

Avd Byggnadsmaterial

Utprovning av nytt betong- proportioneringsprogram anpassat för krossballast

Fredrik Lidberg

ISRN: LUTVDG/TVBM--11/5082—SE (1-42)

ISSN: 0348-7911 TVBM

© Copyright Fredrik Lidberg

Lunds tekniska högskola
Avdelningen för Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Detta examensarbete har utförts i samarbete med Cementa AB och Avdelningen för Byggnadsmaterial på Lunds Tekniska Högskola, som den avslutande delen av min civilingenjörsutbildning vid Väg- och Vattenbyggnadsprogrammet på LTH.

Jag vill tacka min handledare Hans-Erik Gram från Cementa AB som lät mig göra exjobb hos honom samt för intressanta studiebesök på CBI och besökta betongfabriker.

Jag önskar också tacka personal från LTH och då främst handledare bitr. universitetslektor Katja Fridh samt examinator professor Lars Wadsö för råd och vägledning under arbetet. Vidare önskar jag också tacka forskningsingenjörerna Bo Johansson och Stefan Backe för praktisk hjälp under laborationer samt övriga examensarbetare på Avdelningen för Byggnadsmaterial för hjälp under arbetets gång och slutligen mina korrekturläserskor.

Lund, januari 2011

Fredrik Lidberg

Sammanfattning

Vid betongtillverkning används i Sverige idag stenkross som grov ballast, medan det främst är naturgrus från rullstensåsar som nyttjas till den finaste ballasten (stenar som är mindre än 4 mm). Det sistnämnda börjar dock lokalt ta slut och ersättningsmaterialet som finns i tillräcklig mängd och inom rimligt transportavstånd är grus från krossat berg. Dock har det visat sig att betong tillverkad med grus av den här storleken som är framställt genom krossning, får andra egenskaper än betong tillverkad med ballast gjord med naturgrus. Generellt så är små krossgruskorn mer kantiga och avlånga till formen och har en mer ojämn yta än naturgruspartiklar av samma storlek. Byter man naturgrus mot krossgrus i ett betongrecept rakt av förändras därför den färskas betongens egenskaper såsom dess arbetbarhet, det vill säga hur gjutbar den blir. Därför försöker nu Cementa AB att proportionera recept utifrån andra teorier än vad man tidigare länge gjort i Sverige. Proportioneringsprogrammet som är under framtagning bygger på teorierna *Compressible Packing Model* (CPM) [4] och *Partikel Matris Modellen* (PMM) [5]. De går ut på att ballastpartiklar som är större än två mm karakteriseras genom att man undersöker hur tätt de kan packas, vilket berättar hur mycket hålrum det finns mellan stenpartiklarna. Genom att testa detta med så kallad *lös packning*, beaktar man att natur- och krossmaterial packas olika. Ballastmaterial mindre än två mm är inte möjliga att enbart karakterisera med packning, utan dessa undersöks också genom att de reologiska egenskaperna tas fram med hjälp av *bruksförsök*. Bruk är en blandning mellan cement, vatten och finkornig ballast. Genom att göra *utflytmätningar* med bruk så kan det så kallade *flytmotståndet* bestämmas. Flytmotståndet är en reologisk parameter som beror på mängdförhållandet mellan cement och vatten samt på egenskaperna hos den finkorniga ballasten i bruket. Under utflytförsöken har en *Hägermankon*, som är en liten sättmåttskon använts.

Fyra betongfabrikers ballastmaterial har undersökts och resultatet är att krossmaterial har sämre packningsvärden än naturmaterial. Resultat från bruksförsöken är mer svårtolkade då programmet fortfarande är under uppbyggnad. På grund av detta har det inte varit möjligt att anpassa uppmätta värden till recept som används i fabrikerna i dagsläget. Dock är karakteriseringsmetoden som är framtagen så pass lättanvänd att den kan utföras på betongfabriker framöver utan att det krävs några stora investeringar i undersökningsutrustning. Detta är positivt eftersom fabrikerna önskar kunna testa vad övergången från natur- till krossgrus kommer få för effekter på deras nuvarande recept.

Fortsatta försök för att säkerställa känsligheten i karakteriseringsmetoden krävs, följt av fullskaliga gjutprov av betong på fabriker, när recept från programmet har kunnat tas fram.

Abstract

In concrete production in Sweden today crushed rock are used as the large sized aggregate, while it is primarily pebbles from boulder-ridges that are used as the finest aggregates (stones that are smaller than 4 mm). The latter is however starting to locally run out and replacement materials that are available in sufficient quantities and within reasonable distance are gravel from crushed rock. However, it appears that concrete made with aggregates of this size, which are produced by crushing, have different properties than concrete made with aggregates from pebble. Generally, small crushed gravel grains are more angular and elongated in shape and have a more uneven surface than natural gravel particles of the same size. If you change from pebbles to crushed gravel in a concrete recipe without making any other changes, the fresh concrete will receive modified properties, such as its workability, which is how easy it will be to cast. Therefore Cementa AB is now trying to proportion recipes based on other theories than those previously used in Sweden. The proportioning program which is under development, is based on the two theories *Compressible Packing Model* (CPM) [4] and *Particle Matrix Model* (PMM) [5]. The idea is that the aggregate particles larger than two mm is characterized by examining how closely they can be packed together, which tells how large the void between the stone particles is. By testing this with so called *loose packing*, you respect that pebbles and crushed gravel are packed differently. Aggregates smaller than two mm are not possible to characterize only by packing, but are also being investigated through *experiments with mortar*, by which the rheological properties are determined. Mortar is a mixture of cement, water and fine aggregates. By doing *flow out measurements* of the mortar the so called *flow resistance ratio* can be determined. The flow resistance ratio is a rheological parameter that depends upon the ratio of the cement and water quantities, and the characteristics of the fine-grained aggregates in the mortar. During flow out measurements a *Hägermancone* is used, which is a small slump cone.

Aggregates from four concrete factories have been investigated and the result is that the crushed gravel has lower packing value than pebble. Results from the mortar experiments are more difficult to interpret since the program is still under construction. Because of this, it has not been possible to adjust the measured values to the recipes used in factories in the current situation. However, the characterization method that is developed is so easy to use that it can be performed at concrete factories in the future without requiring investments in advanced equipment. This is positive, for the factories want to test the effects of what the changeover from natural to crushed gravel will have on of their current recipes.

Further tests to ascertain the sensitivity of the characterization method are required, followed by full-scale casting of concrete at factories, when recipes from the program have been produced.

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Genomförande	1
1.4 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Betong	3
2.2 Färsk betong	3
2.2.1 Konsistens	4
2.2.2 Reologi	6
2.2.3 Stabilitet	8
2.3 Ballast	8
2.3.1 Kornstorleksfördelning	9
2.3.2 Naturgrus användning	11
2.3.3 Geologi	12
2.3.4 Naturgrusets fördelar	13
2.3.5 Dagsläget och miljöaspekter	13
2.3.6 Krossmaterial	15
2.3.7 Effekter av övergång till krossgrus	16
2.3.8 Dålig ballast	16
2.3.9 Packning	17
2.4 Proportionering	17
2.4.1 Proportionering enligt Betonghandboken	19
2.4.2 Proportionering enligt Cementa AB:s program	20
2.4.2.1 Indata	20
2.4.2.2 Teori bakom programmet	21
3 Empiri	26
3.1 Material	26
3.1.1 Betongelementfabriken	26
3.1.2 Transportbetongfabrik 1	27
3.1.3 Transportbetongfabrik 2	27
3.1.4 Transportbetongfabrik 3	27
3.2 Siktning	28
3.3 Kompaktdensitet	28
3.4 Lös packning	28
3.5 Bruksförsök	29
3.6 Prövade men förkastade undersökningsmetoder	32
3.6.1 Spädmetoden	32
3.6.2 Icke-spädmetoden	32

4 Beräkningar och resultat.....	34
4.1 Fraktioner större än 2 mm.....	34
4.2 Fraktioner mindre än 2 mm.....	34
5 Diskussion.....	37
5.1 Diskussion kring felkällor	38
6 Slutsats.....	40
6.1 Framtida undersökningar.....	40
Referenser	41
Bilaga 1, Konsistensklasser	
Bilaga 2-11, Ballastprotokoll fraktioner >2 mm	
Bilaga 12-15, Ballastprotokoll fraktioner <2 mm	

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I Sverige används årligen cirka 20 miljoner ton betong [6]. Betong tillverkas av ballast, vatten, cement, tillsatsmaterial och tillsatsmedel. Som finkornigt ballastmaterial (partiklar mindre än fyra mm) har i vårt land framförallt naturgrus i form av avlagringar från inlandsisen använts. Dock börjar det råda lokal brist på dessa resurser och återstående rullstensåsar är i stor utsträckning belagda med bevarandeskydd [7]. Det alternativ man funnit, som dels finns i erforderlig mängd och dels finns inom lönsamt transportavstånd, är krossat berg. Försök har visat att det är möjligt att nyttja *helkross*, det vill säga enbart krossat berg, som ballast i betong. Men på grund av att bergmaterials sammansättningar varierar, så varierar även kvaliteten på den färdiga betongen i stor utsträckning. Främst beror detta på att krossballast innehåller mer flakiga (det vill säga mer avlånga) och kantiga partiklar samt mer filler (finmaterial med partikelstorlek mindre än 0,063 mm) än vad naturballast gör. Det får till följd att den färskas betongens egenskaper framförallt i form av *arbetbarhet* ändras [6]. Detta innebär att man kommer tvingas använda en annan proportioneringsmetodik för betong i framtiden. För att tackla detta har Cementa AB tagit fram ett nytt proportioneringsprogram som bygger på en fördjupad karakterisering av ballast, med packningsförsök samt reologisk undersökning av finballasten. Dataprogrammets huvudsyfte är att underlätta övergången från naturgrus till krossgrus för betongfabriker. Cementa AB samarbetar med ett antal företag som planerar att börja tillverka betong med krossgrus och ballast från ett antal av dessa har undersökts inom ramen för examensarbetet.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet var att ta fram ballastspecifika parametrar som krävdes som indata för Cementa AB:s proportioneringsprogram samt om möjligt anpassa dessa för respektive betongfabrik.

1.3 Genomförande

Laborationer med fokus på de finaste ballastfraktionerna (0-2 mm) utfördes med material från betongfabriker som planerade börja använda Cementa AB:s proportioneringsprogram. De ballasttyper som användes på fabrikerna karakteriserades för att erhålla indata till programmet. Försök genomfördes främst i form av *lös packning* samt *utflytmätning* på bruk (se kapitel 3.4 och 3.5).

1.4 Avgränsningar

Under examensarbetet har undersökning av recept med tillsatsmedel och tillsatsmaterial inte undersökts, eftersom detta skulle medfört ett alltför omfattande arbete. Därtill undersöktes inte heller samtliga fabriker som avser börja använda Cements AB:s program, utan antalet kom att vara fyra stycken. Dessa valdes så att så många som möjligt av de olika tillverkningsprodukterna (från självkompakterande betong till trögflytande betong) som fanns bland fabrikerne innefattades.

2 Teori

2.1 Betong

Betong har beståndsdelarna: *vatten*, *cement*, *ballast*, *tillsatsmaterial* och *tillsatsmedel*. Vattnet tillsammans med cementen är bindemedlet i blandningen och benämns *cementpasta*. Dess egenskaper bestäms nästan fullständigt av förhållandet mellan de två ingående komponenterna och uttrycks i form av det så kallade vattencementtalet, *vct* (se ekvation nedan).

$$vct = \frac{W}{C}$$

W är mängden vatten i kg eller kg/m^3
 C är mängden cement i kg eller kg/m^3

Cement är ett *hydrauliskt bindmedel*, vilket betyder att det är ett ämne som när det reagerar med vatten stelnar och därefter är beständigt mot vatten. Tillsatsmaterial är exempelvis *flygaska* och *silika* som tillsätts för att modifiera cementpastans struktur, i syfte att till exempel öka hållfastheten. Exempel på tillsatsmedel är *flyttillsatser* (ibland benämnda *plasticerare*) som kan ändra konsistensen och reducera vattenbehovet samt *luftporbildare* vars främsta syfte är att öka betongens frostbeständighet.[2]

Byggnadsmaterialet betong karakteriseras av god beständighet, formbarhet och hållfasthet, vilket gör att det är mycket lämpligt att använda i bärande konstruktioner som stommateriell. Jämfört med andra material inom byggbranschen så har betong en särställning i det avseendet att det oftast levereras som "råvara". I och med att den fortfarande är formbar och dess egenskaper därmed inte är helt bestämda, utan kan påverkas genom både önskvärt och ofördelaktigt agerande. Exempel på detta är vibrering tillräckligt länge, alternativt för länge, och härdning under goda eller usla förhållanden. För lång vibrering kan leda till *separation* (se kapitel 2.2.3) och härdning under ofördelaktiga förhållanden, exempelvis minusgrader, kan leda till inre uppsprickning, båda sakerna resulterar i sänkt hållfasthet [2]. Att känna till hur betong bör behandlas då den ännu inte stelnat är således viktigt. Vidare kan mycket information beträffande vad den färska betongen kommer ha för *reologiska* egenskaper (se kapitel 2.2.2) utläsas ur undersökningar av *bruk* (cement, vatten och partiklar <2 mm) eller *mikrobruk* (cement, vatten och partiklar <0,25 mm) [6, 8].

2.2 Färsk betong

Undersökningar bland beställare av betong visar att de ofta fokuserar på betongens beskaffenhet då den är i färsk form. Kunderna tycker att det viktigaste beträffande varan, är att den levereras i tid, har beställd konsistens,

att den är pumpbar och först långt ner på prioriteringslistan kommer önskemål om den hårda betongens egenskaper, såsom vct.[9]

Egenskaper hos *färsk betong* påverkar den stelade betongens kvaliteter och främst bland dessa är den färska betongens *stabilitet* och dess *arbetbarhet*. God stabilitet betyder att delmaterialen inte separerar under produktionsprocessen, vilket kan ske vid exempelvis långvarig vibrering. Begreppet god arbetbarhet innebär gjutbarheten hos betongen. Det vill säga hur lätt betongmassan kan komprimeras medan den fortfarande förblir homogen, samtidigt som den utan svårighet kan fylla ut formar och omsluta armeringsstänger. Låg arbetbarhet innebär således att mycket energi måste tillföras betongen genom vibrering och vice versa. Arbetbarheten höjs ofta idag, främst i självkompakterande betong, med hjälp av superplasticerare som motverkar sammanklumpning av finpartiklar och genom att cementpastaandelen ökas genom att mer filler tillsätts [6]. Dessa båda tillsatser frigör vatten vilket ökar rörligheten i den färska betongen. Exakta metoder för att mäta just arbetbarheten saknas dock, varför man istället mäter konsistensen på betongen och/eller dess reologiska egenskaper.[1, 2]

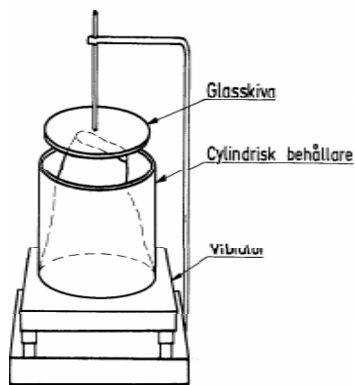
2.2.1 Konsistens

De vanligaste konsistensmått, både i Sverige och utomlands, är *sättnmättet* för betong med lös konsistens och *vebe-talet* för betong med styv konsistens. För mycket lättflytande betongkonsistenser bestäms istället *utbredningsmättet* ibland kallat *flytsättnmättet*.

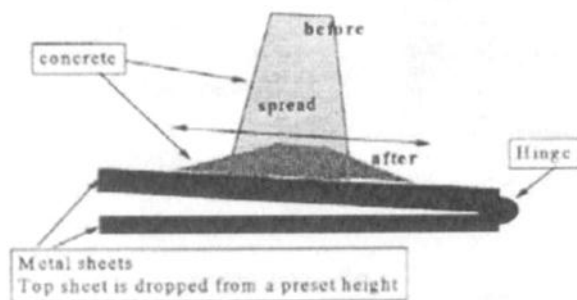
Sättnmättet kontrolleras genom att en 300 mm hög stympad kon fylls med betongmassa och kompakteras på ett standardiserat sätt. Därefter lyfts konen och man mäter sedan höjdskillnaden mellan den färska betongen och konen (se Bilaga 1). Konen ska vara öppen i båda ändarna, ha en bottendiameter på 200 mm och en toppdiameter på 100 mm.[1]

Den svenska uppfinningen *vebemätaren* mäter det så kallade vebe-talet som är tiden det tar för en betongmassa att omformas från en sättkon till en cylinder, under vibrering (se Figur 1).[2]

Utbredningsmättet bestäms med hjälp av standardiserade fällningar av ett *fallbord*. Betongmassans diameter efter sista fällningen betecknar utbredningsmättet (se Figur 2).[1]



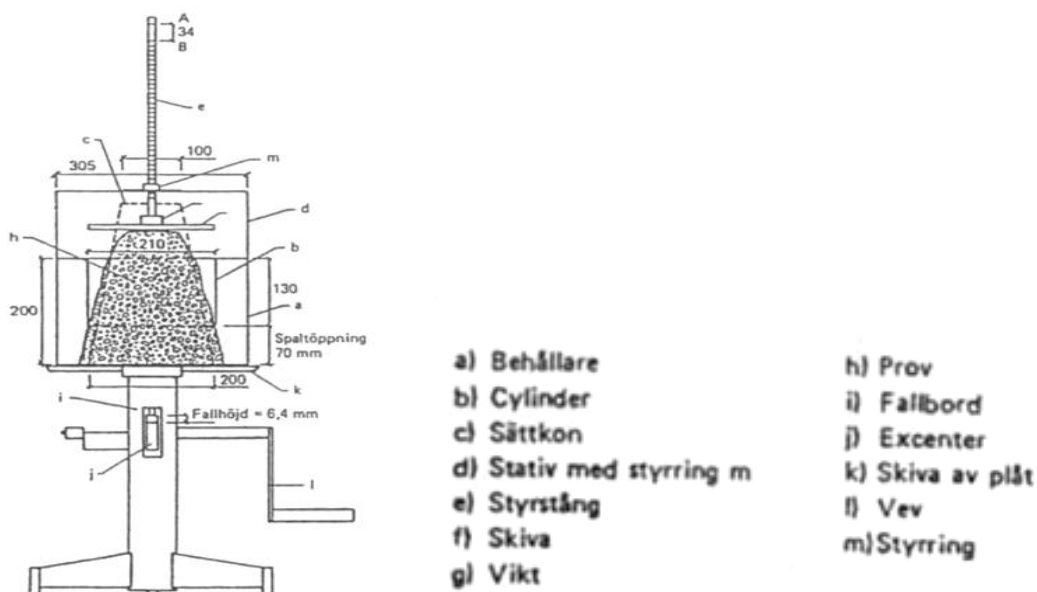
Figur 1 Vebe-mätare.[2]



Figur 2. Exempel på fallbord som används för att mäta utbredningsmättet.[1]

Dock så är det inte möjligt att tillverka en betong som exakt uppfyller ett förutbestämt konsistensvärde, på grund av att betong gradvis stelnar så snart blandandet avbryts. Därför anger man en önskvärd beskaffenhet via en så kallad *konsistensbenämning*, som innefattar ett visst konsistensintervall (se Tabell 1 och Bilaga 1). Om endast något av ovanstående konsistensmått nyttjas för att karakterisera betongen så är det ofta lämpligt att bifoga ett subjektivt bedömande, i form av ord såsom ”kärvt” eller ”kletigt” till analysprotokollet. Det finns dock ett ytterligare sätt för konsistensmätning och detta anses vara det som bäst skattar den färskas betongens gjutbarhet. Det är att bestämma *omformningsmättet* med en så kallad omformningsmätare. Detta test är lämpligt att nyttja vid under-sökningar av lättflytande betong.[1, 2]

En omformningsmätare mäter det antal fall hos ett fallbord som erfordras för att en sättkon, placerad i en plåtcylinder på ett fallbord ska omformas till en cylinder (se Figur 3). Desto färre slag som behövs desto bättre är arbetbarheten hos betongen.[1]



Figur 3. Omformningsmätare med teckenförklaring.[1]

Direkt när man blandar betong så sker en viss minskning i gjutbarheten på grund av initiala kemiska reaktioner mellan cement och vatten. Reaktionshastigheten minskar efter några minuter men avstannar inte helt. Fenomenet benämns *dormantfas* och ibland *konsistensförlust* eller *sättningsförlust*, eftersom dess effekt kan mätas med just sättningsmått. Konsistensförlusterna ökar med ökande temperatur. Detta på grund av att cementreaktionen med vatten går snabbare samt att mer vatten avdunstar vid högre temperatur. För att kompensera för konsistensförlusten tillförs ibland extra blandningsvatten på byggarbetsplatsen. För att vidmakthålla den proportionerade hållfastheten måste i så fall också extra cement tillföras i syfte att bibehålla vct. ”Detta är mycket viktigt. Det har ibland förekommit att man på byggarbetsplatsen hållt vatten i betong som tillstuvnat så mycket att den bedöms vara ogjutbar eller mindre gjutbar. Detta sätt att ”färskas upp” betongen leder till mycket stor hållfasthetsförlust. 30 % eller mer är inte ovanligt.”[1] Ett bättre sätt att minska konsistensförlusten är att tillsätta en del av flyttillsatsen då betongen levereras till byggarbetsplatsen. Detta fordrar dock att leveransen sker med roterbil.[1]

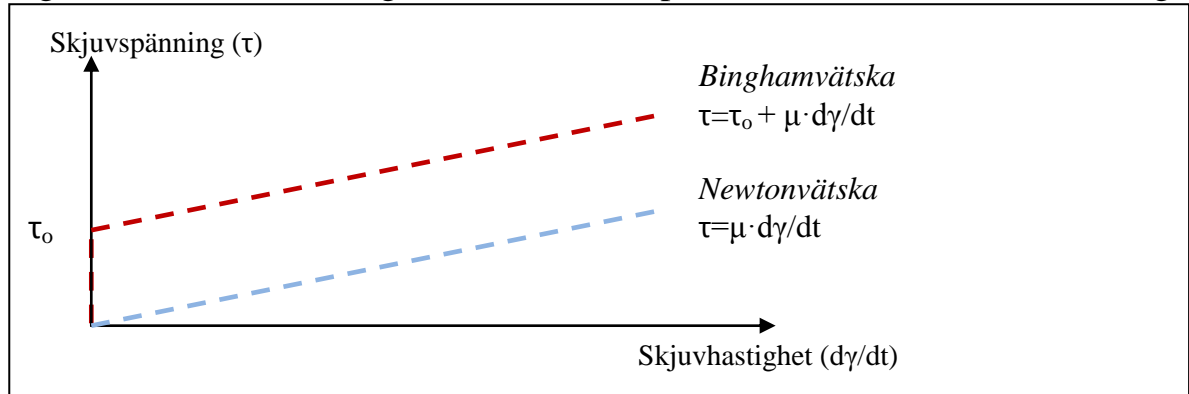
Tabell 1. Värderna för konsistenser enligt olika mätmetoder, måtten är angivna i mm och Vebe-talet i sekunder. SF-konsistenserna är olika klasser av självkompakterande betong (skb). [2, 10]

Konsistens	Sättningsmått	Vebe-tal	Utbredningsmått	Flytsättningsmått
Jordfuktig (J)	-	> 20	-	-
Mycket styv (SS)	-	20-10	-	-
Medelstyv (S)	0-20	10-5	-	-
Plastisk (P)	20-50	5-3	-	-
Trögflytande (T)	50-100	-	-	-
Lättflytande (L)	100-150	-	-	-
Halvflyt (HF)	150-200	-	450-520	-
Fullflyt (FF)	200-240	-	530-620	-
Specialflyt (SF1)	-	-	-	550-650
Specialflyt (SF2)	-	-	-	660-750
Specialflyt (SF3)	-	-	-	760-850

2.2.2 Reologi

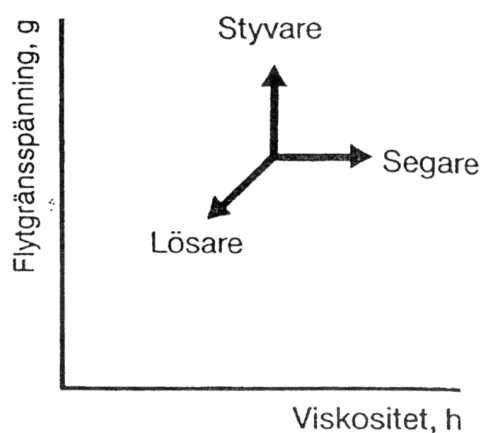
Reologi är läran om materialets deformations- och flytegenskaper. Arbetbarheten hänger samman med deformationsegenskaperna hos den färskbetongen, vilka beror på egenskaperna hos ballasten och cementpastan samt förhållandet dem emellan. Färsk betong beskrivs med reologiska termer som en *Binghamvätska* eller som ett *tixotrop* material. Detta betyder att det är ett material som både har *inre kohesion* (τ_0) och *plastisk viskositet* (μ), vilket innebär att om betongmassan utsätts för skjuvning så kommer den inte reagera förrän den inre kohesionen (ibland även kallad *flytgränsspänningen*) uppnås. Därefter ökar *skjuvspänningen* proportionellt mot *skjuvhastigheten* (dy/dt). I

Figur 4 illustreras en Binghamvätska (exempelvis tandkräm eller färsk betong)



Figur 4. Exempel på hur två olika vätskor beter sig då det utsätts för skjuvning. Båda med samma viskositet men Binghamvätskor har en inre kohesion som gör att det krävs mer spänning innan de börjar röra sig.

och en Newtonvätska (exempelvis vatten eller etanol). Ett enkelt tanke-exempel för att förklara inre kohesion i en vätska, är att föreställa sig ett vattendrag och att vinden blåser parallellt med ytan. Vattenytan börjar då röra på sig i princip direkt medan det skulle krävas betydligt starkare vindstyrkor för att en färsk betongblandning skulle börja röra sig. Enkelt uttryckt skulle man alltså kunna beskriva den inre kohesionen som den minsta energimängd som krävs för att sätta betongmassan i rörelse medan viskositeten är ett mått på massans seghet när den väl är satt i rörelse. En översättning av tidigare beskrivningar av färsk betong så som ”seg”, ”styv” och ”lös” till reologiska termer finns i Figur 5. För att mäta de reologiska egenskaperna kan en *viskosimeter* eller *reometer* användas. Med den här typen av instrument får man en mer detaljerad mätning än om man endast skulle bestämma arbetbarheten med hjälp av en konsistensbestämning till exempel med sättmåttet. Detta för att en reometrisk undersökning ger båda parametrarna inre kohesion och plastisk viskositet, medan tidigare beskrivna konsistens-mätningmetoder endast ger endimensionella resultat.[1, 6]



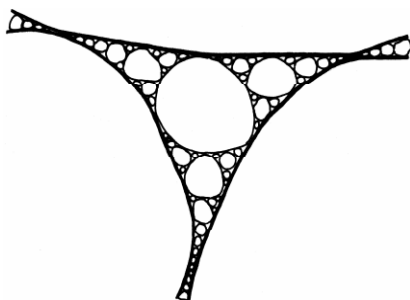
Figur 5. Tolkning av äldre konsistensbegrepp i reologiska termer.[3]

2.2.3 Stabilitet

I betongsorter med låg inre kohesion så som flytbetong och självkompakterande betong är stabilitetsutmaningarna extra stora. I dessa sjunker stenar lätt på grund av densitetsskillnaden mellan ballast (cirka 2700 kg/m³) och cementpasta (cirka 1700 kg/m³). Sådan stenseparation kan resultera i sprickbildning som följd av ojämn krympning. För att minska risken för stenseparation brukar man försöka använda en ballast som är välgraderad utan partikelsprång. Ibland ökas istället mängden filler och ballast av storleken 0-8 mm på bekostnad av de grövre fraktionerna. Dock leder detta lätt till en betong som har hög plastisk viskositet, det vill säga är seg och kletig, vilket kan innebära svårigheter vid *glättning* (avjämning av betongytan) och bearbetning. Med hjälp av tillsatsmedel i form av stabilisatorer och flyttillsatsmedel kan fillerhalten däremot minskas med fortsatt bibehållen stabilitet. Risken för stenseparation kan undersökas genom att ett kärl med färsk betong utsätts för vibrering, varefter man vid ett antal tider mäter tjockleken på det översta stenfria skiktet i betongmassan.[1, 11]

2.3 Ballast

Ballasten är bergmaterialet som man blandar i betongen och det är den beståndsdel som står för betongens egentliga hållfasthet. Andelen ballast i betong uppgår vanligen till cirka 70 % av volymen. Råmaterialet till den grovkorniga delen av ballasten (partiklar som är fyra mm och större) är främst krossad sten, så kallad *makadam* och i ett fåtal fall runda stenar, så kallad *singel* från till exempel rullstensåsar. Basen för fina storlekar har däremot nästan helt utgjorts av material från grusåsar. Dock pågår i Sverige en övergång mot större andel kross, så kallad *stenmjöl* även bland finmaterialen. Sammansättningen av kornfraktionerna som ballasten består av varierar beroende på recept och de egenskaper man önskar i den färdiga blandningen.[2]



Figur 6. Ballastfördelning som helt fyller ut hålrummen.[2]

Eftersom att betongens svagaste del oftast är cementpastan eller fasgränsen mellan det enskilda ballastkornet och pastan, så skulle en idealbetong, med avseende på hållfasthet, bestå av enbart ballast i alla hålrum (se Figur 6). Detta är dock inte praktiskt möjligt.[2]

2.3.1 Kornstorleksfördelning

De olika kornstorlekar som ballast förekommer i definieras som *grov ballast* om partiklarna är större än fyra mm och som *fin ballast* om de är mindre än fyra mm [12]. Vidare används nedanstående beteckningar:

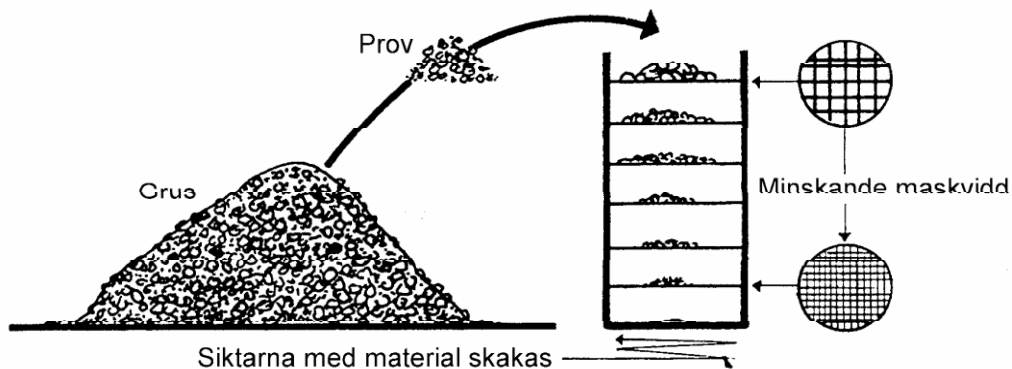
sten > 8 mm

fingrus ≤ 8 mm

sand ≤ 4 mm

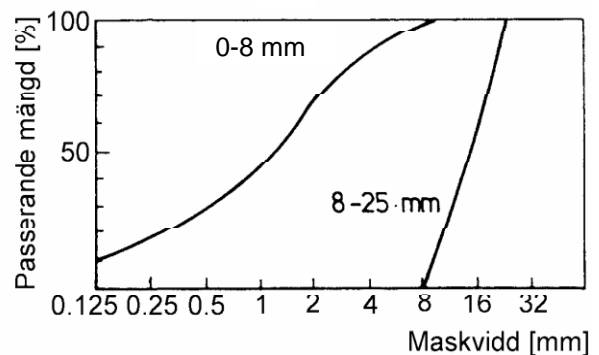
filler ≤ 0,063 mm [12]

Kornstorleksfördelningen för olika materialprov brukar åskådliggöras i form av *siktkurvor*, som framställas utifrån resultatet av siktningar av ballastmaterialen (se Figur 7 & Figur 8). Just kornstorlekssammansättningen är en av de egenskaper hos ballasten som främst påverkar den färska betongen, det är också en av de få egenskaper hos ballast som är möjlig att modulera. Anledningen till att kornstorleksfördelningen är viktig är att den har effekter på vattenbehovet och den färska betongens arbetbarhet och stabilitet.[2]



Figur 7. Principskiss av siktning.[2]

Materialet som stannar på varje sikt vägs, varefter varefter mängderna omräknas till procent (%) av hela provet. Man avsätter sedan i diagrammet den mängd som totalt passerat varje sikt och erhåller ett s.k. siktdiagram.

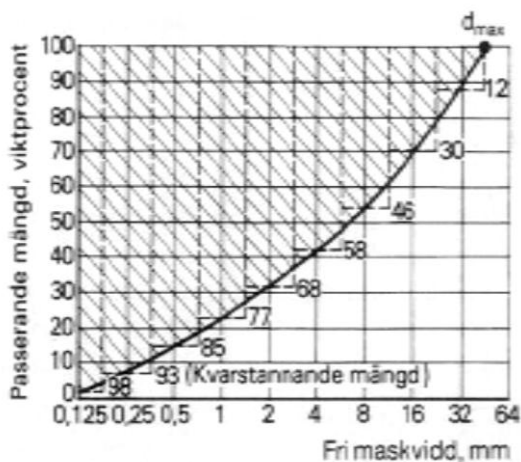


Figur 8. Principbeskrivning på framtagning av siktkurva och exempel på två siktkurvor.[2]

Förutom kornstorleksfördelningen så påverkar egenskaperna *fillerhalt* (mängden partiklar <0,125 mm), *maximal kornstorlek*, *kornform* och *ytbeskaffenhet* betongens sammansättning. Finmaterialhalten i ballasten har stor betydelse för arbetbarheten och risken för vattenseparation samt sug- och pumpbarheten. Finmaterial är också viktigt då vattentät betong önskas och då släta porfria ytor ska tillverkas.[3]

Ballastkornens yta påverkar vattenbehovet i och med att hålrum och ojämnheter på kornen måste fyllas med cementpasta, vilket gör att stor area fodrar mer pasta än liten. Ballast karakteriseras ibland med uttrycket *specifik yta*, som är förhållandet mellan kornarea och massa. Den ökar med minskande kornstorlek. Även avvikelser från sfärisk form ger större partikelnya [6]. Dock används sällan detta begrepp vid proportionering i Sverige, utan istället nyttjas *finhetsmodulen (FM)*, maximal kornstorlek (d_{max}) eller passerad mängd (y_0) på 4 mm-sikten [3]. FM är ett mått på medelkornstorleken men den säger ingenting om själva fördelningen bland kornfraktionerna. FM erhålls genom att ytan ovanför siktcurvan beräknas på sådant sätt som framgår av Figur 9. Finkornigare blandningar kommer förskjuta kurvan uppåt vilket kommer medför lägre värden på FM. Noterbart är att finare materialstorlekar än 0,125 mm inte beaktas vid beräkning av FM.

Att öka ballaststorleken d_{max} i syfte att minska cement- och vattenåtgången är möjligt till en viss gräns. Dels sätter formar och täthet mellan armeringsjärn gränser för hur mycket man kan öka stenstorleken, men större d_{max} än 40 mm ger sällan några fördelar i normal konstruktionsbetong. Betongens permeabilitet ökar också då d_{max} ökas. Större stenpartiklar innehåller fler mikrosprickor än små, varför hållfastheten hos betongen minskar med ökande stenstorlek.[2]

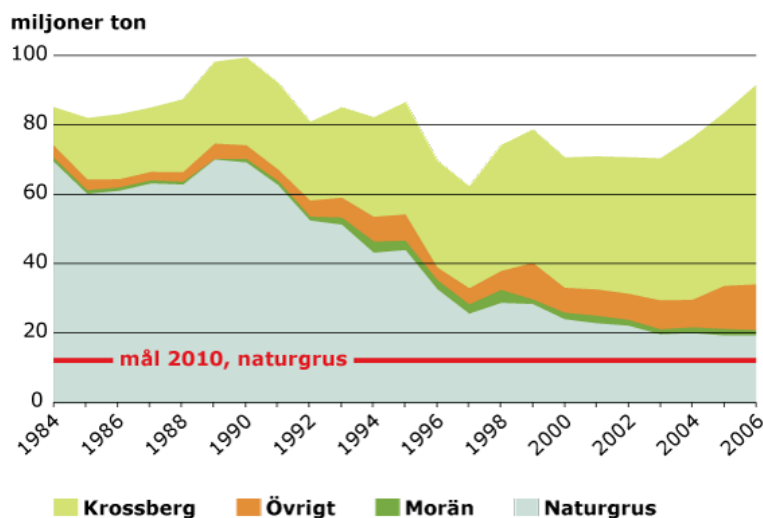


Figur 3.2:5. Finhetsmodulen
 $FM = (0,98/2) + 0,93 + 0,85 + 0,77 + 0,68 + 0,58 + 0,46 + 0,30 + 0,12 = 5,18$.

Figur 9. Exempel på beräkning av finhetsmodulen (FM). 0,125 mm är den minsta fraktionen som tas med vid beräkning av FM och endast halva värdet av den kvarstannande mängden beaktas från denna fraktion.[3]

2.3.2 Naturgrus användning

I Sverige utgör rullstensåsarna från istiden viktiga källor till grundvatten och dessutom är de unika naturmiljöer. Samtidigt är åsarna och andra glaciala avlagringar också av stor betydelse för betongindustrin, i och med att sand och grus (nedan benämnt *naturgrus*) utvunnet ur dessa, fungerar väl som finkornig ballast. I syfte att skydda denna ändliga naturresurs infördes 1996 en skatt på utvinning och försäljning av naturgrus. En sekundär anledning var att främja övergång mot mer uthålligt resursanvändande. Därtill har riksdagen, som del i ett av de 16 nationella miljökvalitetsmålen, 2001 beslutat att uttaget från naturgruskällor år 2010 maximalt får uppgå till 12 miljoner ton per år [13]. *Sveriges Geologiska Undersökning* (SGU), som är ansvarig för att följa upp och utvärdera huruvida delmålet kommer kunna uppnås, anser att det är svårt att se tydliga effekter av naturgrusskatten. De hävdar istället att styrningen via tillståndsgivning för nya och förnyade täktillstånd är det viktigaste styrmedlet. Vad de menar är att fortsätta den kraftigt restriktiva handläggningen från länsstyrelser kring naturgrustäkter, som pågått enda sedan 90-talets början, parallellt med den främjande attityd som rått kring beviljandet av nyöppning av bergtäkter. Detta i syfte att underlätta för näringsidkare att övergå från grus- till krossmaterial.[14]



Figur 10. Diagram över ballastproduktionen i landet mellan 1984-2006. I *Naturgrus* ingår även sandmaterial upptagen från sjöbottnar och kategorin *Övrigt* betecknar främst ballast från flyttbara krossverk och återvunnet material.[15]

SGU bedömer att delmålet troligen inte kommer kunna uppnås, vilket trenden i Figur 10 tyder på. Detta beror främst på att insikten om de stora förändringar som krävs för en fullständig övergång till alternativ till naturgrus inte trängt ut helt till ballastproducenter. SGU föreslår att två nya mål sätts inför år 2020 enligt nedanstående:

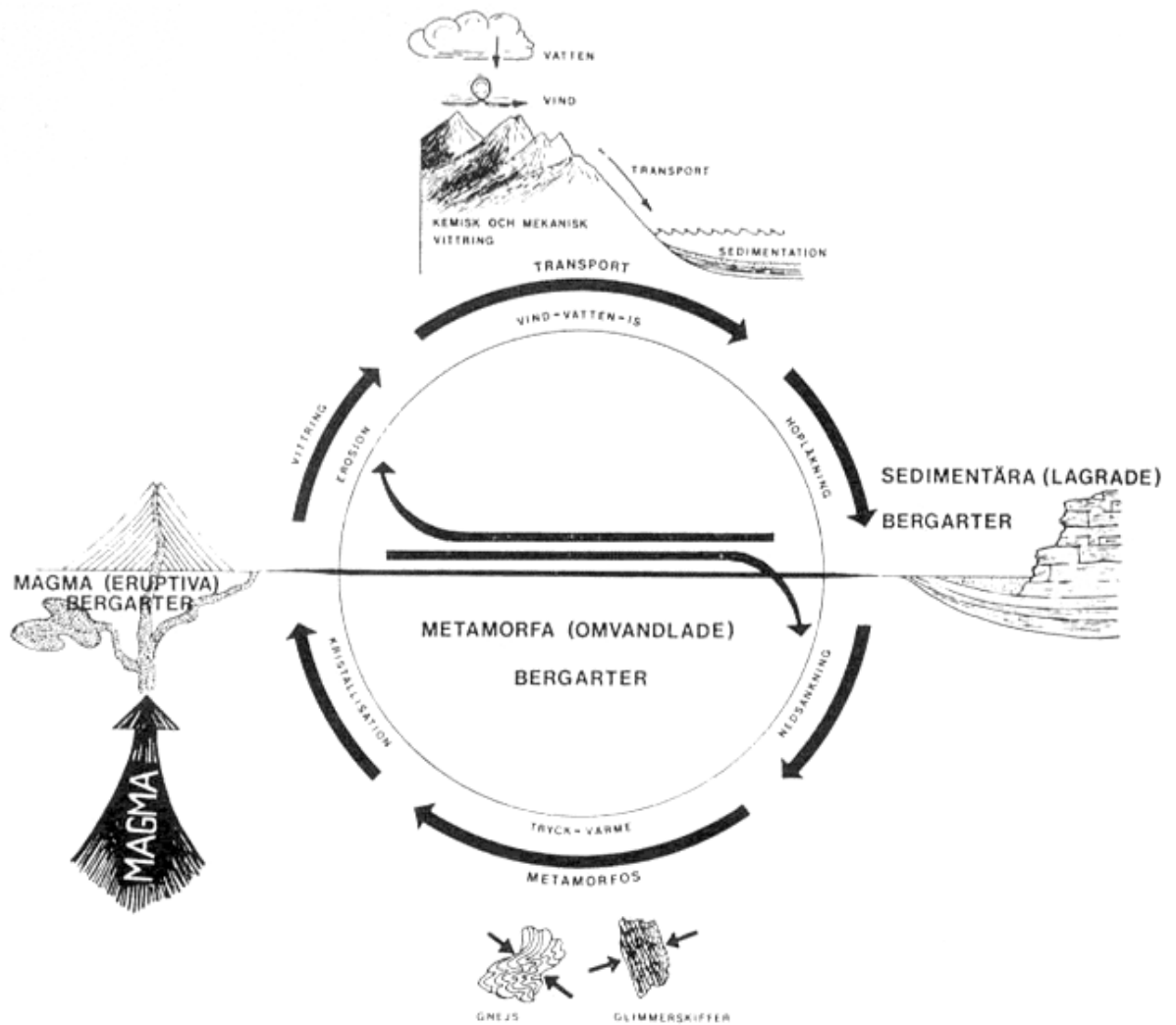
"Naturgrus nyttjas endast när ersättningsmaterial inte kan komma ifråga med hänsyn till användningsområdet.

Inga uttag av naturgrus sker i avlagringar med stort värde för dricksvattenförsörjningen och för natur- och kulturlandskapet.”

Detta anses uppnåeligt eftersom det långsiktiga behovet av naturgrus årligen endast är knappt 3 miljoner ton.[16]

2.3.3 Geologi

Klassificeringen av bergarter görs ofta i tre grupper efter dess bildningsätt: *magmatiska*, *sedimentära* och *metamorfa* bergarter (se Figur 11). Definitionen av vad en bergart är för något är något diffus, men man brukar säga att en bergart definieras som ett aggregat av *mineral*. Normalt innehåller en bergart flera olika mineral men det finns de som endast är uppbyggda av ett enda. *”Ett mineral är ett fast ämne med en bestämd kemisk sammansättning bildad genom naturliga oorganiska processer.”* I Sverige dominerar de magmatiska och metamorfa bergarterna genom att urberget består av bergarterna *granit* och *gnejs*. Granit är en magmatisk djupbergart som är bildad nere mellan jordskorpan och manteln. Den har kylts av långsamt, vilket har medfört en god tillväxtmiljö för gitterstrukturen som har resulterat i stora mineralkorn. Detta får effekten att de har god hållfasthet och därför är lämpliga som råvara i ballastindustri. Gnejs däremot är en metamorf bergart som uppkommit vid högt tryck nere i skorpan. Metamorfa bergarter utmärks ofta av att de har mönster i form av en folierad struktur, som följd av sammanpressning vid bildandet. Detta medföra att de har inbyggda svaghetszoner vilket gör att de är oberäknliga och ibland helt olämpliga som ballastmaterial.[17]



Figur 11. Bergartykeln.[18]

2.3.4 Naturgrusets fördelar

Naturgruset i Sverige består huvudsakligen av rester av *granitoida* bergarter som slipats runda och sorterats av inlandsisen. Hårda mineraler som *kvarts* har genom nötningen anrikats, medan mer vittringsbenägna ämnen såsom *fältspat* och framförallt *glimmer* har brutits ner och försvunnit. Även svavelhaltiga mineral, som kan orsaka beständighetsproblem i härdad betong, har så gott som helt brutits ner och försvunnit. Dessutom har ytan på gruskornen oxiderats och är kemiskt stabil. Detta ger att naturgrus som ballast är nära nog problemfritt, både rörande de reologiska egenskaperna, på grund av kornens rundhet och beträffande långsiktiga beständighetsproblem. Andra isälvsavlagringar såsom *morän* är betydligt sämre som ballast, eftersom partiklarna i dem är mindre rundade och att de innehåller större mängd vittringsprodukter.[19]

2.3.5 Dagsläget och miljöaspekter

Till ballastfraktioner större än åtta mm, har under lång tid och med goda resultat, lokalt krossade granitoida urbergmaterial använts i Sverige. När nu

betongtillverkare ska ersätta naturgrus med andra material så är det endast lokalt bergkross som finns i tillräcklig mängd och inom rimligt transportavstånd. Dock är de flesta bergtäkter i landet framtagna främst för att förse vägbyggnadsbranschen med lämplig sten. Till skillnad från det glacifluviala gruset i rullstensåsarna som är storlekssorterat, så måste kross från en bergtäkt sorteras i samband med brytning och eftersom det tidigare inte funnits stor efterfrågan på finkornig kross, så har täkter i praktiken endast sorterat sitt material som grovt eller fint. Ty vid betongfabriker har det oftast enbart funnits två fickor för ballast, en för fin och en för grov. Under krossprocessen i dagsläget erhålls ett överskott av finmaterial, så kallad stenmjöl (partiklar < 4 mm) som dock inte är optimerat för användning som finballast. För att möta framtidens krav kommer täkterna behöva göra investeringar för att kunna leverera kvalitetssäkrad finballast. Exempel på åtgärder som kan behöva göras för att höja kvaliteten på stenmjölet är omsiktning, tvättning eller bortsällning av oönskade partiklar genom vindsiktning. Det oönskade flakiga mineralet glimmer kan oftast reduceras med hjälp av vindsiktning. Även betongproducenterna kommer förmodligen tvingas tänka om, då användning av krossade finmaterial kommer fordra fler ballastfickor, eftersom att kornkurvan i allmänhet inte är optimal [7]. Dessa kostsamma åtgärder har bidragit till branschens tröghet kring genomförandet av att fasa ut användandet av naturgrus. Framöver bedöms framförallt små betongtillverkare få problem och eventuellt slås ut, vilket kommer innebära färre producenter och längre transporter.[7]

Bytet från naturgrus till krossmaterial, vars ursprungliga syfte var miljövänligt, kan alltså komma att innebära en miljööförsämring. Redan idag utgör transport av ballast 20 % av all tung varutransport. Det beräknas dock att om transport-sträckan överskrider 5-10 mil så kommer kostnaden för transporten att överstiga produktionskostnaderna för ballasten [6]. Dock finns det ytterligare miljöbelastande faktorer att ta i beaktande vid jämförandet mellan naturgrus och krossgrus. Exempelvis försämras närmiljön vid bergkrossar genom buller, damm och vibrationer samtidigt som krossbrytning är mer energikrävande än brytning av naturgrus. Därtill finns skillnader som uppkommer hos slutprodukten, själva betongen. Såsom förändringar i receptur t.ex. annan cementåtgång (produktionen av cement är mycket energikrävande) och förändrade mängder tillsatsmedel samt förändring av beständighet och livslängd. Ett tankeexempel skulle kunna vara att en närbelägen täkt ger en ballast av sådan kvalitet att dyr processteknik erfordras, medan en mer avlägsen bergstäkt erbjuder förutsättningar för att kunna tillverka en billigare betong. Således har både miljöhänsyn och ekonomi inverkan på betong- och ballasttillverkarnas framtida verksamheter. Både Lagerblad [7] och CBI [6] bedömer att betong kommer bli dyrare framöver till följd av övergången från naturgrus till finkross.[6]

2.3.6 Krossmaterial

Utomlands har betongindustrin länge jobbat med ballast uteslutande från krossmaterial, speciellt i regioner som saknat naturgrus. Dock har de sällan arbetat med granitoida bergarter, som internationellt är kända för att fungera dåligt som finballast, utan de har främst använt kalksten, men också kvartsit, diabas och basalt. Dessa ger vid krossning kubiskt formade partiklar, vilket är fördelaktigt för den färska betongens reologiska egenskaper.[20]

I Sverige kubiceras ofta krossmaterialet som används till grovballast, i syfte att minimera mängden flakiga och flisiga stenar. Dock är det endast mycket lite man kan göra för att påverka den finkorniga delen av krossmaterialet genom att bara ändra på själva krossmetoden. Detta på grund av att ju mindre partiklarna är desto mer övergår de från bergart till mineral, vilket gör att mineralens geometri i större grad påverkar dess kornform. Partiklar som består av endast en sorts mineral är de vars form är svårast att påverka, eftersom dessa klyvs efter sina specifika mineralytor. De främsta skillnaderna mellan fraktionen 0-2 mm från naturballast och från krossballast är att partiklarna i *krossat* material:

- *Har kantigare form än naturgrus.*
- *Har flakigare form än naturgruskorn. Detta är hos de finare fraktionerna korrelerat mot mängden fri glimmer.*
- *Får sin form av enskilda mineralkorn. Gäller de finare fraktionerna.[6]*

Materialen i Figur 12 och Figur 13 är exempel på undersökta ballastsorter i rapporten och även om de inte visar just fraktionen 0-2 mm så illustreras skillnaderna mellan natur- och krossmaterial tydligt redan i denna storleksordning.



Figur 12. Naturgrus från transportbetongfabrik 3 i fraktionen 8-16 mm. Notera den stora mängden runda korn med jämn yta.



Figur 13. Krossgrus från transportbetongfabrik 1 i fraktionen 11-16 mm. Notera den stora mängden avlånga, flakiga korn med ojämna yta.

2.3.7 Effekter av övergång till krossgrus

Ballastkornformen spelar roll för vattenåtgången, ty avlånga och kantiga korn kräver mer vatten än runda korn. Dels för att arbetbarheten ska vara densamma och dels för att korn som är krossade har större yta än runda korn, varför de kommer binda mer vatten. Därför kommer en övergång från naturgrus till krossat material att medföra en ökning av vattenmängderna i betongrecepten. För att inte höja vct, och därmed minska hållfastheten hos betongen, så måste också cementmängden ökas då vattenhalten höjs. Vid en sådan åtgärd måste man dock räkna med ökad risk för problem till följd av ökad krympning och värmeutveckling. Eftersom cement är en både kostsam och miljöpåfrestande komponent i betong försöker man istället ofta byta delar av vattnet mot flyttillsatsmedel. Förutom att flakiga och kantiga partiklar behöver mera vatten, så behöver de även mer finmaterial än runda. Detta beror på att färsk betong är en partikelslurry där de olika fragmenten måste kunna röra sig mot varandra.[6]

Sambandet mellan hållfastheten och kornform, ytstruktur och mineralogi är dock invecklad. Exempelvis medför viss ojämnheter på ballastkornens ytor en betong med högre hållfasthet än en som tillverkats med ett ballastmaterial av singeltyp. Medan det för arbetbarheten är betydligt viktigare med vilken kornstorleksfördelning som väljs jämfört med kornformen.[3]

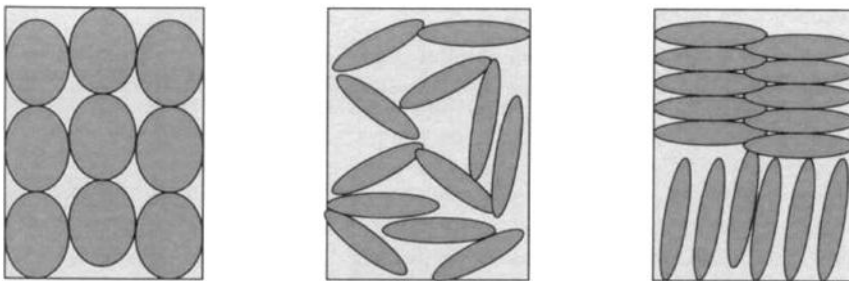
2.3.8 Dålig ballast

Skiffriga, vittrade och glimmerrika material lämpar sig dåligt som betongballast eftersom dessa kan bidra till sänkt hållfasthet och sämre vidhäftning mot cementpastan. Porösa bergarter såsom vissa typer av sprickrik kalksten innebär ökad risk för frostsador, vilket gör att även dessa bör undvikas. Korndensitetsmätningar på ballast kan ge indikationer på att vittring har skett. Dock understiger porositeten i svenska urbergsmaterial oftast en halv procent, varför kompakt- och korndensiteten nära nog enbart bestäms av den mineralogiska uppbyggnaden.[3]

Ballastmaterial som ur kemisk synpunkt är olämpliga, är de där svällande reaktioner i den färdiga betongen kan uppkomma. Bergarter som innehåller *sulfider* (exempelvis mineralet magnetkis) eller *alkalilöslig kiseltsyra* är de som främst kan innebära problem på det området. Alkalireaktiva bergarter förekommer i vårt land främst i form av opal- och flinttyper i Skåne och i vissa *fylliter* och *kvartsiter* i fjällkedjan. Även de sulfidrika bergarterna påträffas främst i fjällkedjan. Därutöver finns svällande leror så kallade *smektiter*, som då de påträffas ofta innebär problem med volymsbeständigheten. En annan sak som inverkar är graden *humus*. Vid höga halter organiskt material fördröjs hårdnandet och hållfastheten försämras. Sammantaget är dock svenska bergtäkter ganska förskonat från olämpliga bergarter.[3]

2.3.9 Packning

Det finns ett antal olika teorier kring packning, men gemensamt är att man försöker finna en fördelning så att hålrummen mellan stora partiklar fylls ut med mindre partiklar, i syfte att minimera den tomma volymen (se Figur 14). Denna volym fylls i betongproportionerandet upp med vatten, men för att möjliggöra rörlighet hos den färska betongen så måste dessutom en viss mängd vatten finnas därutöver. Detta för att pressa isär partiklarna och upphäva friktionen mellan dem. Partiklars storleksfördelning, ytstruktur och kornform påverkar packningsegenskaperna. Packningsgraden kan bestämmas på olika sätt. Antingen genom *lös packning* (se kapitel 3.4), med eller utan vibrering, *hård packning* det vill säga packning med vibrering och pålagd vikt eller packning i *ICT-apparat* (Intense Compacting Tester). I den sistnämnda metoden knådas partiklarna ihop. [21]



Figur 14. Packningen av ett flisigt material är starkt beroende av hur packningen görs.[6]

Tester har visat att lös packning utan vibrering är den modell som ger det mest sanningsenliga värdet på *hålrumsvolym*. Ty vid hård packning och lös packning med vibrering så tvingas partiklar tätare, och egenskaper som man önskar undersöka med packning, som till exempel kornform, då delvis går förlorade [6]. Detta är dock tvärt emot vad de Larrard [4] hävdar. Han förordar den hårda packningen, eftersom den ger mindre spridning i mätresultat jämfört med den lösa packningsmodellen.

Teoretiskt maximal packning för ett material med sfäriska korn, där alla korn har samma storlek, är 74 % eller exakt $\pi/(3\sqrt{2})$. För ett kubiskt material av blandad storlek på partiklarna ligger motsvarande värde på 60-64% beroende på graden av kompaktering.[4]

2.4 Proportionering

Ämnet betong kan betraktas som ett kompositmaterial bestående av två faser, ballast och cementpasta. Ballastmaterialen kallas ibland för *partikelfasen* medan cementpastadelen brukar benämnas *matrixfas*. Ballasten påverkar betongen dels genom egenskaperna från själva stenmaterialet och dels genom egenskaperna från fasgränsen mot cementpastan.[3]

Ett antal olika förutsättningar finns att beakta vid proportionering av betong och de mest centrala är:

- *Funktionskraven på färdig konstruktion.*
- *Krav på den färska betongen.*
- *Produktionsförhållandena på byggplatsen.*
- *Transportförhållandena.*
- *Betongfabrikens möjligheter.*
- *Kostnaderna.*

Exempel på funktionskrav kan vara bärrighet, frostbeständighet, skydd mot armeringskorrosion, täthet, sprickbegränsning (på grund av temperatur och/eller krympning), nötningsmotstånd, ytkvalitet och begränsad byggfukt. Beträffande krav på den färska betongen, så hänger det ofta ihop med förhållandena på byggplatsen, vilka kan medföra att man ibland önskar en viss typ av arbetbarhet och en viss typ av konsistens på betongen samt ett visst tillstyvnandeförlopp. Dock finns även krav på betongen som inte nödvändigtvis hänger ihop med omständigheterna på bygget, så som lufthalt och hållfasthet. Faktorer som kan påverka betongen utifrån ett transportperspektiv kan vara själva avståndet och vägbeskaffenheten samt mottagnings sättet på byggplatsen och på vilket sätt materialet ska förflyttas inom byggplatsen. Slutligen spelar, förutom kostnaden, även betongfabrikens produktions sätt och möjligheter till att kunna tillhandahålla specifika material roll för om man till exempel kan framställa en betong med en önskad temperatur.

Eftersom den mest kostsamma delen i betong är cement, vars mängd är direkt knuten till vattenmängden via vattencementtalet, så finns det ekonomiska incitament för att försöka hålla nere vattenhalten. Även beständighetsproblem i form av till exempel krympning kan minskas genom minskad vattenmängd. Detta kan åstadkommas genom att, med hänsyn till arbetbarheten, använda styvast möjliga konsistens och största möjliga kornstorlek, med hänsyn till konstruktionens dimensioner, armeringstäthet, transport- och gjutmetoden. Vidare kan även vattenmängden minskas genom modellerande med ballastens kornfördelning. Därtill nyttjas idag som regel alltid tillsatsmedel (till exempel flytmedel) vid de tillfällen då det förbättrar betongens egenskaper. Slutligen så måste alltid ett nytt beräknat recept testas med provblandningar och vid behov justeras.[3]

Omfattningen och inriktningen på provningar anpassas mot syftet med undersökningen, dock bör följande egenskaper alltid bestämmas för färsk respektive härdad betong [3]:

Betongmassa: *konsistens, densitet, lufthalt och temperatur.*

Hårdnad betong: *tryckhållfasthet och densitet.*

Om det vid provblandningar framkommer att ett recept är felaktigt så ska det korrigeras. Oftast är det sten- eller finhetshalten som behöver justeras. Proportioneringen görs då om från det steg där man behöver ändra. För att finna precis den konsistens som man önskar anpassar man mängden vatten i blandningen. Det framräknade värdet på vattenvolymen är att betrakta som ett riktvärde. Stor differens mellan beräknat och verkligt värde kan exempelvis bero på att proportioneringssättet man använt inte räknat med inverkan från kornform och ytstruktur hos ballasten, alternativt att olika cementsorter har olika egenskaper.[3]

2.4.1 Proportionering enligt Betonghandboken

Normbildande för svensk betongproportionering har under cirka 40 år varit Alexanderssons metod, vilken finns beskriven i [3]. Två förutsättningar för att den ska kunna tillämpas är att betongen erhållit fullgod komprimering och att delmaterialen efter transport och bearbetning fortfarande kan anses vara homogent fördelade i betongvolymen.

Tidigare erfarenheter bör ligga till grund för framtida receptframtagningar och i de fall dylika saknas på något område kan riktvärden i proportioneringsanvisningarna i [3] nyttjas. För att bygga ett recept i enlighet med [3] så krävs viss indata i form av materialuppgifter och de är:

- *Kornfördelningskurvor för de olika ballastfraktionerna.*
- *Ballastens korndensitet (riktvärde $2,65 \text{ ton/m}^3$).*
- *Cementets korndensitet (riktvärde $3,15 \text{ ton/m}^3$).*
- *Ballastens kornform, det vill säga om det är ett kross- eller naturmaterial.*

Nedanstående steg i skriven ordning används i princip alltid vid bestämning av betongsammansättningar, oavsett metod [3]:

1. Val av cementsort.
2. Val av ballast.
3. Bedömning av erforderligt vct.
4. Bedömning av erforderlig lufthalt.

5. Val av största kornstorlek, d_{max} .
6. Bedömning av lämplig konsistens.
7. Bedömning av lämplig stenhalt, material ≥ 4 mm.
8. Bedömning av lämplig finmaterialhalt, material $\leq 0,25$ mm.
9. Bedömning av vattenbehovet (samband FM eller d_{max} - konsistens - vattenhalt).
10. Beräkning av cementhalt.
11. Beräkning av övriga delmängder.

Ytterligare förfiningar kan göras genom att bedöma eller välja lämplig grad av arbetbarhet och stabilitet samt passande mängd tillsatsmaterial och lämplig tillsatsmedel.

2.4.2 Proportionering enligt Cementa AB:s program

I vanlig betong utgör partikelfasen 60-75% av volymen, men den står endast för 10-20% av betongens materialkostnad. Det finns således ett stort incitament i att ägna partikelfasens sammansättning stor omsorg så att mängd matris kan minimeras. Cementa AB:s program går ut på att maximera betongens partikelfasen med bibehållna konsistensegenskaper. Syftet med dataprogrammet är just att effektivisera befintliga recept och utgöra ett hjälpmedel för framtida byten av ballastmaterial. Ty finkorniga krossmaterial är som tidigare nämnts mer vattenkrävande än naturmaterial och det är den stundande övergången till krossmaterial som har drivit på detta nytänkande kring proportionering som programmet är ett resultat av.[21]

2.4.2.1 Indata

Programmet tar fram ett recept efter att man matat in önskat *vct*, *lufthalt*, konsistens i form av *sättnått*, om betongen ska vara *pumpbar* och om det finns någon *begränsande diameterdimension*. Vidare kan man bestämma huruvida något eller några av inlagda ballastmaterial *måste* vara med i receptet. Programmet optimerar nämligen ibland så att av exempelvis fem inlagda ballastsorter så proportionerar det ett recept där det föreslår att till exempel bara två sorters ballast ska nyttjas. (Detta är en efterfrågad styrmöjlighet från betongfabrikerna som ibland har överskott respektive underskott på vissa sorters ballast.)

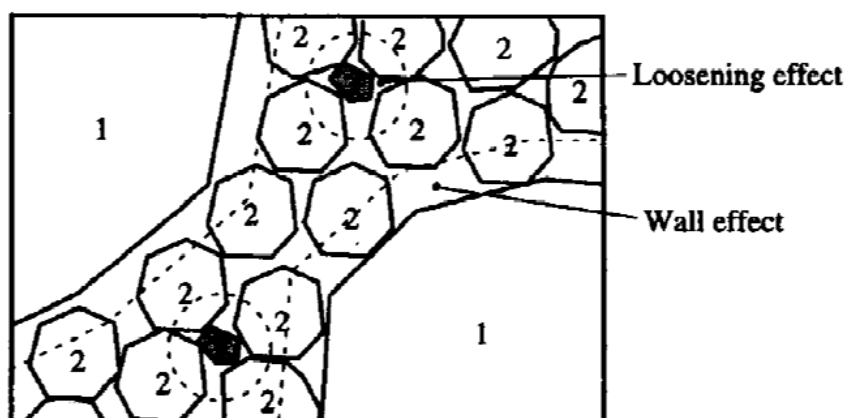
Indata för cementet till programmet är *lasersiktkurva*, *kompaktdensitet* och materialparametern k_c . Lasersiktkurvan är motsvarigheten till den "vanliga" siktcurvan fast för små partiklar, i intervallet 2 mm ner till 0,02 μm [22].

Indata för ballastfraktioner som är större än 2 mm är *vattenabsorptionen*, *packningsvärdet*, som tas fram genom lös packning, *siktkurva* och *kompakt-densiteten* samt huruvida stenen är ett *natur-* eller *krossmaterial*.

Ballastfraktioner som innehåller material mindre än 2 mm kräver även karakterisering med hjälp av *bruksförsök* (se kapitel 3.5). Utifrån bruksförsök kan materialparametern k_f tas fram, vilken tillsammans med ovanstående utgör indata.

2.4.2.2 Teori bakom programmet

Cementas proportioneringsprogram bygger på teorierna *Compressible Packing Modell* (CPM) och *Partikel Matris Modellen* (PMM). CPM är framtaget av fransmannen *F. de Larrard* [4] och bygger vidare på teorin *LDPM* (Linear Density Packing Model). LDPM går ut på att en partikelstorlek packas optimalt, varefter övriga fraktioner passas in för att fylla hålrummen så mycket som möjligt. CPM är en utveckling av LDPM, men i CPM-teorin är målet att optimera packningen av alla ingående fraktioner genom ett iterativt förfarande. Modellen tar också hänsyn till samspelet mellan kornen, genom att beakta så kallade *vägg-* och *lösgöringseffekter* (se Figur 15). Enligt väggeffekten blir packningen av mindre korn intill ett större inte fullständig och enligt lösgöringseffekten kan ett mindre korn pressa isär en samling större korn [21]. I hur stor grad dessa effekter, som styr hur nära varandra kornen teoretiskt kan packas, går att modellera i programmet genom att ändra på regleringsfaktorn K . Desto högre värden på K desto tätare beaktar man att partiklarna kan packas.



Figur 15. Illustration av CPM-modellens hänsynstagande till vägg- och lösgöringseffekter. I figuren är de stora stenarnas väggeffekt och de små svarta stenarnas lösgöringseffekt utritad.[4]

Ballastmaterial större än 0,125 mm behandlas i programmet enligt CPM-teorin, fränsett att indata tas fram med hjälp av lös packning istället för hård packning. En korrigerig för detta görs i programmet. Det CPM-delen i programmet slutligen beräknar och skickar vidare till PMM-delen är ett värde för betongreceptets *hålrumsmodul* (H_m). Hålrumsmodulen kan räknas fram

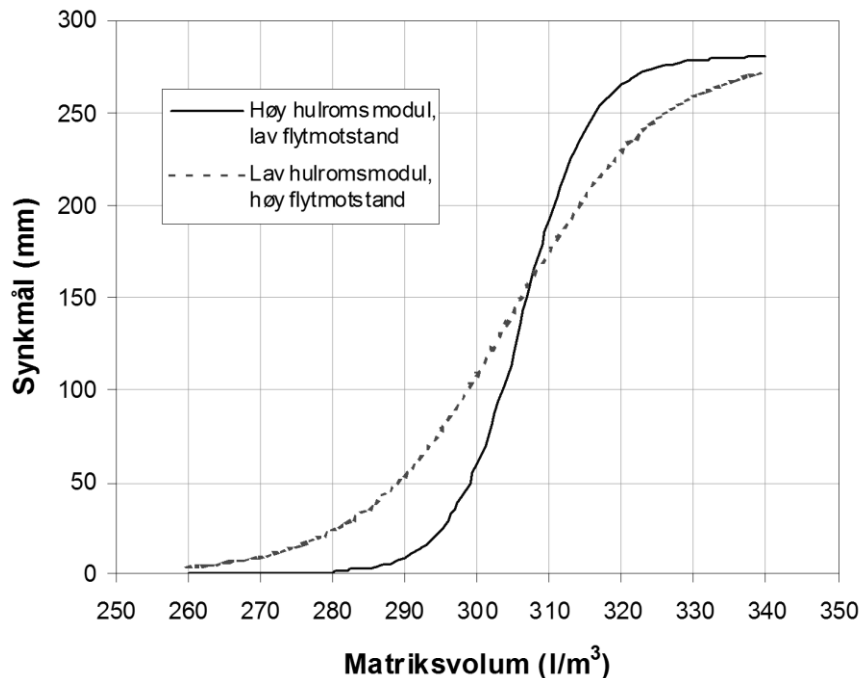
med hjälp av endast PMM-teori, men då baseras resultatet på bland annat finhetsmodulen (FM) och ett ballastspecifikt värde som inte är enkelt att ta fram. Att beräkningsmässigt gå via CPM-teori torde därför ge ett mer exakt värde.

Egenskaperna för ballastens finpartiklar (0-0,125 mm) är svåra att bestämma med hjälp av packningsförsök, varför man istället undersöker dess reologiska egenskaper genom att göra bruksförsök. I och med dessa kan man få fram uppgifter om den framtida betongens konsistens. Anledningen till att packning inte fungerar bra är att det är ett mycket stort spann storleksmässigt mellan de minsta och största partiklarna i den här fraktionen. En av grundförutsättningarna för att karakterisering med hjälp av packning ska fungera väl är att storleksspannet i den undersökta fraktionen är så litet som möjligt. Bland finpartiklarna kan storleksskillnaden vara 100:1 eller mer, jämfört med till exempel en 4-8 mm-fraktion, där största skillnaden är 2:1. Vidare kommer ytpotentialer, och van der Waalskrafter att påverka packningsförsök av finmaterialfraktionen, vilket gör det till en alltför osäker metod att nyttja.[6] Att istället undersöka reologin är möjligt eftersom det finns tydliga samband mellan en betongs arbetbarhet och de reologiska egenskaperna hos dess bruksfas [8]. Teorierna som ligger till grund för analyseringen av bruk finns beskrivna av norrmannen *E. Mørtsell* [5], företrädesvis i kapitel 6. *Mørtel* (vilket är det norska ordet för Bruk). Dessa bygger på modellen PPM som Mørtsell tagit fram.

I syfte att inte behöva sikta fram stora volymer av endast fraktionen 0-0,125 mm, vilket skulle ta lång tid, när man ska analysera bruk, har den övre gränsen satts till två mm. Att gränsen valts vid just två mm beror på att tidigare undersökningar visar att *"om 0-2 mm-fraktionen är dålig så kommer man få problem med betongen"* [6].

Grunden i PMM är att färsk betong/bruk består av två delar, en partikelfas och en matrisfas. Till partikelfasen räknas allt material som är större än 0,125 mm, medan matrisfasen är allt övrigt. Det vill säga cement, tillsatsmaterial, filler, de finaste ballastkornen, vatten, tillsatsmedel och luftporer. Enligt modellen så finns det ett samband mellan betongens arbetbarhet och andelen matris. Detta illustreras för två olika betonger i Figur 16. Startpunkterna i figuren är de matrisvolymer som krävs för att precis fylla alla hålrum i partikelfaserna, samtidigt som de precis täcker alla partikelytor vilket gör att ballastkornen börjar glida sinsemellan. Det vill säga precis innan sättmättet blir större än noll. Kurvornas form bestäms av både partiklarnas form, ytstruktur och kornstorleksfördelning samt matrisfasens reologiska egenskaper. I början dominerar partikelegenskaperna medan matrisegenskaperna tar över mer och mer ju lösare blandningarna blir. Ökas matrisdelen ytterligare kommer bruket

till sist att separera. Motsvarande samband råder mellan ett bruks matrisvolym och dess *utflytmått*. Utflytmåttet är diametern som ett bruk får när man lyft en sättkon vid ett sättmåtsförsök. (Det minsta värdet som då kan uppkomma är inte noll utan konens bottendiameter.)[5]



Figur 16. Sambandet mellom matrisvolym (*Matriksvolum*) og sättmått (*Synkmål*) for två olika betonger.[5]

Centralt för den reologiska karakteriseringen är *flytmotståndet* (λ_Q) (ibland kallat *FlowCyl-talet*). Det är en enhetslös parameter mellan noll och ett som betecknar flytegenskaperna för matrisfasen. För bruk kan den beräknas enligt **[Ekvation I]**. Höga värden på λ_Q , vid konstant volym matris, innebär mer trögflytande bruk och vice versa [5]. Flytmotståndet kan mätas för viskösa material med en så kallad *Marsh cone*. Detta är en mätning som genomförs genom tidtagning av en känd volym av ett material, då det får rinna genom en speciell tratt [5]. Enligt Pedersen [23] så påverkas flytmotståndet främst av materialets plastiska viskositet. Han menar vidare att en mätning av λ_Q är likvärdigt med en mätning av viskositeten. Ett syfte med CEMENTAS program är dock att det inte ska krävas onödigt komplicerade mätningar som fordrar avancerad utrustning för att ta fram indata till det. Så för att slippa en mätning samt apparatur så kan värdet istället beräknas.

$$\lambda_Q = 3,598 \cdot \left(k_c \cdot \frac{c}{w} + k_f \cdot \frac{f}{c} \right)^{2,736}$$

Ekvation I

k_c = materialparameter specifik för olika cementsorter.

k_f = materialparameter specifik för olika sorters filler.
 c = cementvikten [kg].
 w = vattenvikten [kg].
 f = vikten filler [kg].

Programmet kommer behöva beräkna olika flytmotståndsvärden, vilket medför att samtliga materialkonstanter måste fastställas. Cementa AB har bestämt parametern k_c för sina olika cementsorter med hjälp av data från bindemedelsprov. Som obekant återstår då endast materialparametern k_f . Den bestäms med hjälp av beräkningar utifrån resultat från bruksförsök.

Sambandet mellan ett bruks konsistens och dess matrisvolym, som Mørtsell har funnit och som visas i Figur 16 kan beskrivas matematiskt som en tangenshyperbolikusfunktion [**Ekvation II**]. Det är genom beräkningar med hjälp av ett motsvarande samband som gäller för konsistensen hos färsk betong och dess matrisvolym, som programmet kan proportionera den beställda betongen så att den får det önskade sättmättet.

$$K_p = \frac{(n-m)}{2} \cdot (\tanh(z) + 1) + m \quad \text{Ekvation II}$$

K_p = utflyt-/sättmättet [m].
 n = maximalt utflyt/sjunk [m].
 m = minimalt utflyt/sjunk [m].
 z = en funktion som beror på matrisandelen och som är olika beroende om man är intresserad av sjunk eller utflyt.

För *utflytförsök* så ser funktionen som är påverkad av matrisdelen ut som beskrivs i [**Ekvation III**].

$$z = 38 \cdot e^{-2,45 \cdot \lambda_Q} \cdot \frac{F_p - Hm^U}{100} - 1 \quad \text{Ekvation III}$$

λ_Q = flytmotståndet för brukets matrisdel (se [**Ekvation I**]).
 F_p = andelen matris i bruket [%].
 Hm^U = hålrumsmodulem [%].

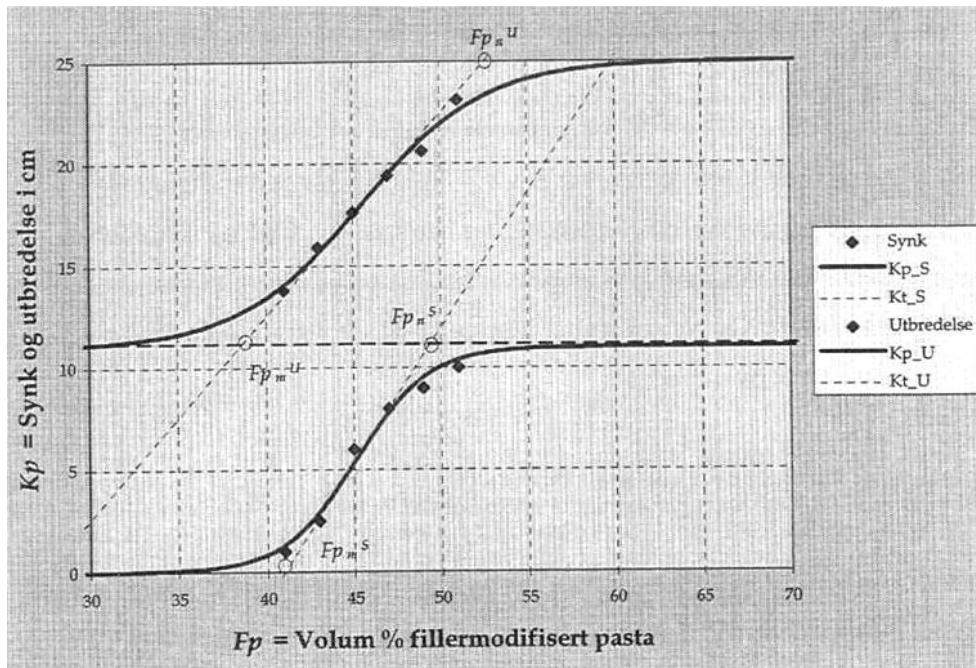
Eftersom sambandet i [**Ekvation II**] är ganska invecklat och parametern *maximalt utflyt* (n) är omöjlig att fastställa exakt, studeras istället *tangenten* till funktionen. Tangenten som åsyftas är den som tangerar grafen där funktionen har maximal lutning (se Figur 17). Ett samband som beskriver tangentens lutning för ett bruks utflyt beroende av flytmotståndet visas i [**Ekvation IV**] [5].

$$\alpha^U = 19 \cdot e^{-2,45 \cdot \lambda_Q}$$

Ekvation IV

α^U = tangentens lutning.

λ_Q = flytmotståndet för brukets matrisdel (se [Ekvation I]).



Figur 17. Exempel på samband mellan sättmått/utflyt (synk/utbredelse) och volymandelen matris (fillermödfiserad pasta) för ett undersökt bruk med mätvärden inritade [5]. Den övre grafen betecknar utflyt medan den undre visar sättmått, notera att kurvornas tangenter inte är parallella.

Eftersom tangentens lutning är möjlig att beräkna utifrån bruksförsök kan λ_Q bestämmas vilket gör att parametern k_f slutligen kan fastställas.

Det framtagna värdet på k_f verkar sedan som ett startvärde, då det läggs in i programmet, som sedan eventuellt måste justeras något. Detta beror på att receptet måste fabriksanpassas. På grund av att olika fabriker har olika blandningsprocedurer, med exempelvis olika roterhastighet och inblandningsordning kommer en betong tillverkad med samma recept på två olika fabriker, att få något olika egenskaper.

3 Empiri

I samband med besök på betongfabriker utfördes ett antal försök med deras ballastmaterial, i syfte att inhämta indata till proportioneringsprogrammet. Undersökningarna av de olika fraktionerna innebar att ballastprotokoll fylldes i. Två typer av protokoll arbetades fram, en sort för fraktioner större än två mm och en sort för finballastfraktionerna, se Bilaga 2-15.

Först i detta kapitel beskrivs ballastsorterna som hämtades från de olika fabrikena, följt av de olika laborationsmetoderna som användes. Sist beskrivs även två metoder som prövades under examensarbetets gång, men som inte nyttjades för att ta fram resultatet i den här rapporten.

3.1 Material

Fyra betongfabriker besöktes och ballast hämtades därifrån till analys. På grund av brist på lämplig utrustning på fabrikena hämtades endast ballast på fabrikena, medan försöken sedan utfördes delvis på Cementa AB:s lab i Stockholm och delvis på Avdelningen för Byggnadsmaterials lab i Lund. Ballasten som hämtades varierade mellan två till fyra sorter per fabrik. Då det funnits många sorter på en fabrik så har de som nyttjas i de vanligaste recepten valts ut och undersökts. Fabrikena önskade inte redovisa sina recept öppet varför de i rapporten framöver benämns enligt nedan istället för med fabriksnamn:

- *Elementfabriken (E)*
- *Transportbetongfabrik 1 (T1)*
- *Transportbetongfabrik 2 (T2)*
- *Transportbetongfabrik 3 (T3)*

Benämningen *transportbetongfabrik* betyder att betongen som produceras på fabriken hämtas med bilar och körs ut till byggarbetsplatsen.

3.1.1 Betongelementfabriken

I betongelementfabriken tillverkas främst bjälklagslement maskinellt på långa gjutbäddar (se Figur 18). Dessa sågas sedan till rätt längd när betongen härdat. Betongen som oftast blandas i fabriken är *jordfuktig* till konsistensen (se Tabell 1). Ballastsorterna som nyttjas kommer från grustag och bergtäkter inom 2 km från fabriken. De olika fraktionerna som undersöktes var:

0-4 mm natur (E, 0-4)

2-8 mm kross (Ek, 2-8)

8-11 mm kross (Ek, 8-11)

11-16 mm kross (Ek, 11-16)



Figur 18. Gjutning av förspända håldäckselement.

3.1.2 Transportbetongfabrik 1

Krossballastsorterna som nyttjas i transportbetongfabrik 1 levereras från en bergtäkt 6 km från fabriken. Medan naturgruset kommer från en annan täkt cirka 50 km från fabriken. De olika fraktionerna som undersöktes var:

0-8 mm natur (T1, 0-8)

5-8 mm kross (T1k, 5-8)

11-16 mm kross (T1k, 11-16)

3.1.3 Transportbetongfabrik 2

Till transportbetongfabrik 2 levereras all ballast från en täkt cirka 35 km från fabriken. De olika fraktionerna som undersöktes var:

0-8 mm natur (T2, 0-8)

8-16 mm natur (T2n, 8-16)

8-16 mm kross (T2k, 8-16)

3.1.4 Transportbetongfabrik 3

De storkorniga naturgrussorterna som nyttjas vid transportbetongfabrik 3 kommer från grustag dryga 70 km från fabriken. Medan den finaste ballasten bryts cirka 35 km från fabriken och krossmaterialet levereras från en täkt endast 15 km bort. De olika fraktionerna som undersöktes var:

0-2 mm natur (T3,0-2)

*4-8 mm natur (T3n, 4-8)**

*8-16 mm natur (T3n, 8-16)**

11-16 mm kross (T3k, 11-16)

*Produktbladet beskriver materialet som "singel, delvis maskinellt krossat".

3.2 Siktning

Vid *siktning* erhålls värden för att kunna framställa materialets kornstorleksfördelning i form av en *siktkurva*. Utifrån dessa värden kan även *finhetsmodul* och *fillerhalt* för materialet bestämmas.

För siktning behövdes beroende på kornstorlek, inte alla siktstorlekar varje gång, men de standardmått på siktar som finns och som nyttjades är:

botten, 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 & 32.0 mm

Utöver siktarna så behövdes en siktapparat, en mikrovågsugn/ugn och en våg med 0,1 g noggrannhet.

Siktningen utförs genom att ett representativt prov tas från en ballastsort och placeras i mikrovågsugnen/ugnen. Det värms därefter upp i syfte att eventuellt vatten i provet ska avdunsta. Provet kyls därefter till rumstemperatur och appliceras sedan på den hopsatta siktserien. Det bearbetas därefter i tio minuter i siktapparaten varefter delmaterialen på varje sikt vägs och siktkurva framställs (se Figur 7 & Figur 8).

3.3 Kompaktdensitet

Fanns inte kompaktdensiteten angiven på produktblad så beräknades den genom att ett representativt prov av materialet applicerades i en behållare med känd volym. (Viktigt var att inget materialkorn stack upp ovanför kärlets ovanyta.) Behållaren hade dessförinnan nollställt på en våg. Grusets vikt noterades varefter vågen återigen nollställdes. Behållaren fylldes sedan upp till bredden med vatten och vattnets vikt noterades. Vattens densitet är mycket nära 1,0 kg/l. Grusets volym kunde beräknas som kärlets volym subtraherat med vattnets volym. Densiteten för gruset erhöles sedan genom att dess vikt dividerades med dess volym.

3.4 Lös packning

Vid mätning av *lös packning* erhålls ett *packningsvärde*. Detta betecknar hur stor del av en behållare som inte är tomrum, då undersökningsmaterialet placeras i behållaren, utan att komprimeras (inte heller vibrering nyttjas).

För att mäta lös packning fordras ett cylinderformat kärl med känd volym, ett verktyg för avjämning av cylinderns överyta, till exempel en bredspackelspade och en våg med 0,1 g noggrannhet.

Kärlet vägs och vågen nollställs. Ett representativt prov från den fraktion man önskade undersöka hålls ner i kärlet (se Figur 19), vars överyta jämnades av med ”sågande” rörelse med en bredspackelspade då cylindern blivit rågat fylld. Kärlet vägs därefter och försöket upprepas minst tre gånger varefter medelvärdet på vikterna beräknas. Medelvikten divideras sedan med volymen

på kärlet samt med materialets *kompacktdensitet* och på så sätt erhålls packningsvärdet. Detta försök genomfördes för samtliga undersökta material samt även för, från finballast-materialen, framsiktade fraktionerna 0,125-2 mm.

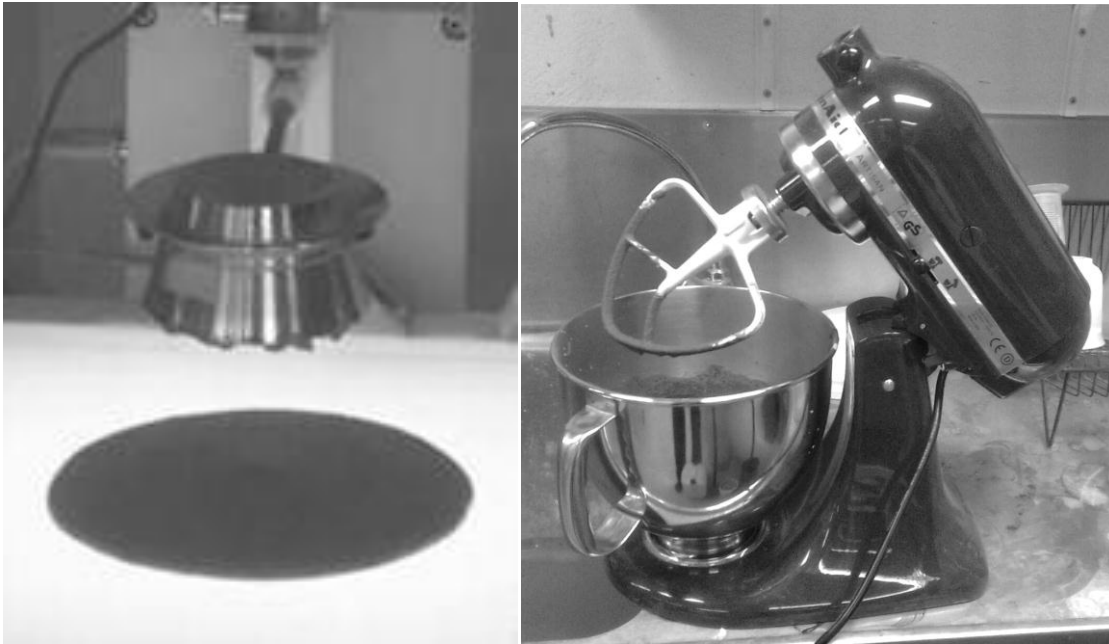


Figur 19. Lös packning. Kärlets diameter var 7,05 cm invändig höjd 13,95 cm och uträknad volym blir således 544,6 cm³.

3.5 Bruksförsök

Vid *bruksförsök* mäts utflytmåttet på ett bruk som blandas av cement, vatten och finballastmaterialet (0-2 mm-fraktionen) som ska undersökas. Resultatet blir den materialspecifika parametern k_f .

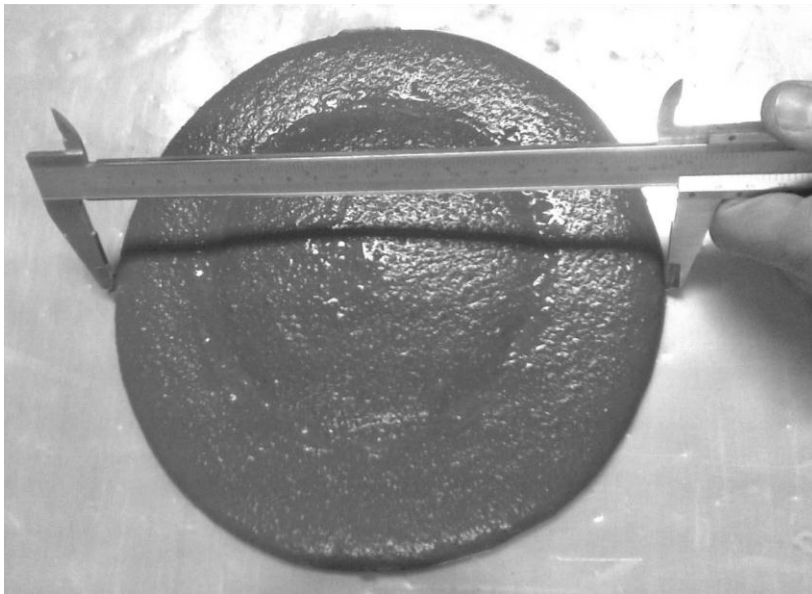
För att utföra bruksförsök fordras en våg med 0,1 g noggrannhet, en *Hägermankon* med bottendiameter $100 \pm 0,5$ mm, ovandiameter $70 \pm 0,5$ mm och höjd $60 \pm 0,5$ mm (se Figur 20), en liten bruksblandare med minst 1 liters kapacitet (se Figur 20), en glasskiva med avfasade kanter cirka 450 x 450 mm, ett stort skjutmått, en tumstock med mm-noggrannhet, ett verktyg för avjämning av konens överyta, till exempel en kniv, ett mätglas med ml-noggrannhet, en matsked, vatten och cement.



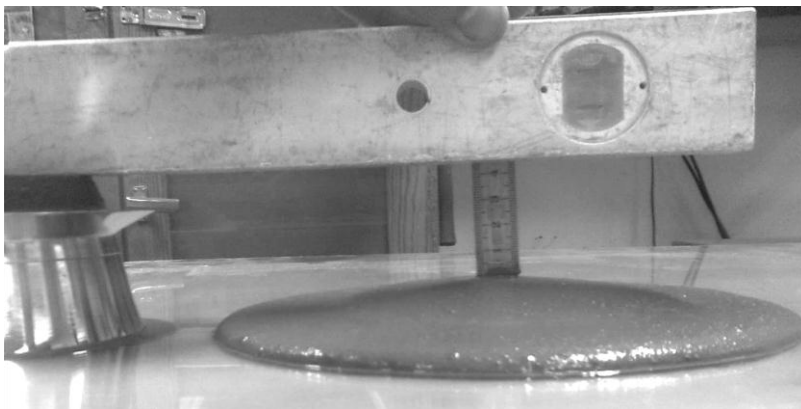
Figur 20. T v. Hägermankon under lyft av tryckluftsdreven camFlow-apparat. Konens volym är 0,334 l. T h. Bruksblandare av fabrikatet Kitchen Aid.

Om ballastmaterialet som ska undersökas är av annan fraktion än 0-2 mm (till exempel 0-8 mm) måste man först sikta fram denna fraktion. Vidare måste även ett par gram från fraktionen 0-0,125 mm siktas fram om fillerhalten i 0-2 mm-fraktionen överstiger 5 %. Förutsatt att fillerhalten understiger 5 % vägs 360 g cement och 790 g av ett representativt prov från ballastens 0-2 mm-fraktion upp och blandas i bruksblandaren. Detta görs på lägsta hastigheten i en halv minut, varefter 216 g vatten tillfördes under fortsatt omrörning på samma hastighet. Vattnet hålls i varsamt, i syfte att inte onödigt stänk sker och så att allt material inarbetas i bruksblandningen. Detta görs i ordningen så att först hålls hälften av vattnet i och blandas i 15 sekunder (fortfarande på lägsta hastigheten) varefter resterande mängd vatten tillförs. Efter en minuts bearbetning stannas maskinen och kanterna samt botten skrapades med en sked, i syfte att säkerställa fullgod blandning. Omrörningen startas sedan igen och håller på i ytterligare två minuter, nu på näst lägsta hastighet.

Hägermankonen placeras så mitt på glasskivan och bruk flyttas över till konen som när den är rågat fylld jämnas av med "sågande" rörelse med ryggen på en kniv. Därefter lyfts konen rakt upp, varpå brukets utflytmått mäts på två ställen med skjutmått (se Figur 21). Även avståndet från en linje parallell med konens ovkant till brukets högsta punkt, mättes med en tumstock (se Figur 22). (Dock nyttjades "sättnmåttsvärdena" inte i just detta projekt.)



Figur 21. Mätning av brukets utflytmått.



Figur 22. Mätning av brukets sättmått.

I de fall fillerhalten överstiger 5 % väljs ett motsvarande bruksrecept (se Bilaga 12-15) och mängden extra filler adderas samtidigt som cementen och ballasten. Om utflytmåttet skulle understiga 150 mm för något material så bör ytterligare ett försök genomföras, då med nästa bruksrecept med ett steg högre fillerhalt, enligt tabell i Bilaga 12-15. (Syftet med detta är att säkerställa att det är matrisfasens egenskaper som mäts och inte endast partikelfasens.)

Försöket kan utföras med manuellt lyft av kon och mätning med skjutmått, eller med en tryckluftsdreven camFlow-apparat som lyfter konen varefter en kalibrerad kamera mäter utflytmåttet. Valet av proportionerna på mängden bruks- ingredienser som används i försöket är grundat på erfarenheter från tidigare försök och det är anpassat för att passa merparten av de svenska grustyperna. Vidare blir vct i den blandningen som skapas ett ofta använt värde (0,60) i betongrecept.

3.6 Prövade men förkastade undersökningsmetoder

Under examensarbetets gång har ett antal olika bruksförsöksmetoder prövats för att karakterisera fillerdelen och bestämma k_f . Initialt nyttjades den nedan benämnda *spädmetoden* vilken utvecklades till *icke-spädmetoden* och det är delar av den sistnämnda som blivit metoden *bruksförsök*, som beskrivs i kapitel 3.5. Målet har hela tiden varit att bestämma parametern k_f , genom att först bestämma flytmotståndet (λ_Q).

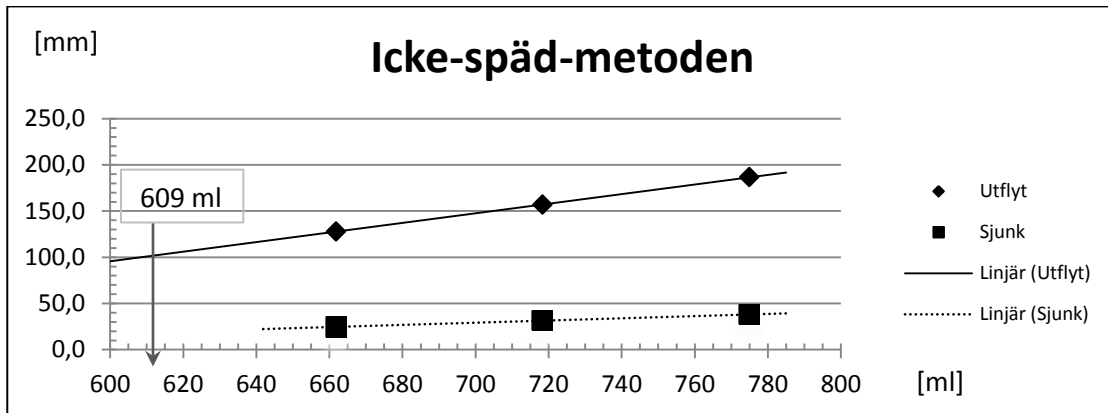
3.6.1 Spädmetoden

Spädmetoden utförs initialt som en utflytsmätning med bruksreceptet och tillvägagångssättet som finns beskrivet i kapitel 3.5. Efter en mätning återfördes sedan bruket till blandaren, varefter 16 g vatten varsamt tillfördes och blandas på näst lägsta hastigheten i två minuter, varefter mätningarna med Hägermankonen upprepades. Mellan mätningarna rengjordes glasskivan och konen. I och med att endast vattenmängden ökades blir bruket fuktigare och mer lättflytande för var gång försöket upprepades. Totalt utfördes spädning och mätning cirka fem gånger per material eller tills ett utflytmått kring 200 mm uppnåts. När sedan utflytmåtten ritades upp som en funktion av matrisandelen så framträdde ett linjärt samband. (Detta ansågs motsvara tangenten till grafen som beskrivs i Figur 17.) Dock så hade inte flytmotståndet hållits konstant genom mätserierna när endast vattenandelen ökades. Att hålla flytmotståndet konstant krävde att hela matrisandelen ökades i samband med vattenökningen. Därmed utformades *icke-spädmetoden*. Ett steg på vägen var att försöka blanda en cementslurry och späda med detta istället för att späda med endast vatten. Detta visade sig dock fungera dåligt rent praktiskt.

3.6.2 Icke-spädmetoden

Icke-spädmetoden utvecklades ur spädmetoden med syftet att bibehålla samma flytmotstånd (λ_Q) vid alla utflytmätningar. Den inleddes med att ett bruksförsök gjordes med ett grundrecept. Genom att sedan öka *samtliga* matrisdelar (cement-, vatten- och fillervikten) procentuellt jämfört med grundreceptet i en ny blandning (härav namnet *icke-spädmetoden*), så bibehölls flytmotståndet och vct konstant. Antal mätningar kunde nu reducerades till endast tre, eftersom utflytmått som en funktion av matrisandelen förändrades enligt ett tydligt linjärt samband. Detta samband extrapolerades sedan till utflytet 100 mm för att bestämma vilket värde på matrisandelen som skulle gett ett så kallat *noll-utflyt*. Det vill säga ett utflyt som inte var större än Hägermankonens bottendiameter (se exempel i Figur 23). Denna matrisvolym motsvarade sedan hålrumsmodulem (Hm^U) i [Ekvation II]. I och med att hålrumsmodulem var bestämd så var endast flytmotståndet (λ_Q) och maximalt utflyt obekanta (n). Eftersom tre mätningar fanns, i vilka dess båda obekanta värden var konstanta, så var det möjligt att ta

fram dem med hjälp av att optimera [Ekvation II] som ett minsta-kvadratproblem i beräkningsprogrammet Matlab. Utifrån framräknat värde på flytmotståndet kunde sedan k_f beräknas med hjälp av [Ekvation I].



Figur 23. Exempel på framtagning av matrisandelen vid noll-utflyt. I det här fallet 609 ml, vilket sedan kunde räknas om till procent av hela bruksvolymen och i aktuellt prov blev den 55,6 %.

Anledningen till att icke-spädmetoden beslöts att inte användas till förmån för metoden bruksförsök (i kapitel 3.5), var främst att den sistnämnda var betydligt mer användarvänlig. Dels rent utförandemässigt beträffande mängden ballast som behövde siktas och antalet blandningar som behövde göras, samt beräkningsmässigt. Dessutom korrelerade mätvärdena inte helt enligt teorierna. Detta genom att beräkningar ibland resulterade i att flytmotståndet blev större än ett och enligt Mørtsells PMM-teori ska λ_Q vara ett tal mellan noll och ett. Viktigt att notera är också att materialparametern k_f som erhålls alltid behöver korrigeras i proportioneringsprogrammet (vilket finns beskrivet i kapitel 2.4.2.2). Ett faktum som också talar för den enklare metoden.

4 Beräkningar och resultat

4.1 Fraktioner större än 2 mm

Ballastfraktioner som är större än två mm karakteriserades genom *siktning*, *kompaktdensitet* och *lös packning*. Lös packning utfördes på materialet i syfte att ta fram packningsvärdet som mäts i procent. Om inte siktkurva fanns att tillgå via produktblad så togs en sådan fram genom siktning. Även kompaktdensiteten bestämdes om den inte redan fanns tillgänglig. Se resultat i Tabell 2.

Tabell 2. Resultat från karakterisering av ballastmaterial större än två mm. Fullständiga beräkningar finns i Bilaga 2-11.

	Ballasttyp	Packningsvärde [%]	Kompaktdensitet [kg/m ³]	FM
Ek, 2-8	Kross	50,67	2670	5,16
Ek, 8-11	Kross	49,66	2760	6,32
Ek, 11-16	Kross	51,94	2780	6,54
T3n, 4-8	Natur	56,20	2568	5,22
T3n, 8-16	Natur	52,88	2639	6,40
T3k, 11-16	Kross	51,80	2612	6,59
T1k, 5-8	Kross	50,12	2795	5,58
T1k, 11-16	Kross	49,78	2847	6,59
T2k, 8-16	Kross	50,66	2638	6,30
T2n, 8-16	Natur	53,62	2646	6,40

4.2 Fraktioner mindre än 2 mm

Ballastfraktioner mindre än två mm måste förutom karakterisering genom *siktning*, *kompaktdensitet* och *lös packning* även karakteriseras med *bruksförsök*. På grund av detta tillverkades ett separat ballastprotokoll för analys av finballasten, se Bilaga 12-15.

Först togs siktkurvan fram antingen genom siktning eller utifrån produktblad. Från kurvan för hela provet togs sedan en profil fram för endast fraktionen 0-2 mm. I denna avlästes finhetsmodulen (FM) och fillerhalten. Sedan genomfördes lös packning på hela fraktionen, om inte redan kompaktdensiteten fanns given så bestämdes den. Därefter siktas 0,125-2 mm fram och lös packning utförs på denna fraktion. Det bortsiktade materialet i 0-0,125 mm-fraktionen sparades för att eventuellt användas vid bruksförsök senare. Packningsvärdet för 0,125-2 mm-fraktionen korrigerades sedan, dels för mätkärls geometriska form samt för om kross- eller naturmaterial använts. Därefter gjordes en standardisering av packningsvärdet så som det skulle blivit om packningen genomförts i *lufthaltskärlet*. (Lufthaltskärlet är ett åtta liters stort kärl med standardmått som används för att mäta lufthalt på färsk betong.)

Detta värde subtraherades nu från 100 vilket gav parametern H_s , vilken mäts i procent. Den betecknar *hålrummet* i fraktionen, det vill säga det utrymmet som är möjligt att fylla upp med matrisvolym.

Bruksförsök utfördes sedan med material från fraktion 0-2 mm, med slutmålet att ta fram fillerparametern k_f . Cementet som användes vid samtliga försök var Cementa AB:s skövdetillverkade byggcement (CEM II/A-LL 42,5 R) med $k_c=0,18$. I de fall där fillerhalten i 0-2 mm-fraktionen översteg fem procent valdes ett modifierat recept för bruksförsök, med tillsatt mängd framsiktad extrafiller (se Bilaga 12-15). När utflytet var uppmätt i och med försöket så kunde önskade *matrisandelen* (F_p) som motsvarade detta utflytmått, bestämmas. Detta gjordes genom en serie beräkningar vilka förklaras nedan och vilkas resultat finns i tabeller i Bilagorna 12-15. (Observera att under följande beräkningar så särbehandlas den delen av ballasten som är mindre än 0,125 mm från övrig ballast.)

$$\text{ballast/cement [\%]} = \frac{\left(b - b \cdot \frac{f_h}{100}\right)}{c} = b_c$$

$$\text{filler/cement [\%]} = \frac{\left(f_x + b \cdot \frac{f_h}{100}\right)}{c} = f_c$$

$$\text{vct [\%]} = \frac{w}{c} = w_c$$

b ballastvikten [kg].

f_h fillerhalten [%].

c cementvikten [kg].

f_x vikten extrafiller [kg].

w vikten vatten [kg].

b_c vikten 0,125-2 mm ballast per vikt cement.

f_c vikten filler (0-0,125 mm) per vikt cement.

Med hjälp av ovanstående förhållanden kunde matrisandelen efter några steg beräknas. För att göra detta räknades bruksreceptet om till ett 1000 liters-recept. Lufthalten antogs vara fem procent i bruket, vilket motsvarar 50 l/m^3 .

$$\text{cementhalt [kg/m}^3\text{]} = \frac{1000-50}{\left(\frac{1}{\rho_c} + \frac{b_c+f_c}{\rho_b} + \frac{w_c}{1.0}\right)} = C$$

$$\text{ballasthalt [kg/m}^3\text{]} = C \cdot b_c = B$$

$$\text{matrisandelen [\%]} = \frac{\left(1000 - \frac{E}{\rho_b}\right)}{10} = F_p$$

ρ_c cementets kompaktdensitet [kg/m³].

ρ_b ballastens kompaktdensitet [kg/m³].

Med hjälp av matrisandelen (F_p), utflytmåttet (u) och hålrumsvärdet (H_s) samt Hägermankonens bottendiameter (100 mm) kunde man beräkna tangentens lutning (α^U), vars ekvation beroende på flytmotståndet finns beskriven i [Ekvation IV]. Lutningsvärdet beräknas med räta linjens ekvation:

$$\alpha^U = \frac{100 - u}{H_s - F_p}$$

Ur [Ekvation IV] kan sedan flytmotståndet lösas ut och då är endast den ursprungligen sökta parametern k_f obekant i [Ekvation I] och kan därför lösas ut. Resultat framgår av Tabell 3. Noterbart är att ett lågt värde på fillerhalten resulterade i ett högt fillerparametervärde och tvärt om.

Tabell 3. Resultatvärden från bruksförsök. Packningsvärdet avser packningen av hela fraktionen, ej 0,125-2 mm-delen, medan fillerhalten och FM avser 0-2 mm-fraktionen. Fullständiga beräkningar finns i Bilaga12-15.

	E, 0-4	T3, 0-2	T1, 0-8	T2, 0-8
ballasttyp	Natur	Natur	Natur	Natur
packningsvärde [%]	54,23	59,28	57,98	63,03
kompaktdensitet [kg/m ³]	2670	2551	2650	2491
fillerhalt [%]	8,5	1,6	4,1	5,6
Finhetsmodulen (FM)	1,44	1,69	1,93	2,12
hålrumsvärdet (H_s) [%]	43,72	39,09	43,36	41,03
flytmotståndet (λ_0)	0,747	0,626	0,601	0,638
fillerparametern (k_f)	1,4	6,35	2,42	1,88

5 Diskussion

Ett nytänkande krävs för proportionering av betong, eftersom att naturgruset redan idag lokalt i landet är på väg att fasas ut. Att då börja proportionera i enlighet med Cementa AB:s program, som bland annat har som mål att kostnadseffektivisera befintliga och nya recept genom att minimera matrisdelen, är positivt. Detta dels för att det just är cement som är både den stora kostnaden och den, vid tillverkning, mest energikrävande och därmed miljöskadliga komponenten i matrisfasen och hela betongen [2]. Hur väl programmet kommer att fungera återstår att se då det ännu är under uppbyggnad.

Försök att proportionera med hjälp av den version som dataprogrammet finns i för närvarande, resulterade i samtliga fyra fabrikers fall i recept som krävde mindre cement än tidigare. Det rörde sig om mellan 4-35 kg mindre än vad de använde för tillfället. Med tanke på att alla för närvarande använder drygt 310 kg cement per ton betong i dagsläget (i de recept som studerats), så skulle en minskning med upp mot tio procent med fortsatt bibehållna egenskaper hos betongen, inte vara försumbar. Dock är dessa resultat än så länge osäkra då exempelvis flyttillsatsmedel inte har kunnat beaktas på ett fullgott sätt. Dessutom finns det faktorer i CPM-delen av programmet som ska korrigera för om det packade materialet varit ett natur- eller krossmaterial som inte är helt bestämda. Vidare så återstår också en del provande innan regleringsfaktorn K helt kan fastställas. Beräkningarna i CPM-delen ska i programmet utföras före PPM-beräkningarna (vilka bruksförsök ger indata till), vilket gör att då så pass mycket ännu återstår i första delen så har inga anpassningsförsök gjorts av inparametrar som jag tog fram (k_f). Utan ovanstående beräkningar är utförda direkt med mätvärdena.

Samtliga framtagna flytmotståndsvärden befinner sig mellan noll och ett vilket är helt i linje med teorin i PMM-modellen. Vidare så följer också alla finmaterial Mørtsells regel att högre λ_Q vid samma matrisandel medför trögare bruk, utom materialet från transportbetongfabrik 3 (detta syns om man jämför ballast-protokollen i Bilaga 12-15). Detta material innehåller dock en mycket liten mängd filler vilket får stor inverkan på så sätt att materialparametern k_f blir betydligt större än de övriga materialens.

Det hade varit intressant att testa att ta fram flytmotståndet för materialen med marsh cone och jämföra mot de man fått fram genom försök med Hägermankonen. Det negativa med marsh cone är dock som tidigare nämnts att den kräver framsiktning av stora mängder finmaterial.

Rörande packningsgraden för finballasten från transportbetongfabrik 2 (63,03%), så kan den tyckas hög med avseende på de Larrards beräkningar, men det är ett okubicerat naturmaterial. Hade detta värde uppkommit för ett krossmaterial så hade det bedömts som mer märkligt. Dock befinner sig samtliga undersökta krossgrus under 60 % i packningsvärde. Som väntat har också finballast-materialen över lag högre packningsvärden jämfört med de stora materialen. Endast naturgruset från elementfabriken ligger möjligen väl lågt (54,23 %) och just detta material undersöktes turligt nog både i Lund och i Stockholm, och i Stockholm blev packningsvärdet över 59 %. Olikheterna tyder på att undersökningsmetoden inte är helt exakt.

5.1 Diskussion kring felkällor

Mørtsells samband är empiriskt framtagna för bruksblandningar som har haft matrisandelar mellan 35-60 volymprocent, medan samtliga undersökta bruksblandningar i detta projekt legat mellan knappt 55 till 65 volymprocent. Alltså högre än eller bland de högsta av de försöksprover som Mørtsell baserar sina teorier på. Detta skulle kunna innebära att man under försöken har befunnit sig i den övre "svansdelen" av grafen i Figur 17, vilket skulle medfört att tangenten man tar fram inte helt överensstämmer med den vars ekvation beskrivs i [Ekvation IV]. Det kan även vara så att det hålrumsvärde som tas fram via CPM-modellen inte exakt överensstämmer med det som är betecknat med $F_{p_m}^U$ i Figur 17, vilket skulle få samma resultat som beskrivet innan, nämligen att [Ekvation IV] inte går att använda rakt av. Dock gör även Mørtsell ett antal antaganden då han tar fram hålrumsvolymen enligt PMM-teori. Trots att uppmätt värde senare måste anpassas i dataprogrammet så vore det bra om fortsatta undersökningar kunde känslighetstesta bruksförsöksmetoden för att visa hur exakt den verkligen är.

Att utföra lyft med Hägermankon för hand kan aldrig bli lika exakt som lyft med trycklyftsdriven robotarm, vilket gör att undersökningarna vid utprovandet av den bruksförsöksmodellen borde genomförts med sådan. Vidare borde också fler försök vid samma matriskoncentration genomförts för att skapa ytterligare mätdata.

Ett riktigt representativt prov på ett material är mycket svårt att ta fram, trots det så baserar man ändå samtliga mätningar på provet man tar. Även om man låter en skopa av ett ballastmaterial falla över en skiljevägg mellan två behållare (så hälften av mängden hamnar i vardera behållare) och sedan än en gång tömmer den ena behållaren över väggen och upprepar detta tills erforderlig vikt material finns i den första behållaren, så kan man aldrig vara säker på hur bra provet avspeglar verkligheten. Detta för att ursprungsprovet som togs ur ballasthögen vid fabriken kan ha varit förorenad lokalt, eller just den skeppningen kan råka vara dåligt representativ för den kan ha blivit

ovanligt mycket storlekssorterad då den transporterades till fabriken på en skakig lastbil. Dock är detta det bästa förfarandet som finns.

En svårighet med lös packning är att beroende på hur man håller materialet så varierar den uppmätta vikten. Skillnader i vikt, på cirka en procent, noterades beroende på om konstant flöde eller ej bibehölls tills kärlet var fyllt eller om bred eller smal grusstråle användes. Bäst torde vara en tratt på stativ ovanför ett kärl med en standardvolym. En utrustning för finballastmaterial finns redan (vilken ej har används i detta projekt), men även för stora material borde en standardutrustning införas i syfte att erhålla jämnare mätvärden, vilket är samma sak som de Larrard framför som kritik mot lös packning.

Kritik mot PMM-modellen har framförts av bland annat B. Pedersen [23] då den inte är enkel att applicera på självkompakterande betong (skb). Detta är illavarslande då användningen av skb ökar och till exempel inom prefabindustrin redan står för med än hälften av all betonganvändning [11].

Både då siktning och bruksblandning har genomförts så har ingen standardmetod använts. Detta gjordes dels av tids- och utrustningsskäl.

6 Slutsats

Karakteriseringsmetoderna lös packning och siktning är enkla att genomföra och med en Hägermankon och en liten bruksblandare så är även bruksförsök genomförbara på fabriker. Att det vidare är relativt lite beräkningar som behöver göras medför att ballastprotokollen är tämligen lätta att fylla i, vilket bidrar till lättanvändligheten. Detta gör att framtidsutsikterna ser goda ut för att kunna implementera Cementa AB:s program framöver. Dock så bör undersökningsmetoden känslighetstestas. Det är inte heller förrän provgjutningar har gjorts på respektive fabrik som effekten av karakteriseringsmetoden (bruksförsök) kan utvärderas fullt ut. För det är först då man definitivt kan utvärdera hur väl materialparametern k_f beskriver verkligheten och hur stor justering som krävs i programmet.

6.1 Framtida undersökningar

Framtida försök bör genomföras med standardiserad lös packnings-, siktnings- och bruksblandningsmetod.

Anpassning i dataprogrammet av framtagna ballastmaterialparametrar k_f behöver göras så att de passar den fabrik där de ska användas. Vidare bör verifiering av recepten framtagna med Cementa AB:s program göras genom att de provgjuts på respektive fabrik.

Karakteriseringsmetoden behöver testas på ett par krossgrus som redan idag används vid betongtillverkning i fabriker. Bäst vore det om även samtliga utförda försök kunde upprepas igen för att säkerställa och identifiera känsligheter i analysmetoden.

Framöver behöver försök utföras för att möjliggöra införandet av tillsatsmedels- och tillsatsmaterialparametrar i programmet. Mørtsell har redan en modell för hur silika kan hanteras i recept [5]. Beträffande till exempel flytmedel så skulle det troligen kunna tas i beaktande genom att man tar fram en ”effektivfaktor” för vattnet, som multipliceras med vatten-mängden.

När proportionerade recept tas fram med Cementa AB:s program och jämförelser görs mot nuvarande, så måste förutom direkt mätbara egenskaper, så som hållfasthet, även beständighetsfrågor i stil med frostbeständighet beaktas. Detta i syfte att upptäcka eventuella brister (och fördelar) med nya recept, så att man inte optimerar vissa egenskaper utan att vara medveten om att andra egenskaper nedgår i effekt.

Referenser

1. Fagerlund, G. *Materialprovning. Färsk betong och cement*. Kapitel 16 i BLCP-pärmen 1998.
2. Burström, P.G., *Byggnadsmaterial, Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. 2001, Lund: Studentlitteratur.
3. Svensk Byggtjänst and Cementa AB, *Betonghandbok, Material. Kap. 3, 33 & 34*. 2:nd ed. 1997, Stockholm: Svenskt tryck AB.
4. de Larrard, F., *Concrete Mixture Proportioning*. 1999, London: E&FN Spon.
5. Mørtsell, E., *Modellering av delmaterialenes betydning for betongens konsistens, Institutt for konstruksjonsteknikk*. 1996, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet: Trondheim.
6. Lagerblad, B., et al., *Bergkrossmaterial som ballast i betong*. 2008, CBI Betonginstitutet: Stockholm.
7. Lagerblad, B., *Krossat berg som ballast till betong, CBI nytt*. 2005, Federativ Tryck AB.
8. Westholm, M., *Rheology of the Mortar Phase of Concrete with Crushed Aggregate, Department of Chemical Engineering and Geosciences, Division of Mineral Processing*. 2006, Luleå University of Technology: Luleå.
9. Weywadt, P., *Mix Design -Betongtillverkning m h t funktionskrav, Betong i ett livscykelerspektiv*. 2010, AB Sydsten: Lund.
10. Svenska Fabriksbetongsföreningen (SFF), *Klassificering av självkompakterande betong*
11. Nykvist, H., *Självkompakterande underlättar för fabriksbetong, Tidsskriften Betong*. 2008, Betongföreningen. p. 3.
12. Swedish Standards Institute, *SS-EN 12620+A1:2008 Ballast för betong* 2008.
13. Naturvårdsverket. *Miljömålsportalen 2011-01-03*.
<http://www.miljomal.se/>.
14. Arell, L., *När vi naturgrusmålet? SGUs underlag till fördjupad utvärdering av delmål 4 inom miljö kvalitetsmålet God bebyggd miljö, mars 2003*. 2003.
15. Sveriges Geologiska Undersökning(SGU). *Leveranser av ballastmaterial 1984–2006*.
16. Arell, L., *Fördjupad utvärdering av naturgrusdelmålet inom God bebyggd miljö*. 2007.
17. Svensson, C., *Kompendium i Teknisk Geologi AK*. 2005, Lund.
18. Morfeldt, C.-O., *Varudeklaration av byggnadsmaterialet berg, Väg- och vattenbyggaren nr 8-9*. 1974.

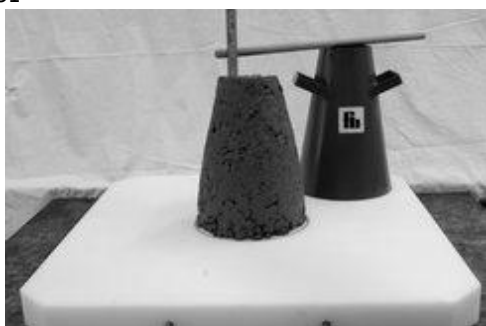
19. Järvenpää, H., *Quality characteristics of fine aggregates and controlling their effects of concrete*. 2001, Acta Polytechnica, Civil Engineering and Building Construction Series: Espoo.
20. Bengtsson, M., *Quality driven production of crushed aggregates.*, Dept of Applied Mechanics. 2006, Chalmers University of Technology: Göteborg.
21. NordiskIndustrifond, *CONCRETE MIX DESIGN - Ett nordiskt betongproportioneringsprogram*. 2003.
22. Henriksson, O., *Optimal partikelfördelning för förbättrad reologi hos betong med krossballast*, Avdelningen för Byggnadsmaterial. 2005, LTH: Lund.
23. Pedersen, B.M., *Alkali-reactive and inert fillers in concrete*, in *Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Structural Engineering*. 2004, Norwegian University of Science and Technology: Trondheim.
24. AB Färdig Betong. *Konsistensklasser 2011-01-03*.
<http://www.fardigbetong.se/produkter-tjanster/konsistensklasser.asp>.

Bilaga 1

Konsistensklasser

Konsistensklass enligt SS EN 206-1	Sättmått, mm enligt SS EN 206-1
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220

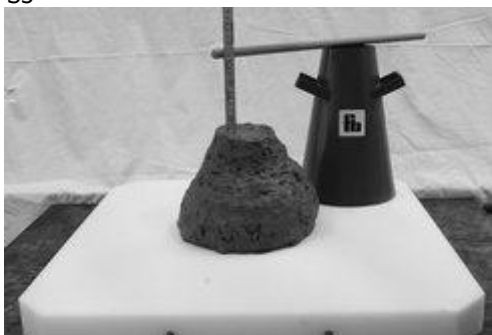
S1



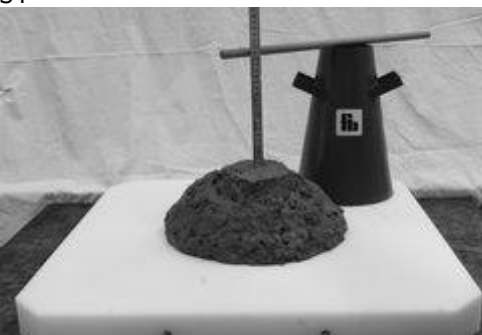
S2



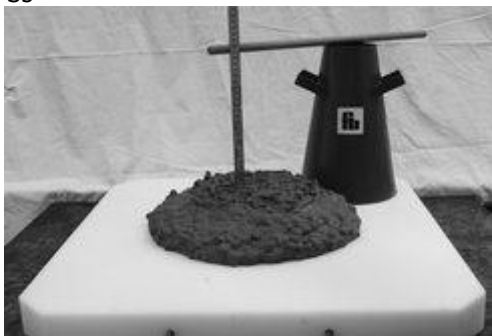
S3



S4



S5



SKB (självkompakterande betong)



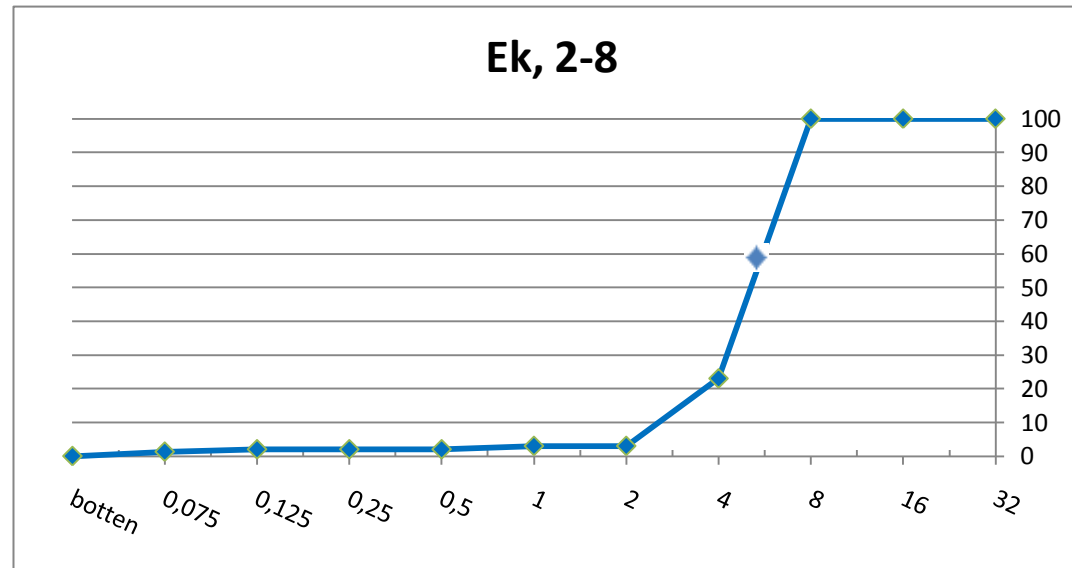
Bilaga 2

Elementbetongfabrik kross 2-8

16-nov-10

2-8mm		
Siktkurva	Passerar %	Sum stannande
32	100	0
16	100	0
8	100	0
5,6	59,0	41,0
4	23,0	77,0
2	3,0	97,0
1	3,0	97,0
0,5	2,0	98,0
0,25	2,0	98,0
0,125	2,0	98,0
0,075	1,3	98,7
botten	0,0	100

FM= **5,16**



Provkärlets volym: 1,071 l

Kompaktdensitet **2760** kg/m³ =g/liter

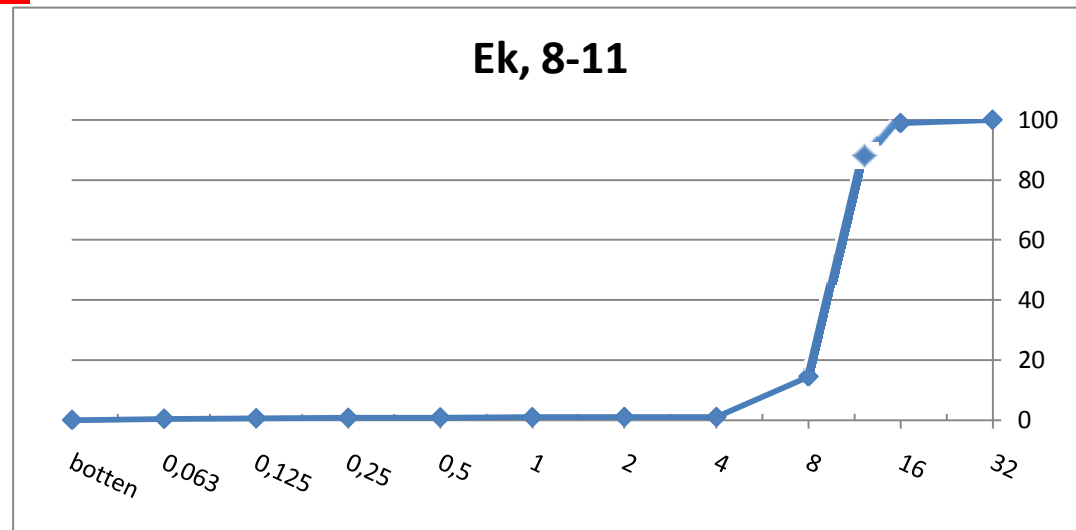
Lös packning:	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	packning
	2-8 mm	1474,3	1462,3	1448,2	1428,5	1436,5	1444,2	8694	49,02 %

Bilaga 3

Elementbetongfabriken 8-11 Kross

12-11-2010

Siktkurva	Stannar	Stannar %	8-16mm Passerar %	Sum stannande
32	0	0,0	100	0,0
16	16	1,1	98,9	1,1
11,2	190	13,2	85,7	14,3
8	1023	71,2	14,5	85,5
4	194	13,5	1,0	99,0
2	0	0,0	1,0	99,0
1	1	0,1	0,9	99,1
0,5	1	0,1	0,8	99,2
0,25	2	0,1	0,7	99,3
0,125	2	0,1	0,6	99,4
0,063	2	0,1	0,4	99,6
botten	6	0,4	0,0	100,0
Summa:	1437	100,0	FM=	6,32



Provkärlets volym: 8,0 l

Kompaktdensitet **2760** kg/m³ =g/liter

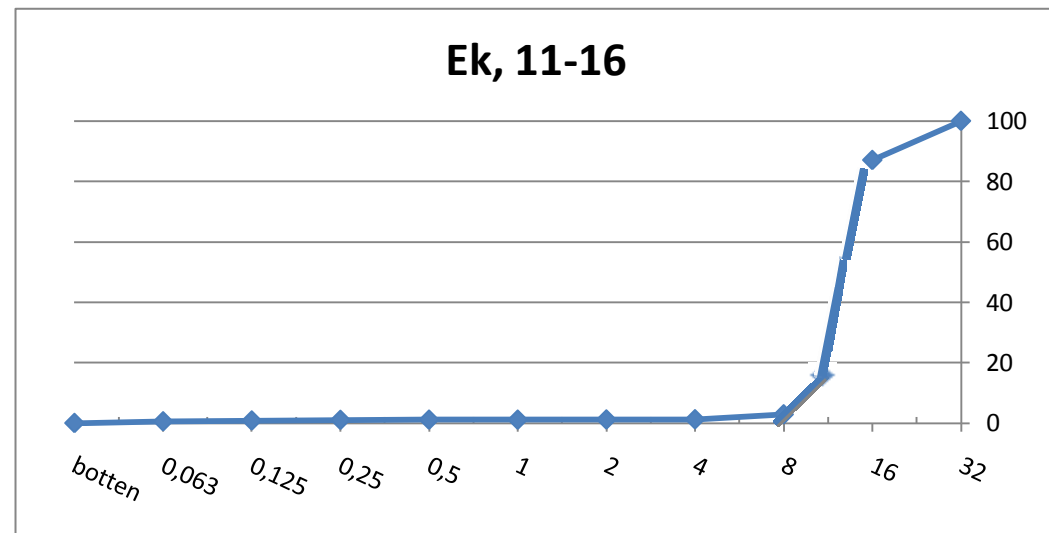
Lös packning:	Fraktion	vikt [kg]	vikt [kg]	vikt [kg]	vikt [kg]	Summavikt packning	
	11-16 mm	11,038	10,995	10,865	10,961	43,859	49,66 %

Bilaga 4

Elementbetongfabriken 11-16 Kross

12-11-2010

11-16mm				
Siktkurva	Stannar	Stannar %	Passerar %	Sum stannande
32	0	0,0	100	0,0
16	190	12,9	87,1	12,9
11,2	1029	70,1	17,0	83,0
8	207	14,1	2,9	97,1
4	24	1,6	1,2	98,8
2	1	0,1	1,2	98,8
1	1	0,1	1,1	98,9
0,5	0	0,0	1,1	98,9
0,25	1	0,1	1,0	99,0
0,125	3	0,2	0,8	99,2
0,063	4	0,3	0,5	99,5
botten	8	0,5	0,0	100,0
Summa:	1468	100,0	FM=	6,54

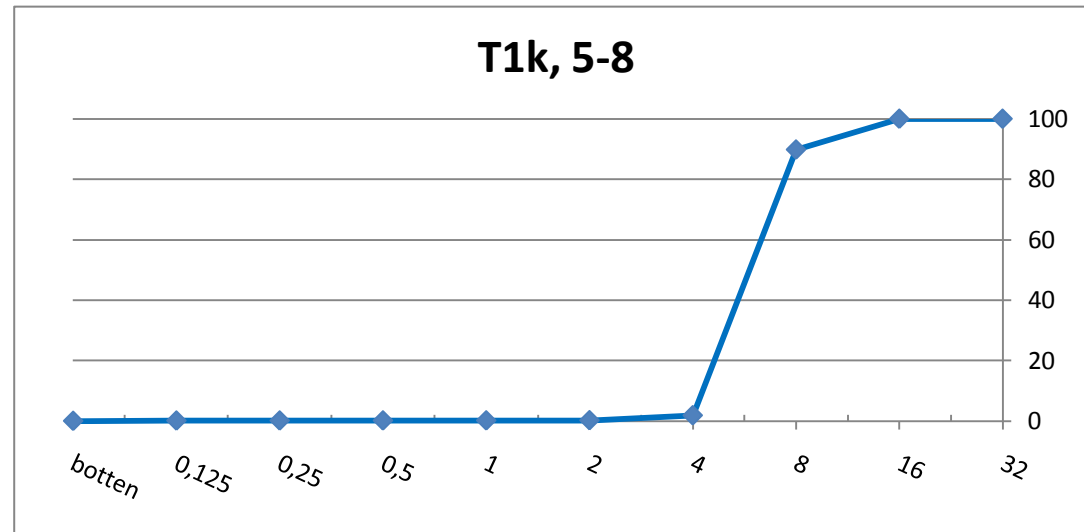


Provkärlets volym: 8,0 l

Kompaktdensitet **2780** kg/m³ =g/liter

Lös packning:	Fraktion	vikt [kg]	vikt [kg]	vikt [kg]	vikt [kg]	vikt [kg]	Summavikt packning	
	11-16 mm	11,681	11,581	11,533	11,463	11,504	57,762	51,94 %

Siktkurva	Stannar	Stannar %	5-8mm Passerar %	Sum stannande
32	0	0	100	0
16	0	0	100,0	0
8	62,6	10,2	89,8	10,2
4	540,1	88,0	1,8	98,2
2	10	1,6	0,2	99,8
1	0,4	0,1	0,1	99,9
0,5	0,1	0,0	0,1	99,9
0,25	0,1	0,0	0,1	99,9
0,125	0,1	0,0	0,1	99,9
botten	0,6	0,1	0,0	100
Summa:	614	100,0	FM=	5,58



Lilla kärlet:	0,5456 l
Provkärlets volym:	1,071 l
Grusets vikt	764,3 g
vattnets vikt	272,1 g
Grusets volym	0,2735 l
Kompaktdensitet	2795 kg/m ³ =g/liter

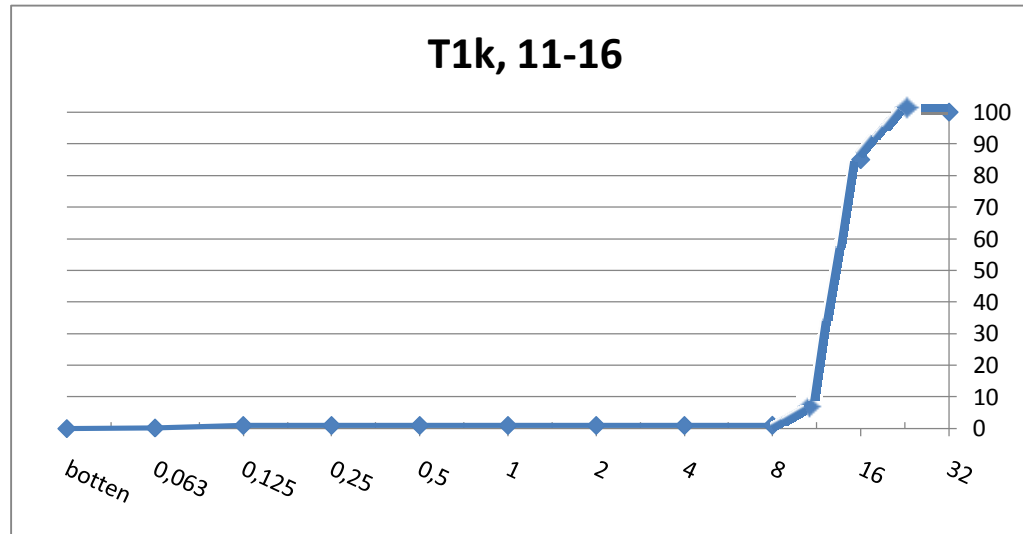
Lös packning:	stort kärl	litet kärl	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	packning
			5-8 mm	1492,6	1492,5	1490,1	1489,4	5964,6	49,82 %
			5-8 mm	765,2	784,3	762,5	763,1	3075,1	50,42 %

Medelpackning: **50,12 %**

Bilaga 6

11-16 mm		
Siktkurva	Passerar %	Sum stannande
32	100,0	0
22,4	100,0	0
16	85,0	15
11,2	8,0	92
8	1,0	99,0
4	1,0	99,0
2	1,0	99,0
1	1,0	99,0
0,5	1,0	99,0
0,25	1,0	99,0
0,125	1,0	99,0
0,063	0,2	99,8
botten	0,0	100

FM= **6,59**



Provkärlets volym:	1,071 l
Grusets vikt	1509,5 g
vattnets vikt	540,7 g
Grusets volym	0,5303 l
Kompaktdensitet	2847 kg/m ³ =g/liter

Lös packning:

Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	packning
11-16 mm	1512,7	1529,3	1518,6	1509,5	6070,1	49,78 %

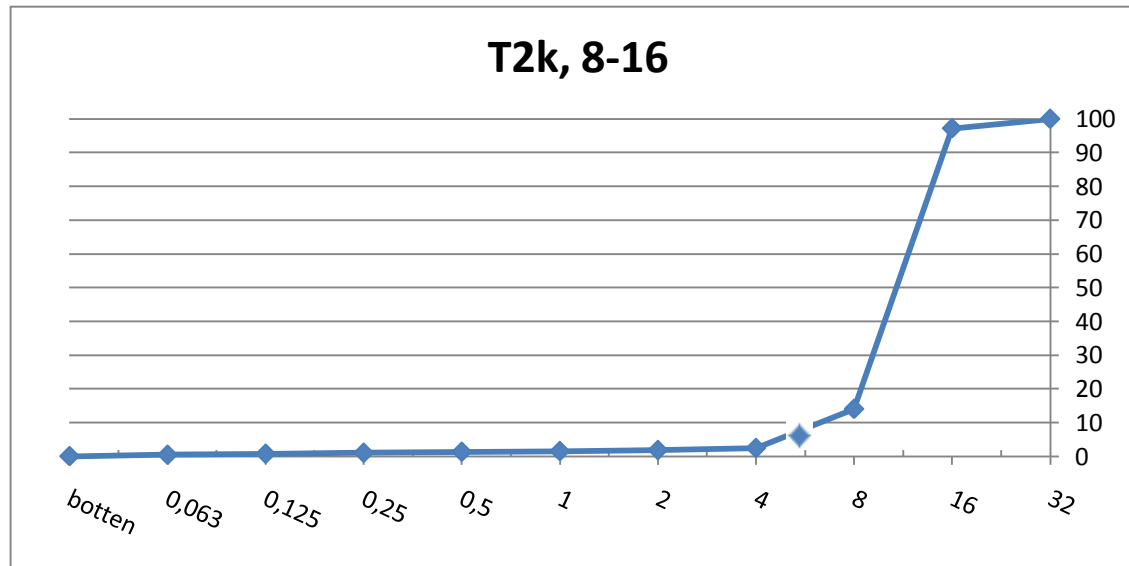
Bilaga 7

Transportbetongfabrik2 8-16 kross

08-dec-10

8-16 mm		
Siktkurva	Passerar %	Sum stannande
32	100,0	0
16	97,2	2,8
8	14,0	86,0
5,6	3,3	96,7
4	2,4	97,6
2	1,8	98,2
1	1,5	98,5
0,5	1,3	98,7
0,25	1,0	99,0
0,125	0,7	99,3
0,063	0,4	99,6
botten	0,0	100

FM= **6,30**



Provkärlets volym: 1,071 l
 Grusets vikt 1447 g
 vattnets vikt 522,5 g
 Grusets volym 0,5485 l

2638 kg/m³ =g/liter

Kompaktdensitet

Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	packning
----------	----------	----------	----------	----------	-----------	----------

Lös packning:

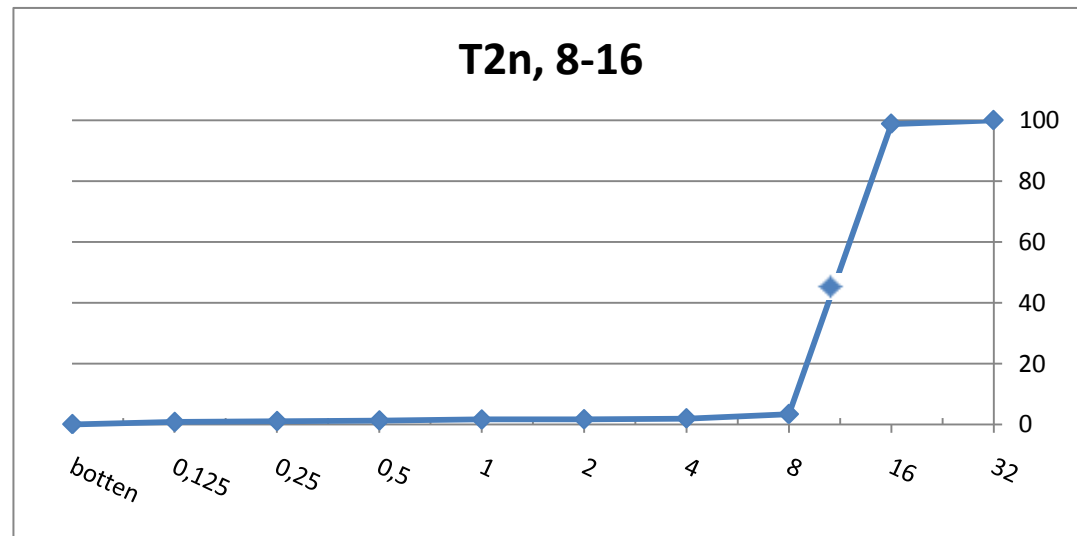
8-16 mm	1415,4	1417,3	1446,2	1447	5725,9	50,66 %
---------	--------	--------	--------	------	--------	----------------

Bilaga 8

8-16mm

Sikturva	Passerar %	Sum stannande
32	100	0
16	98,8	1,2
11,2	44,0	56
8	3,3	96,7
4	1,9	98,1
2	1,6	98,4
1	1,5	98,5
0,5	1,2	98,8
0,25	1,0	99,0
0,125	0,7	99,3
botten	0,0	100

FM= **6,40**



Lilla kärlet:	0,5456 l
Provkärlets volym:	1,071 l
Grusets vikt	1553,2 g
vattnets vikt	483,9 g
Grusets volym	0,5871 l

Kompaktdensitet **2646** kg/m³ =g/liter

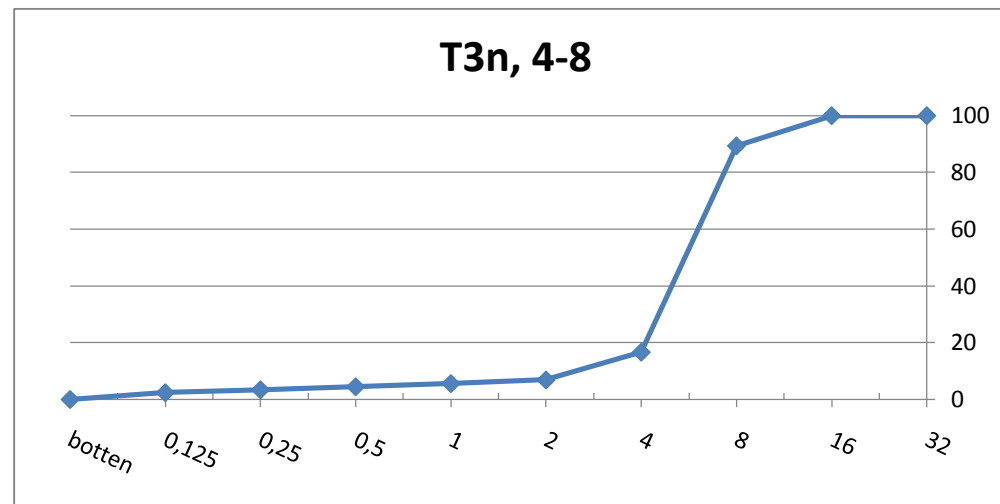
Lös packning:

	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	packning
litet kärl	8-16 mm	762,1	755,9	774,9	770,7		3063,6	53,06 %
stort kärl	8-16 mm	1516,9	1502,4	1546,8	1555,1	1553,2	7674,4	54,17 %

Medelpackning: **53,62** %

Bilaga 9

Siktcurva	Stannar	Stannar %	4-8 mm Passerar %	Sum stannande
32	0,0	0,0	100,0	0,0
16	0,0	0,0	100,0	0,0
8	36,1	10,6	89,4	10,6
4	246,7	72,7	16,7	83,3
2	33,2	9,8	6,9	93,1
1	4,3	1,3	5,6	94,4
0,5	3,8	1,1	4,5	95,5
0,25	3,6	1,1	3,4	96,6
0,125	3,5	1,0	2,4	97,6
botten	8,1	2,4	0,0	100,0
Summa:	339,3	100,0	FM= 5,22	



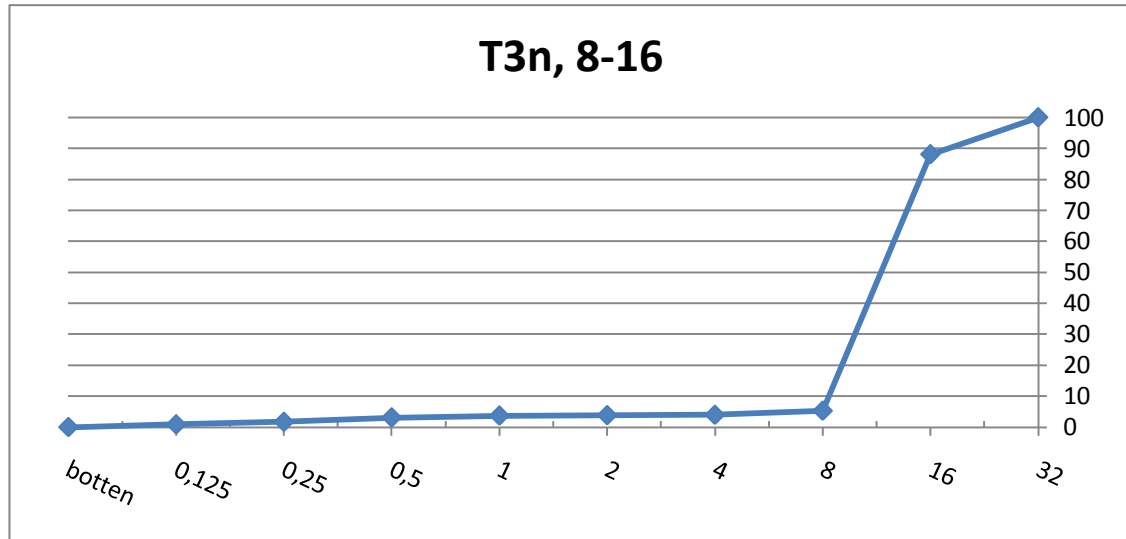
Provkärllets volym: 0,5456 l
 Grusets vikt: 788,5 g
 vattnets vikt: 238,5 g
 Grusets volym: 0,3071 l

Kompaktdensitet: **2568** kg/m³ =g/liter

Lös packning:

Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	packning
4-8 mm	791,6	783,3	788,2	786,2	3149,3	56,20 %

8-16mm				
Siktkurva	Stannar	Stannar %	Passerar %	Sum stannande
32	0	0	100	0,00
16	291,4	11,9	88,1	11,94
8	2021	82,8	5,3	94,73
4	32,4	1,3	3,9	96,06
2	2,6	0,1	3,8	96,16
1	3,1	0,1	3,7	96,29
0,5	14,7	0,6	3,1	96,89
0,25	34,5	1,4	1,7	98,30
0,125	20,3	0,8	0,9	99,14
botten	21,1	0,9	0,0	100,00
Summa:	2441,1	100,0	FM=	6,40



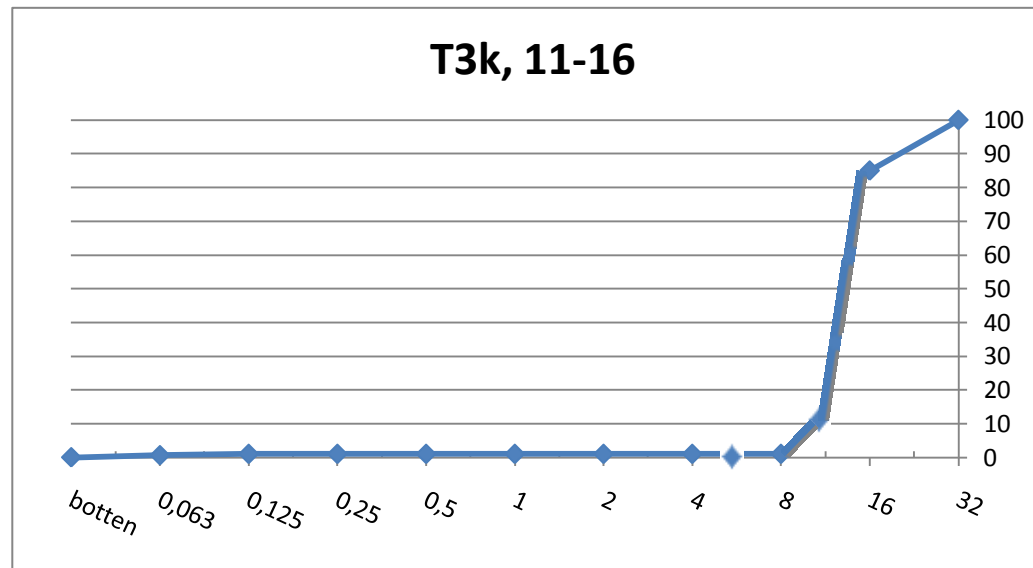
Lilla kärlet:	0,5456 l
Provkärllets volym:	1,071 l
Grusets vikt	1571,5 g
vattnets vikt	475,6 g
Grusets volym	0,5954 l

Kompaktdensitet **2639** kg/m³ =g/liter

Lös packning:	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	packning
litet kärl	8-16 mm	759,1	753,2	743,4	757,4	756,1	3769,2	52,35 %
stort kärl	8-16 mm	1517,3	1508,8	1499,8	1506,9	1517,4	7550,2	53,42 %

Medel: **52,88 %**

11-16 mm		
Siktkurva	Passerar %	Sum stannande
32	100	0,0
16	85	15,0
11,2	11	89,0
8	1	99,0
5,6	1	99,0
4	1	99,0
2	1	99,0
1	1	99,0
0,5	1	99,0
0,25	1	99,0
0,125	1	99,0
0,063	0,6	99,4
botten	0	100,0
Summa:	FM=	6,59



Provkärlets volym:	1,071 l
Grusets vikt	1406,2 g
vattnets vikt	532,6 g
Grusets volym	0,5384 l

Kompaktdensitet **2612** kg/m³ =g/liter

Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	packning
Lös packning: 11-16 mm	1474,3	1462,3	1448,2	1428,5	1436,5	1444,2	8694	51,80 %

Siktkurva	Stannar	0-4 mm		0-2 mm		Stannar %	passerar %	Sum stannande
		Stannar %	Passerar %	Sum stannar				
32	0	0	100	0				
16	0	0,0	100,0	0,0				
8	0	0,0	100,0	0,0				
4	3	0,6	99,4	0,6				
2	4	0,8	98,6	1,4				
1	23	4,5	94,1	5,9	23	4,6	95,4	4,6
0,5	105	20,6	73,5	26,5	105	20,9	74,6	25,4
0,25	216	42,4	31,2	68,8	216	42,9	31,6	68,4
0,125	116	22,7	8,4	91,6	116	23,1	8,5	91,5
0,075	35	6,9	1,6	98,4	35	7,0	1,6	98,4
botten	8	1,6	0	100	8	1,6	0,0	100,0
Summa:	510	100,0	FM=	1,49	503	100,0		

FM =

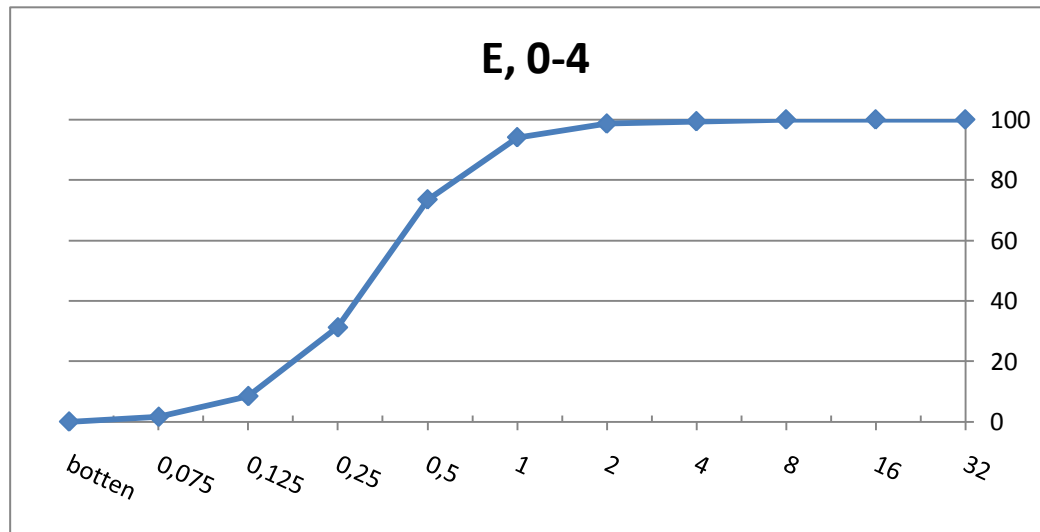
1,44

Kompaktdensitet

2670 kg/m³

Andel filler i gruset (0-2) är:

8,5 %



Bilaga 12 (2/2)

Packning för hela fraktionen

	0,5446 liter						
	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	Packning
Lös packning:	0-4 mm	782	783,9	786	802,2	3154,1	54,23 %

Provning av bruk för att ta fram faktorn k_f till PMM

Cementkvalitet/kompaktdensitet: 3,08

Cementets faktor k_c = 0,18

	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	Packning
Lös packning:	0,125-2 mm	799,4	808	803,8	798,5	3209,7	55,18

Standardiserad packning m hänsyn till fraktionsgränser o kärlets dimensioner:

56,28

H_s =

43,72

Andel filler av 0-2 mm-fraktionen:	< 5 %	<10 %	<15%	>15%	Välj recept enligt fillerhalten
Extra filler 0-0,125	0,00	8,8	15,6	22,5	I detta exempel recept i kolumn nr 2
Cement	360	360	360	360	
Vatten	216	216	216	216	
Grus 0-2	790	687,0	607,7	526,7	
Antag lufthalt 5%					
Volym	628,8	593,5	566,3	538,6	
inklusive luft	661,9	624,7	596,1	566,9	
Ballast(0,125-2mm)/cement	2,01	1,75	1,54	1,34	
filler/cement	0,1876	0,1876	0,1876	0,1876 f/C	
vct	0,60	0,60	0,60	0,60	
Cementhalt	544	576	604	635	kg/m^3
Vattenhalt	326	346	362	381	kg/m^3
Ballastandel	1092	1006	932	850	kg/m^3
Fillerandel	102,0	108,1	113,3	119,1	kg/m^3
Matrisdelen = F_p	59,12	62,34	65,08	68,18	%
vpt Vattenpulvertal	0,5052	0,5052	0,5052	0,5052	(vikt)
Utflyt hos bruksprover i mm	128,0	156,8	186,75		
Sjunk hos bruksprover i mm	24,8	31,5	38		

k_f =

1,40

Siktkurva	Stannar	Stannar %	0-8 mm		0-2 mm		Stannar %	passerar %	Sum stannande
			Passerar %	Sum stannar	Passerar %	Sum stannar			
32	0	0	100	0					
16	0	0,0	100,0	0,0					
8	4,2	0,5	99,5	0,5					
4	42,7	5,1	94,5	5,5					
2	55	6,5	87,9	12,1					
1	117,1	13,9	74,1	25,9	117,1	15,8	84,2	15,8	
0,5	241,2	28,5	45,5	54,5	241,2	32,5	51,8	48,2	
0,25	246,7	29,2	16,4	83,6	246,7	33,2	18,6	81,4	
0,125	107,4	12,7	3,6	96,4	107,4	14,5	4,1	95,9	
0,063	-	-	-	-	-	-	-	-	-
botten	30,8	3,6	0,0	100	30,8	4,1	0,0	100	
Summa:	845,1	100,0	FM=	2,30	743,2	100,0			

FM =

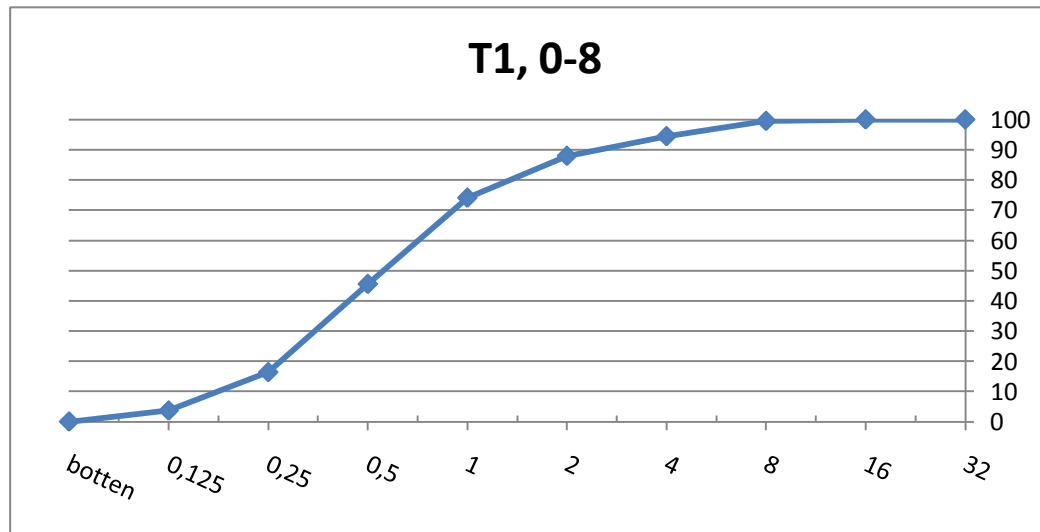
1,93

Kompaktdensitet

2650 kg/m³

Andel filler i gruset (0-2) är:

4,1 %



Bilaga 13 (2/2)

Packning för hela fraktionen

	Fraktion	0,5446 liter vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	Packning
Lös packning:	0-8 mm	833,5	839,2	834,4	839,8	3346,9	57,98 %

Provning av bruk för att ta fram faktorn k_f till PMM

Cementkvalitet/kompaktdensitet: **3,08**

Cementets faktor k_c = **0,18**

	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	Packning
Lös packning:	0,125-2 mm	814,3	797,8	792,5	801	3205,6	55,53

Standardiserad packning m hänsyn till fraktionsgränser o kärlets dimensioner:

56,64

H_s =

43,36

Andel filler av 0-2 mm-fraktionen:	< 5 %	<10 %	<15%	>15%	Välj recept enligt fillerhalten
Extra filler 0-0,125	0,00	4,3	7,6	10,9	I detta exempel recept i kolumn nr 1
Cement	360	360	360	360	
Vatten	216	216	216	216	
Grus 0-2	790	687,0	607,7	526,7	
Antag lufthalt 5%					
Volym	631,0	593,7	565,1	535,7	
inklusive luft	664,2	625,0	594,8	563,9	
Ballast(0,125-2mm)/cement	2,10	1,83	1,62	1,40	
filler/cement	0,0909	0,0909	0,0909	0,0909	f/C
vct	0,60	0,60	0,60	0,60	
Cementhalt	542	576	605	638	kg/m^3
Vattenhalt	325	346	363	383	kg/m^3
Ballastandel	1140	1054	979	895	kg/m^3
Fillerandel	49,3	52,4	55,0	58,1	kg/m^3
Matrisdelen = F_p	56,98	60,24	63,04	66,22	%
vpt Vattenpulvertal	0,5500	0,5500	0,5500	0,5500	(vikt)
Utflyt hos bruksprover i mm	159,3	181,85	223		
Sjunkt hos bruksprover i mm	34,5	38	44		

k_f =

2,42

Siktkurva	Stannar	Stannar %	0-8 mm		0-2 mm		Stannar %	passerar %	Sum stannande
			Passerar %	Sum stannar	Passerar %	Sum stannar			
32	0	0	100	0					
16	0	0,0	100,0	0,0					
8	19	1,8	98,2	1,8					
4	114,8	10,7	87,5	12,5					
2	125,4	11,7	75,8	24,2					
1	218,6	20,4	55,4	44,6	218,6	26,9	73,1	26,9	
0,5	249,1	23,2	32,2	67,8	249,1	30,7	42,4	57,6	
0,25	187,1	17,5	14,7	85,3	187,1	23,0	19,4	80,6	
0,125	111,9	10,4	4,2	95,8	111,9	13,8	5,6	94,4	
0,063	-	-	-	-	-	-	-	-	-
botten	45,5	4,2	0,0	100	45,5	5,6	0,0	100	
Summa:	1071,4	100,0	FM=	2,84	812,2	100,0			

FM =

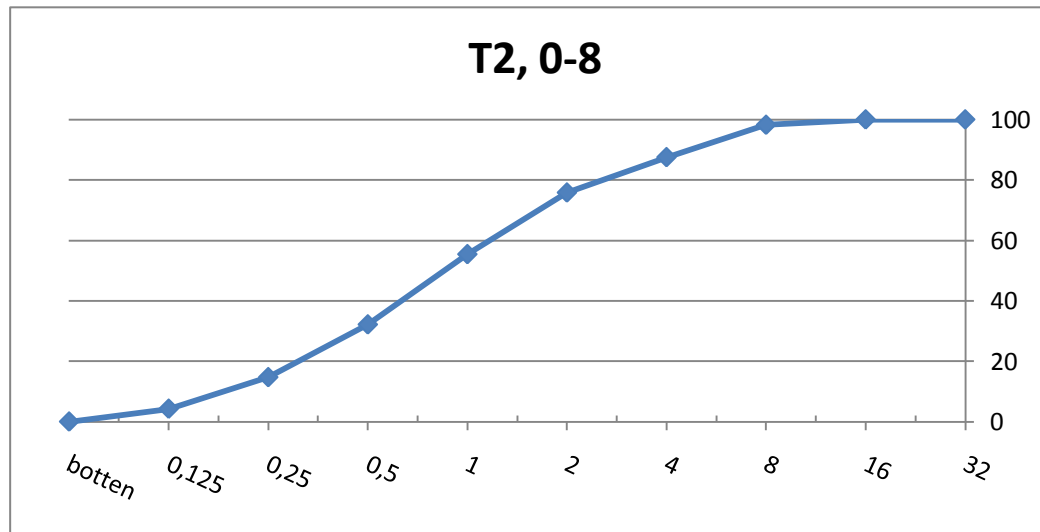
2,12

Kompaktdensitet

2491 kg/m³

Andel filler i gruset (0-2) är:

5,6 %



Bilaga 14 (2/2)

Packning för hela fraktionen

	0,5446 liter						
	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	Packning
Lös packning:	0-8 mm	861,5	851,7	857,1	849,6	3419,9	63,03 %

Provning av bruk för att ta fram faktorn k_f till PMM

Cementkvalitet/kompaktdensitet: **3,08**

Cementets faktor k_c = **0,18**

	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	Packning
Lös packning:	0,125-2 mm	778,9	786,6	783,4	788,3	3137,2	57,82

Standardiserad packning m hänsyn till fraktionsgränser o kärlets dimensioner:

58,97

H_s =

41,03

Andel filler av 0-2 mm-fraktionen:	< 5 %	<10 %	<15%	>15%	Välj recept enligt fillerhalten
Extra filler 0-0,125	0,00	5,8	10,2	14,8	I detta exempel recept i kolumn nr 2
Cement	360	360	360	360	
Vatten	216	216	216	216	
Grus 0-2	790	687,0	607,7	526,7	
Antag lufthalt 5%					
Volym	650,0	611,0	580,9	550,2	
inklusive luft	684,2	643,1	611,5	579,2	
Ballast(0,125-2mm)/cement	2,07	1,80	1,59	1,38	
filler/cement	0,1229	0,1229	0,1229	0,1229	f/C
vct	0,60	0,60	0,60	0,60	
Cementhalt	526	560	589	622	kg/m^3
Vattenhalt	316	336	353	373	kg/m^3
Ballastandel	1090	1008	938	858	kg/m^3
Fillerandel	64,7	68,8	72,4	76,4	kg/m^3
Matrisdelen = F_p	56,25	59,52	62,34	65,54	%
vpt Vattenpulvertal	0,5343	0,5343	0,5343	0,5343	(vikt)
Utflyt hos bruksprover i mm	151,7	173,50	201,9		
Sjunkt hos bruksprover i mm	30,5	38	40		

k_f =

1,88

Siktkurva	Stannar	Stannar %	0-2 mm		0-2 mm			
			Passerar %	Sum stannar	Stannar %	passerar %	Sum stannande	
32	0	0	100	0				
16	0	0,0	100,0	0,0				
8	0	0,0	100,0	0,0				
4	0	0,0	100,0	0,0				
2	11	2,2	97,8	2,2				
1	32	6,4	91,4	8,6	32	6,5	93,5	6,5
0,5	124	24,8	66,6	33,4	124	25,4	68,1	31,9
0,25	243	48,6	18,0	82,0	243	49,7	18,4	81,6
0,125	82	16,4	1,6	98,4	82	16,8	1,6	98,4
0,063	7	1,4	0,2	99,8	7	1,4	0,2	99,8
botten	1	0,2	0,0	100	1	0,2	0,0	100,0
Summa:	500	100,0	FM=	1,75	489	100,0		

FM =

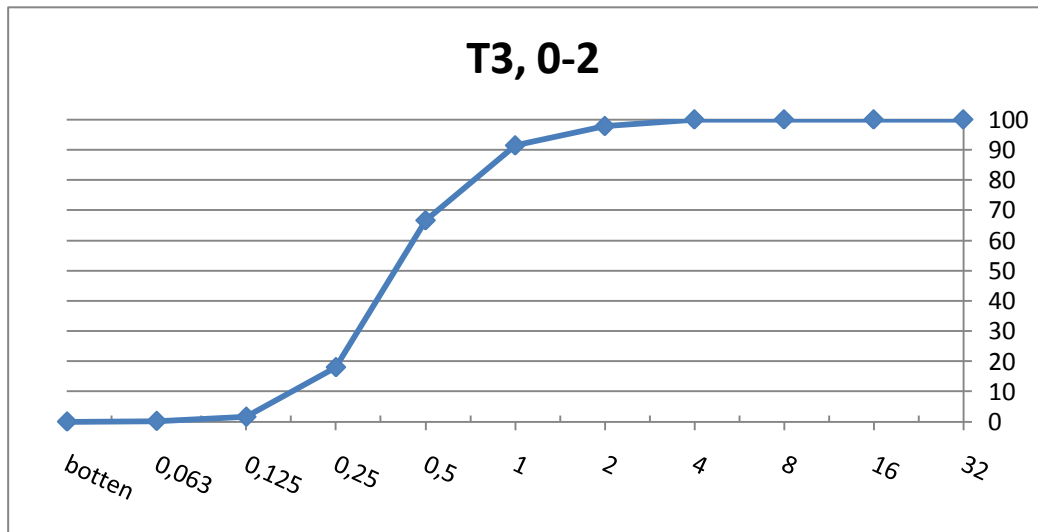
1,69

Kompaktdensitet

2551 kg/m³

Andel filler i gruset (0-2) är:

1,6 %



Bilaga 15 (2/2)

Packning för hela fraktionen

	Fraktion	0,5446 liter vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	Packning
Lös packning:	0-2 mm	828,3	820,5	821,7	823,4	3293,9	59,28 %

Provning av bruk för att ta fram faktorn k_f till PMM

Cementkvalitet/kompaktdensitet: **3,08**

Cementets faktor k_c = **0,18**

	Fraktion	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	vikt [g]	Summavikt	Packning
Lös packning:	0,125-2 mm	825,6	836,2	833,3	823,5	3318,6	59,72

Standardiserad packning m hänsyn till fraktionsgränser o kärlets dimensioner:

60,91

H_s =

39,09

Andel filler av 0-2 mm-fraktionen:	< 5 %	<10 %	<15%	>15%	Välj recept enligt fillerhalten
Extra filler 0-0,125	0,00	1,7	3,0	4,3	I detta exempel recept i kolumn nr 1
Cement	360	360	360	360	
Vatten	216	216	216	216	
Grus 0-2	790	687,0	607,7	526,7	
Antag lufthalt 5%					
Volym	642,6	602,8	572,3	541,0	
inklusive luft	676,4	634,6	602,4	569,5	
Ballast(0,125-2mm)/cement	2,16	1,88	1,66	1,44	
filler/cement	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359 f/C	
vct	0,60	0,60	0,60	0,60	
Cementhalt	532	567	598	632	kg/m^3
Vattenhalt	319	340	359	379	kg/m^3
Ballastandel	1149	1065	992	910	kg/m^3
Fillerandel	19,1	20,4	21,5	22,7	kg/m^3
Matrisdelen = F_p	54,96	58,26	61,10	64,34	%
vpt Vattenpulvertal	0,5792	0,5792	0,5792	0,5792	(vikt)
Utflyt hos bruksprover i mm	165,0	192,00	218,25		
Sjunkt hos bruksprover i mm	35	39	44		

k_f =

6,35