.4)

Resultaten i figur 3.4.8 och 3.4.9 visar på att det inte råder något samband mellan varken packningsgrad och flytgränsspänning eller packningsgrad och plastisk viskositet i bruk som är gjorda med viskomaten.

Bilaga 1

Kornstorleksfördelning (0-2 mm) hos de olika grussorterna.



Bilaga 2

Bild 1 visar hur en bestämd mängd från en viss fraktion vägs upp. Denna mängd hälls sedan i en tratt, bild 2. Från ett visst avstånd fylls sedan kärlet med en bestämd volym, bild 3. Överskottet materialet ”skrapas” sedan bort utan att kärlet utsätts för någon vibration, bild 4. Materialet vägs därefter, bild 5.

Bild 1

Bild 2

Bild 3

Bild 4

Bild 5

Exempel för redovisning och beräkning för K5

För varje fraktion gjordes tre uppvägningar i volymerna 2 respektive 4 cl enligt nedan tabell (För fraktionen 2 mm endast 4 cl). Volymerna var 19,44 cm^3 (2 cl), 40,35 cm^3 (4 cl) och 209,93 cm^3. Vattenvikten är uppfyllnad av aktuell volym på mätning 3. Densiteten är beräknad med hjälp av vattenvikten på resterande volym. Eftersom vattnets densitet är satt till 1 g/cm3 beräknas exempelvis första värdets densitet genom: 48,10/(40,35-22,08). För fraktionerna mindre än 0,5 mm ha ingen vattenmätning och densitetsberäkning gjorts eftersom kornen blev för små för att kunna göra en relevant mätning.

	Ballastvikt (g)				**Vattenvikt**	**Densitet**
Fraktion (mm)	Mätning 1	Mätning 2	Mätning 3	Medel	(g)	(g/cm3)
2 (4 cl)	47,95	48,20	48,10	48,08	22,08	2,63
1 (2 cl)	22,35	22,18	22,20	22,24	11,02	2,64
1 (4 cl)	47,48	47,42	47,22	47,37	22,37	2,63
0,5 (2 cl)	22,95	22,66	22,63	22,75	10,81	2,62
0,5 (4 cl)	47,69	47,74	47,86	47,76	22,01	2,61
0,25 (2 cl)	23,16	23,12	23,39	23,22		
0,25 (4 cl)	47,84	47,90	48,19	47,98		
0,125 (2 cl)	22,74	22,79	22,86	22,80		
0,125 (4 cl)	46,70	47,19	46,94	49,94		
<0,125 (2 cl)	19,57	20,04	20,25	19,95		
<0,125 (4 cl)	41,68	41,18	41,50	41,45		

	Mätning 1	Mätning 2	Mätning 3	Mätning 4	Medel (g)
0-2 mm (209,93 cm^3)	297,16	297,70	297,53	297,03	297,36