

Optimal partikelfördelning för förbättrad reologi hos betong med krossballast

Oscar Henriksson

ISRN: LUTVDG/TVBM--/5060--(1-37)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds tekniska högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
22100 Lund

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

Förord

Detta examensarbete har utförts i samarbete med Abetong och avdelningen för byggnadsmaterial på Lunds tekniska högskola. Jag vill tacka handledarna för arbetet som har varit Bertil Persson, LTH, och Jan Lillieblad, Abetong. Tack också till Bo Johansson, LTH, för hjälp med siktningen, Roger Lehrberg, Cementa Research AB, för hjälp med lasersiktningen, samt personalen på Abetong i Vislanda som hjälpte till med provgjutningarna.

Sammanfattning

Naturgruset som används på Abetongs fabrik i Vislanda har på senare tid fått en försämrad gradering med minskad mängd finmaterial. Man har varit orolig för att detta ska påverka reologin hos betongen och därför har en översyn av partikelfördelningen hos recepten utförts i detta examensarbete. I arbetet har också möjligheten att ersätta en del av naturgruset med krossat material undersökts då detta är ett miljömål hos Abetong.

Noggranna siktkurvor har tagits fram genom konventionell siktning med siktnät och genom att finmaterialet $< 0,125$ mm har skickats till Cementa Research i Slite för lasersiktning. Förutom att lasersiktningen gav noggranna indata visade den också att finmaterial hos krossat material har finare gradering än den hos naturgrus. Betongrecepten har därefter optimerats med hjälp av datorprogrammet "Optiprop" till idealkurvor som härstammar från datorprogrammet "PROPH 2.0". Vid optimeringen infördes två nya material, stenkross som ska ersätta naturgruset samt "Baskarpsand 15" som valdes för att fylla ut ett språng i kornfördelningskurvan.

Sju recept har provgjutits i 25-literssatser på Abetongs fabrik i Vislanda där reologin kontrollerades med sättmått. Resultaten visar på ett minskat vattenbehov hos de optimerade recepten, detta trots att en del naturgrus har ersatts med stenkross. En kompletterande provgjutning utan "Baskarpsand" utfördes också och då dessa ej gav sämre resultat konstaterades att inblandningen av "Baskarpsand 15" var onödig. Slutligen testades ett recept där allt naturgrus ersatts av stenkross. Provgjutningen gav goda resultat, antagligen pga. den större mängden finmaterial som fanns i stenkrossen. Dock rekommenderas provgjutning i full skala då de små provblandningarna inte alltid ger samma resultat som i produktionen. Provgjutning med bara torrt material kan också vara av intresse då man får en större noggrannhet på vattenbehovet.

En översikt av hållfasthetskraven och den faktiska hållfastheten hos betongen visar att det finns ett utrymme för en minskad mängd cement. Detta tillsammans med en övergång från naturgrus till stenkross kan ge en stor minskning av produktionskostnaden.

Summary

The sieve grading of the natural gravel used at Abetong's factory in Vislanda has recently deteriorated because of the reduced quantity of fine material. Concern has been raised that this could affect the rheology of the concrete and that is why the particle distribution has been reviewed in this master's thesis. The possibility to partially replace the natural gravel with crushed stone has also been examined as this is an environmental goal of Abetong.

Accurate grading curves have been obtained with sieve nets and the fine material has been sent to Cements Research in Slite to be analysed with laser technology. Besides giving accurate sieve data the laser analysis also showed that the fine material from crushed stone has a finer sieve grading than fine material from natural gravel.

The mix designs have been optimized with the computer program "Optiprop" to match ideal curves that originate from the computer program "PROPH 2.0".

In the optimization two new materials were introduced, crushed stone to replace the natural gravel and "Baskarp sand 15" which was chosen to fill a gap in the sieve grading curve.

Seven mix designs have been tested in 25-litre batches at Abetongs factory in Vislanda where the rheology was measured with a slump cone. The results show a decreased water requirement in the optimized mix designs despite the replacement of natural gravel with crushed stone. A complementary test of a mix design without "Baskarpsand" was also made and the results showed no deterioration. Hence the conclusion was drawn that "Baskarpsand" is unnecessary in the mix design.

Finally a mix design where all natural gravel was replaced with crushed stone was tested. The mix design gave good results, probably because of the increased quantity of fine material that came from the crushed stone. However it is recommended to perform a full scale test because of the variations small mixes can show compared to production. A test with only dry material can also be of interest to give better accuracy in the water requirement.

An overview of the actual concrete strength and the strength requirements shows that there is scope to decrease the amount of cement. Together with a replacement of natural gravel with crushed stone, this could give a significant decrease in production costs.

Innehållsförteckning

Förord.....	iii
Sammanfattning	iv
Summary	v
Innehållsförteckning	vi
1. Inledning	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar.....	1
1.4 Metodik	1
2. Ideal partikelfördelning i betong.....	2
3. Material	4
3.1 Ballast	4
3.2 Tillsatsmedel	4
3.3 Cement	5
4 Metoder	6
4.1 Siktning	6
4.2 Lasersiktning.....	6
4.3 Optiprop	7
4.4 Fuktmätning	7
4.5 Konsistensmätning.....	7
4.6 Lufthalt och densitet.....	8
4.7 Hållfasthet	9
4.8 Provblandningar	9
5 Resultat och diskussion	11
5.1 Siktkurvor	11
5.2 Lasersiktning.....	12
5.3 Optimering	13
5.4 Provgjutning.....	15
5.5 Jämförelse mellan tidigare och optimerade recept.....	31
6. Felkällor	35
6.1 Siktkurvor	35
6.2 Fuktmätning	35
6.3 Lufthaltsmätning	35
7. Slutsatser	36
7.1 Lasersiktning.....	36
7.2 Provgjutning.....	36
7.3 Ekonomi.....	36
Referenser	37

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Partikelfördelningen har visat sig ha en avgörande betydelse för reologin hos betong [1]. Detta gäller även fördelning av finmaterial, filler och cement < 0.125 mm, särskilt för självkompakterande betong [2]. Abetong har från och till haft problem med reologin hos betongen på fabrikerna i Vislanda troligen beroende av variationer i grusets finmaterial. På fabriken i Falkenberg har man däremot mycket goda erfarenheter av de använda betongrecepten och därför kan en jämförelse fabrikerna emellan vara intressant.

Naturgrus är en ändlig resurs och i en undersökning av "Sveriges geologiska undersökning"(SGU) fann man ett 40-tal kommuner där naturgruset bara kommer att räcka under 20 år till vid nuvarande produktionstakt. Enligt SGU uppgick uttaget av ballast år 2000 till 71,2 miljoner ton varav 24,6 miljoner ton (35 procent) var naturgrus [3]. I miljö kvalitetsmålen anges att uttaget av naturgrus år 2010 ska uppgå till max 12 miljoner ton. Därför har man infört en skatt på naturgrus som för närvarande är 10 kr/ton. Med anledning av detta vill Abetong undersöka möjligheterna att ersätta en del av naturgruset i betongen med krossat stenmaterial.

1.2 Syfte

Arbetet syftar till att optimera partikelfördelningen i Abetongs recept. För detta ändamål studeras först partikelfördelningen hos nuvarande recept med tillhörande reologi, även finmaterialfördelningen genom lasersikting vid Cementa Research, Slite. Efter val av en ideal partikelfördelning optimeras recepten till denna idealkurva med hjälp av datorprogram och eventuellt genom inblandning av nya ballastmaterial. Även möjligheten att blanda i stenkross som ersättning för naturgrus undersöks men fokus ligger i huvudsak på att få en ideal partikelfördelning.

1.3 Avgränsningar

Detta arbete kommer att behandla Abetongs recept från fabrikerna i Falkenberg och Vislanda med avseende på partikelfördelning och reologi. Recepten optimeras till "ideal" partikelfördelning varpå gjutbarheten kontrolleras i produktion.

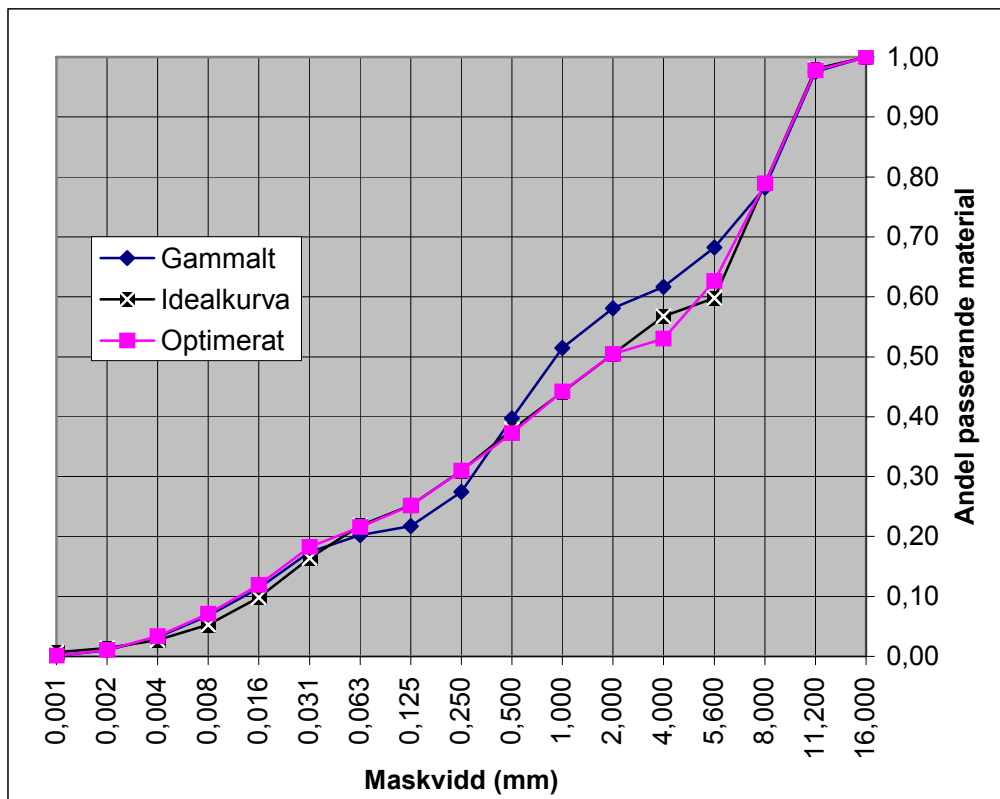
1.4 Metodik

Abetongs ballastmaterial siktas med konventionella siktnät vilket ger data för partiklar ≥ 0.125 mm. Det resterande finmaterialet < 0.125 mm lasersiktas vid Cementa Research i Slite. Datorprogrammen PROPH [4] och OPTIPROP [5,6] används för att räkna ut vilka andelar av de ingående materialen som ger optimal partikelfördelning. Reologin kontrolleras med sättmått och flytsättmått.

2. Ideal partikelfördelning i betong

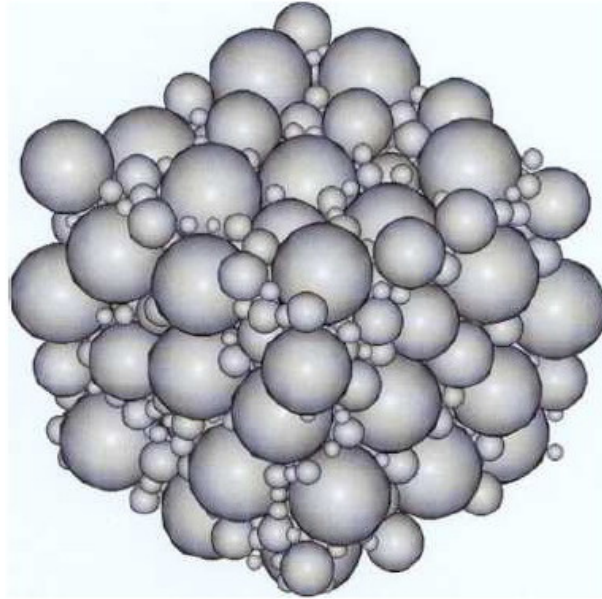
Betong består generellt av cement, ballast, vatten och tillsatsmedel. De fasta partiklarna utgörs således av cement och ballast där ballasten kan bestå av t.ex. ett naturgrus med storlek 0-8 mm och ett krossat stenmaterial 8-16 mm.

Teorin om ideal partikelfördelning bygger på att varje mellanrum mellan de större stenarna i betongen måste fyllas ut med mindre partiklar och vatten. En ideal partikelfördelning betyder då att partiklarnas spridning i storlek är optimerad på så sätt att de fyller ut mellanrummen mellan de andra partiklarna så effektivt som möjligt. En avsaknad av partiklar med en viss storlek ger en svacka i siktcurvan, ett så kallat partikelsprång, se figur 2.1.



Figur 2.1 Exempel på betongrecept med visst partikelsprång mellan 0,063 och 0,125 mm samt överskott av partiklar mellan 0,25 och 1,0 mm.

Denna svacka i partikelfördelningen måste fyllas ut av finare partiklar. Detta leder till ett ökat cementbehov. Partikelsprånget ger också ett ökat vattenbehov då det blir mer hålrum mellan partiklarna som får fyllas ut med vatten. För att ge betongen rörlighet behövs det förutom vatten i hålrummen mellan partiklarna också ett litet överskott av vatten som kan hålla isär partiklarna och upphäva friktionen. Flytmedel har i sin tur till uppgift att förstärka denna effekt. Figur 2.2 visar hur mindre partiklar fyller ut mellanrummen mellan de större partiklarna.



Figur 2.2 3D-modell över partikelpackning.

De idealkurvor som används i detta examensarbete har sitt ursprung i datorprogrammet "PROPH 2.0" [4]. Programmet innehåller empiriska idealkurvor för olika betongkvaliteter framtagna genom laboratorieförsök. Dessa kurvor har sedan uppdaterats med data från väl fungerande betongrecept med god gjutbarhet från Strängbetongs produktion.

3. Material

3.1 Ballast

Ballast från både Abetongs fabrik i Falkenberg och i Vislanda har undersökts med avseende på partikelfördelning. I tabell 3.1 redovisas de olika ballastmaterialen i fabrikena. För siktkurvor och utvärdering se kapitel 5.

Tabell 3.1 Ballastfraktioner på de olika fabrikena.

Fabrik	Fraktion (mm)	Typ	Ort
Falkenberg	0-4	Naturgrus	Släryds
	0-8	Naturgrus	Folkared
	8-11	Makadam	Obbhult
	8-16	Makadam	Folkared
	0-0,25	Kalkstensfiller	Ignaberga
Vislanda	0-8	Naturgrus	Förarp
	4-8	Makadam	Räppe
	6-12	Makadam	Räppe
	8-16	Makadam	Räppe
	0-2	Makadam	Räppe
	0,063-0,25	Natursand	Baskarp

3.2 Tillsatsmedel

De tillsatsmedel som används vid fabrikena är följande:

Falkenberg:

Sika M97 är ett effektivt vattenreducerande flyttillsatsmedel huvudsakligen baserat på modifierat melaminformaldehydkondensat som ger betongen god arbetbarhet och god styrkeutveckling [7].

Sika CemFlux Hus är ett supereffektivt vattenreducerande flyttillsatsmedel av den tredje generationen som ger betongen god arbetbarhet och god styrkeutveckling [7].

Complex P30 är en superplasticerare/vattenreducerare baserad på den tredje generationen modifierade polymerer (polykarboxylateter). Complex P30 är speciellt designad för användning i högkvalitetsbetong till betongelement och förspänd betong samt i fabriksbetong när man har krav på snabbt tillstyvnande och snabb hållfasthetstillväxt [8].

Micro Air är ett luftporbildande medel som används för att få en ökad frostbeständighet. Luftporerna ger plats åt expansionen som sker när vatten i betongen fryser till is [9].

Vislanda:

Sika CemFlux Prefab 30 är ett supereffektivt vattenreducerande flyttillsatsmedel av den tredje generationen som ger betongen god arbetbarhet och god styrkeutveckling. Medlet har ingen påtagligt retarderande effekt och lämpar sig därför till prefabproduktion samt fabriksbetong med låg temperatur [7].

Glenium 400, samma egenskaper som ”Sika CemFlux Prefab 30” [7].

Glenium Stream är ett viskositetshöjande medel speciellt framtaget för att användas i självkompakterande betong där man vill ha hög tolerans mot variationer i ballastfukt, kornform och finhetsmodul. Stream kan även användas i betong med låg finmaterialhalt.

Micro Air, se ovan.

3.3 Cement

Cementtyperna som ingår i recepten som behandlas i denna rapport är följande:

- Snabbhårdnande Portlandcement Skövde: CEM I 52,5 R
- Anläggningscement CEM I 42,5 N BV/SR/LA, från Degerhamn.
- Byggcement Skövde: CEM II/A-LL 42,5 R.

Det snabbhårdnande cementet använder Abetong främst till förspända konstruktioner som t.ex. betongslipers då det annars tar för lång tid innan man kan avforma.

Då det finns extra krav på beständighet som t.ex. sulfatresistens används anläggningscement. I övriga fall används byggcement då det är mest ekonomiskt.

4 Metoder

4.1 Siktning

Alla ballastsorter från Falkenberg och Vislanda siktades med en siktapparat för att insamla minst 50 gram finmaterial $< 0,125$ mm. Finmaterialet skickades till Cementa Research i Slite för lasersiktning. Siktcurvan från 0,125 mm till 16 mm noterades också för materialen. Dessa kurvor, framtagna i februari 2005 har använts i beräkningen av alla recept. Figur 4.1 visar siktapparaterna som använts i arbetet.



Figur 4.1 Siktapparater.

4.2 Lasersiktning

Lasersiktningen på Cementa Research gjordes med en Malvern Mastersizer 2000. Mätningen går till så att partiklarna slammas upp i en vätska som ger en bra dispergering som sedan genomlyses med lasrar. Principen är att olika stora partiklar sprider ljuset i olika riktningar och med hjälp av detektorer som mäter diffraktionsmönstret kan man sedan beräkna en kornstorleksfördelning [10]. Instrumentet kan detektera partiklar mellan $0,02 \mu\text{m}$ och 2 mm .

Lasersikten ger oftast ett lite annorlunda värde än ett siktnät då den beräknar ett värde från en teoretisk modell. T.ex. angav lasersiktningen att ca 15% finmaterial från ”8-11”-materialet var större än $0,125$ mm. Detta värde angavs trots att finmaterialet hade passerat en mekanisk sikt med siktvidd på $0,125$ mm. För att kunna sammanfoga värdena från trådnätssiktningen med värdena från lasersiktningen krävdes en omräkningsmodell. Detta gjordes så att passerande material för siktvidden $0,125$

Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast sattes till 100 % och sedan beräknades en faktor för att beräkna om de övriga fraktionerna, se tabell 4.1.

Tabell 4.1 Exempel på omräkning från lasersikt till trådnätssikt.

Siktvidd (mm)	Lasersiktning	Omräknat från laser till siktnät	
	Passerande material (%)	Passerande material (%)	Faktor siktnät/laser:
0.125	85.18	100.00	1.174
0.063	55.43	65.07	
0.032	32.62	38.30	
0.016	18.25	21.43	
0.008	9.27	10.88	
0.004	4.17	4.90	
0.002	1.36	1.60	
0.001	0.22	0.26	

4.3 Optiprop

De nya recepten beräknades med datorprogrammet Optiprop [5,6] som är en vidareutveckling av datorprogrammet PROPH [4]. Programmet använder Monte Carlometoden för att proportionera ballastmaterialen så att kornfördelningen anpassas till den valda idealkurvan så bra som möjligt. Optiprop hanterar kornstorlekar ned till 0,001 mm till skillnad mot PROPH som har minsta siktvidden 0,125 mm.

4.4 Fuktmätning

Fuktmätning gjordes på all fuktig ballast. Ett kärl med ca 1 kg representativ ballast värmdes genom eldning av T-sprit och fukthalten räknades ut genom viktskillnaden.

4.5 Konsistensmätning

För att kontrollera konsistensen togs sättmått på den blandade betongen. Till detta används en sättkon som fuktas något och placeras på en fuktad stålplatta. Konen fylls till 1/3 med betong varpå den kompakteras med 25 stötar med en stålstav. Detta upprepas två gånger, dock är det bara det nya lagret betong som ska utsättas för stötar. Därefter jämnas ytan av och konen dras uppåt med en jämn långsam rörelse varpå höjdskillnaden mellan sättkonen och den ihopsjunkna betongens högsta punkt utgör sättmättet.



Figur 4.2 Sättkon och stålstav.

För den mer lättflytande betongen mäts istället flytsättmättet. Proceduren liknar den för vanligt sättmått med skillnaden att man inte kompakterar betongen med en stålstav samt att man istället för höjden mäter ett medelvärde på diametern på den cirkel som den utbredda betongen bildar, se figur 4.3.



Figur 4.3 Flytsättmått.

4.6 Lufthalt och densitet

För att mäta lufthalten användes en lufthaltsmätare som består av ett kärl och ett lock med pumpmekanism och tryckmätare, se figur 4.4. Kärlet fylls till mitten, vibreras och fylls sedan helt och vibreras tills man får en jämn yta. Kanten på kärlet stryks av så att man får en tät förslutning när locket sätts på. Sedan fylls mellanrummet mellan betongen och locket med vatten genom ventiler som sedan försluts. Ett standardiserat tryck pumpas upp i locket och släpps ut i betongen varpå tryckmätaren ger ett direkt värde på lufthalten i betongen.



Figur 4.4 Lufthaltsmätare.

4.7 Hållfasthet

För varje blandning göts två kuber för kontroll av hållfastheten, se figur 4.5. Kuberna fylldes till mitten, vibrerades och fylldes sedan helt och vibrerades igen varefter ytan jämnades av. Kuberna lagrades sedan 1 dygn i luft, därefter under vatten i 7 dagar och sedan i luft tills 28 dygns ålder var uppnådd då kuberna provtrycktes.



Figur 4.5 Kuber gjutna för hållfasthetsprovning.

4.8 Provblandningar

För att göra en kontroll av reologin hos de optimerade recepten valdes 7 recept ut för provblandning. För varje recept gjordes en blandning med originalreceptet och en med det optimerade receptet, vardera på ca 25 liter. För de flesta blandningarna behövdes mer flytmedel än vad som var angivet i recepten för att få rätt konsistens. Detta beror på att man på fabriken ofta späder betongen med vatten för att nå önskad

Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast

konsistens, samt att flytmedel inte har lika stor effekt vid blandning med små volymer [11]. För att inte få varierande vattencementtal för de jämförande blandningarna undveks spädning med vatten i de flesta blandningarna.

Med hjälp av erfaren personal på fabriken tillsattes flytmedel tills man tyckte att betongen hade uppnått önskad konsistens. Därefter mättes lufthalt, densitet, sättmått eller flytsättmått. Två kuber göts också för kontroll av 28-dygnshållfasthet. Figur 4.6 visar betongblandaren med en volym på ca 200 l som användes vid försöken.

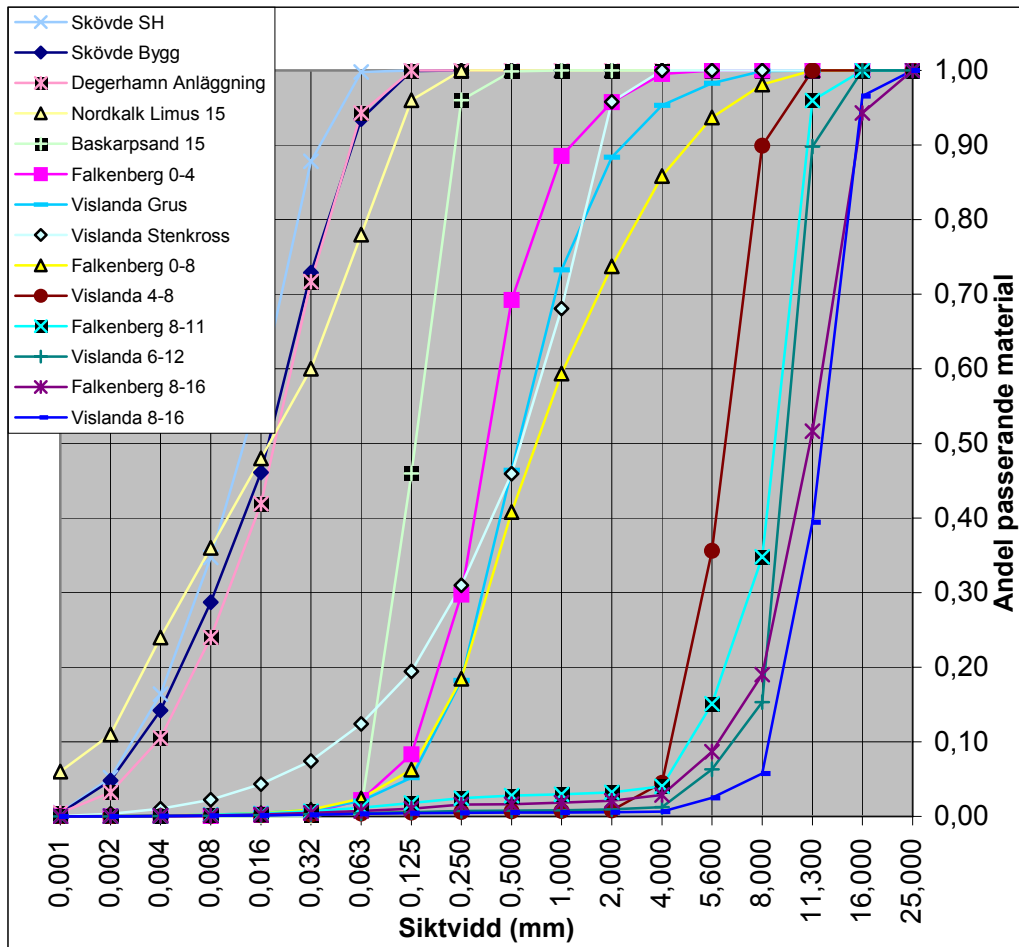


Figur 4.6 Betongblandare.

5 Resultat och diskussion

5.1 Siktcurvor

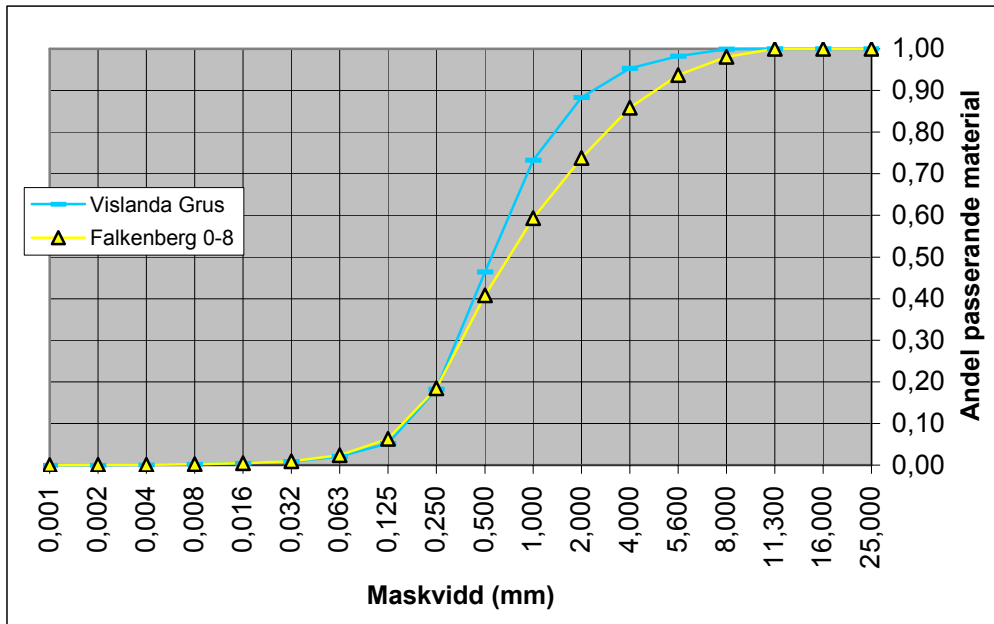
För att få noggranna data att använda i Optiprop siktades alla ballastmaterial förutom ”Baskarpsand 15” och ”Nordkalk Limus 15” där data togs från leverantören, se figur 5.1.



Figur 5.1 Siktcurvor för ballastmaterial samt cement. Ordningsföljden i förklaringsrutan är den samma som kurvorna från vänster till höger i linjen $Y=0,70$.

En av anledningarna till att man får bättre resultat med betongrecepten i Falkenberg än i Vislanda är att gruset i Vislanda har en sämre gradering. Gruset har för lite material mellan 0,063 och 0,125 mm och för mycket mellan 0,25 och 1,0 mm, se figur 5.2. Det sämre gruset gav upphov till en del av avvikelserna från idealkurvan (se exempelvis figur 2.1).

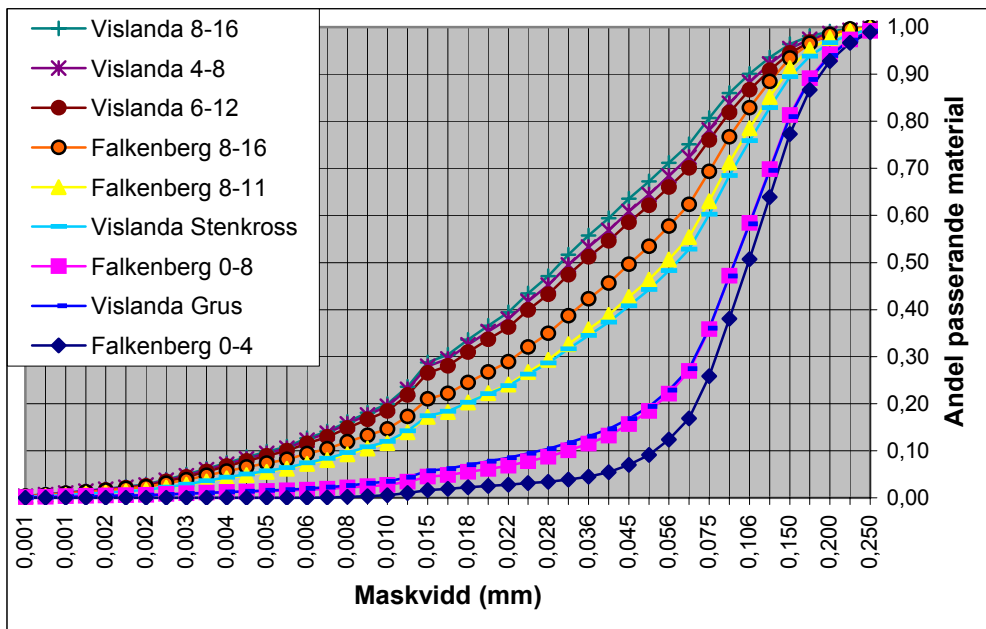
Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast



Figur 5.2 Jämförelse mellan naturgrus (0-8) i Vislanda och Falkenberg.

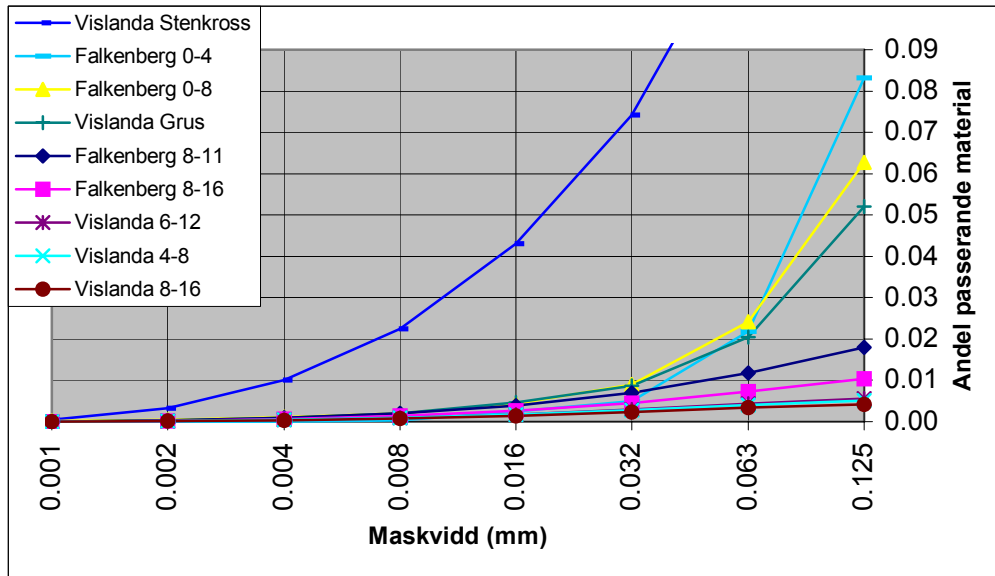
5.2 Lasersiktning

Resultaten från lasersiktningen visar att finmaterialet från det krossade materialet innehåller finare partiklar än finmaterialet från naturgruset vid samma fraktion, se figur 5.3.



Figur 5.3 Siktcurvor för finmaterialet från ballastmaterialen. Ordningsföljden i förklaringsrutan är den samma som kurvorna från vänster till höger i linjen $Y=0.40$.

Figur 5.4 visar utseendet för den totala andelen finmaterial.

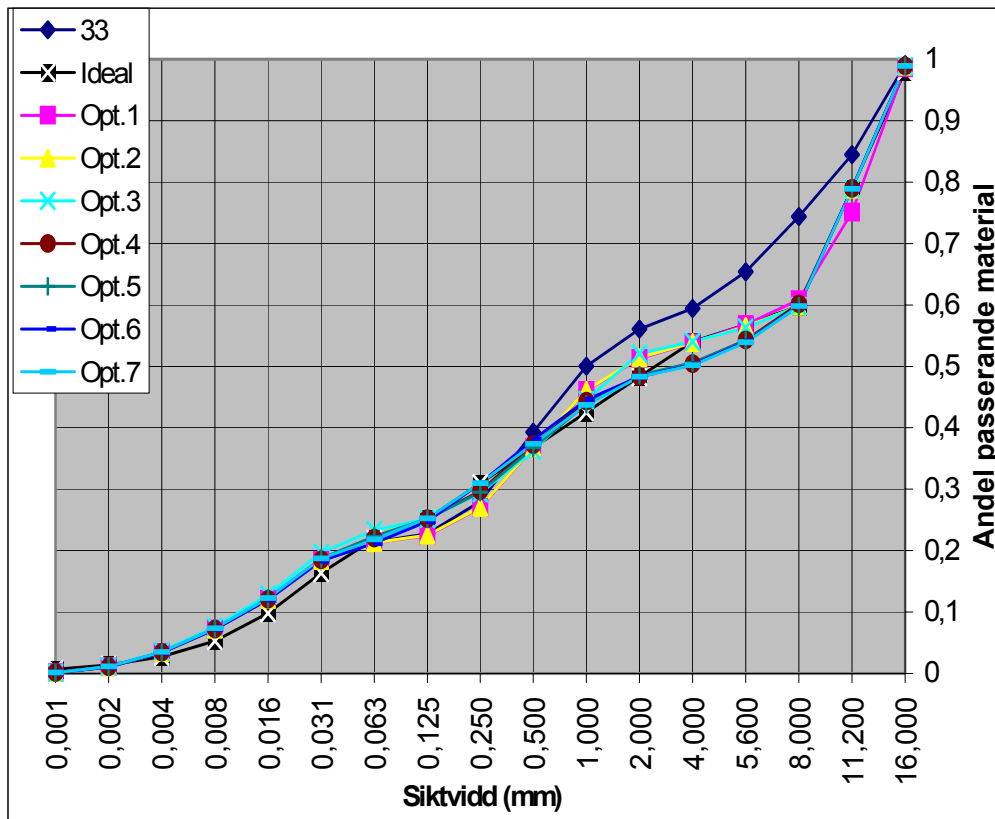


Figur 5.4 Den totala siktcurvans utseende i finmaterialområdet (förstoring av figur 5.1). Ordningsföljden i förklaringsrutan är den samma som kurvorna uppifrån och ner i linjen $X=0.125$.

5.3 Optimering

Recepten optimerades med olika material med hjälp av programmet Optiprop. Figur 5.5 visar ett exempel på de olika kurvor som producerades vid de olika optimeringarna. Tabell 5.1 visar vilka material som användes vid optimeringarna och det ”totala felet” som är ett mått på avvikelserna från idealkurvan.

Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast



Figur 5.5 Resultat av optimering av ett recept i Optiprop (Vislanda S33).

Tabell 5.1 Tillsatta material vid de olika optimeringarna samt "Totalt fel".

	Tillsatta material			Totalt fel
S 33				0.539
Opt.1				0.271
Opt.2	6-12			0.231
Opt.3	6-12	Stenkross		0.210
Opt.4	6-12		Bask.10	0.190
Opt.5	6-12	Stenkross	Bask.10	0.189
Opt.6	6-12		Bask.15	0.196
Opt.7	6-12	Stenkross	Bask.15	0.180

Den första optimeringen utfördes med originalmaterialen och kurvan med större material än 0.5 mm kunde minskas avsevärt. Dock fanns det en svacka kvar runt 0.125 mm. Trots att optimering 3 med stenkrossen förbättrade kurvan något var ändå svackan kvar. Därför testades också optimeringar med baskarpsand och baserat på optimeringar av 7 av Abetongs recept valdes "Baskarp 15" då den gav de mest fördelaktiga kurvorna.

5.4 Provgjutning

5.4.1 Recept "Vislanda S 23"

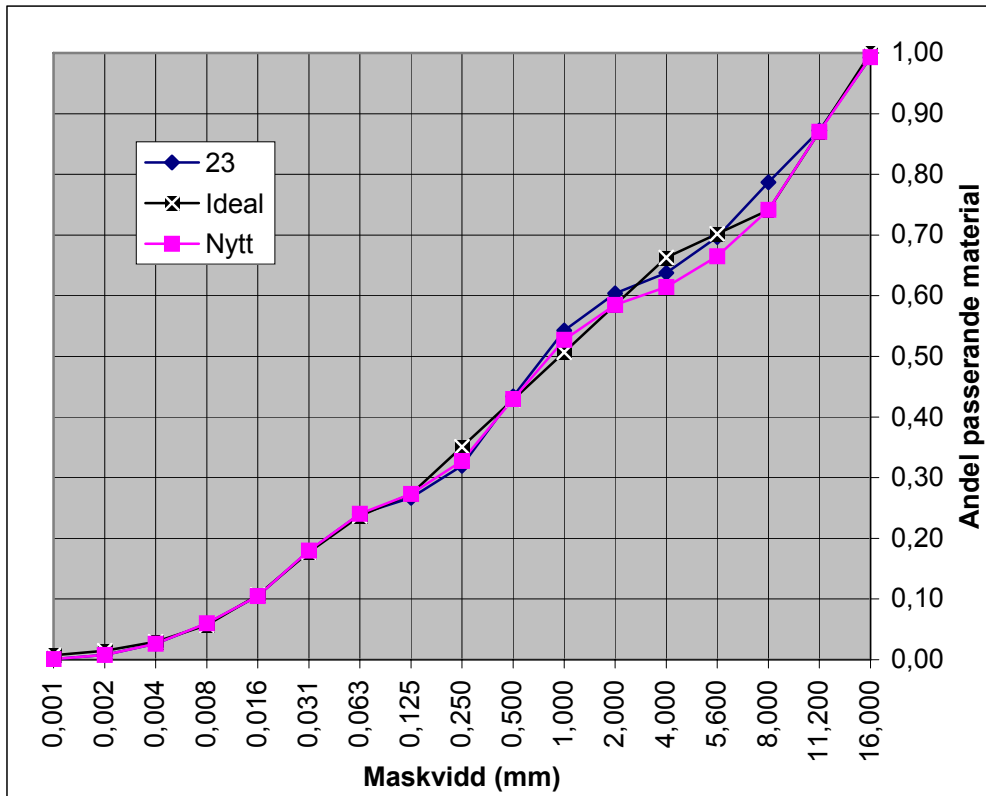
Tabell 5.2 visar andelen av de olika materialen i recepten och resultaten från provgjutningen.

Tabell 5.2. Resultat av provgjutning av det gamla och nya receptet.

	S 23	Nytt	S 23	Nytt
	Kg/25l	Kg/25l	Kg/m ³	Kg/m ³
Vislanda Grus	22.150	19.256	891.3	763.9
Vislanda 4-8	7.700	5.862	309.8	232.5
Vislanda 6-12	0.000	3.586	0.0	142.3
Vislanda 8-16	11.550	11.149	464.7	442.3
Baskarpsand 15	0.000	0.730	0.0	29.0
Degerhamn Anläggning	13.375	13.365	538.2	530.2
Vislanda Stenkross	0.000	0.827	0.0	32.8
Micro-air	0.0403	0.0403	1.6	1.6
CemFlux	0.0870	0.0870	3.5	3.5
Stream	0.0403	0.0403	1.6	1.6
Vatten	3.8750	3.8750	155.9	153.7

Ändring och resultat/25l:	S 23	Nytt
Extra vatten (kg)	0.35	0.45
Extra CemFlux (g)	0	0
Ordinarie flytsättnmätt (mm)	600	600
Uppmätt flytsättnmätt (mm)	720	650
Lufthalt %	1.0	6.0
Densitet (kg/m ³)	2367	2341
Vct	0.316	0.324
28-dygns hållfasthet (MPa)	82.6	87.8
28-dygns hållfasthet (MPa)	83.0	82.1
Medelhållfasthet (MPa)	82.8	85.0
Ordinarie medelhållfasthet	77	77
Hållfasthetskrav (MPa)	K60	K60
	Separation	

Det nya optimerade receptet blev mycket likt det gamla receptet. Kurvan ser ungefär likadan ut (se figur 5.6) och de ingående materialen ändrades inte särskilt mycket. Receptet var ganska svårblandat och vid den första provblandningen separerade originalreceptet. Pga. detta gjordes en ny provblandning men då båda recepten separerade gjordes inga fler försök pga. tidsbrist. Lufthaltsmätningen är inte helt tillförlitlig då utförandet troligen var bristfälligt för detta recept (se avsnitt 6.2).



Figur 5.6 Partikelfördelning för det gamla och nya receptet samt idealkurva, recept Vislanda S23.

5.4.2 Recept "Vislanda S 26"

Tabell 5.3 visar andelen av de olika materialen i recepten och resultaten från provgjutningen.

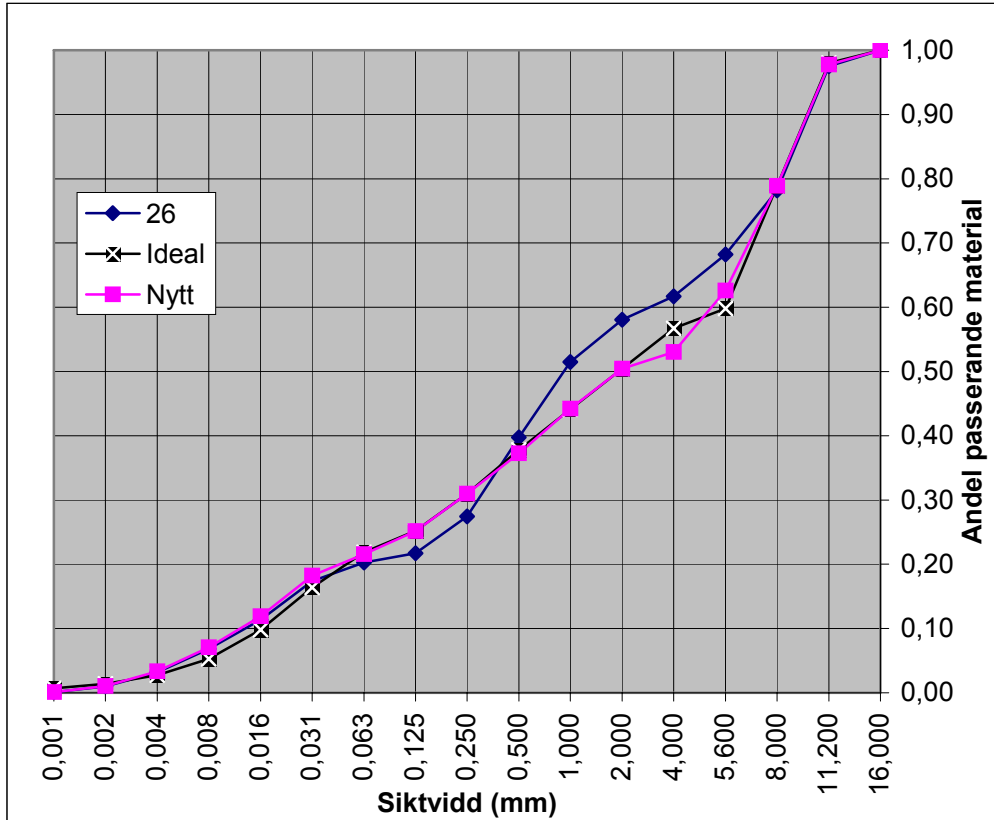
Tabell 5.3. Resultat av provgjutning av det gamla och nya receptet.

	S 26	Nytt	S 26	Nytt
	Kg/25l	Kg/25l	Kg/m ³	Kg/m ³
Vislanda Grus	23.775	7.440	916.0	288.2
Vislanda 4-8	7.100	14.160	273.6	548.6
Vislanda 6-12	13.175	11.900	507.6	461.0
Vislanda 8-16	0.000	0.000	0.0	0.0
Baskarpsand 15	0.000	2.458	0.0	95.2
Skövde SH	10.500	10.500	404.6	406.8
Vislanda Stenkross	0.000	8.096	0.0	313.7
CemFlux	0.063	0.063	2.4	2.4
Vatten	4.8250	4.8250	185.9	186.9

Ändring och resultat/25l:	S 26	Nytt
Extra vatten (kg)	0	0
Extra CemFlux (g)	21	38
Ordinarie flytsättningsmått (mm)	150-200	150-200
Uppmätt flytsättningsmått (mm)	150	185
Lufthalt %	4.0	2.6
Densitet (kg/m ³)	2290	2303
V _{ct}	0.460	0.460
28-dygns hållfasthet (MPa)	71.0	70.7
28-dygns hållfasthet (MPa)	68.2	69.1
Medelhållfasthet (MPa)	69.6	69.9
Ordinarie medelhållfasthet	64	64
Hållfasthetskrav (MPa)	K50	K50

Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast

Optimeringen av detta recept gav en uträdd kurva (se figur 5.7) med en ökad andel stenmaterial. Mycket av naturgruset byttes också ut mot stenkross. Vid provblandningen användes något mer flytmedel till det nya receptet men samtidigt blev sättnmättet något större. Detta tyder på att vattenbehovet inte ökade trots inblandningen av stenkross när partikelfördelningen förbättrades.



Figur 5.7 Partikelfördelning för det gamla och nya receptet samt idealkurva, recept Vislanda S26.

5.4.3 Recept "Vislanda S 33"

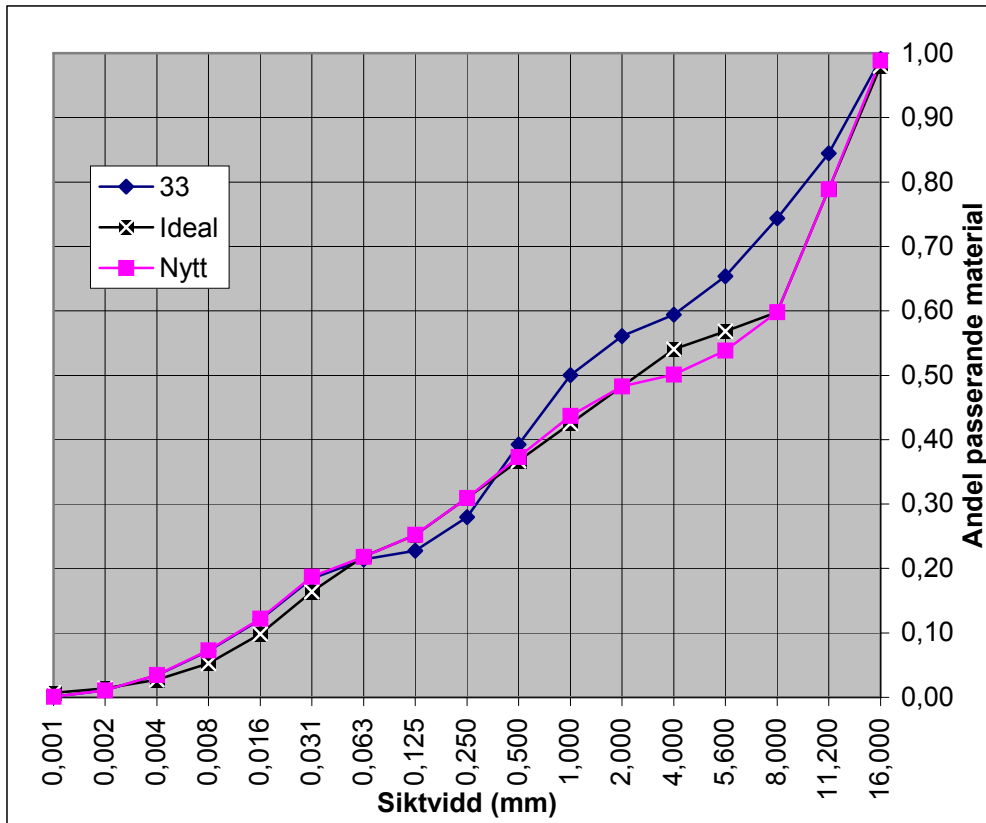
Tabell 5.4 visar andelen av de olika materialen i recepten och resultaten från provgjutningen.

Tabell 5.4. Resultat av provgjutning av det gamla och nya receptet.

	S 33	Nytt	S 33	Nytt
	Kg/25l	Kg/25l	Kg/m ³	Kg/m ³
Vislanda Grus	22.275	10.272	880.9	409.5
Vislanda 4-8	7.700	3.758	304.5	149.8
Vislanda 6-12	0.000	5.403	0.0	215.4
Vislanda 8-16	14.300	18.481	565.5	736.7
Baskarpsand 15	0.000	2.846	0.0	113.4
Skövde SH	11.400	11.397	450.8	454.3
Vislanda Stenkross	0.000	3.518	0.0	140.2
CemFlux	0.069	0.069	2.7	2.7
Vatten	4.4250	4.4250	175.0	176.4

Ändring och resultat/25l:	S 33	Nytt
Extra vatten (kg)	0	0
Extra CemFlux (g)	15	0
Ordinarie flytsättningsmått (mm)	150-200	150-200
Uppmätt flytsättningsmått (mm)	150	200
Lufthalt %	3.1	2.0
Densitet (kg/m ³)	2367	2418
V _{ct}	0.388	0.388
28-dygns hållfasthet (MPa)	76.9	73.1
28-dygns hållfasthet (MPa)	74.2	78.6
Medelhållfasthet (MPa)	75.6	75.9
Ordinarie medelhållfasthet	72	72
Hållfasthetskrav (MPa)	K60	K60

Det nya receptet fick ett större sättnmätt än det gamla trots att det tillsattes mindre flytmedel. Detta beror antagligen på att den ändrade partikelfördelningen (se figur 5.8) minskade vattenbehovet.



Figur 5.8 Partikelfördelning för det gamla och nya receptet samt idealkurva, recept Vislanda S33.

5.4.4 Recept "Vislanda S 52"

Tabell 5.5 visar andelen av de olika materialen i recepten och resultaten från provgjutningen.

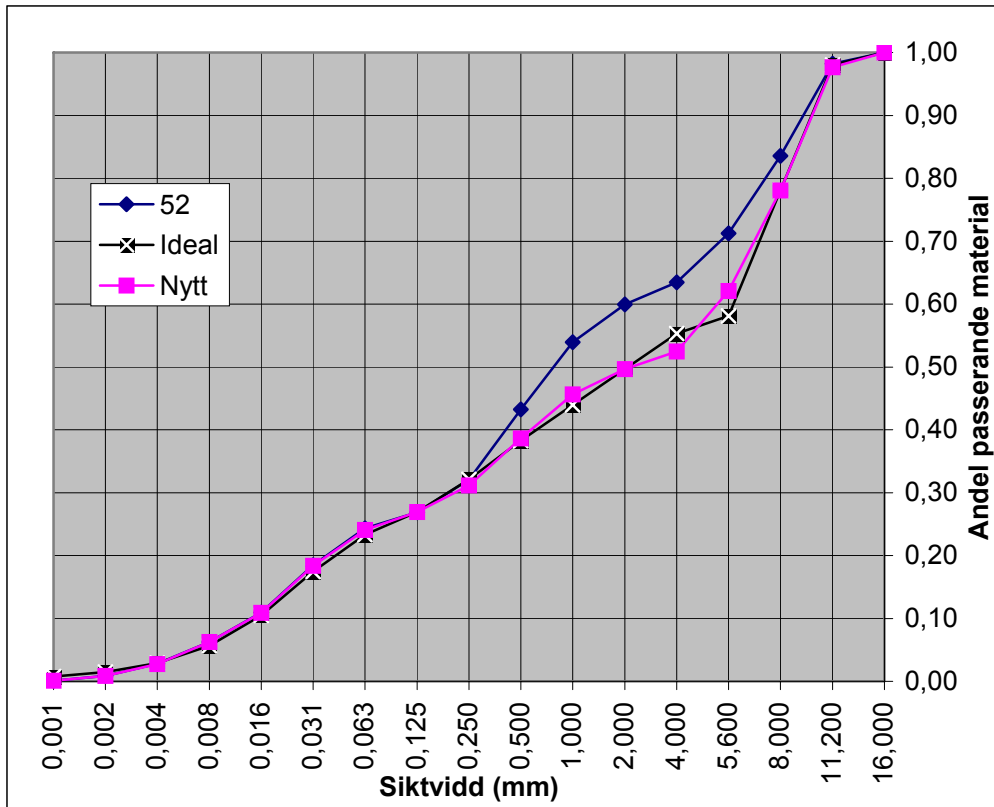
Tabell 5.5. Resultat av provgjutning av det gamla och nya receptet.

	S 52	Nytt	S 52	Nytt
	Kg/25l	Kg/25l	Kg/m ³	Kg/m ³
Vislanda Grus	21.350	14.078	884.5	574.0
Vislanda 4-8	10.000	13.339	414.3	543.9
Vislanda 6-12	9.250	12.358	383.2	503.8
Degerhamn Anläggning	11.925	11.925	494.1	485.2
Baskarpsand 15	0.000	0.850	0.0	34.6
Skövde SH	1.325	1.325	54.9	54.0
Vislanda Stenkross	0.000	0.000	0.0	0.0
Micro-air	0.020	0.020	0.8	0.8
CemFlux	0.053	0.053	2.2	2.2
Vatten	4.1250	4.1250	170.9	168.2

Ändring och resultat/25l:	S 52	Nytt
Extra vatten (kg)	0.15	0.15
Extra CemFlux (g)	15	0
Ordinarie flytsättnmätt (mm)	150-200	150-200
Uppmätt flytsättnmätt (mm)	210	220
Lufthalt %	3.1	2.2
Densitet (kg/m ³)	2405	2418
Vct	0.323	0.323
28-dygns hållfasthet (MPa)	88.2	90.0
28-dygns hållfasthet (MPa)	88.6	95.5
Medelhållfasthet (MPa)	88.4	92.8
Ordinarie medelhållfasthet	73	73
Hållfasthetskrav (MPa)	K60	K60

Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast

Optimeringen av detta recept gav ingen inblandning av stenkross och mängden baskarpsand är mycket liten. Skillnaden utgörs främst av ett minskat grusinnehåll och en ökning av andelen stenmaterial, se figur 5.9.



Figur 5.9 Partikelfördelning för det gamla och nya receptet samt idealkurva, recept Vislanda S52.

5.4.5 Recept "Vislanda H 42"

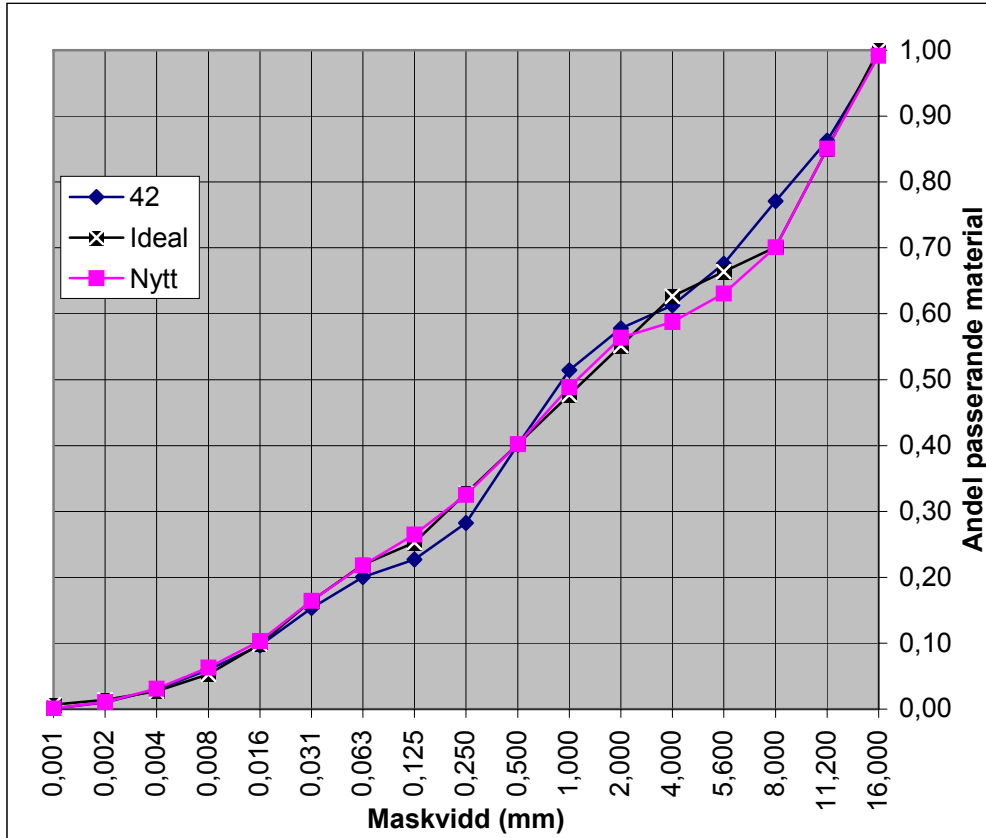
Tabell 5.6 visar andelen av de olika materialen i recepten och resultaten från provgjutningen.

Tabell 5.6. Resultat av provgjutning av det gamla och nya receptet.

	H 42	Nytt	H 42	Nytt
	Kg/25l	Kg/25l	Kg/m ³	Kg/m ³
Vislanda Grus	22.500	9.297	910.9	374.4
Vislanda 4-8	7.975	5.134	322.9	206.8
Vislanda 6-12	0.000	4.404	0.0	177.4
Vislanda 8-16	12.125	12.460	490.9	501.8
Baskarpsand 15	0.000	1.804	0.0	72.6
Skövde Bygg	10.900	10.900	441.3	439.0
Vislanda Stenkross	0.000	9.487	0.0	382.1
Micro-air	0.0275	0.0275	1.1	1.1
Stream	0.0650	0.0650	2.6	2.6
Glenium 400	0.0925	0.0925	3.7	3.7
Vatten	4.4600	4.3600	180.6	179.6

Ändring och resultat/25l:	H 42	Nytt
Extra vatten (kg)	0.1	0.1
Extra CemFlux (g)	25	15
Ordinarie flytsättnått (mm)	600	600
Uppmått flytsättnått (mm)	500	500
Lufthalt %	2.8	3.1
Densitet (kg/m ³)	2354	2341
Vct	0.418	0.409
28-dygns hållfasthet (MPa)	66.4	64.1
28-dygns hållfasthet (MPa)	66.3	67.7
Medelhållfasthet (MPa)	66.4	65.9
Ordinarie medelhållfasthet	58	58
Hållfasthetskrav (MPa)	K45	K45

Kurvan efter optimeringen har rätats ut lite men är ganska lik den gamla (se figur 5.10) samtidigt som mycket av gruset har bytts ut mot stenkross. Trots det ökade innehållet av stenkross har vattenbehovet inte ökat då flytsättnmättet är det samma för det nya receptet som för det gamla. Detta beror troligen på en förbättrad partikelfördelning.



Figur 5.10 Partikelfördelning för det gamla och nya receptet samt idealkurva, recept Vislanda H42.

5.4.6 Recept "Vislanda H 51"

Tabell 5.7 visar andelen av de olika materialen i recepten och resultaten från provgjutningen.

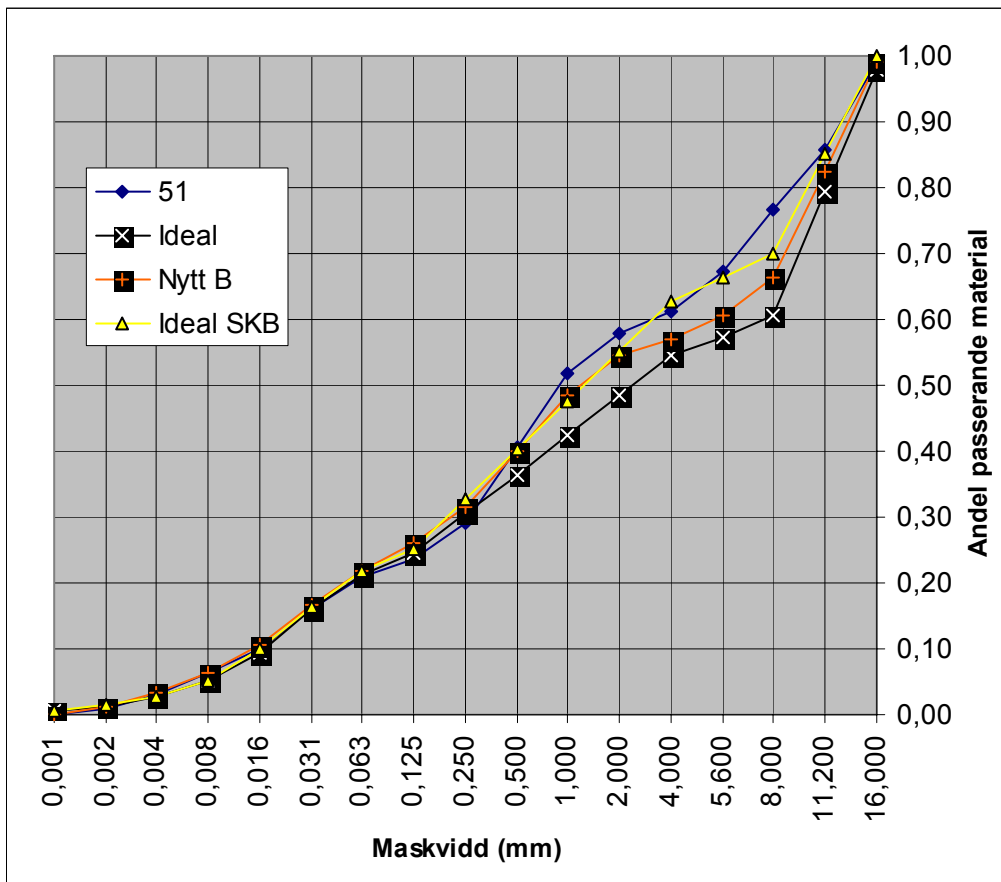
Tabell 5.7. Resultat av provgjutning av det gamla och nya receptet.

	H 51	Nytt B	H 51	Nytt B
	Kg/25l	Kg/25l	Kg/m ³	Kg/m ³
Vislanda Grus	22.400	13.156	868.5	519.2
Vislanda 4-8	7.825	3.785	303.4	149.4
Vislanda 6-12	0.000	4.380	0.0	172.9
Degerhamn Anläggning	0.000	15.100	495.3	595.9
Baskarpsand 15	0.000	1.500	0.0	59.2
Skövde SH	11.750	11.750	455.6	463.7
Vislanda Stenkross	0.000	5.000	0.0	197.3
Micro-air	0.0500	0.0500	1.9	2.0
CemFlux	0.0800	0.0800	3.1	3.2
Vatten	5.1700	5.1700	200.5	204.0

Ändring och resultat/25l:	H 51 B	Nytt B
Extra vatten (kg)	0	0
Extra CemFlux (g)	0	-3
Ordinarie flytsättnått (mm)	400	400
Uppmått flytsättnått (mm)	420	460
Lufthalt %	3.5	2.7
Densitet (kg/m ³)	2328	2367
V _{ct}	0.440	0.440
28-dygns hållfasthet (MPa)	59.6	57.9
28-dygns hållfasthet (MPa)	61.2	62.1
Medelhållfasthet (MPa)	60.4	60.0
Ordinarie medelhållfasthet	65	65
Hållfasthetskrav (MPa)	K50	K50

Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast

Under provgjutningen kom det fram att detta recept var en blandning mellan självkompakterande och normal betong med ett flytsättningsmätt runt 400 mm. Provblandningen av det första optimerade receptet separerade och därför gjordes ett nytt recept manuellt. Detta blev ett mellanting mellan normal betong och självkompakterande med större mängd stenkross och baskarpsand än den första optimeringen, se tabell 5.7 och figur 5.11. Flytsättningsmättet blev något större för det nya receptet.



Figur 5.11 Partikelfördelning för det gamla och nya receptet samt idealkurva, recept Vislanda H51.

5.4.7 Recept "Vislanda H 55"

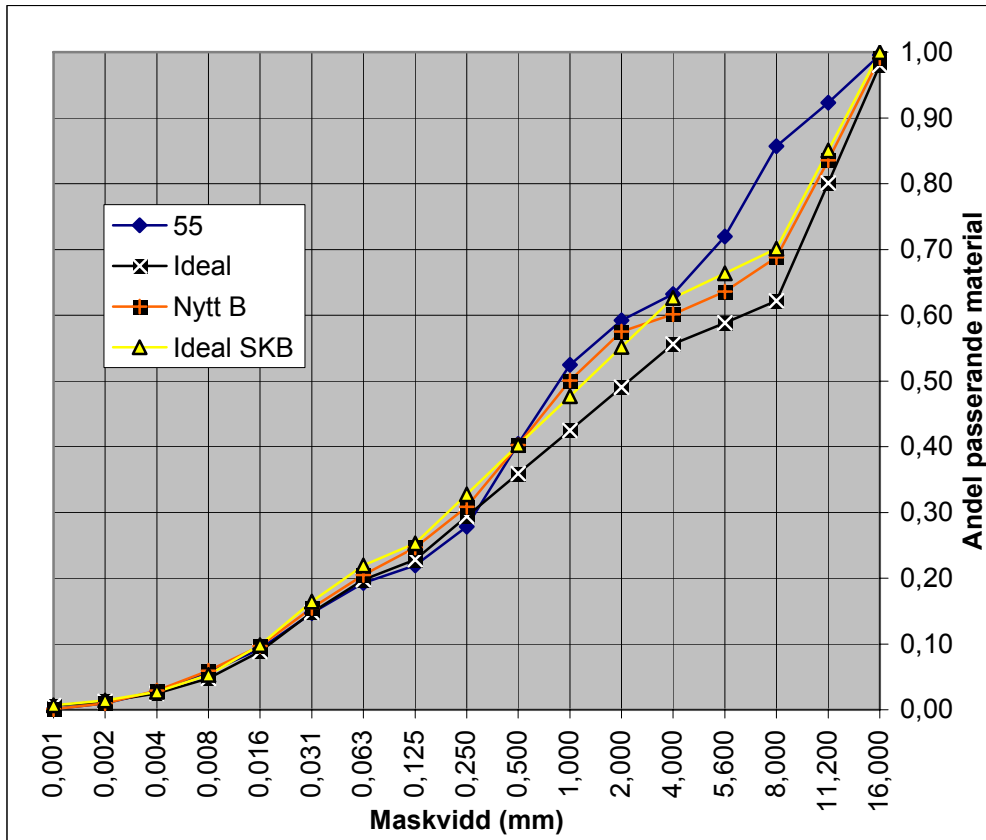
Tabell 5.8 visar andelen av de olika materialen i recepten och resultaten från provgjutningen.

Tabell 5.8. Resultat av provgjutning av det gamla och nya receptet.

	H 55	Nytt B	H 55	Nytt B
	Kg/25l	Kg/25l	Kg/m ³	Kg/m ³
Vislanda Grus	24.675	14.388	935.2	548.3
Vislanda 4-8	12.775	3.329	484.2	126.9
Vislanda 6-12	0.000	4.000	0.0	152.4
Vislanda 8-16	7.000	14.300	265.3	544.9
Baskarpsand 15	0.000	1.440	0.0	54.9
Skövde Bygg	10.750	10.750	407.4	409.6
Vislanda Stenkross	0.000	7.000	0.0	266.7
Stream	0.0175	0.0175	0.7	0.7
Glenium 400	0.0625	0.0625	2.4	2.4
Vatten	5.4825	5.4825	207.8	208.9

Ändring och resultat/25l:	H 55 B	Nytt B
Extra vatten (kg)	0	0
Extra CemFlux (g)	0	-11
Ordinarie flytsättnmätt (mm)	450	450
Uppmätt flytsättnmätt (mm)	410	410
Lufthalt %	3.4	3.6
Densitet (kg/m ³)	2303	2316
Vct	0.510	0.510
28-dygns hållfasthet (MPa)	51.1	49.7
28-dygns hållfasthet (MPa)	51.5	53.5
Medelhållfasthet (MPa)	51.3	51.6
Ordinarie medelhållfasthet	51	51
Hållfasthetskrav (MPa)	K40	K40

Även detta recept hade optimerats för vanlig betong men skulle ha ett flytsättningsmått på 450 mm. Därför tillsattes mer stenkross och baskarpsand. Det nya receptet gav samma sättningsmått som det gamla receptet trots en mindre mängd flytmedel och inblandning av stenkross.



Figur 5.12 Partikelfördelning för det gamla och nya receptet samt idealkurva, receptet Vislanda H55.

5.4.8 Recept "Vislanda S 33". Provgjutning med fokus på stenkross.

I de föregående provgjutningarna har Baskarpsand 15 använts. Då denna sand är relativt dyr var det av intresse att provgjuta optimerade recept utan Baskarpsand. I tabell 5.9 visas resultaten av provgjutningarna där recept "A" är samma optimering med Baskarpsand 15 som i avsnitt 5.4.3. Recept "B" är en optimering med grus och stenkross, och recept "C" är en optimering där allt grus har ersatts av stenkross.

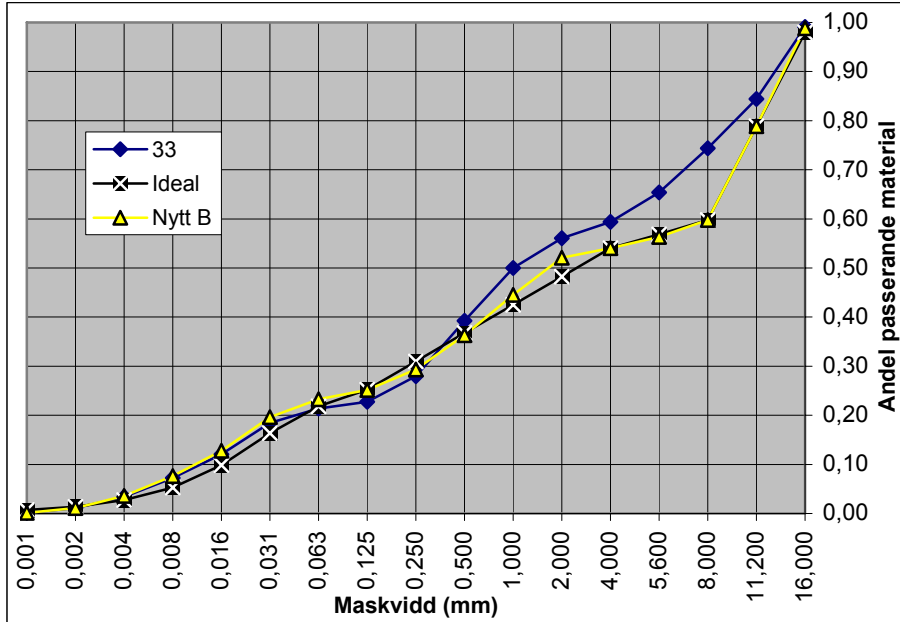
Tabell 5.9. Resultat av provgjutning av gamla och nya recept.

	33	Nytt A	Nytt B	Nytt C
	Kg/25l	Kg/25l	Kg/25l	Kg/25l
Vislanda Grus	22,275	10,272	8,048	0,000
Vislanda 4-8	7,700	3,758	1,275	2,060
Vislanda 6-12	0,000	5,403	5,784	5,669
Vislanda 8-16	14,300	18,481	18,414	18,434
Baskarpsand 15	0,000	2,846	0,000	0,000
Skövde SH	11,400	11,397	11,397	11,397
Vislanda Stenkross	0,000	3,518	10,758	18,115
CemFlux	0,069	0,069	0,069	0,069
Vatten	4,4250	4,4250	4,4250	4,4250
Ändring och resultat/25l:	33	Nytt A	Nytt B	Nytt C
Extra vatten (kg)	0	0	0	0
Extra CemFlux (g)	73	50	62	53
Ordinarie flytsättningsmått (mm)	150-200	150-200	150-200	150-200
Uppmått flytsättningsmått (mm)	190	190	210	210
Lufthalt %	3,2	2,5	2,1	2,0
Densitet (kg/m ³)	2405	2405	2405	2405
V _{ct}	0,388	0,388	0,388	0,388
28-dygns hållfasthet (MPa)	81,6	82,5	81,1	77,4
28-dygns hållfasthet (MPa)	81,6	78,5	80,6	77,9
Medelhållfasthet (MPa)	81,6	80,5	80,9	77,7
Ordinarie medelhållfasthet	72	72	72	72
Hållfasthetskrav (MPa)	K60	K60	K60	K60

De optimerade recepten har alla ett likvärdigt eller större sättmått än originalreceptet trots att mängden tillsatt flytmedel är mindre. Detta tyder på ett minskat vattenbehov. Recept "B" (se figur 5.13) som ej innehåller Baskarpsand 15 fick ett större sättmått än recept "A" (se figur 5.8) men mängden tillsatt flytmedel var något större.

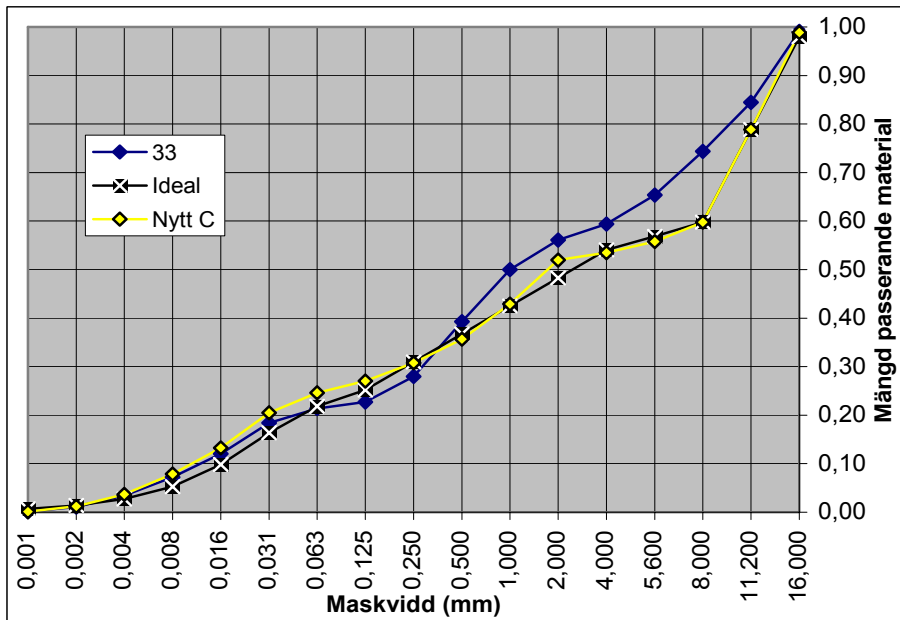
Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast

Vattenbehovet för dessa recept kan därför jämföras vilket visar att inblandningen av "Baskarpsand 15" inte har avgörande effekt på vattenbehovet.



Figur 5.13 Partikelfördelning för recept Vislanda S33 samt nytt recept B.

Normalt brukar vattenbehovet öka när naturgrus byts ut mot krossat material men provgjutningen av recept "C" visar motsatsen. Detta kan eventuellt härledas till den ändrade partikelfördelningen och särskilt den ökade mängden finmaterial, se figur 5.14.

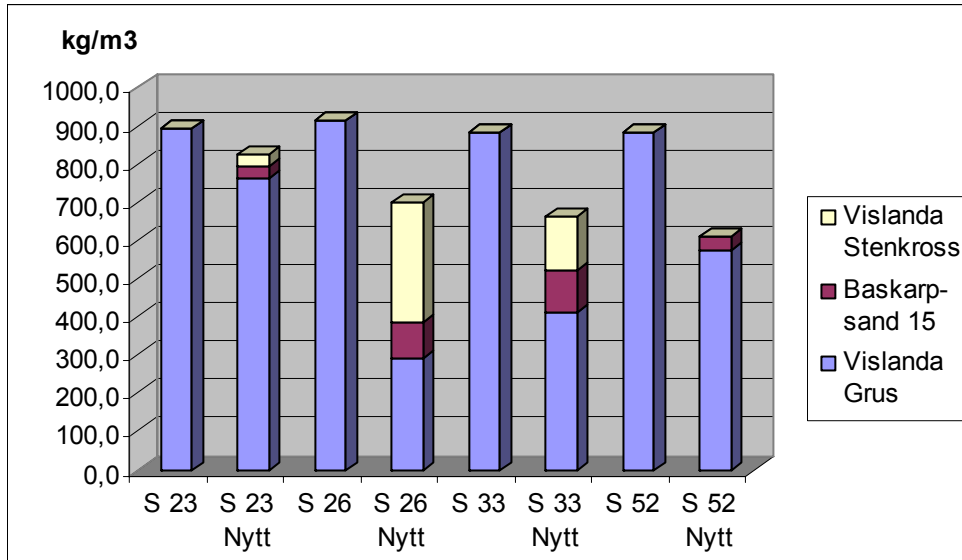


Figur 5.14 Partikelfördelning för recept Vislanda S33 samt nytt recept C.

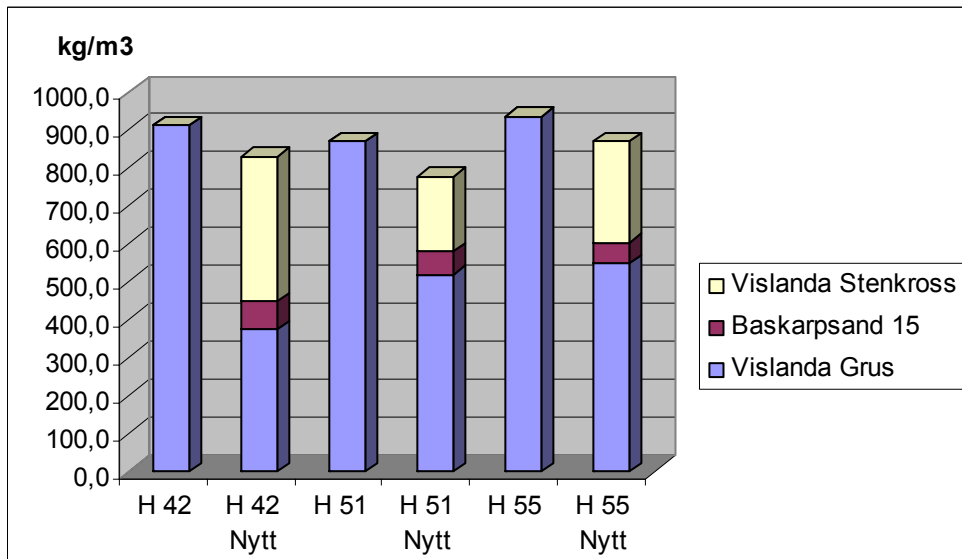
5.5 Jämförelse mellan tidigare och optimerade recept

5.5.1 Delmaterial

I figurerna 5.15 och 5.16 visas hur mängden naturgrus och grusersättande material varierar för de olika recepten.



Figur 5.15 Mängd naturgrus och ersättande material i Vislanda S.

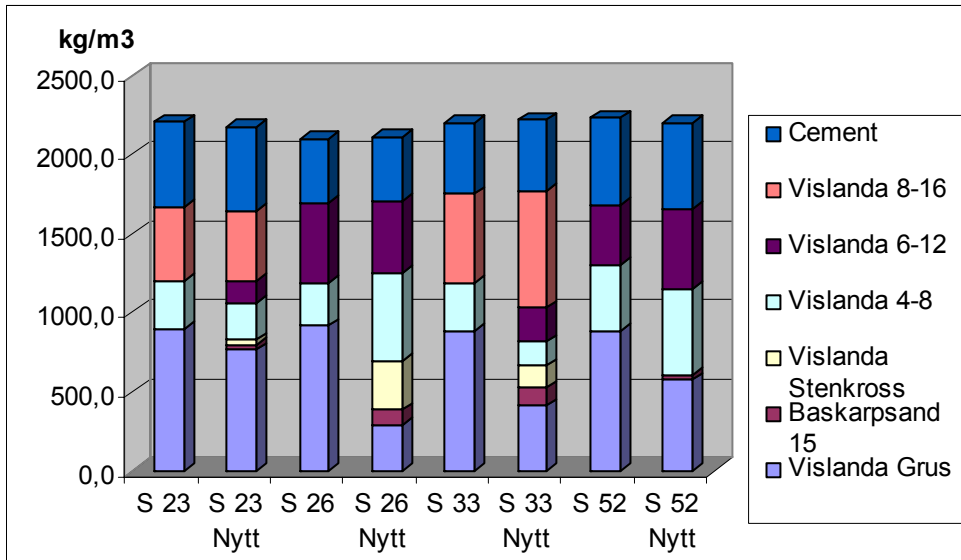


Figur 5.16 Mängd naturgrus och ersättande material i Vislanda H.

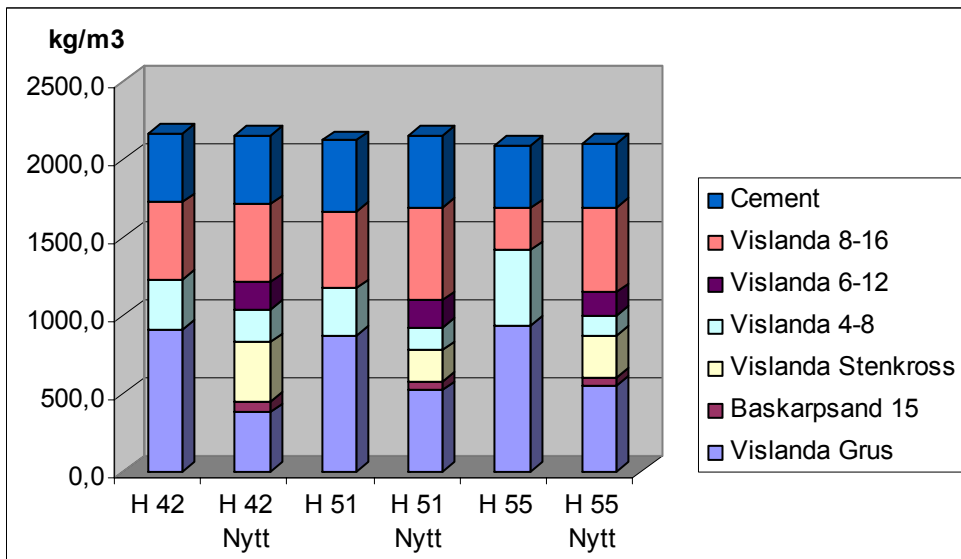
Abetong har som miljömål att ersätta 50 % av naturgruset med krossat material men då fokus i detta arbete har legat på partikelfördelningen så är andelen stenkross bestämd av optimeringen i Optiprop. Alla recept har mindre grusliknande material (naturgrus, baskarpsand och stenkross) efter optimeringen och i recepten S26 och

Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast

H42 har naturmaterialmängden (naturgrus och baskarpsand) mer än halverats. Som följd av det minskade grusinnehållet har givetvis steninnehållet ökat vilket åskådliggörs i figur 5.17 och 5.18.



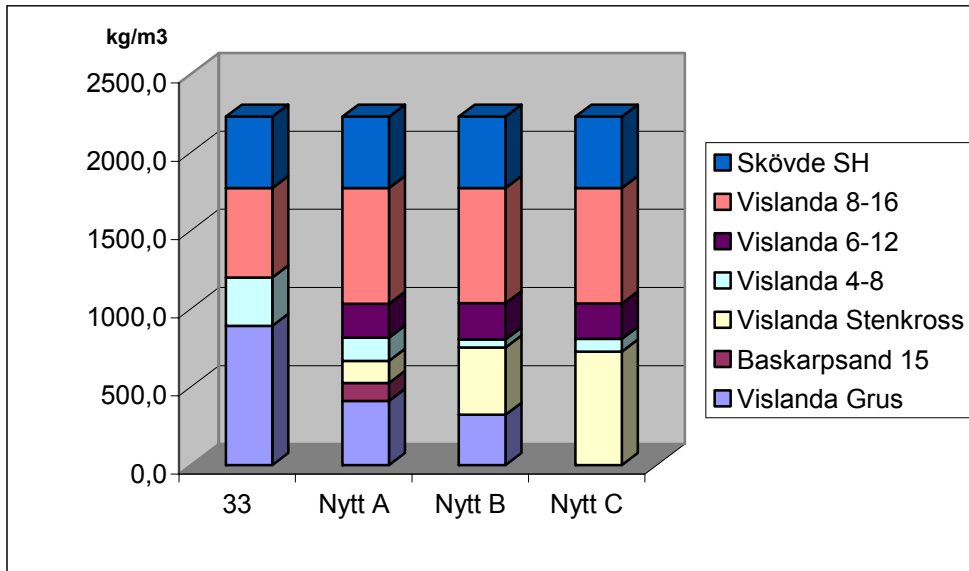
Figur 5.17 Den totala sammansättningen i Vislanda S.



Figur 5.18 Den totala sammansättningen i Vislanda H.

Optimal partikelfördelning för bättre reologi hos betong med krossballast

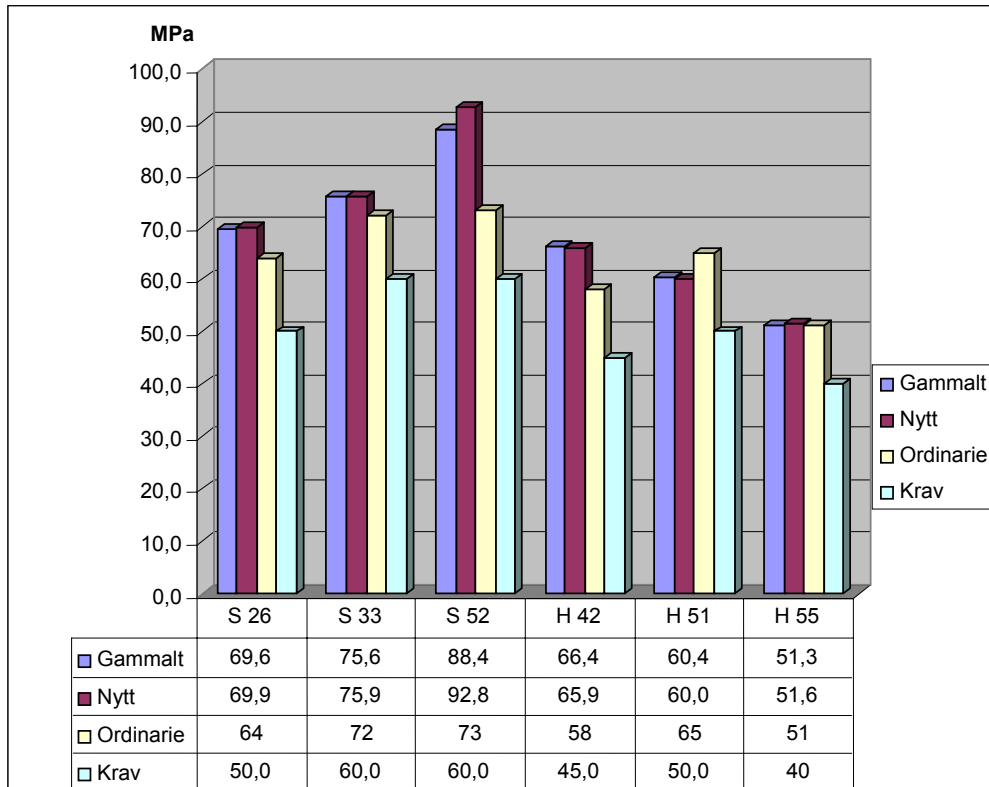
För provgjutningen med fokus på stenkross gjordes de nya optimeringarna "B" och "C". Optimering "A" är den som också användes i kapitel 5.4.3. I figur 5.19 visas den totala sammansättningen för de olika recepten. I recept "B" ersattes drygt hälften av naturgruset med stenkross och i recept "C" ersattes allt naturgrus med stenkross. De optimerade recepten innehåller också mer grovt stenmaterial än originalreceptet.



Figur 5.19 Den totala sammansättningen i Vislanda S33 med fokus på stenkross.

5.5.2 Hållfasthet

Hållfastheten för de nuvarande och de nya recepten är i stort sett likvärdig med undantag för recept S 52 där det nya har en ökad hållfasthet med drygt 4 MPa (se figur 5.19).



Figur 5.20 Översikt av 28-dygns hållfastheten hos de olika recepten.

Varje värde är dock bara baserat på två provkroppar. Recept S 23 har tagits bort från jämförelsen då blandningen av det gamla receptet separerade.

Orsaken till att provgjutningarna av recept S 52 gav mycket högre hållfasthet än i produktion är okänd.

Överlag överstiger hållfasthetsproverna i produktion kravhållfastheten med stor marginal. Definitionen av kravhållfastheten är att högst 5 % av hållfasthetsproven av betongen får understiga kravvärdet. Här finns det troligen möjlighet att minska hållfastheten med några MPa genom att minska mängden cement. Dock bör även tidig hållfasthet beaktas i syfte att avforma betongen efter 16 h varför 28-dygns hållfastheten oftast ej är avgörande.

6. Felkällor

6.1 Siktkurvor

Siktkurvorna som sammanställdes i början av projektet har använts vid all optimering och gjutning. Siktkurvan varierar mellan varje leverans, särskilt finmaterialet hos det krossade materialet.

6.2 Fuktmätning

Fuktmätningen gjordes på omblandad ballast som ansågs representativ. Trots att fuktmätningen anses tillförlitning tas den ändå med som felkälla då en felaktig fuktmätning ger stor inverkan på vattenbehovet, och kan omkullkasta många resultat. Eventuellt kan försök med bara torkad ballast vara önskvärt.

6.3 Lufthaltsmätning

Lufthaltsmätningen på de första provgjutningarna är inte helt tillförlitliga då vibrationstiden inte alltid var densamma. Intryckningen och släppandet av knappen på lufthaltsmätaren krävde också ett visst handlag för att få rätt resultat. Denna teknik förfinades efter hand.

7. Slutsatser

7.1 Lasersiktning

Finmaterial från krossad ballast innehåller mycket mer partiklar i storleken < 0.05 mm än finmaterial från naturgrus. Ett byte från naturgrus till krossat material ger därför ett stort tillskott av material i detta storleksområde där cementen annars dominerar.

7.2 Provgjutning

Alla optimerade recept har likvärdigt eller mindre vattenbehov, detta trots att en del naturgrus ersatts av krossat material.

”Baskarp 15” gav kurvan ett något bättre utseende men inga tydliga resultat på förbättrad betong.

Inblandningen av stenkross gav inga märkbara negativa effekter på vattenbehovet. Försöken visar att allt naturgrus kan ersättas med stenkross med goda resultat. Dock är fullskaleförsök i produktion önskvärda.

Försök i liten skala med bara torr ballast kan göras för att få större noggrannhet på vattenbehovet.

7.3 Ekonomi

Bytet från naturgrus till stenkross är ett miljömål hos Abetong men ger också ekonomiska fördelar då stenkross är ett billigare material.

En översyn av hållfasthetsmarginalerna visar att det finns utrymme för en minskad mängd cement i recepten vilket ger en billigare betong. Dock bör då även krav för tidig hållfasthet beaktas. En samtidig inblandning av stenkross kan ge positiv effekt då finmaterialet liknar det hos cementen.

Referenser

- [1] Persson, Bertil. Ideal partikelfördelning i högpresterande betong. Betong 95/3. 1995. Stockholm, 6-8, 39.
- [2] Esping, Oskar. Licentiatavhandling om finmaterialets betydelse för betongens flytegenskaper. Betong nr3/2004, 50-55.
- [3] SGU. www.sgu.se , 2005-05-05
- [4] Persson, Bertil. Beräkningsprogram ”PROPH” för partikelfördelning av färsk betong, Rapport TVBM-7090, Avdelning Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 1995.
- [5] Andersson, Richard, Sjökvist, Lars-Göran, Självkompakterande betong i prefabriceringsindustrin – en teknisk och ekonomisk analys. Rapport TVBM-5039. Avd. Byggnadsmaterial. Lunds universitet. Lund. 1999, 48 sid.
- [6] Dieden, Christer, Självkompakterande husbyggnadsbetong – sammansättning, hållfasthet och krympning.” Rapport TVBM-5040. Rapport TVBM-5039. Avd. Byggnadsmaterial. Lunds universitet. Lund. 1999, 50 sid.
- [7] www.sika.se , 2005-05-05
- [8] www.bkn-byggekemi.se , 2005-05-05
- [9] www.degussa-cc.se , 2005-05-05
- [10] www.cementaresearch.se , 2005-05-05
- [11] Lillieblad, Jan. Personlig information. Abetong. 2005.