

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING  
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

# FRAGMENTERING I BERGTÄKTER

Rock fragmentation in quarries

Mats Olsson, SveBeFo  
Victoria Svahn, Chalmers  
Finn Ouchterlony, SveBeFo  
Ingvar Bergqvist, Dyno Nobel

SveBeFo Rapport 60

Stockholm 2003  
ISSN 1104 - 1773  
ISRN SVEBEFO-R--60--SE

## FÖRORD

Allt större mängder bergmaterial för ballaständamål produceras genom krossning av berg från bergtäkter. Detta för att begränsa uttaget av naturgrus, både av miljöskäl och på grund av sinande tillgångar i de mest befolkade områdena i landet, där behovet av bergmaterial är som störst. Ökande mängder och höga kvalitetskrav på de krossade produkterna medför ett ökat behov av teknikutveckling, där en viktig faktor är storleksfördelningen på de krossade produkterna. De finaste fraktionerna är ofta svåra att få avsättning för och blir därmed en avfallsprodukt, som måste hanteras med ökande kostnader till följd av allt strängare regelverk.

Storleksfördelningen på krossberg från bergtäkter beror av bergets egenskaper in-situ, använd sprängningsteknik och efterföljande krossning. För att öka kunskanternas om fragmenteringsprocessen i allmänhet och specifikt för att bättre kontrollera finandelen har ett par projekt drivits under senare år i samarbete mellan SveBeFo och Chalmers. Föreliggande rapport redovisar resultaten från det senaste projektet, som initierades i samband med programarbetet för "Forskningsprogram 2000". Målet har varit att genom undersökningar i modellskala på provkroppar i betong och genom fullskaleförsök på mindre sprängsalvor i stenbrott få bättre klarhet i "varifrån finandelen kommer", dvs var, när och hur finandelen uppstår under fragmenteringsprocessen.

Projektet har huvudsakligen genomförts av Victoria Svahn vid Chalmers och Mats Olsson vid SveBeFo med bidrag av Ingvar Bergqvist, Dyno Nobel, och Finn Ouchterlony, SveBeFo. Modelförsöken har ingående redovisats i Victoria Svahns licentiatrapport och delar av projektet har också presenterats vid konferenser under projektiden. I föreliggande rapport sammanfattas projektet i sin helhet med bakgrund, genomförande och resultat, som inneburit en ökad förståelse av fragmenteringsprocessen och möjligheterna att påverka finandelen. Som nämns i rapporten har också viss samordning skett med EU-projektet "Less Fines Production in Aggregate and Industrial Minerals Industry".

Projektet har finansierats gemensamt av SBUF, SBMI, Banverket, Vägverket och SveBeFo samt NCC och Dyno Nobel genom egeninsatser. Till alla dem som stött projektet finansiellt, genom medverkan i försök eller i projektets styr- och referensgrupp riktas ett varmt tack. Särskilt bör nämnas Hans Carlsson, som under sin tid vid Sabema aktivt bidrog till projektets start, och Sven-Olof Båvik, Vägverket Produktion som ordförande i referensgruppen.

Stockholm i oktober 2003

Tomas Franzén

## SAMMANFATTNING

Många stenbrott i Sverige har problem med en för stor andel fint material. Andelen < 8 mm uppskattas till ca 10 % av Sveriges sprängda ballastproduktion. Ett projekt initierades på SveBeFo med syfte att ta reda på orsakerna till finandelen vid sprängning samt metoder att reducera denna. Projektet har drivits som ett samarbetsprojekt mellan SveBeFo och Institutionen för väg- och vattenbyggnad, Geologi vid Chalmers Tekniska Högskola.

Projektet har bestått av två delar, en modellförsöksdel bestående av sprängning av betong-cylindrar och en del med ”halvskaleförsök” med sprängning och siktning i en bergtäkt. Dessa försök har utförts för att verifiera hypoteser om finandelens uppkomst. Projektet har finansierats av SBUF, GMF, Vägverket, Banverket samt SveBeFo. Dessutom har NCC och Dyno Nobel ställt upp med naturaresurser.

Modellförsöken på Chalmers har drivits som ett licentiandprojekt. För att bestämma varifrån finandelen bildats har cylindrar gjutits med olika färgskikt runt ett centrumhål. Cylindrarna var 600 mm höga och 300 mm breda. Cylindrarnas centrumhål har laddats med detonerande stubin varefter cylindrarna har sprängts. Materialet har samlats upp och siktats. Digital bildanalys på det olika infärgade materialet har också använts. Resultatet blev att den största andelen fint produceras närmast hålet. Detta stämmer bra med vår grundhypotes att borrhålsstrycket ger uppkrossning och en finandelsproduktion närmast hålet. Däremot svarar borrhålsstrycket inte nödvändigtvis för den största totala mängden finmaterial. De yttre skiktens större volym uppväger den lägre andelen finmaterial i dem.

Halvskaleförsöken har utförts i Emmaboda Granits blockstensbrott i Bårarp. Sju salvor har där sprängts i en gnejsig granit. Håldimension och hållayout har varierats men den specifika laddningen har hållits konstant i samtliga salvor. I sex av salvorna har hålen fulladdats medan hålen i en salva frikopplades. Varje salva har omfattat 4-8 hål och medfört ett teoretiskt tonnage på mellan 280 ton och 420 ton. Efter sprängning har salvorna siktats i olika omgångar och siktkurvor har erhållits från storlekar > 500 mm ner till laboratoriesiktningens < 0,075 mm. Även bildanalys har använts. SveBeFo har köpt programmet WipFrag för detta ändamål. Resultatet av salvorna var att den frikopplade salvan och salvan med 76 mm hål gav minst finandel. Att frikoppling skulle reducera finandelsmängden var väntat då borrhålsstrycket blir lägre och därmed reducerar krosszonen. Att finandelen skulle minska med ökad hålstorlek var inte lika väntat men det är allmänt känt att styckefallet blir grövre vid ökad håldimension. Det är svårare att dra några generella slutsatser om hålstorlekens betydelse för finandelen. Skillnaderna bli rätt marginella när salvvolymerna har justerats.

## SUMMARY

Many quarries in Sweden report large amounts of fines from their production. How much of the fines originates from blasting, how is the fines produced and what methods could reduce the amount of fines?

A project was therefore initiated at SveBeFo some years ago. The project “ Fragmentation in quarries” was a co-operation between SveBeFo and Chalmers University of Technology and has consisted of two main parts. The first part consisted of model blasting in concrete cylinders and the second part was full scale blasting and screening in a quarry. The project was sponsored by SBUF (The Development Fund of the Swedish Construction Industri), SBMI (Swedish Aggregates Producers Association, former GMF), Vägverket (Swedish National Road Administration), Banverket (Swedish National Rail Administration) and SveBeFo. NCC and Dyno Nobel have contributed with personell, equipment and explosives.

The model blasting part was a licentiate project at Chalmers. To determine how fines are produced, a number of concrete cylinders were cast with different coloured layers. There were three layers around the centre blast hole. The cylinders were 600 mm high and 300 mm wide. The cylinders were charged with detonating cord and blasted in a special chamber. The material was then screened and analysed with a digital image programme. Expressed as a percentage most of the fines were produced in the vicinity of the blast hole. That’s also what we had expected according to our hypothesis (the bore hole pressure crushes the rock in the vicinity of the blast hole). The borehole layer doesn’t necessarily produce the largest mass of fine material though. The large volume of the outer layers compensates for their lower fines percentage. If fines are defined as <1 mm material, the borehole layer and the outer layer produce the same mass of fine material, about 1 kg each. If the fines limit is larger, the outer layer produces more fines than the borehole layer.

Full scale blasting tests were performed at a dimension stone quarry in Sweden. Seven rounds were blasted in a granitic gneiss. The hole dimension and thereby burden and spacing was varied but the specific charge was kept constant for all of the rounds. Six of the rounds had fully charged holes while the holes in one round were decoupled. Each round contained 4-8 holes with a theoretic tonnage of 280 to 420 ton. The hole diameter varied from 76 mm down to 38 mm.

After blasting of each round the rock was screened and weighed in three steps. Test samples were taken from the finest fraction for laboratory sizing. In this way fractions from –0,075 mm up to boulders larger than 1 m could be determined. Digital photos were also taken from the muckpiles and analysed with the help of WipFrag.

The result from manual sieving was that decoupling only produced a small amount of fines. That was expected. Fully charged 76 mm holes also produced less fines and that was not expected. The limited number of holes could be an explanation. It’s also a well known fact that the fragmentation usually is coarser with an increasing hole diameter.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1.</b>	<b>BAKGRUND</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>MÅLSÄTTNING</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>PLANERING/HYPOTESER</b>	<b>4</b>
	3.1 Uppläggnig	4
	3.2 Hypoteser	4
<b>4.</b>	<b>FINANSIERING</b>	<b>5</b>
<b>5.</b>	<b>ORGANISATION</b>	<b>5</b>
<b>6.</b>	<b>FÖRSÖKSUPPLÄGGNING</b>	<b>6</b>
<b>7.</b>	<b>MODELLFÖRSÖK</b>	<b>6</b>
	7.1 Metod	6
	7.2 Modellmaterialet	6
	7.3 Gjutprocessen	8
	7.4 Materialegenskaper	10
	7.5 Val av sprängämne	11
	7.6 Sprängning	12
	7.7 Siktning	12
	7.8 Provtagning	13
	7.9 Tunnslip	13
<b>8.</b>	<b>FÄLTFÖRSÖK</b>	<b>14</b>
	8.1 Val av försöksplats	14
	8.2 Regional geologi	14
	8.3 Lokal geologi	14
	8.4 Sprickkartering	14
	8.5 Tekniska egenskaper	15
	8.6 In-situ blockstorleksfördelning	16
	8.7 Försöksuppläggnig	16
	8.8 Försökssalvor	19
<b>9.</b>	<b>RESULTAT</b>	<b>21</b>
	9.1 Modellförsök	21
	9.2 Fältförsök	24
	9.2.1 Allmänt	24
	9.2.2 Bildanalys	25
	9.2.3 Sprängning och siktning	26

<b>10.</b>	<b>ANALYS</b>	<b>31</b>
	10.1 Modellförsök	31
	10.1.1 Modellmaterial	31
	10.1.2 Varifrån kommer finandelen?	32
	10.2 Fältförsök	32
	10.3 Praktiska slutsatser	34
	10.4 Utblick mot Less Fines-projektet	35
<b>11.</b>	<b>REFERENSER</b>	<b>36</b>
<b>12.</b>	<b>ERKÄNNANDEN</b>	<b>38</b>

## 1. BAKGRUND

”Den svenska berggrunden kan enklast indelas i ett antal geologiska bildningsperioder som sträcker sig från 2500 miljoner år och framåt. Här kan urskiljas den sydvästsvenska gnejsregionen och den svekokarelska regionen från Mellansverige upp till Norrbotten. Mellan dessa båda regioner påträffas en region som sträcker sig från Småland upp till Värmland med granitoida bergarter. De allra yngsta bergarterna tillhör perioden yngre än 570 miljoner år och förekommer dels i fjällkedjan dels i södra Sverige som sedimentära restberg liggande på den äldre kristallina berggrunden” /1/.

Bergarterna inom dessa regioner varierar mycket kraftigt vad gäller bildningssätt, sammansättning, metamorf omvandlingsgrad och tektonisk påverkan. Ur materialsynpunkt skapar denna variation en stor spännvidd vad avser kvalitet, vilket innebär att man i vissa delar av Sverige har stora svårigheter att uppnå uppställda kvalitetskrav för krossade bergprodukter att användas som ballast i asfalt och betong. I många fall måste kraven sänkas då det blir för höga kostnader att transportera material från andra regioner med bättre kvaliteter. En annan faktor av stor vikt i detta sammanhang är att berggrund med hög kvalitet ofta inte sammanfaller med Sveriges mest tätbefolkade delar där behovet av makadamprodukter är som störst. Förbrukningen i detta sammanhang sätts till 10 ton per invånare och år.

Den totala produktionen i Sverige av grus och krossat berg har som mest varit 100 miljoner ton i slutet av 1980-talet men är i dagsläget ungefär 80 miljoner ton. Avsikten är att minska beroendet av naturgrus och öka andelen krossat bergmaterial. Detta innebär att kraven på prospektering av berg med bra kvalitet kommer att öka. I de områden som har en mindre god kvalitet kommer krav dessutom att ställas på förbättrade produktionsmetoder i form av skonsammare sprängning och ändrade krossningsprocesser för att minska finandelen och öka mängden användbara fraktioner.

Många stenbrott, för att inte säga de flesta, har därför önskemål om förbättrat styckefall vid sprängning för att kunna öka kvalitén på sina produkter. Täkterna provar därför ofta själva att ändra på några parametrar, eller gör en undersökning tillsammans med tex. sprängämnesleverantören för att se om man kan förbättra sitt styckefall /2/. Det kan vara svårt för täkterna att hinna följa upp resultaten för dessa prov och att dessutom dokumentera vad man gjort. Dessutom är själva provtagningen alltid besvärlig i en kontinuerlig process. Proven som tas i produktionskedjan är oftast tagna efter att berget passerat krossen och det kan därför vara svårt att fastställa styckefallet från själva sprängningen. Bildanalys kan vara ett hjälpmedel men siktning av salvan ger ett tillförlitligare resultat.

Ett antal fragmenteringsprojekt har genom åren drivits på Högskolor (examensarbeten, lic.) samt hos forskningsorganisationer, dels i Sverige men oftare utanför Sverige. Exempel på nordiska arbeten är från Heikkilä /3/, Kristiansen /4/, Kaijun /5/, Mononen /6/ och Tonnvik /7/.

SveBeFo drev tidigare ett projekt tillsammans med Chalmers vars syften var att:

- öka förståelsen för fragmenteringsprocessen vid sprängning
- förbättra sprängmetodikerna med hänsyn till finandel, skutandel, lastbarhet och kvalitet
- styra storleksfördelningen i sprängsalvan
- öka andelen + 200 mm
- minimera finandelen
- minska skutandelen

För detta provades olika typer av sprängning och mättes fragmentering i stenbrotten Källered och Billingsryd. Sprängämnen med olika detonationshastighet provades, frikopplingens och specifika laddningens inverkan på fragmenteringen undersöktes. Det var svårt att hitta tydliga samband mellan de ingående parametrarna och deras betydelse för att minska finandelen. Till stor del kan detta ha berott på svårigheterna med att begränsa antalet variabler vid försöken då såväl geologi som borrh- och laddplaner samt även mätmetodiken varierade mellan försöksomgångarna /8/.

Projektet nådde alltså inte fram till den digra målsättningen. Såväl täktägare, sprängämnes-tillverkare som forskare var otillfredsställda med detta. Det beslöts därför att SveBeFo skulle fortsätta med forskning om fragmentering i bergtäkter under ramprogramperioden 1997-99. En beredningsgrupp för ett nytt projekt bildades under hösten -98 bestående av:

Hans Carlsson, Sabema	Bo Ronge, Chalmers
Ulf Svensson, Nitro Nobel	Finn Ouchterlony, SveBeFo
Bernt Larsson, Kimit	Mats Olsson, SveBeFo
Gunnar Gustafsson, Chalmers	Tomas Franzén, SveBeFo

Projektet kom att inriktas mot finandelsproblematiken ty en betydande del av problemen för täkterna beror på att en för stor andel fint material bildats efter krossen. Många av dessa täkter ligger på västkusten och består av gnejser. Många täkter saknar närheten till ett asfaltverk och tvingas därför kassera sitt finmaterial.

Trots att genereringen av finandel kan vara en stor ekonomisk förlust för ballastproducenter världen över så har förhållandevis lite forskning gjorts på området. Finandelen finns i de fraktioner som går igenom och bildas i alla producerande steg i en täkt men säljs till det lägsta priset. Detta är naturligtvis inte hållbart eftersom det i många fall inte säljs alls utan materialet hamnar i stora högar vilka förr eller senare blir en miljömässig belastning.

#### *Geologiska egenskaper*

Svaghetsplan påverkar i stor utsträckning fragmenteringen i berg. Speciellt vid betraktelsen av generering av finmaterial så kan dessa vara en källa. Vågreflektioner skulle kunna ge upphov till invändig utstötning i berget och därmed sönderdela det i större grad än vad det hade gjorts annars.

*In situ* material är den finandel som redan finns i sprickor och håligheter inuti pallen som ska sprängas. Det är aldrig möjligt att reduceras denna mängd så om det finns 20 % finmaterial från början kan den slutliga mängden bara bli större än denna andel. En täkt med så mycket finmaterial i slutet av ballastprocessen har uppenbara problem men mycket få chanser att förbättra situationen.

Hållfastheten hos bergarter påverkar också utfallet efter en sprängning. Bergarter med hög porositet och därmed låg tryckhållfasthet borde ge mer finandel. Forskning pekar också på att bergarter med höga draghållfastheter (alltså berg som skulle betraktas som mer kompetent) ger mer finandel än de med lägre draghållfastheter. Detta visar på det komplexa i situationen och att det är svårt att dra några enkla slutsatser om vilka bergarter som är mer lämpliga att använda för att producera makadam.

Alla egenskaper beror i stort sett av bergets mineralogi. Mycket litet forskning har lagts på att studera ingående mineralers påverkan på utfallet vid sprängning. Exempelvis kan ett mineral vara mer benäget att falla sönder vid belastning än vad ett annat är. En del kanske till och med



har förmågan att agera sprickinitiatorer eller verkar som hinder vid fortsatt sprickpropagering. Mineral som kvarts och kalifältpat ger mer finandel än exempelvis amfiboler och pyroxener /9/. Mineral som har större benägenhet att erhålla mikrosprickor vid sprängning kommer i slutändan av den ballastproducerande processen, om inte vid sprängningen, att falla sönder och där ge mer finmaterial.

#### *Sprängparametrar och geometrier*

Bergmassan och dess egenskaper måste alltid beaktas då en salva planeras. För kraftfulla laddningar kan överfragmentera pallen och vice versa. Energins fördelning över tiden är bland annat en viktig del att ta hänsyn till. För höga tryck i början av sprängningen resulterar till stor del i uppkrossning närmast varje borrhål och lite energi blir kvar till övriga delar av pallen. Här spelar också inspänningen en stor roll. Ju större inspänning desto mer finmaterial bildas. Detonationshastigheten är också viktig att välja med försiktighet. Högre VOD har visat sig ge mer finandel /10/.

Borrhålets diameter har varit en omdiskuterad parameter som har uppfattats som en av de mest avgörande. En rad forskningsprojekt visar att en minskning av diametern minskar mängden finmaterial och olika teorier för hur detta hänger samman har föreslagits /11/.

En generell uppfattning är att en ökning av den specifika laddningen också ökar andelen finmaterial. Hur stor betydelse den har finns det dock olika åsikter om.

Frikoppling av sprängladdningen används i många täkter som en åtgärd mot finandelsgenerering. Luftspalten mellan borrhållsväggen och laddningen minskar borrhålstrycket markant och därmed blir uppkrossning närmast borrhål inte lika stor. Förladdningen däremot, har som uppgift att stänga in gaserna under en längre tid och det finns naturligtvis möjlighet att styra denna tid med hjälp av dess storlek. Denna får dock inte vara för stor eftersom det då råder stor risk för att den översta delen av pallen inte fragmenteras och problem med skut uppstår. Bottenladdningen (som ofta är väl tilltagen för att undvika gaddar) har däremot alltid en stor inspänning, oavsett förladdningens storlek. Detta leder i många fall till att pallen inte bara skjuts sönder onödigt mycket i botten, utan också att man på förhand förstör pallen undertill (som kanske vid något framtida tillfälle ska tas ut).

Pallens geometri och borrhållsplan spelar en stor roll eftersom dessa helt avgör hur stor del av bergmassan som varje hål ska sönderdela. En annan viktig aspekt är fördröjningstiderna som inte får vara för korta mellan raderna. Varje rad måste ges möjlighet att röra sig ett bestämt avstånd framåt innan nästa börjar röra på sig för att sekundär fragmentering (autogenkrossning) inte ska bli ett alltför stort problem.

I Sverige produceras årligen ca 8 Mton/år av finmaterial 0-4 mm varav ca 6 Mton/år måste kasseras. Det är oklart hur stor del av denna mängd som själva sprängningen och krossningen åstadkommer. Vad man däremot vet är att bergets in-situ finandel, dvs den del av finandelen som ges av bergmassans struktur, uppgår till mellan 5 och 10 % av årlig producerat finmaterial. Detta skulle betyda att processen spränga-krossa åstadkommer 7,2-7,6 Mton i finandel per år. Antag att det produceras lika mycket fint vid sprängningen som vid krossningen. Detta skulle innebära att andelen fint från sprängningen uppgår till 3,6-3,8 Mton/år, varav merparten är osäljbart material. Ett värde av finandelen på 25 kr/ton skulle medföra en intäkt för täkterna på 85 Mkr. Om lösningar kan tas fram för att halvera den producerade finandelsmängden skulle detta innebära drygt 40 Mkr i ökat produktvärde för branschen. Detta var ett starkt argument till att starta SveBeFo-projektet "Fragmentering i bergtäkter".

## 2. Målsättning

Att fastställa olika källors bidrag till finandelen vid sprängning samt att minska dessa.

## 3. Planering/Hypoteser

### 3.1 Uppläggnig

En projektplan togs fram bestående av följande delar:

- |         |   |
|---------|---|
| Steg 1. | Förutsättningar                                 |
| Steg 2. | Grundläggande försök - verifiering av hypoteser |
| Steg 3. | Fullskaleförsök i homogent berg                 |
| Steg 4. | Fullskaleförsök i uppsprucket berg              |

Det första steget omfattade täktbeskrivning, val av täkt och en hypotesgenomgång. Det andra steget omfattade modellförsök och fältförsök i täkter för att undersöka orsaker till finandelen. I det tredje och fjärde delsteget skulle sedan vunna erfarenheter testas genom fullskaleförsök.

Projektet startade 1999 med resurser både från SveBeFo och Chalmers. SveBeFo skulle ansvara för projektledning samt teknisk expertis och Chalmers skulle bidra med licentiand, handledare och examiner. Det gjordes en uppdelning av arbetsuppgifterna i den första delen, dvs. t.o.m. lic.avhandlingen. Chalmers svarade för val av täkt, geologi, litteraturstudie, laboratorieförsök samt insamling och testning av bergdata från försöksplatser. SveBeFo ansvarade för projektledning och fältförsöken

De grundläggande försöken i det andra delsteget syftade till att verifiera hypoteserna för finandelens uppkomst. Hypoteserna skulle undersökas dels i "halvskaleförsök" (full skala men med färre antal hål) samt genom modellförsök.

### 3.2 Hypoteser

Utifrån litteraturstudier och tidigare erfarenheter ställdes tidigt i projektet följande hypoteser för hur finandelen vid sprängning bildas:

1. *Uppkrossning* närmast hålen (erfarenheter från Vånga /12/)
 

Borrhålstrycket vid en detonation ger upphov till en hög sprickkoncentration nära hålet. Dessa sprickor medför i sin tur en ökad finandel.
2. *Nötning* mellan sprickplan
 

Sprickplanen kan vara både geologiskt betingade och/eller uppkomna genom sprängning. Vid rörelse mellan dessa sprickplan uppstår friktion som river loss fina partiklar.
3. *Autogenkrossning* vid sprängningen

Vid sprängning kastas stenblock iväg. Dessa block krockar med varandra i luften och sönderdelas i mindre stenar. Stenblock slås också sönder då de landar på marken. Fint material bildas.

4. *Sprängskador* från tidigare rad  
 Sprängning ger alltid mer eller mindre skador på kvarvarande berg. Vid sprängning med fulladdade hål blir skadorna avsevärda dels bakom den sprängda raden och dels under densamma. Dessa skador kan påverka mängden finandel.

## 4. Finansiering

Projektet har finansierats genom medel från SBUF, SBMI (Sveriges Bergmaterialindustri), Vägverket och Banverket samt med medel från SveBeFo, se Tabell 1. Dyno Nobel och NCC har dessutom bidragit med naturaresurser.

Tabell 1. Finansiering av projekt "Fragmentering i bergtäkter"

<b>Finansiär</b>	<b>Budgeterade medel (tkr)</b>
SveBeFo	3000
SBMI	460
SBUF	600
Vägverket	360
Banverket	250
Summa	4670

Projektmedlen har fördelats på 4 år och omfattat kostnader för Chalmers och SveBeFo.

## 5. Organisation

Projektet har bestått av en projektgrupp samt en referensgrupp. Projektgruppen har bestått av följande personer:

### Projektgrupp

Mats Olsson	projektledare SveBeFo
Finn Ouchterlony	SveBeFo
Ingvar Bergqvist	Dyno Nobel
Victoria Svahn	licentiand Chalmers
Bo Ronge	biträdande handledare Chalmers t.o.m. 2000
Patrik Alm	" f.o.m. 2001

Referensgruppen har förutom ovanstående bestått av personer från industrin samt Chalmers och SveBeFo, se bilaga 1. SO Båvik, Vägverket Produktion, har varit ordförande i referensgruppen. Referensgruppen har sammanträtt 6 ggr sedan projektstarten.

## 6. Försöksuppläggning

Försöken har bestått av två delar, modellförsök och fältförsök. Genom dessa försök skulle de olika hypoteserna undersökas. Tanken i projektplanen var att man i modellförsöken skulle testa krossning närmast hålet, nötning mellan sprickplan samt hypotesen om autogenkrossning. Genom fältförsöken skulle främst krossning närmast hålet undersökas. Resultaten från modellförsöken och fältförsöken skulle sedan ge en uppläggning av fullskaliga fältförsök.

Försöken som redovisas nedan omfattar tester enligt den första hypotesen, dvs. krossning närmast hålet. Chalmers har ansvarat för modellförsöken och SveBeFo för fältförsöken. Finn Ouchterlony kom med uppslaget att använda betongskikt med olika färg i modellförsöken.

## 7. Modellförsök

Det är svårt att studera hur finandel bildas i full skala. Det är också svårt att få en god repeterbarhet i full skala. Hur skall man då bära sig åt? Kontakter med Universitetet i Leoben i Österrike visade att man där använt modellsprängningar i sin forskning om fragmentering. Där hade man använt betongcylindrar för sina sprängförsök /13/.

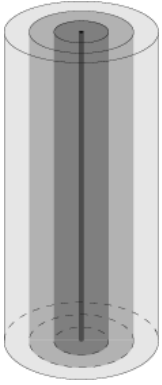
Huvudhypotesen med våra modellförsök var i ett första steg att undersöka om finandelen verkligen produceras närmast spränghålet. En utförlig plan för modellförsöken togs fram där det bestämdes att modellförsöken skulle utföras i betongcylindrar och att varje försök skulle upprepas tre gånger.

### 7.1 Metod

Efter att ha studerat olika geometrier på provkroppar valdes en cylinder med diametern 300 mm och en höjd på 600 mm. Cylindern delades in i tre cylindriska skikt som skulle skilja sig från varandra utan att provkroppens homogenitet påverkades. För att åstadkomma detta tillverkades cylindern i betong, eller snarare bruk eftersom ballasten bestod av sand. Med hjälp av bruket kunde cylinderns egenskaper kontrolleras och de olika skikten skiljas åt genom infärgning. Färgpigment tillsattes då bruket blandades och påverkade inte dess slutliga egenskaper. Efter sprängning representerade varje färg ett skikt och det var på så sätt möjligt att spåra varifrån i den ursprungliga provkroppen som varje fraktion härstammade. Provkroppens innersta hålcylinder hade en diameter på 120 mm, den mellersta 200 mm och den yttersta hålcylindern hade en diameter på 300 mm, se Figur 1.

### 7.2 Modellmaterialet

Det valda modellmaterialet betong har en sammansättning som skiljer sig markant från berget i fullskalförsöken. För att göra materialet lite mer likt berg användes en kvartssand som ballast. Den största kornstorleken var 0,5 mm och kvartshalten var 94,7 %. Denna sammansättning närmar sig bruk, istället för betong.



Figur 1. Provkroppen utformades som en cylinder av bruk som bestod av tre cylinderskikt i olika färger.

Brukets sammansättning komponerades för att uppnå högsta möjliga hållfasthet och lägsta porositet. Detta gick att åstadkomma genom att tillsätta flytmedel och välja ett vatten-cement-tal (vct) till 0,35. Flytmedlet minimerade inte bara porositeten utan gav också bruket en lägre viskositet vilket var nödvändigt för att kunna utföra gjutningen av provkroppen. Brukets sammansättning är sammanfattad i Tabell 2.

Tabell 2. Brukets sammansättning

Sand	Industrisand (Askania)
Cement	Vit std. cement (Ålborg, CEMENTA)
Flytmedel	1,7 % (Cementa SSP20)
Pigment	4 % (BKN Byggekemi AB)
vct	0,35
Sand : Cement	1,5 : 1

För att färga bruket användes järn- och kromoxid. Färgerna valdes ut bland många genom att färgintensiteten studerades då pigmentet blandats med den vita cementen. Svart, gul och grön färg valdes ut eftersom de färgerna skiljde sig markant från varandra visuellt. Varje pigment testades så att färgen inte påverkades av det höga trycket och den höga temperaturen som uppstår i borrhålet vid detonationstillfället, se Figur 2. Inga färgskiftningar kunde upptäckas men däremot så svärtade sprängmedlet bruket närmast borrhålet, se Figur 3, vilket gjorde att det svarta segmentet placerades längst in.



Figur 2. Mindre provkroppar användes för att undersöka huruvida pigmentet påverkades av tryck och temperatur vid sprängningen.



Figur 3. Sprängmedlet svärtade bruket närmast borrhålet.

### 7.3 Gjutprocessen

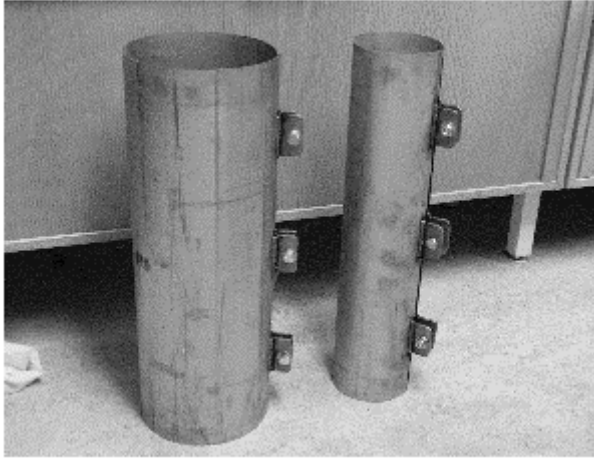
Gjutprocessen för provkropparna visade sig bli mer komplicerat än vad som först antagits. Först tillverkades en yttre cylinderform genom att ett stålrör skars upp och försågs med skruvar som gjorde att den kunde återförslutas. Gjutformen målades med en plastfärg för att underlätta att bruket, efter härdning, skulle släppa formen. Sedan svetsades två cylinderrör samman, den minsta i den större. Denna form skulle fungera som en glidform som centerades i den stora målade cylindern. I den innersta cylinder centerades en stålstav med 9 mm diameter som efter härdning drogs upp och formade hålet för laddningen.

Gjutprocessen testades med en icke-infärgad brukblandning. Bruket kunde hällas ner i de tre segmenten tack vare blandningens låga viskositet. Bruket kunde också anses vara självkompakterande varför ingen vibrering behövdes göras. De två innersta cylindrarna (glidformen) lyftes sakta upp. Efter gjutning förvarades provkroppen fuktigt och efter ett dygn kunde stålstaven tas bort och efter ytterligare ett dygn den yttersta formen. Provkroppen fuktades och lindades in i plast varpå den lämnades att härda i ytterligare 26 dygn.

Sprängningen utfördes i en specialtillverkad container och sprängmedlet som användes var sprängdeg som försiktigt trycktes ner i "borrhålet". Provkroppen laddades och sprängdes men detonationen blev ofullständig och halva cylindern förblev intakt. Det kunde dock ses att cylindern vid gjutningen erhållit svaghetszoner i övergången mellan de olika skikten, det vill säga där glidformen dragits upp. Svaghetsplanen bildades förmodligen då formen drogs upp och vatten ansamlades under kanten. Konsekvensen av detta första försök blev att gjutprocessen förkastades.

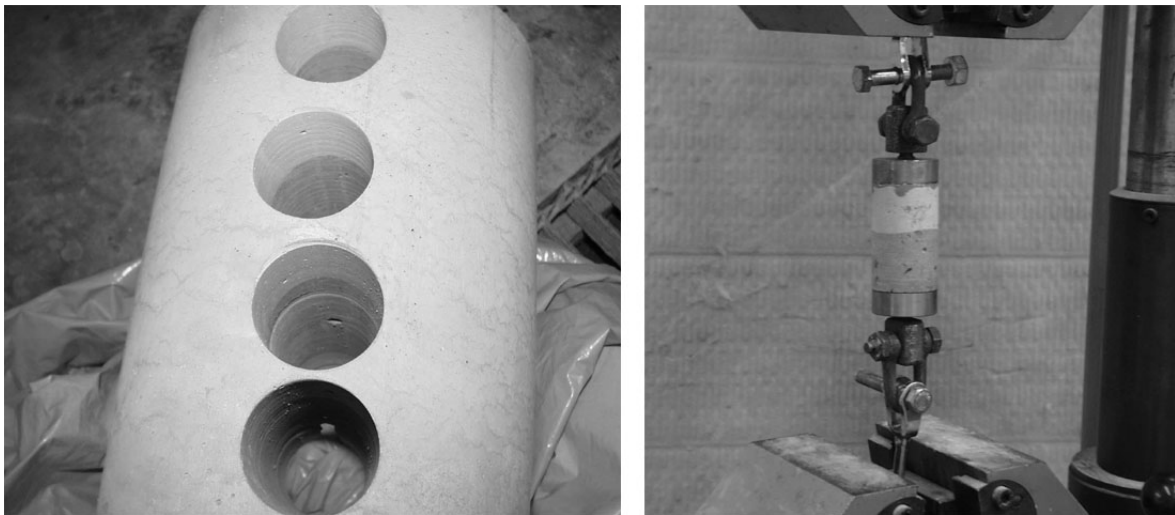
Den nya metoden bestod av en gjutning i tre steg. Den yttersta gjutformen behölls men två nya fristående formar tillverkades, en för den inre cylindern och en för den mittersta, se Figur 4.

Först gjöts den innersta svarta cylindern med stålstaven i mitten. Denna tilläts härda i ett dygn innan formen togs bort och inlindad i plast fortsatte härdningen i ytterligare ett dygn. Ytan på den svarta cylindern sandblästrades sedan för att allt svagare material som ansamlats vid gjutformen skulle avlägsnas. Därefter placerades den innersta cylindern i den mellersta gjutformen och det gula bruket hälldes ner runt den svarta kroppen. Efter ett dygn avformades denna, nu tvåfärgade, provkropp.



Figur 4. Den andra gjutprocessen bestod av en tre-steps-process där provkroppen gjöts med hjälp av tre fristående gjutformar.

För att testa kontaktytan mellan den svarta innersta cylindern och det gula mellersta lagret borrades kärnor diametralt genom provkroppen och draghållfastheten provades, se Figur 5.

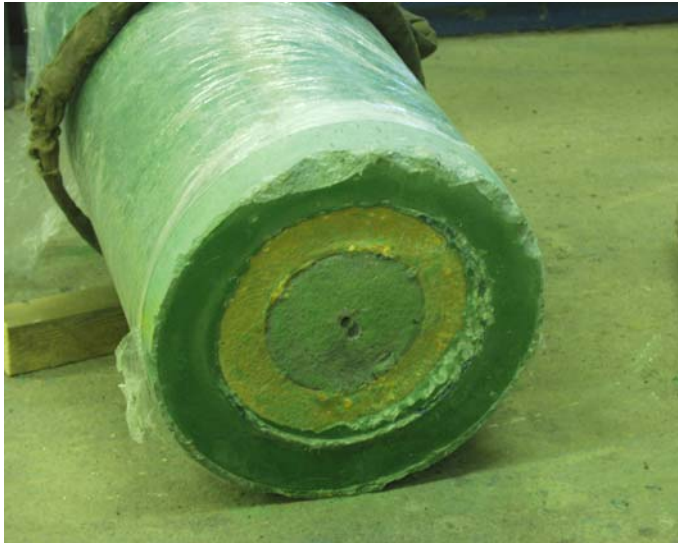


Figur 5. Kontaktytan mellan de olika segmenten dragtestades med urborrade kärnor.

Resultaten från dragtestet visade att det inte fanns något svaghetsplan i skarven, samtliga brott gick genom den svarta cylindern. Testet avslöjade dessutom att det svarta bruket hade en lägre hållfasthet än det gula trots att bruket gjutits på samma sätt och hade samma sammansättning. Det svarta bruket hade en högre porositet, vilket förmodligen förklarade hållfasthetsskillnaderna. Detta demonstrerade svårigheterna i att gjuta liknande blandningar trots att identiska sammansättningar blandats och samma utrustning använts.

Då gjutprocessen konstaterats framgångsrik påbörjades proceduren att gjuta tre kompletta provkroppar. Proceduren påbörjades enligt ovan beskrivna ordning förutom att det sista gröna lagret lades på efter att den mellersta gula ytan blåstrats. De färdiggjutna provkropparna härdades i 28 dygn (efter att det yttersta lagret gjutits) i 20°C. Provkropparna kom att bestå av 15 % svart bruk, 28 % gult och 57 % grönt, se Figur 6. Under gjutprocessen tillverkades också provkroppar för hållfasthetsprovning för att alla egenskaper hos de färdiga cylindrarna skulle kunna bestämmas. Speciellt viktigt var detta för det yttersta gröna lagret eftersom

volymen bruk varit för stor för utrustningen. Därför kunde inte allt grönt bruk blandas vid ett tillfälle utan tre separata blandningar gjordes, en för varje provcylinder. Egenskaper hos bruket bestämdes efter 28 dagar och samma dag som provkropparna sprängdes.



Figur 6. En av de färdig cylindriska provkropparna.

#### 7.4 Materialegenskaper

Både färsk och härdade egenskaper bestämdes efter 28 dagar och på den dag då provkropparna sprängdes. Uppmätta egenskaper kan ses i Tabell 3.

Tabell 3. Brukets egenskaper samma dag som provkropparna sprängdes

Lager	Färsk densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Tryckhållfasthet [MPa]	Böjdraghållfasthet [MPa]	Hastighet P-våg [m/s]
Svart	2214	2253	76,6	7,8	3922
Gul	-	2266	98,4	7,8	4143
Grön1	2055	2039	62,2	7,2	3803
Grön2	2325	2338	85,3	7,6	4078
Grön3	2316	2340	86,3	8,7	4178

Den första gröna brukblandningen visar sämre hållfasthetsegenskaper än de övriga. Den färsk densiteten indikerar att något blivit fel från början. För att få en uppfattning om porositeten hos bruket så mättes även P-vågshastigheten. Denna var relativt lika för samtliga blandningar. Målet att tillverka ett höghållfast bruk hade dessutom lyckats.

Eftersom det inte var möjligt att få fram ett spännings-töjningsdiagram på traditionell väg, och därmed bestämma E-modulen och Poisson's tal, användes istället en approximation:

$$E_d \cong \rho \cdot V_p^2 \quad (1)$$

där  $E_d$  = dynamisk E-modul [Pa]  
 $\rho$  = materialets densitet [kg/m<sup>3</sup>]  
 $V_p$  = P-vågshastigheten [m/s]



Ekvation 1 baseras på en ekvation för en Hopkinson Pressure Bar där våghastigheten i stången är kvadratroten av E-modulen delat med densiteten. En förenkling av denna har föreslagits av ASTM Standard (C769-80) /14/ och denna innebär att stångens hastighet antas vara lika med P-vågshastigheten. Modulen som tas fram på detta sättet är en dynamisk modul, se Tabell 4, och är därför inte jämförbar med den E-modul som tas fram vid traditionell betongprovning.

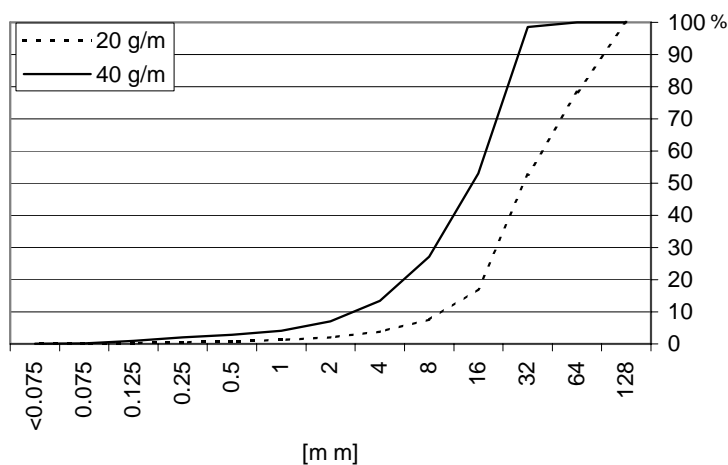
Tabell 4. E-modulen för de tre cylinderkropparna

Lager	P-vågshastighet [m/s]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	E-modul [GPa]
Svart	3922	2253	34,6
Gul	4143	2266	38,9
Grön1	3803	2039	29,5
Grön2	4078	2338	38,9
Grön3	4178	2340	40,8

Den uträknade E-modulen är fullt acceptabel, då betong i allmänhet har en statisk modul mellan 10 och 40 GPa /15/. Den dynamiska modulen är lite högre eftersom provkroppen utsätts för en plötslig pålastning. Trycket har då ingen tid att finna de svagaste passagen som det annars skulle /11/.

## 7.5 Val av sprängmedel

Det första sprängmedlet som testades var sprängdeg. Sprängdegen laddades med hjälp av en träpinne. Vid sprängningen fick man detonationsavbrott vilket troligen berodde på att man fått luftfickor i laddningen. Därför valdes istället pentylstubin för de fortsatta försöken. Detta sprängämne ansågs både säkrare att använda och lättare att hantera. Två pentylstubiner (Detonex) med olika laddningskoncentrationer testades; 20 och 40 g/m. Två cylindrar tillverkades för att testa vilken laddningskoncentration som blev bäst. Efter sprängning siktades materialet och resultatet visade att laddningen med 40 g/m gav mer finandel och därför valdes denna laddningskoncentration för de efterföljande försöken, se Figur 7. Den specifika laddningen blev 0,53 kg/m<sup>3</sup> vilket rätt väl motsvarar den som används vid produktionssalvor.



Figur 7. Test av olika laddningskoncentrationer

## 7.6 Sprängning

Sprängningen av de tre infärgade provkropparna ägde rum i en specialtillverkad container, se Figur 8. Containern hade klätts, invändigt, med 10 mm stål på vilket ett lager gummi klistrats fast. Gummit skulle dämpa kast och därmed minimera risken för sekundär fragmentering. Pentylstubinen placerades i mittenhålet i varje provkropp och detonationen initierades av en sprängkapsel. Efteråt samlades alla fragment upp och transporterades bort för siktning.



Figur 8. Sprängningarna utfördes i en specialtillverkad container.

## 7.7 Siktning

Eftersom betong är ett sprött material siktades allt material för hand. Vid en provsiktning visade det sig att även om skaktiden minskades skapades en stor mängd finandel vid den mekaniska siktningens procedur. Detta undveks genom att inte bara minska skaktiden men också använda stora handsiktare, se Figur 9. Först delades materialet ner i fraktioner större än 4 mm och därefter användes traditionella laboratoriesiktare ner till fraktionen  $< 0,075$  mm.

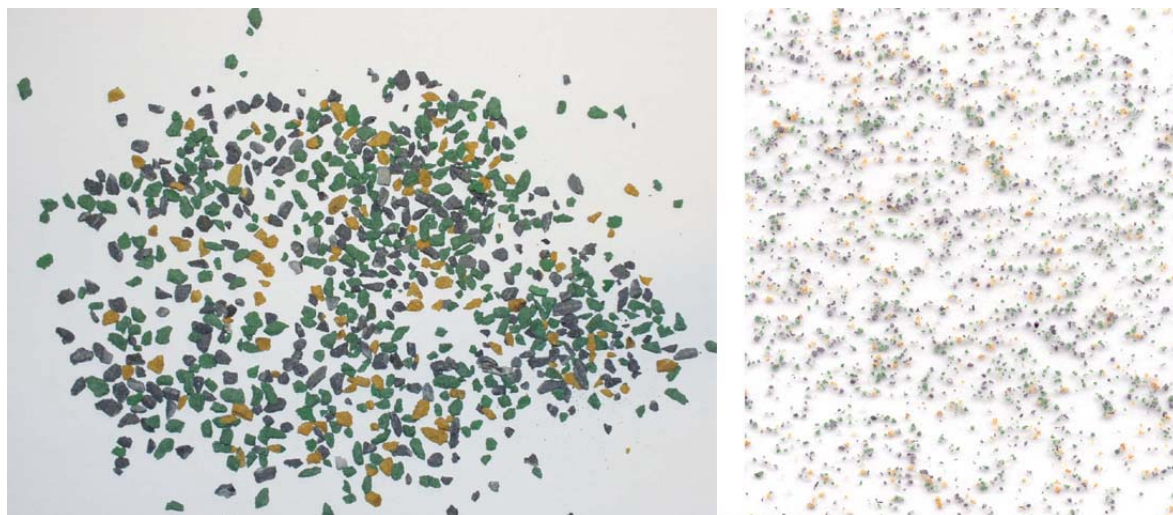


Figur 9. Eftersom det spröda bruket föll sönder under traditionell laboratoriesiktning, ersattes denna av en mer skonsam siktning.

## 7.8 Provtagning

Efter att samtliga tre cylindrar siktats upp påbörjades arbetet med att bestämma andelen av respektive färg i varje fraktion. Efter att denna separering hade gjorts så kunde siktkurvorna presenteras.

De större fraktionerna ( $> 8$  mm) separerades för hand. Det totala antalet fragment i varje färg räknades. För fraktionerna  $< 8$  mm blev antalet fragment för många för att totalräknas och därför togs prov från dessa, se Figur 10. För fraktionerna 4 – 8 mm och 2 – 4 mm utgjorde de slumpmässiga proverna 15 % av den totala mängden. För fraktionerna  $< 2$  mm gav även detta för många fragment så då togs tillräckligt många prov för att uppnå konfidensintervall om 2 % eller mindre vid en signifikansnivå på 0,05. Detta betydde att 6 000 – 11 000 fragment (i mer än fem prover per fraktion) räknades. När fragmenten blev för små för att hantera med fingrarna spriddes de ut på ett papper och lades in i en scanner. Efter att bilden skrivits ut var det lättare att räkna genom att studera papperet. Ett bildanalysprogram testades för att underlätta arbetet men slutsatsen blev ändå att räkna för hand skulle vara mindre tidskrävande.



Figur 10. Utskrifter av scannade bilder underlättade arbetet med att räkna in alla provtagna fragment. Till vänster fraktionen 2 – 4 mm och till höger 0,25 – 0,5 mm.

## 7.9 Tunnslip

För att vidare kunna studera sprickpropagering i provcylindrarna tillverkades sju tunnslip. Dessa togs från två stora bitar som blev kvar efter sprängningen. Bitarna innehöll samtliga tre infärgade segment och var bara lätt fragmenterade. En bit var fragmenterad i både det svarta bruket (närmast det laddade hålet) och det yttersta gröna. Den andra hade en intakt grön ytteryta. Tunnslipen tillverkades på traditionellt sätt med ett tillägg; innan prepareringen påbörjades dränktes bitarna av bruk in i rödfärgad epoxi. Epoxin trängde in i sprickor och gjorde dessa mycket lättare att studera i det slutliga tunnslipet.

## 8. Fältförsök

### 8.1 Val av försöksplats

Vid projektstarten bestämdes att försöken skulle utföras dels i sura dels i basiska bergarter med grovblockig struktur, dvs. så lite naturliga sprickor som möjligt. Ett antal stenbrott besöktes och 2 st valdes som lämpliga täkter, Bårarp (gnejs) resp. Sternö (diabas). Försöken har emellertid utförts i Bårarp.

Bårarp är ett blockstensbrott ca 2 mil norr om Halmstad. Brottet som ägs av Emmaboda Granit består av flera separata områden.

### 8.2 Regional geologi

Halland består till största del av kristallin berggrund vilken är en del av den västsvenska gnejsregionen. Regionen sträcker sig från Törnquistzonen i söder till södra delarna av Norge och kan delas in i två zoner som skiljs åt av Mylonitzonen /16/.

Täktverksamheten i området domineras av blockstens- och ballastproduktion. Den polerade gnejsen har en väldigt attraktiv färg såväl som bra tekniska egenskaper och den är motståndskraftig mot vittring.

### 8.3 Lokal geologi

Bårarpstäkten, i vilket fältförsöken utförts, består till största del av grå-röd alkalignejs med en kornstorlek mellan 0,5 och 5 mm. Berget har metamorfoserats vilket lett till partiell uppsmältning på vissa platser och en mer phaneritisk struktur /1/. Det går också att finna pegmatit vilket även det är ett resultat av uppsmältningen. De dominerande mineralen är kvarts, kalifältspat (mikroklin), plagioklas, biotit och muskovit. Kvarts och fältspater (Ca) är de första mineralen att smälta varför de ansamlas i större volymer. Berget innehåller också xenoliter. Mineralkorn växer samman i den riktningen där det minsta trycket råder och lägger sig parallellt med detta. Variationer i tryck och temperatur innebär också olika grader av transformationer vilket ger berget en folierad struktur. Foliationens strykning är nord-nordöst och stupningen sydöstlig.

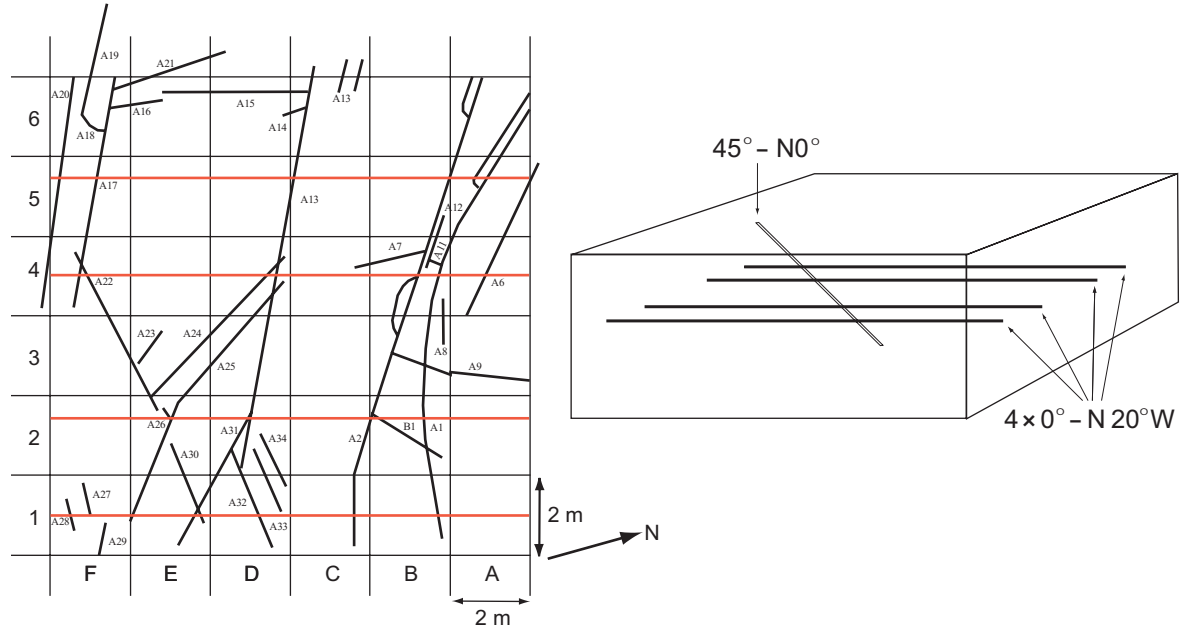
Försöksplatsen består av samma typ av gnejs som beskrivits ovan. Foliationens strykning uppmättes till N40°E och stupningen 35-45°SE. Berget är sprött och sprickfrekvensen mycket låg. De få sprickor som finns är dock väldigt dominerande och öppna. De något mindre är oftast slutna och ihopläckta. Sprickor bredare än 50 mm har sand som sprickfyllnad.

### 8.4 Sprickkartering

Innan sprängningarna tog sin början karterades geologin och sprickorna mycket noggrant. Pallöverytan delades in i ett rutnät för att underlätta identifieringen och dokumenteringen av alla sprickor. Tack vare att sprickfrekvensen var så låg markerades alla synliga sprickor med färg och fotograferades med en digitalkamera. Figur 11 visar sprickkarteringen.

## 8.5 Tekniska egenskaper

Gnejsens tekniska egenskaper undersöktes med hjälp av fem utborrade bergskärnor. Dessa togs ut enligt skissen i Figur 11.



Figur 11. Sprickkartering och läge på bergskärnor (pallfronten vid höger sida).

Kärnorna användes också för att studera sprickfrekvensen och det visade sig att de sprickor som observerats på ytan i stort sett var desamma som hittades inuti pallen.

Egenskaperna som bestämdes var tryck- respektive draghållfastheten samt P-vågshastigheten, se Tabell 5. Detta gjordes enligt standardmetoder. Tidigare provtagningar redovisas i Tabell 6-7. För vidare information om testförfarande hänvisas till FAS /17/, Pells /18/, Schön /19/ och Brook /20/.

Tabell 5. Tryck- och draghållfasthet samt P-vågshastighet för Bårarpsgnejsen /11/

$\sigma_c$ , Point load [MPa]	$\sigma_t$ , Brazilian [MPa]	$V_p$ [m/s]
$244 \pm 37$	$13,2 \pm 1,4$	$5526 \pm 185$

Tabell 6. Några tekniska egenskaper utvärderade av Lundqvist et al. /16/

Sprödhetstal [vikt%]	Flisighet [vikt%]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Kulkvarnsvärde [cm <sup>3</sup> ]	Glimmerinnehåll [vol%]
55	1,35	2,7	3,09	6

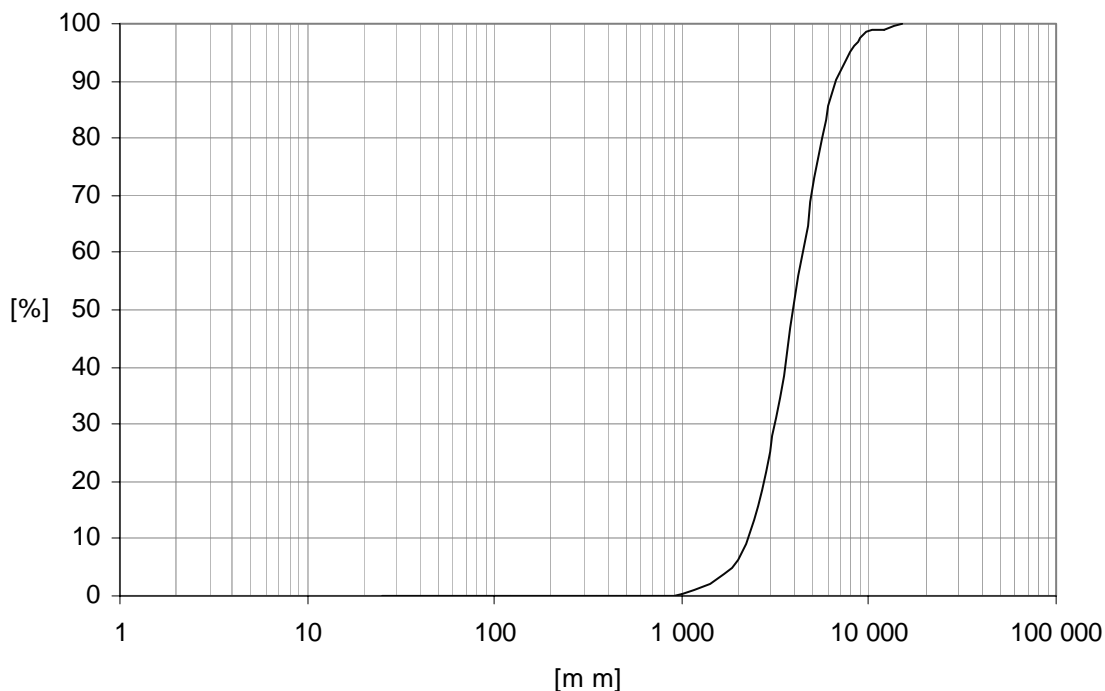
Tabell 7. Några tekniska egenskaper sammanställda av SGU /21/ och SP /22,23/

LT-index [vikt%]	Punktlastindex (torr) [MPa]	Punktlastindex (våt) [MPa]
14,0	9,3	8,4

Genom att utnyttja P-vågshastigheten och bergets densitet var det möjligt att räkna fram en dynamisk E-modul som blev 82,5 GPa.

## 8.6 In-situ blockstorleksfördelning

Sprickkarteringen i försöksområdet gjorde det möjligt att ta fram en in-situ fördelning över blocken i pallen. Detta gjordes statistiskt genom att anta att sprickorna var slumpmässigt fördelade och att de dominerande sprickriktningar kunde tas fram. På stereoplotten hittades dock inga ansamlingar vilket föranledde ett antagande om att det inte existerade några dominerande sprickriktningar. Monte Carlo-simuleringar resulterade i 100 fördelningar för blockstorleken ur vilka 10 slumpmässigt valdes ut att representera försöksområdet. Dessa fördelningar var log-normalfördelade med ett medelvärde på  $5,7 \text{ m}^3$  och standardavvikelse  $0,84 \text{ m}^3$ . Den slutliga fördelningen ses i Figur 12.



Figur 12. Den modellerade in-situ-fördelningskurvan för försöksområdet.

## 8.7 Försöksuppläggning

Vid fältförsöken valde vi att undersöka hypotesen att krossning närmast hålet ger en hög finandel. Detta innebar att vi studerade inverkan av håldimension och frikoppling vid konstant specifik laddning. Detta medförde att försättning och hålavstånd avpassades för att uppnå en konstant specifik laddning. Projektplanens ursprungliga uppläggning var sprängning av 6 st försöks-salvor. Försöket kom emellertid att omfatta 7 salvor. Salvorna 1-3 utfördes i samma pall och salva 4-7 i en pall strax framför.

Inför varje ny försöksomgång rensprängdes pallfronten, se Figur 13. Detta för att inte få med sprängskadat berg i den nya försökssalvan. Arbetet utfördes av Emmaboda Granit med samma höga krav på pallfronten som är brukligt i brottet. Detta innebar att en tätsöm med hålavstånd c-c ca 0,3 m sprängdes med 20- eller 40 grams cord varefter berget lastades ut och bottenytan avjämnades.

Hållriktningen för våra försökshål var parallell med den rensprängda salvan. Våra försökshål borrades av Nybergs Borrtjänst AB.

För att säkra noggrannheten på initieringen användes elektroniska sprängkapslar. Dyno Nobel tillhandahöll dessa för projektet liksom sprängmedlet, patronerad emulsion Emulite och Kemix.



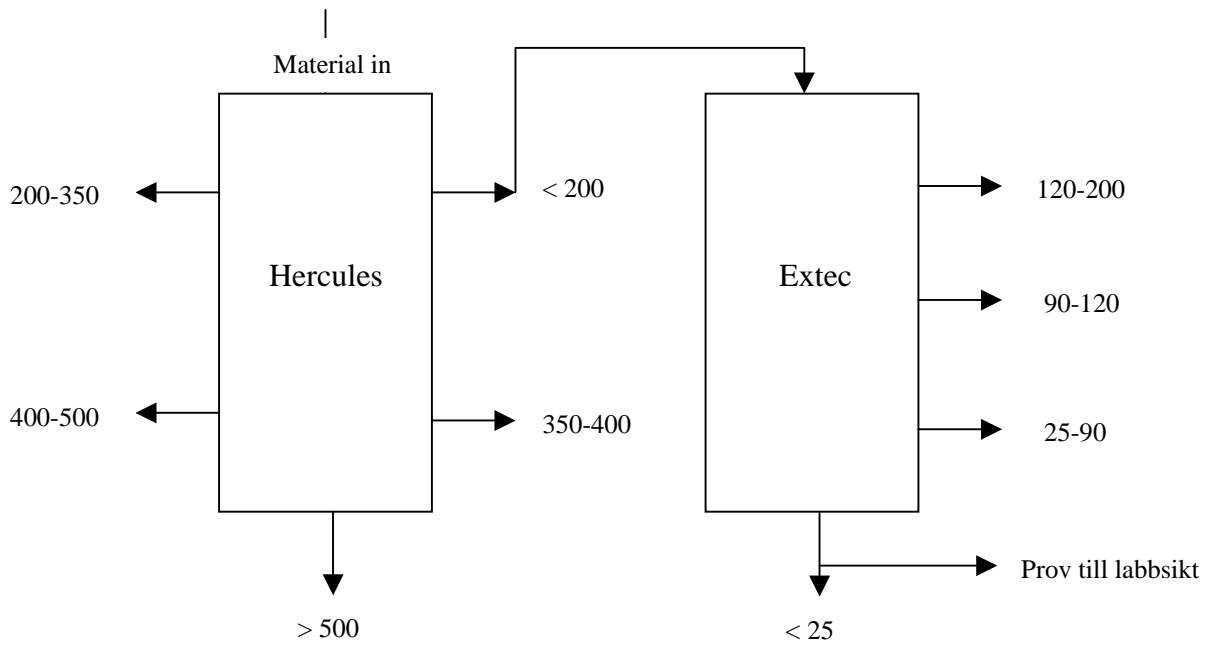
Figur 13. Rensprängd pall inför ny provomgång.

Efter varje salva lastades berget till en roterande sikt av märke Hercules, Figur 14. Sikten ägs av NCC som tidigare använt denna för att sikta upp material för Öresundsbron.

Skut som riskerade att fastna i siktens matare, mättes, vägdes och lades åt sidan. Efter siktning och vägning av de olika fraktionerna från Hercules siktades fraktionen < 200 mm på en Extec-sikt. För detta fick vi transportera materialet < 200 mm med lastbil till Eldsberga där Extec-sikten fanns. Billast och samtliga fraktioner från Extec vägdes. Från fraktionen < 25 mm från Extec-sikten togs prover för en efterföljande laboratoriesiktning. Provtagningen gjordes enligt Svensk Standard SS 132102 /24/ vilket här innebar att högen rörde om och plattades ut varefter ca 50 kg prov togs ut och samlades i en tunna med lock. Tunnorna transporterades sedan till NCC:s Väglaboratorium i Kvibille för analys av finandel. Uppläggningsen av siktningen kan beskrivas enligt Figur 15. Figur 16 visar sikthögar från Hercules resp. Extec-siktarna. Ramarna som syns på berghögen från Hercules-sikten användes som referensmått för en efterföljande bildanalys.



Figur 14. Hercules roterande trommelsikt /25/.



Figur 15. Flödesplan siktning (siffrorna anger styckefallet ut i mm).





Figur 16. Fraktion < 200 mm från Hercules samt omsiktning med Extec.

## 8.8 Försökssalvor

Innan laddning påbörjades renblåstes samtliga hål från vatten. Uppläggnen av de 7 försökssalvorna framgår av Tabell 8. Samtliga salvor laddades med patronerad emulsionssprängämne, Emulite eller Kemix från Dyno Nobel. Samtliga salvor förutom salva 2 hade fulladdade hål. I salva 2 testades frikoppling genom att 51 mm rör centreres i 76 mm hål. Detta utfördes praktiskt så att 43 mm Emulite laddades i 51 mm plaströr vilka sedan sänktes ner i borrhålen.

Underborrningen var ca 0,5 m i salvorna. På grund av att den specifika laddningen hölls konstant varierade hålantalet mellan salvorna. Salva 5 med Ø 38 mm hål hade flest antal hål, 8 st, medan salvorna med Ø 76 mm hål endast hade 4 hål. Tonnaget mellan salvorna varierade från ca 240 ton upptill drygt 400 ton. Samtliga salvor initierades med elektronik sprängkapslar, EPD, från Dyno Nobel. Från och med salva 4 användes en ny generation av dessa kapslar och från och med denna salva ändrades även intervallsättningen något för att undvika att två närliggande hål initieras samtidigt. Kemix användes från och med denna salva då Dyno Nobel slutat tillverka Emulite. Figur 17 visar sprängämnepatroner och kapslar. Detta emulsionssprängämne har i stort sett samma data som Emulite, se Tabell 9.



Figur 17. Kemix och elektronik kapslar samt laddning av salva 5.

Samtliga hål förladdades med proppgrus 4-8 mm. Vi försökte hålla förladdningslängden 1,4 m konstant men förladdningen i salva 3 blev 1,8 m vilket är för långt, särskilt med tanke på att hålen i försöket var relativt korta jämfört med hållängder i dagbrott.

Det var ibland svårt att få konstant packning och laddningslängd. Vi skar ett snitt i plasten hos det patronerade sprängämnet och släppte sedan ner laddningarna i hålet. På detta sätt lyckades vi få bra utfyllnad och packningsgrad, se närmare Tabell 8. Den specifika laddningen per hål var i snitt 0,45 kg/m<sup>3</sup> med variationer från 0,41 kg/m<sup>3</sup> till 0,48 kg/m<sup>3</sup>.

Innan sprängningen märktes pallsidorna med linjer på ett känt avstånd från pallbotten. Detta gjordes för att underlätta lastning ner till rätt nivå. Vi provade också att lägga ut markörer i form av stockar för lastning till rätt nivå. Detta fungerade bra men ställde till problem vid siktningen.

Tabell 8. Data från försökssalvorna

Salvdata	Salva 1	Salva 2	Salva 3	Salva 4	Salva 5	Salva 6	Salva 7
Försättning (m)	1,8	1,8	2,7	1,8	1,35	2,3	2,7
Hålavstånd (m)	2,1	2,1	3,4	2,2	1,65	2,85	3,3
Pallhöjd (m)	5	5	5	5,2	5,2	5,3	5
Håldjup (m)-verkligt	5,6	5,5	5,5	5,5	5,35	5,6	5,6
Håldiameter (mm)	51	76	76	51	38	64	76
Hålantall (st)	6	6	4	6	8	5	4
Teoretisk volym (m <sup>3</sup> )	94,5	94,5	137,7	103	81,1	139	133,7
Teoretisk tonnage (ton)	283,5	283,5	413,1	309	243,3	417	401,1
Tändare	EPD	EPD	EPD	EPDnya	EPDnya	EPDnya	EPDnya
Intervall (nr och 25 ms)	321123	321123	2112	321234	32101234	32123	2123
Sprängämne	Emulite	Emulite	Emulite	Kemix	Kemix	Kemix	Kemix
Kopplingsgrad	1	0,66	1	1	1	1	1
Laddningslängd /hål (m)	4,2	4,2	3,7	4,2	4,2	4,4	4,2
Laddningsmängd (kg/m)	2,1	2,1	5,2	2,2	1,3	3,5	4,6
Förladdning (m)	1,4	1,4	1,8	1,2	1,1	1,2	1,4
Specifik laddning/hål	0,48	0,48	0,41	0,46	0,46	0,44	0,44
Specifik laddning	0,55	0,57	0,55	0,55	0,52	0,55	0,58

Tabell 9. Sprängämnesdata

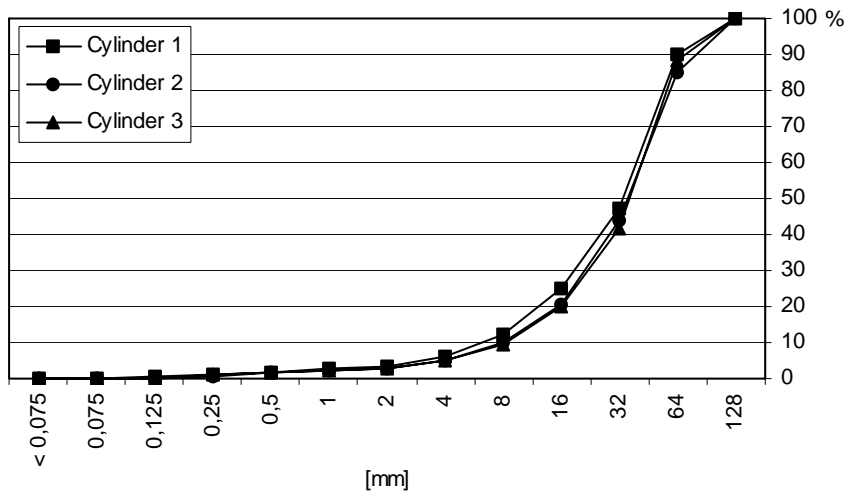
Sprängämnesdata	Emulite 100	Kemix
Densitet (kg/dm <sup>3</sup> )	1,2-1,25	1,2
Viktstyrka (% rel. Dynomit)	70	70
Energi (MJ/kg)	2,7	3,2
Detonationshastighet (m/s)	5000	4800-5800
Gasvolym (l/kg)	910	950

Detonationshastigheten mättes i två hål i salva 2 och salva 5. Hastigheten varierade mellan ca 5400 m/s och 5850 m/s vilket stämmer rätt bra med den av Dyno Nobel uppgivna.

## 9. Resultat

### 9.1 Modellförsök

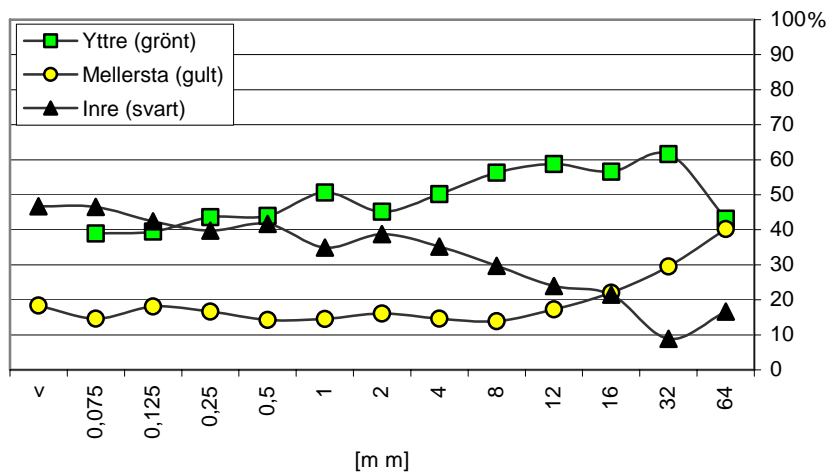
Efter att samtliga fraktioner vägts upp, plottades siktkurvorna för cylindrarna i ett kumulativt diagram, se Figur 18. På det sättet var det möjligt att se om fragmenteringen hade blivit likvärdig vid sprängningarna.



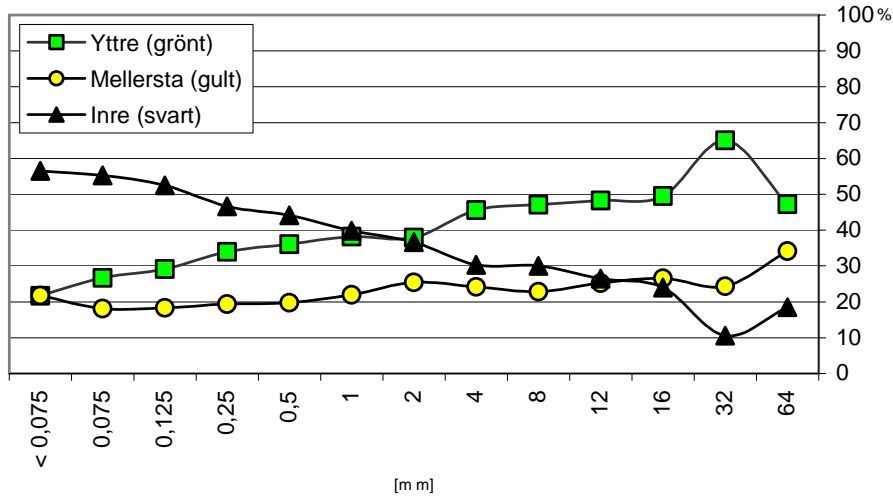
Figur 18. Kumulativa siktkurvor för de tre infärgade cylindrarna.

Alla cylindrarna uppvisade en mycket snarlik fragmenteringen och nästa steg blev att separera varje fraktion i respektive färg.

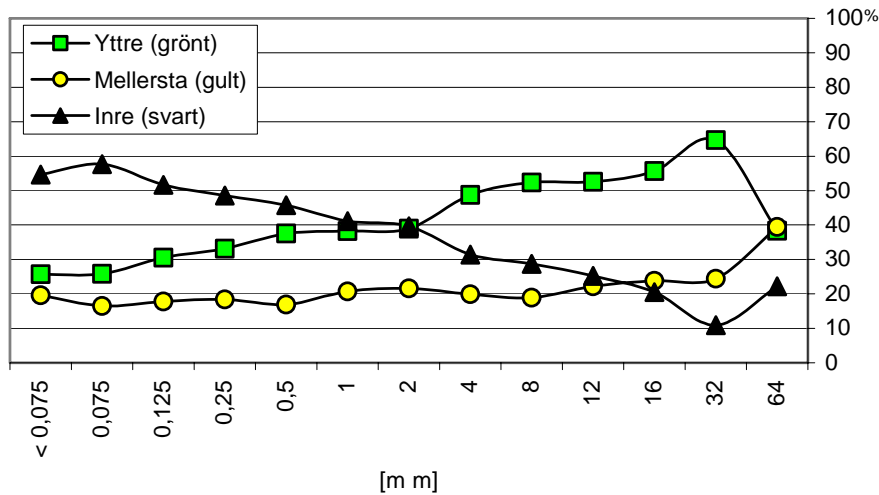
För att hitta trender i färgernas fördelning i respektive fraktion så plottades den procentuella fördelningen för varje cylinder, se Figur 19 – 21.



Figur 19. Cylinder 1: Fördelningen av färger i fraktionerna.



Figur 20. Cylinder 2: Fördelningen av färger i fraktionerna.



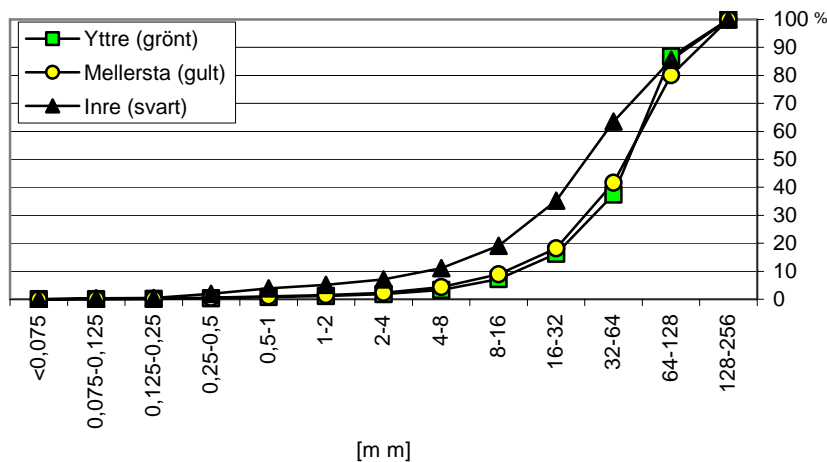
Figur 21. Cylinder 3: Fördelningen av färger i fraktionerna.

När man jämför de tre cylindrarna så ser man att den första cylindern har en något annorlunda fördelning av färgerna än de övriga två. Det gröna, yttersta, lagret är något finare fragmenterat vilket skulle kunna vara resultatet av att just detta lager har något sämre hållfasthetsvärden hos bruket. Med anledning av detta är endast cylinder två och tre med i den fortsatta diskussionen.

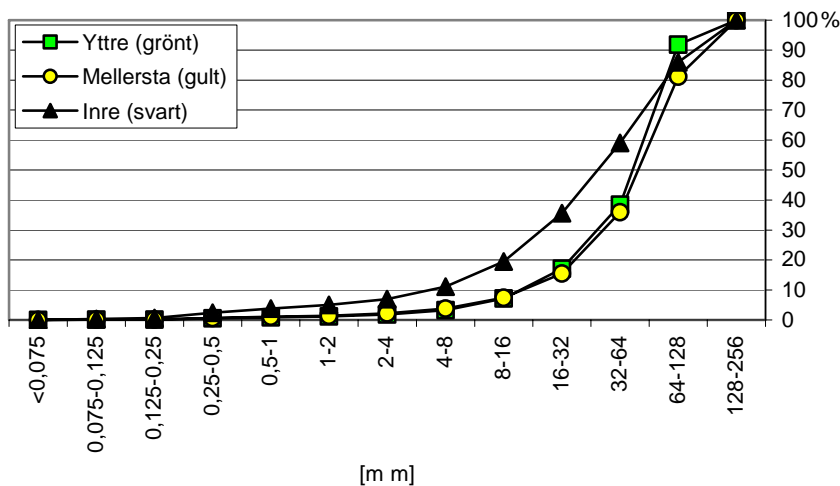
En överraskning med de redovisade kurvorna var att det fanns förhållandevis lite gula fragment i fraktionerna. Eftersom cylindrarna ändå bestod av 28 % gult bruk så förväntades denna andel vara större än den svarta andelen och mindre än den gröna. Detta kan ha berott på att i fraktionen > 64 mm fanns en del stora bitar som bestod av alla tre färgerna. Dessa bitar var fragmenterade i både det svarta och det gröna lagret medan det gula var i stort sett intakt. Dessa fragment ”stal” därmed en stor andel av den totala mängden gult vilken sedan blivit underrepresenterad i de övriga fraktionerna. Att det är sprängämnet som fragmenterat det inre svarta bruket är det nog ingen tvekan om men vad det är som har sönderdelat det yttersta gröna lagret är lite mer tveksamt. Det troliga är att det är en kombination av att kompressionsvågen reflekterats mot ytan och att fragmentet kastats in i containerns vägg.

Att det yttersta lagret har fragmenterats av andra orsaker än sprängmedlets verkan gör att det blivit överrepresenterat i de mindre fraktionerna men trots detta så är andelen svart klart dominerande i dessa så det är ingen tvekan om att det är uppkrossningen närmast borrhål som skapat en stor del av finandelen. Till saken hör också att cylindern i sin helhet bestod av 57 % grönt och bara 15 % svart bruk. Däremot svarar borrhålsskiktet inte nödvändigtvis för den största totala mängden finmaterial. De yttre skiktens större volym uppväger den lägre andelen finmaterial i dem. Anses finmaterial vara mindre än 1 mm svarar borrhålsskiktet och de yttre skikten för lika mycket, ca 1 kg var. Om finmaterialet är större svarar de yttre skikten för en större mängd än borrhålsskiktet.

Nedan redovisas siktcurvor som anger andelen av respektive färg av den totala mängden av just den färgen, se Figur 22-23.



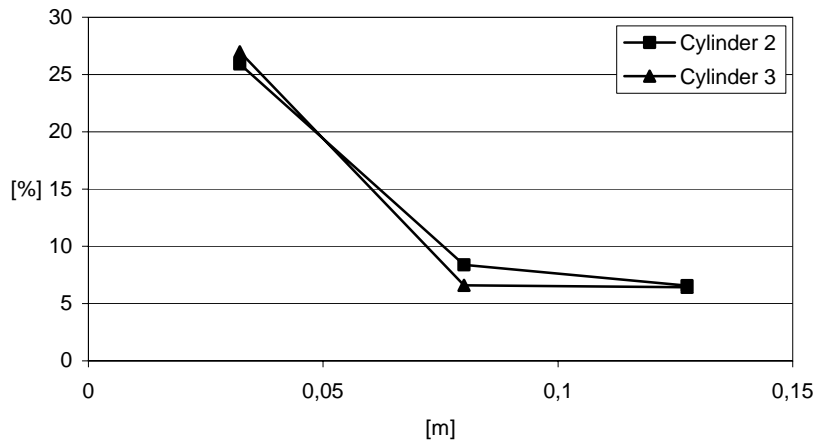
Figur 22. Siktcurvor för varje färg i cylinder 2.



Figur 23. Siktcurvor för varje färg i cylinder 3.

För fraktioner < 8 mm finns omkring 12 % av det svarta bruket men bara cirka 4 % av det gröna. För de finare fraktionerna < 4 mm eller < 2 mm dominerar fortfarande de svarta fragmenten även om procentandelen är mycket liten. Eftersom konfidensintervallet vid provtagningen är 2 % eller mindre, exempelvis 12 %  $\pm$  2 %, så är det svårt att dra några säkra slutsatser när andelen blir alltför liten. Trots detta kan man observera att det svarta bruket erhållit en långt mer finfördelad massa än de övriga lagrena.

Resultaten bekräftar hypotesen att uppkrossning närmast borrhål är en stor källa till finandel. Detta kan också illustreras genom att plotta mängden finandel som en funktion av avståndet från sprängladdningen, se Figur 24. X-axeln representerar radien hos cylindern där 0,15 är avståndet till mantelytan och origo är sprängladdningens placering. Värdena för varje lager har plottats i dess medelpunkt.



Figur 24. Finandelsmängden, < 8 mm, för varje lager som en funktion av avståndet från sprängladdningen för cylinder 2 och 3.

Återigen avspeglar diagrammen att det svarta lagret har en mycket finare fragmentering än det mellersta och yttersta lagret. Värt att observera är att skillnaden mellan dessa två lager inte är särskilt stor.

Då det även var av intresse att studera sprickpropageringen i cylindern så tillverkades sju tunnslip från två av de största bevarade bitarna i fraktionen > 64 mm. Tunnslipen beskrev bitarna i tre dimensioner. Analysen av dessa visade att samtliga identifierade sprickor gick genom cementpastan och inte genom ballasten av sand. Dessutom så hade det inre svarta lagret långt många fler sprickor i sig än det yttersta gröna. Undantaget var det tunnslip som tagits från ett fragment som fragmenterats i mantelytan. I övrigt var det svårt att dra några konkreta slutsatser.

## 9.2 Fältförsök

### 9.2.1 Allmänt

Sprängningarna fungerade bra i samtliga salvor. Det enda missödet var ett hål i salva 1 som inte detonerade. Styckefallet blev bra men några salvor hade ett antal stora skut. Dessa skut kom från den övre, förladdade delen salvan men uppstod även på grund bakåtbrytning och utfall längs blankslag. En del av skuten var så stora att de inte gick att väga med lastarens skopvåg. Vikten av dessa skut beräknades efter mätning. Överberget, dvs. bergmängden som är större än den teoretiska, uppgick i salvorna till mellan 15 och 30 %. Detta kan dels bero på bakåtbrytningen men kan även bero på svårigheter att hålla rätt lastnivå.

För att reducera risken för inras funderade vi vid uppläggningsen av fältförsöken på att begränsa pallområdet genom att förspräcka sidorna. Denna tanke övergavs dock pga. att det

var svårt att utföra en sådan sprängning samt att man då troligen råkat ut för andra randeffekter som inte uppträder vid ordinarie salvor i täkter.

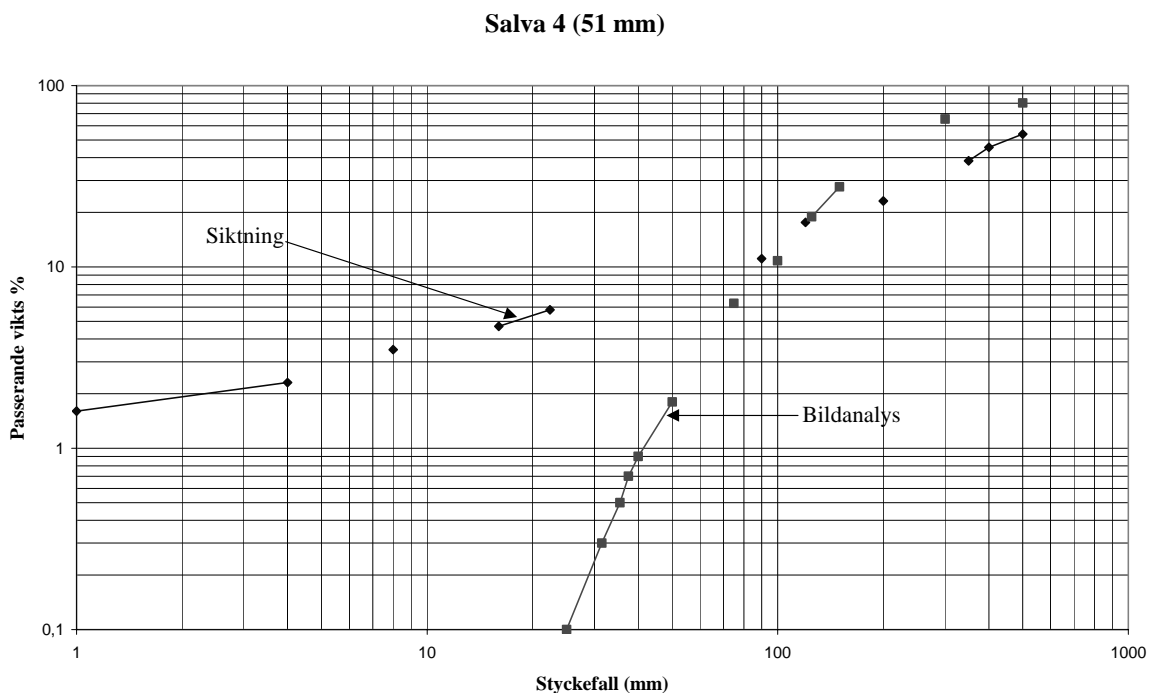
Ett annat problem vid dessa försök är salvstorleken. Då våra försökssalvor var små med få hål kan man också få vissa randeffekter beroende på att avladdningarna blir för stora samt även beroende på för stor inverkan av kanthålen. Dessa problem är dock något man får leva med vid fåhålsförsök.

Samtliga salvor, utom vid salva 6, videofilmades för att dokumentera initieringen. Vid salva 6 var det så dimmigt att videofilmningen inte gick att genomföra.

### 9.2.2 Bildanalys

Direkt efter sprängning fotograferades salvhögarna med hjälp av digitalkamera. Olika referensobjekt lades ut i berghögen, dels 3 st basketbollar och dels en ram med kända kantlängder. Bilder togs även på berghögarna från siktningen.

Målsättningen med att använda bildanalys var att kunna jämföra dess beräknade värden mot uppsiktade värden. Bildanalysprogrammet WipFrag, som SveBeFo köpt, användes vid utvärderingen. Tyvärr tycks inte dagens bildanalysprogram klara av finandelen. Programmen uppfattar och tolkar stora stenar som många små och slår ihop mindre stenar till större. Detta beror på upplösning och förmåga att uppfatta och tolka skuggor, kontraster och ojämnheter i bildobjektet. En del utvecklare av bildanalysprogram försöker lösa problemen med att tolka finandelen och laborerar med olika algoritmer för att kunna uppskatta finandelssvansen på styckefallskurvorna. WipFrag har inte denna kompensation utan rekommenderar istället att man tar detaljbilder av små objekt. En jämförelse mellan verkligt utsiktat material och bildanalysen visas i figur 25. Här framgår tydligt att bildanalysen stämmer hyfsat vid grovt styckefall men inte alls vid fint styckefall.






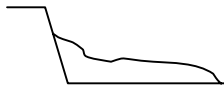


Figur 25. Jämförelse mellan siktning och bildanalys för salva 4.

### 9.2.3 Sprängning och siktning

Efter sprängning fotograferades pallkant och berghög. Tabell 10 visar salvprofil, kastlängd samt antal skut (sida >1 m) och en uppskattning av styckefallet.

Tabell 10. Salvprofil, kastlängd och antal skut från salvorna

Salva	Håldimension	Salvprofil	Kastlängd	Styckefall	Antal skut
1	51		20 m stopp mot mur	Fint och grovt	>10 st
2	51/76		> 20 m	Fint och grovt	ca 10 st
3	76	Saknas	35-40 m	Medel och grovt	< 10 st
4	51		20 m	Fint	ca 10 st
5	38		20 m	Ingen uppgift	ca 10 st
6	64		25-30 m	Fint och grovt	ca 10 st
7	76		Saknas	Grovt	> 10 st

I figur 26-29 visas styckefallet från salvorna 4,5,6 och 7. Här syns tydligt den sneda pallväggen som orsakade bergutfall.

Det första intrycket efter sprängning var att styckefallet såg fint ut men att salvan hade ett antal större block, se tex. salva 6 i figur 28. Här syns också de referensobjekt som användes vid bildanalysen.



Figur 26. Styckefall från salva 4 (Ø 51 mm).    Figur 27. Styckefall från salva 5 (Ø 38 mm).

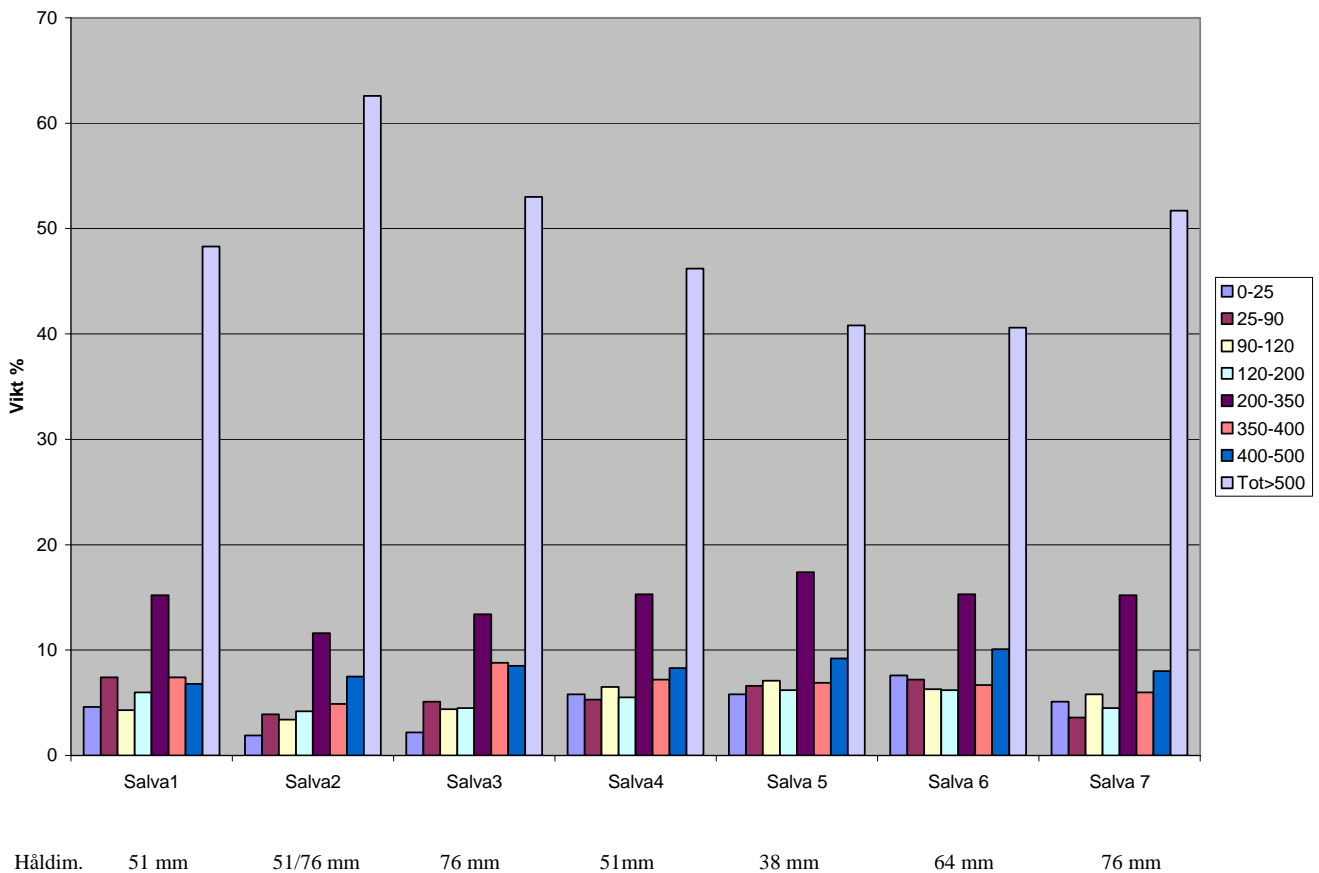




Figur 28. Styckefall från salva 6 (Ø 64 mm).    Figur 29. Styckefall från salva 7 (Ø 76 mm).

Genom dessa siktningar erhöles tonnaget från skut ner till < 25 mm. För att undersöka det riktigt fina materialet utfördes även provtagning av materialet < 25 mm och en efterföljande laboratoriesiktning. Resultatet av siktning och vägning av materialet genom Hercules- och Extec och laboratoriesiktning framgår av sammanställningen i Bilaga 3. Det fanns en misstanke om att fint material också kunde fastna på större material vid tex. fuktiga bergmassor. Således gjordes också en laboratoriesiktning på storleken 25-90 mm för salva 1-3.

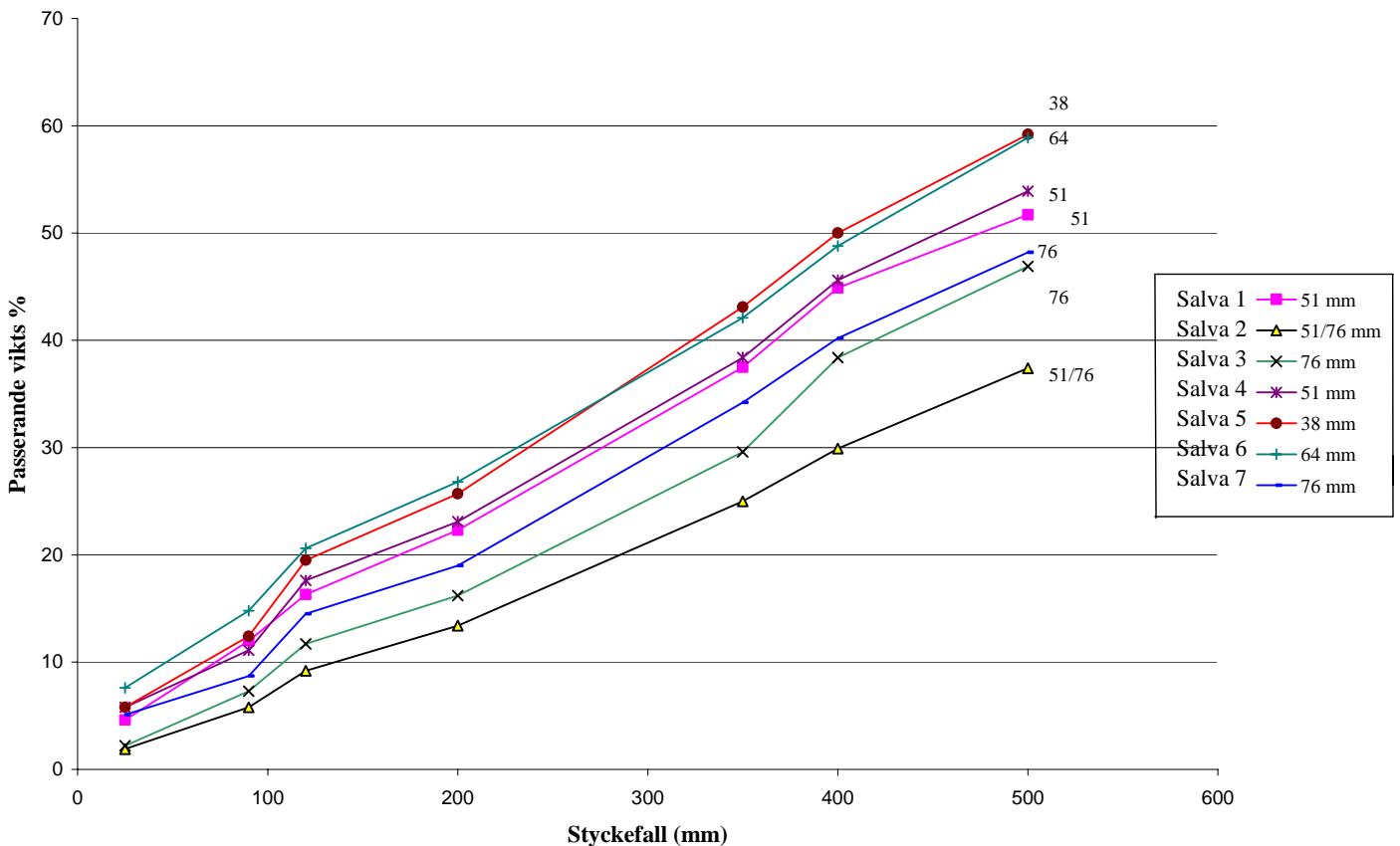
Resultaten av dessa siktningar visas även i diagramform, se Figur 30 och 31. Figur 30 är en



Figur 30. Andelen vikt % av de olika fraktionerna i försökssalvorna.

Sammanställning som visar vikts % för de olika fraktionerna. Det verkligt iögonfallande är den stora delen grovt (>500) material. Denna del utgör 40-50 % av totalt vägt material. Mest grovt kommer från salva 2, 3 samt 7, dvs. den frikopplade salvan samt salvorna med fulladdade 76 mm hål. Mängden fint material < 25 mm är låg och ligger mellan 2-7 % av totalt siktat material.

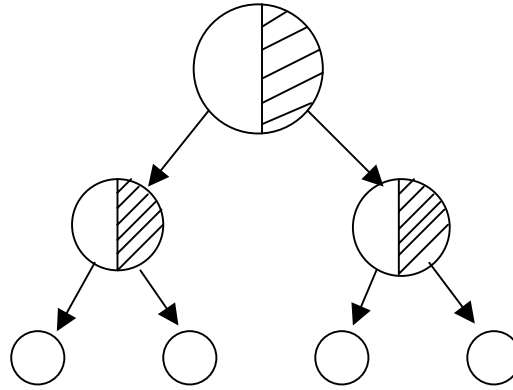
Ett vanligt sätt att åskådliggöra styckefallet är att ange passerande vikts %, se Figur 31. Här visas styckefallstorlekar från 500 mm ner till < 25 mm, dvs. styckefallet t.o.m. Extec. Den frikopplade salvan (51 mm laddning i 76 mm hål) gav minst andel fint. Salvorna med fulladdade 76 mm hål gav näst minst med finandel medan den fulladdade 64 mm salvan gav högsta andelen fint tätt följd av salvan med fulladdade 38 mm hål. Att den frikopplade salvan skulle ge lite finandel var väntat då frikoppling ger ett lägre borrhålstryck och därmed en mindre uppkrossning närmast hålväggarna. Detta stämmer med våra hypoteser.



Figur 31. Siktanalys från 500 mm ner till 25 mm.

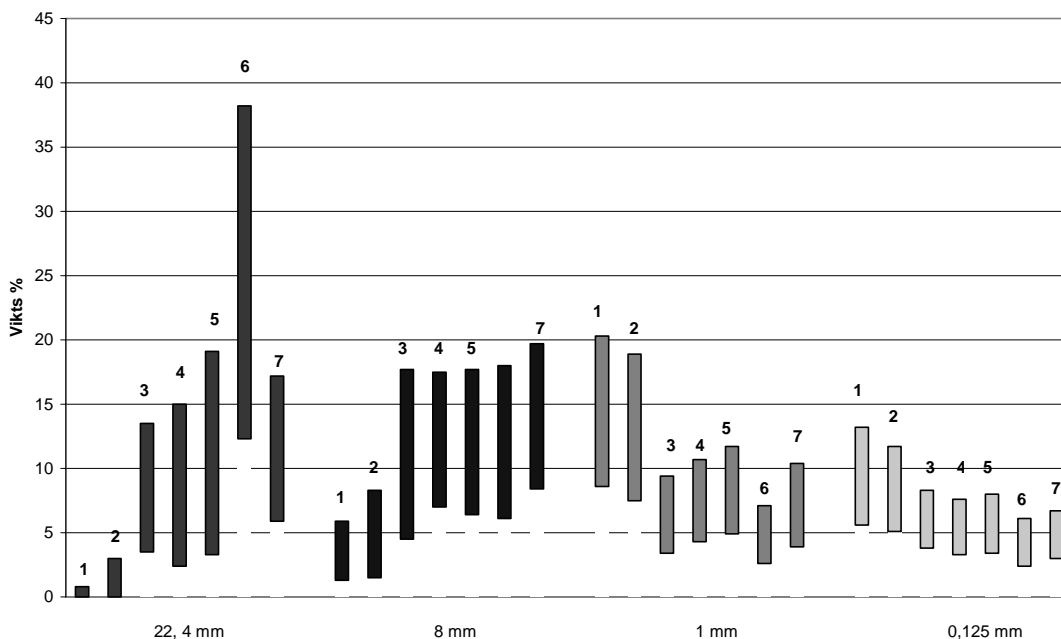
Resultaten är annorlunda längre ner i styckefallskurvorna. Här korsar kurvorna varandra och vid 25 mm verkar den frikopplade salvan och en salvorna med 76 mm hål få lika låg finandel.

Prover av materialet < 25 mm skickades till NCCs väglaboratorium. Provstorleken var ca 50 kg per salva. Detta material neddelades i olika omgångar för en riktig provtagning, se figur 32. Siktad mängd var mellan 10 och 25 kg per salva. Efter torkning siktades materialet i olika fraktioner från 22,4 mm ner till < 0,075 mm. Från salva 1-3 siktades också provtagen mängd från fraktionen 25-90 på liknande sätt. Då denna del inte nämnvärt bidrog till finandelen uteslöts provtagning på fraktionerna 25-90 för salvorna 4-7.



Figur 32. Neddelningsapparat och princip för neddelning /24/

Det är viktigt att provtagning och neddelning görs på rätt sätt. En sammanställning av spridningen i vikts % från några siktstorlekar (22,4 mm, 8 mm, 1 mm samt 0,063 mm) på de sju salvorna har gjorts och visas i Figur 33. Här framgår att spridningen kan vara stor men inte skiljer sig så mycket mellan salvorna.

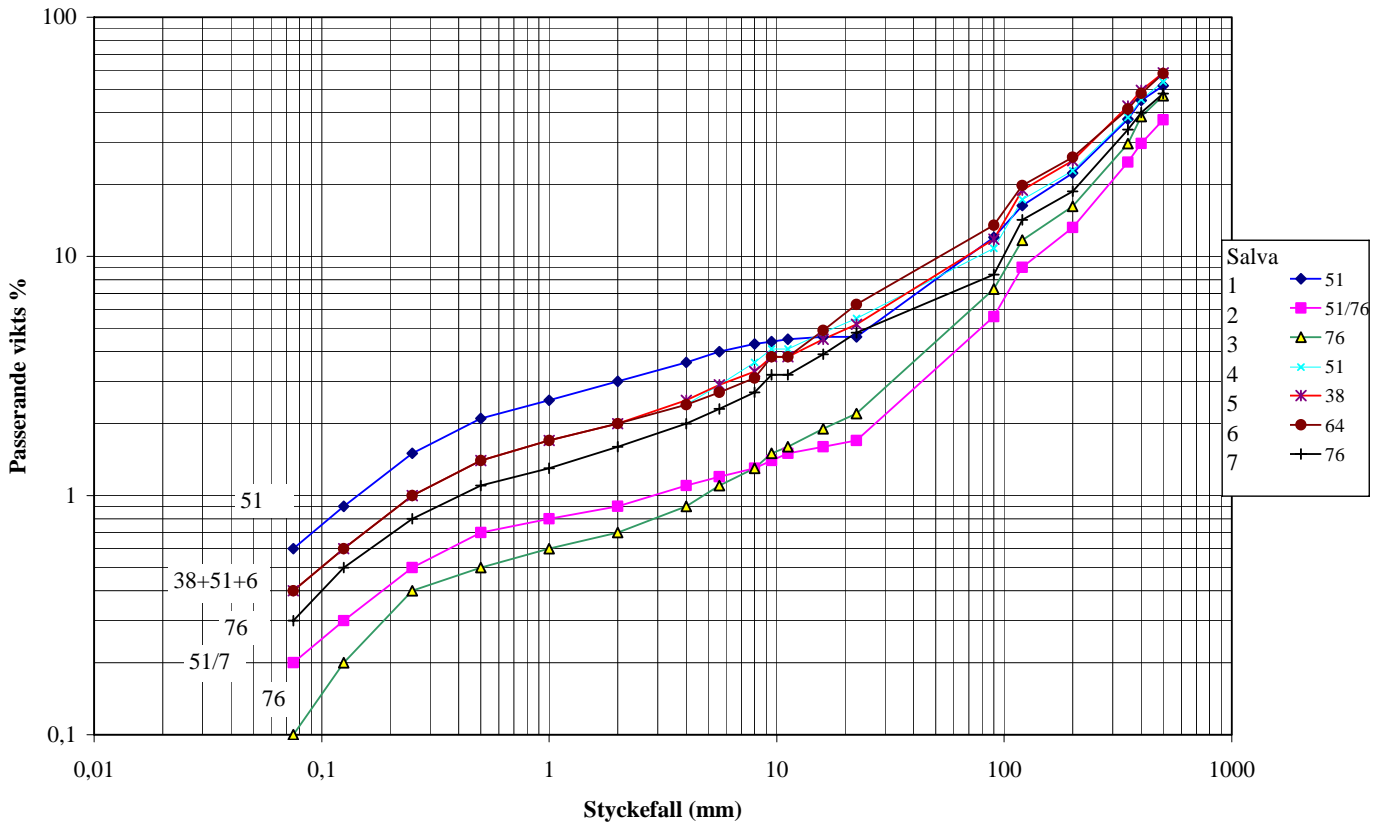


Figur 33. Spridning (i vikts %) hos några olika fraktioner från de 7 salvorna.

Figur 34 visar en sammanställning av hela siktcurvan från < 500 mm ner till < 0,063 mm. Underlaget till kurvorna, passerande vikt %, hittas i Bilaga 4. Tendensen från Figur 31 håller i sig, dvs. frikoppling och 76 mm hål ger minst finandel. Kurvorna för 76 mm salvorna, salva 3 och salva 7, följer varandra i grovområdet men skiljs åt vid ett styckefall på ca 90 mm. Därefter faller kurvan för salva 3 medan kurvan för salva 7 flackar ut. Detta kan bero på att förladdningslängden för salva 3 var 30 % större än för salva 7 vilket innebär att man haft något mindre sprängämne i salva 3 än i salva 7 och detta kan ha gett mindre andel fint material. Variationen i den specifika laddningen var dock liten mellan salvorna, men fyllnadsgraden för sprängämnet var högre i salva 3 jämfört med salva 7. Förmodligen har berget i salva 3 fragmenterats ojämnt längs hålen.

De två 51 mm kurvorna, salva 1 och salva 4, följer varandra ner till ett styckefall motsvarande ca 50 mm. Vid ca 25 mm ändrar kurvan för salva 1 lutning. Kurvorna korsar sedan varandra vid ca 15 mm. Anledningen till att kurvan för salva 1 avviker kan vara att sprängningen inte fungerade som den skulle vid denna salva. En annan anledning är osäkerheten i neddelningen ty många av kurvorna har en knyck vid 22,4 mm dvs. vid övergången till laboratorie-siktningen.

Vid ett styckefall på ca 5 mm går kurvorna för 38 mm, 64 mm samt den ena 51 mm kurvan ihop till samma punkter och blir omöjliga att skilja åt.



Figur 34. Siktcurvor för salva 1-7.

Det är svårt att dra några slutsatser men man kan konstatera att minst finandel har den frikopplade salvan samt salvorna med fulladdade 76 mm hål.

## 10. ANALYS

### 10.1 Modellförsök

#### 10.1.1 Modellmaterial

Det är oklart vilka parametrar som bör betraktas då val av modellmaterial ska göras inom ramen för sprängforskning. Väldigt ofta blir det i slutänden syftet med forskningen som styr valet. Om exempelvis sprickpropagering ska studeras är det lämpligt att välja ett material som framhäver detta t.ex. plexiglas. Detta får då som konsekvens att det är oklart huruvida resultaten går att tillämpa på materialet forskningen ämnar efterlikna, i detta fall berg. Det är också viktigt att fundera på om modellförsök ger information om den storskaliga verksamheten. Men hur ska detta göras? Forskare har skilda uppfattningar om vilka egenskaper som är av störst betydelse och därför hittar man i forskningen material som betong och plast. Ett sätt att undersöka problematiken skulle vara att utföra modellförsöken både i ett modellmaterial och i berg men i de flesta fall är detta inte möjligt, som i detta projekt. Det finns alltid en anledning till att ett annat material än det som ska studeras väljs.

En klar nackdel med bruk som modellmaterial är avsaknaden av bergets inhomogena natur. Bruket har inga spricksystem eller variation i mineralogi som är av stor betydelse för hur just berget responderar vid sprängning. Kristiansen *et al.* /26/ och Moser *et al.* /13/ sprängde både berg- och betongprover och jämförde fragmenteringen. Resultatet visade att sikt kurvorna såg väldigt lika ut även om de absoluta värdena inte överensstämde.

En annan svårighet är att välja vilken hållfasthet som modellmaterialet ska ha. Det är hursomhelst inte möjligt att komma upp i de hållfastheter som hårt berg har. Återigen finns det olika uppfattningar om hur detta ska behandlas /11/. Ett sätt är att betrakta förhållandet mellan tryck- respektive draghållfasthet och vid en sammanställning av olika material så visar det sig att berg och betong ligger väldigt nära varandra jämfört med till exempel Plexiglas. I föreliggande forskningsprojekt togs fasta på just detta vilket dessutom resulterade i en låg porositet.

Sprängkropparnas form har naturligtvis betydelse för fragmenteringsresultatet men så länge man väljer en form och håller sig till denna genom alla försök så torde detta inte vara ett stort problem. Vilken form man än väljer så kommer alltid avsaknaden av verklighetens inspanning vara ett annat problem att beakta. Här valdes cylindern i hopp om att mindre komplexa reflektionsmönster för stötvågorna skulle uppstå.

Variation i pålastningshastighet ger material, generellt, olika hållfastheter. Vid hastigheter motsvarande dem vid ett sprängningsförlopp uppvisar både berg och betong en ofta flerfaldig ökning av tryckhållfastheten. Detta gör materialen jämförbara i detta avseende.

Ett problem med att använda betong eller bruk är det faktum att det är ett mycket sprött material. Vid sprängning och hantering kommer det alltid att bildas mer finmaterial än hos berg. Som nämnts tidigare så är trenderna godtagbara att tolka men inte de absoluta värdena.

Bergets sammansättning, mineralogin, är helt avgörande för hur mycket finmaterial som skapas. En bergart med mycket glimmer ger troligtvis betydligt mer finpartiklar än en utan. Denna skillnad uppstår naturligtvis också när man jämför betong och berg men eftersom dessa försök inte ämnar studera denna problematik diskuteras inte detta vidare.

Sammanfattningsvis kan konstateras att betong eller bruk förmodligen är ett bra modellmaterial vid försök liknande dem i denna rapport. Det går dock inte att tolka resultaten utan att ha alla skillnaderna klart för sig

### 10.1.2 Varifrån kommer finandelen?

Resultaten från modellscaleförsöken indikerade att uppkrossning närmast borrhålet är en viktig källa till finandel. Är detta hela sanningen? Modellförsöken har visat att lika mycket material <1mm producerades närmast hålet som från de två yttre lagren. Procentuellt kommer naturligtvis mest fint material från området närmast hålet då detta område har en mindre volym än de två yttre lagren. Men vid en fullskalig sprängning är det ju finandelen från hela volymen som räknas. En analys av modellförsöken som gjorts i licentiatsuppsatsen /11/ visar också på att det måste finnas en annan källa till finandelen, se Appendix 1.

## 10.2 Fältförsök

En del orsaker till siktkurvans utseende har berörts i kapitel 9.2. Minst finandel hade kurvan för frikoppling samt kurvorna för salvorna med fulladdade 76 mm hål. För de övriga kurvorna är det svårare att se tydliga samband. Dock kan man konstatera att finandelsmängden för alla salvor är låg, se Tabell 11.

Tabell 11. Mängd < 8 mm

Salva	Håldiameter (mm)	Mängd < 8 mm (%)
1	51	4,3
2	51/76	1,3
3	76	1,3
4	51	3,6
5	38	3,3
6	64	3,1
7	76	2,7
Medelsalva		2,8
Fulladdade hål		3,4

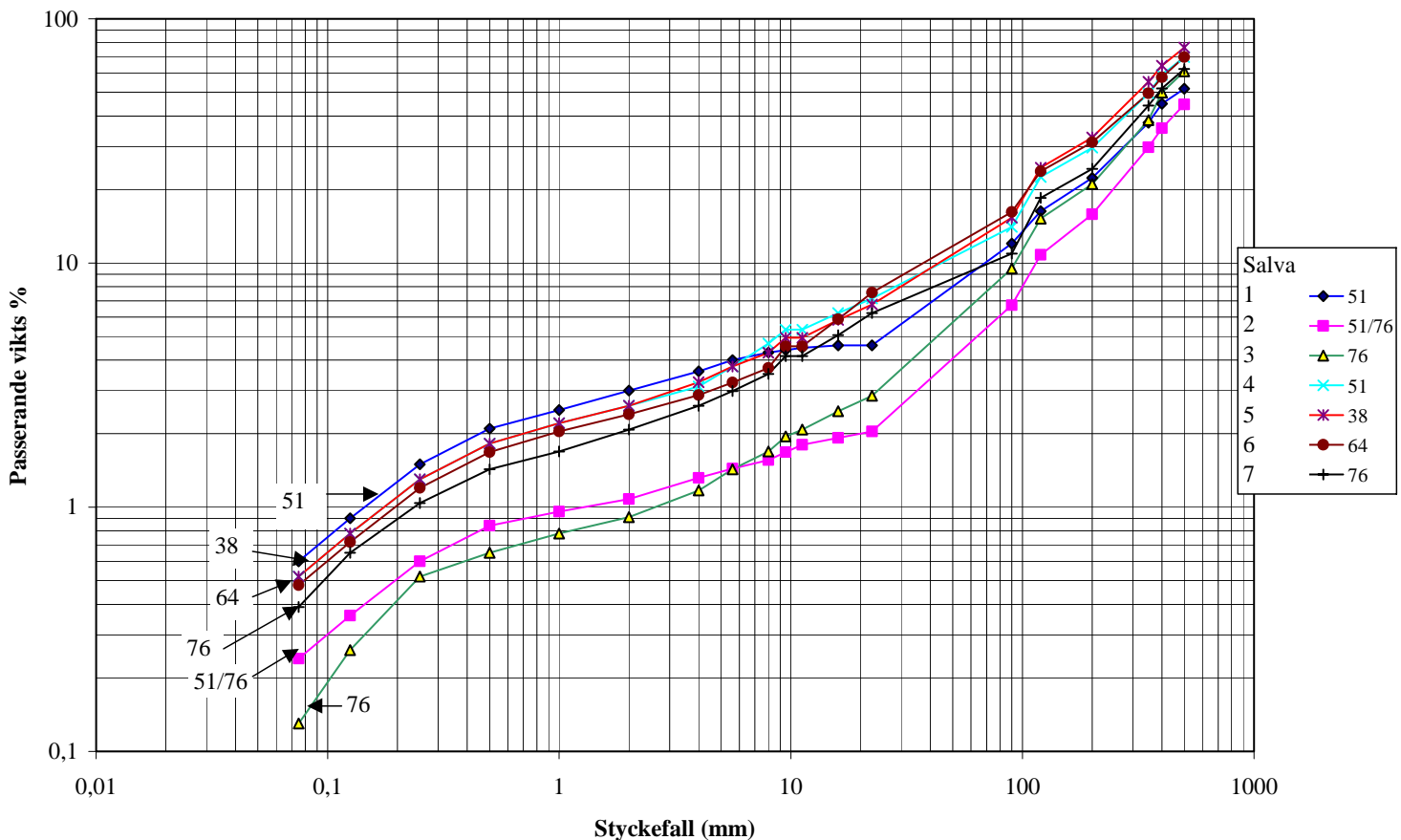
En jämförelse mellan de två salvorna med 51 mm hål, salva 1 och salva 4, visar spridningen i resultatet. Salva 1 gav 4,3 % finmaterial medan salva 4 gav 3,6 %. På samma sätt varierar finandelen för 76 mm hål från 1,3 % till 2,7 % (dock är, som tidigare nämnts, resultatet från salva 3 tveksamt). En trend är klar. Den procentuella finandelen < 8 mm var 1,3 % från den frikopplade salvan vilket är betydligt lägre än finandelen för fulladdade hål som i snitt var 3,4 % (salva 3 borttagen).

En berättigad fråga är vilken betydelse överberget har för styckefallet? I samtliga salvor har man fått överberg till följd av bakåtbrytning och nedglidning av berg från sidorna till följd av befintliga slag, se Tabell 12.

Tabell 12. Utlastad och teoretisk salvvikt (ton)

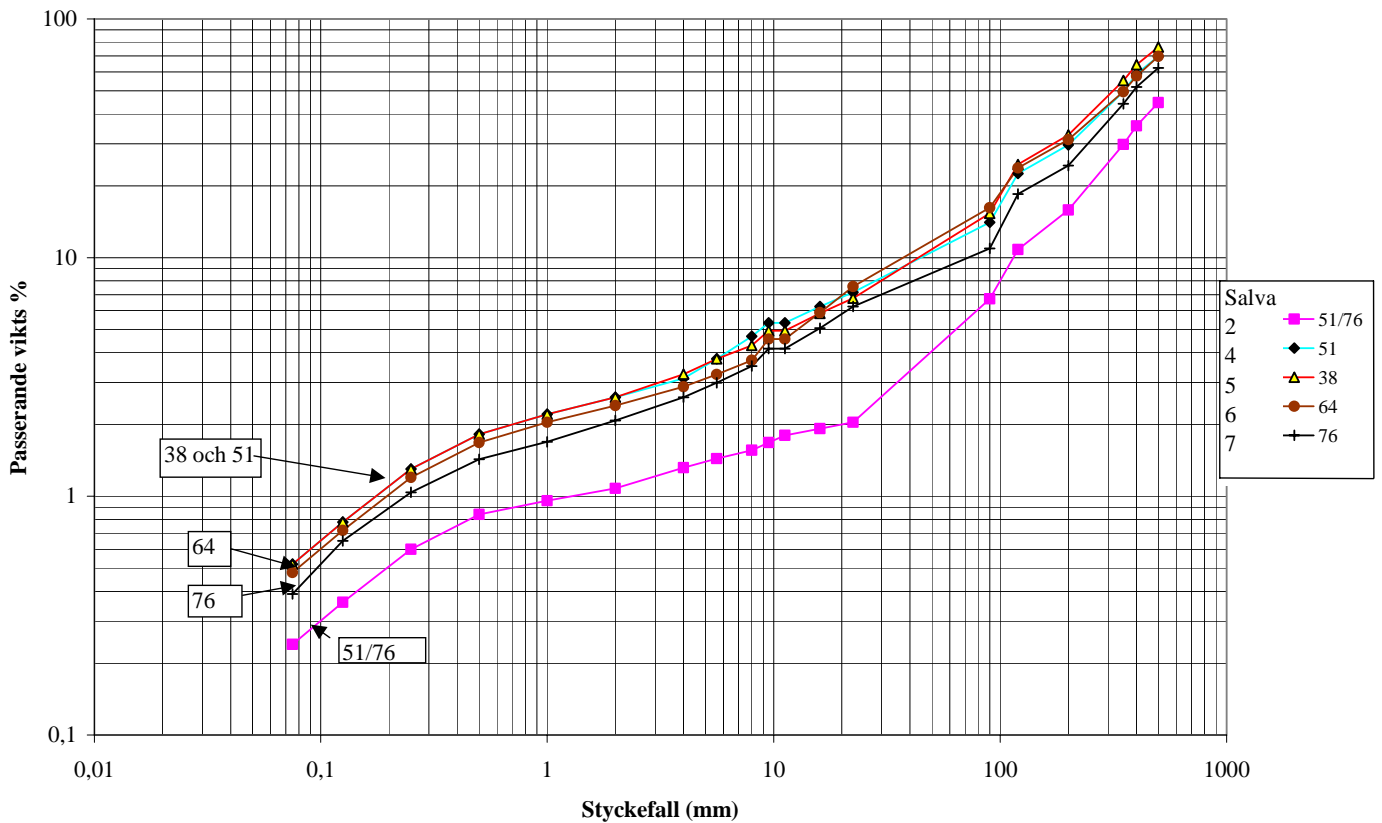
	Salva 1	Salva 2	Salva 3	Salva 4	Salva 5	Salva 6	Salva 7
Utlastad salvvikt	285,3	336,6	536,3	403,9	319,1	498,4	530,2
Teoretisk salvvikt	283,5	283,5	413,1	309	243,3	417	401,1

Ett sätt att betrakta överbergets inverkan är att multiplicera passerad viktsprocent med kvoten utlastad salvvikt/teoretisk salvvikt. Figur 35 visar siktkurvorna från denna betraktelse, se även passerande vikt % i Bilaga 5.



Figur 35. Korrigerade siktkurvor.

Kurvorna trycks nu uppåt och trenden blir nu ännu tydligare och om man bortser från salva 1 (fel bergmängd) så följer kurvorna trenden att finandelen ökar med minskad mindre håldimension. Minst finandel fås vid frikoppling samt vid störst håldimension. Tar man sedan bort de osäkra kurvorna salva 3 och salva 1 blir bilden tydligare, se figur 36. Här framgår det tydligt att frikoppling ger mist finandel. Bilden blir ännu tydligare om man studerar passerande mängd mindre än 8 mm, se Tabell 13. Mängden < 8 mm har ett medelvärde på 4,1 % för salvorna med fulladdade hål medan värdet för den frikopplade salvan är betydligt lägre med 1,6 %.



Figur 36. Kurvor kompenserade för överberg samt för osäkra de osäkra salvorna 1 och 3.

Tabell 13. Mängd < 8 mm efter kompensation för överberg

Salva	Håldiameter (mm)	Mängd < 8 mm (%)
2	51/76	1,6
4	51	4,7
5	38	4,3
6	64	3,7
7	76	3,5
Fulladdade hål		4,1

### 10.3 Praktiska slutsatser

Försöken i Bårarp har rätt tydligt visat att finandeln kan reduceras genom att använda frikopplade laddningar. Detta stämmer med tidigare erfarenheter. Finandelsmängden < 8 mm blev lägre än för fulladdade hål. Dessutom minskade mängden grovt material >500 mm.

Däremot är det svårare att dra några generella slutsatser om hålstorleken betydelse för finandelen. I salvhögarna fanns en hög andel grovmaterial vilket kan berott på en stor del överberg. Samtidigt har troligen skalan på försöken påverkat resultaten, dvs. försökssalvorna har varit känsliga för randeffekter (avladdningslängd, hålantals, m.m). Den rätt tydliga tendensen till att finandelen minskar med ökad håldiameter i Figur 34, försvinner nästan helt när salvvolymen justerats, se Figur 36 och Tabell 13.



För närvarande saknas en praktisk och billig metod att ladda frikopplat i vertikala hål. Laddningar tejpad på pentylstubin eller bulksprängämnen fyllda i rör är både svår hanterat och dyrt. Dessutom kan vatten i hålen förta en stor del av frikopplingseffekten. Ett annat sätt att reducera borrhålstrycket är att använda lätt ANFO men försök som SveBeFo tidigare gjort /12/ visar att man trots detta inte reducerar sprickorna runt borrhålen. Samma torde gälla för en hårdare gasad bulkemulsion.

Försök gjorda av Kristiansen /4/ visar att finandeln ökar med hålstorleken. Resultaten grundar sig på dels modellsprängningar i betong, dels fullskaleprov. Kristiansens slutsatser stämmer inte med våra slutsatser. Den viktigaste förklaringen är nog att Kristiansen tog sina siktprover från fullskaleförsöken på ett band efter förkrossen.

Bildanalys är ännu inte tillräckligt bra för att bedöma mängden finandel utan man måste fortfarande använda siktning för en säkrare analys. Bildanalysen lider både av begränsad upplösning och svårigheter att återge fördelningen rätt inom det upplösta storleksintervallet.

#### **10.4 Utblick mot Less Fines**

För närvarande (sep 2003) pågår ett EU-projekt med syfte att minska finandelen vid sprängning. Dyno Nobel, Nordkalk och SveBeFo (numera med Swebrec som forskarresurs) är nordiska deltagare. Övriga deltagarländer är Österrike, Spanien och Frankrike. Fältförsök i Spanien, Österrike och Sverige visar att sprängämnets teoretiska energiinnehåll endast utnyttjas till en mindre del för fragmentering /27/, /28/. Det har inte gått att påvisa några ändringar i finandelsmängden trots ändringar i sprängämnets densitet. Dock baseras mätningarna på digital bildanalys och denna teknik har inte varit lyckosam för analys av finandelen.

Ett samarbete mellan Swebrec och högskolan i Leoben har visat på likheter i siktkurvorna mellan fullskaleförsöken i Bårarp och modellskalesprängningar i samma materia /29/. Kurvorna har i stort sett samma lutning i logaritmiska diagram och är endast parallellförskjutna. Detta stämmer bra med den hypotes om materialets naturliga styckefallskurva (NBC, natural breakage characteristic) som högskolan i Leoben lanserat.

## 11. REFERENSER

1. Ronge, B. Lokalisering av försökstäckter SveBeFo-projekt 636. Geologiska institutionen, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 2000.
2. Kattilavaara, N. Minskning av finandel < 25 mm vid Nordkalk Storugns AB. *Nitro Nobels Sprängtekniska konferens*, 1995.
5. Heikkilä, P. Improving the Quality of Crushed Rock Aggregate. *Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering and Building Construction Series No 96*, Helsinki 1991.
4. Kristiansen, J. Finandelens beroende av håldimensionen. *Sprängnytt*, Nr 3, 1995.
5. Kaijun, T. Estimation of Fragment Size Distribution in Open Pit. MSc, Department of Materials Science and Rock Engineering, Helsinki University of Technology, Helsinki 1999.
6. Mononen S. Fragmentation in Open Pits. The Finnish Association of Mining and Metallurgical Engineers, Research Report A112. Espo 1999.
7. Tonnvik, G. Påverka finkornsandelen vid losshållning av berg i bergtäkt. Avd för Bergteknik, Examensarbete, 2001:064 CIV, LTU, 2001.
8. Gynnemo, M. Fragmentering i bergtäkter. Inverkan av geologi och sprängteknik. SveBeFo Rapport 35, 1999.
9. Bohlooli, B. Effects of the Geological Parameters on Rock Blasting Using the Hopkinson Split Bar. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, Nr 3-4, s. 630-637, 1997.
10. Kristiansen, J. Sprengbarhet av berg. Et prosjekt for å optimere kvaliteten av fragmentert berg for norsk pukk- og grusindustri. Nitro Nobel, Sprängteknisk konferens, Stockholm-Helsingfors, s. 1-12, 1994.
11. Svahn, V. Generation of Fines in Bench Blasting. Licentiate thesis, Department of Geology, Publ. A 104, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2003.
12. Olsson, M. Bergqvist, I. Sprickutbredning vid flerhållsprängning. SveBeFo Rapport nr 18, 1995.
13. Moser, P., Cheimanoff, N., Oritz, R & Hochholdinger, R. Breakage Characteristics in Rock Blasting. In *Explosives & Blasting Technique* R. Holmberg red., s 165-170. Balkema, Rotterdam 2000.
14. Kim, D. S. & McCarter, M. K. Quantative Assessment of Extrinsic Damage in Rock Material. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 31, Nr 1, s. 43-62, 1998.

15. Tepfers, R. Byggnadsmaterial – Allmän kurs. Institutionen för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 1995.
16. Lundqvist, I. & Wik, N-G. Industriella mineral och bergarter i Hallands län. Sveriges Geologiska Undersökning, Rapport 96. Uppsala 1998.
17. FAS Metoder. Föreningen för asfaltsbeläggningar i Sverige, Service AB, Stockholm 1995.
18. Pells, P. J. N. In *Uniaxial Strength Testing. Comprehensive Rock Engineering – Principles, Practice and Projects*. Rock Testing and Site Characterization. Vol. 3, Pergamon Press Ltd., Oxford 1993.
19. Schön, J. H. *Physical Properties of Rocks – Fundamentals and Principles of Petrophysics*. Pergamon, New York 1996.
20. Brook, N. In *The Measurement and Estimation of Basic Rock Strength. Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*. Rock Testing and Site Characterization. Vol. 3, Pergamon Press Ltd., Oxford 1993.
21. SGU Bestämning av punktlastindex. Sveriges Geologiska Undersökning, Rapport 08-858/97, Uppsala 1997.
22. SP, Sveriges provnings- och forskningsinstitut, Rapport 96B3.3352, Borås 1996.
23. SP. Petrografisk beskrivning av blocksten från Bårarp. Sveriges provnings- och forskningsinstitut, Rapport 97B3.3413, Borås 1997.
24. SIS. Stenmaterial (ballast) för byggnads-och anläggningsändamål- Provning vid leverens. Svensk Standard SS 132102, SIS-Standardiseringskommisssionen i Sverige, 1986.
25. Olsson, M. Bergqvist, I. Fragmentering i bergtäkter. Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte, BK 2002, s.33-38, 2002.
26. Kristansen J., Kure, K., Vestre, J. & Bergqvist, I. An Investigation of Heave and Fragmentation Related to Explosives Properties. EXPLO'90, s. 83-90, Brisbane, Australien, 1990.
27. Moser, P. Less Fines production in aggregate and industrial minerals industry. Proceedings of EFEE second world conference on explosives and blasting technique, Prague, s 335-343, 2003.
28. Ouchterlony, F., Nyberg, U., Olsson, M., Bergqvist, I., Granlund, L., Grind, H. The energy balance of production blasts at Nordkalk's Klinthagen quarry. Proceedings of EFEE second world conference on explosives and blasting technique, Prague, s 193-203, 2003.
29. Moser, P., Grasedieck, A., Olsson, M., Ouchterlony, F. Comparison of the blast fragmentation from lab-scale and full-scale tests at Bårarp. Proceedings of EFEE second world conference on explosives and blasting technique, Prague, s 449-458, 2003.

## **12. ERKÄNNANDEN**

Författarna tackar alla inblandade personer och riktar ett speciellt tack till:

Rolf Persson, Emmaboda Granit  
Uno Andersson, Getinge Grus  
Göte Svensson, NCC Ballast  
Leif Gunnarsson, NCC Ballast  
Ilja Berkenbos, tidigare NCC Ballast

samt till Krister Nilsson och Lars Granlund, Dyno Nobel.

## Bilaga 1.

Referensgruppens sammansättning har varierat men bestod under senare delen av projektet av:

Patrik Alm, CTH  
Jan Ericsson, Swerock  
Leif Fuxin, Skanska  
Magnus Björkman, Skanska  
SO Båvik, Vägverket Produktion, ordf.  
Bernt Larsson, Kimit  
Ingvar Bergqvist, Dyno Nobel  
Peter Lundman, Banverket

Tomas Franzén, SveBeFo  
Gunnar Gustafsson, CTH  
Mats Olsson, SveBeFo  
Finn Ouchterlony, SveBeFo  
Lennart Persson, Skanska  
Bo Ronge, Migmatit  
Victoria Svahn, CTH  
Sven Wallman, CTH

## Bilaga 2.

	Salva 1	Salva 2	Salva 3	Salva 4	Salva 5	Salva 6	Salva 7
Försättn (m)	1,8	1,8	2,7	1,8	1,35	2,3	2,7
Hålavst (m)	2,1	2,1	3,4	2,2	1,65	2,85	3,3
Pallhöjd (m)	5	5	5	5,2	5,2	5,3	5
Håldjup (m)-verkligt	5,6	5,5	5,5	5,5	5,35	5,6	5,6
Håldiam (mm)	51	76	76	51	38	64	76
Hålantal (st)	6	6	4	6	8	5	4
Teor volym (m3)	94,5	94,5	137,7	103	81,1	139	133,7
Teor tonnage (ton)	283,5	283,5	413,1	309	243,3	417	401,1
Tändare	EPD	EPD	EPD	EPDnya	EPDnya	EPDnya	EPDnya
Intervall (nr och 25 ms)	321123	321123	2112	321234	3210123 4	32123	2123
Sprängämne	Emulite	Emulite	Emulite	Kemix	Kemix	Kemix	Kemix
Densitet (kg/dm3)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Sprängämnescylinder	43	43	60	40	32	55	60
Patronvikt (kg)	0,9	0,9	1,9	0,83	0,53	1,56	1,8
Laddn.diam (mm)	51	50	76	51	38	64	76
Koppl.grad	1	0,66	1	1	1	1	1
Laddn.längd /hål (m)	4,2	4,2	3,7	4,2	4,2	4,4	4,2
Antal patroner/hål	10	10	10	11,3	10	9,8	10,8
Total laddningslängd (m)	25	25,2	14,7	25,3	33,9	21,9	16,7
Patroner Totalt	58	60	40	68	80	49	43
Laddn./hål (kg)	9	9	19	9,4	5,3	15,3	19,4
Total sprängämnesmängd	52,2	54	76	56,44	42,4	76,44	77,4
Teor hålvolum	2,04	1,96	4,54	2,04	1,13	3,22	4,54
Teor maxvolum	2,45	2,35	5,45	2,45	1,36	3,86	5,45
Laddn.mängd (kg/m)	2,1	2,1	5,2	2,2	1,3	3,5	4,6
Utfylln.grad	0,86	0,89	0,95	0,9	0,96	0,91	0,84
Förladdn. (m)	1,4	1,4	1,8	1,2	1,1	1,2	1,4
Detonerade hål	5	6	4	6	8	5	4
VOD (m/s)		5491			5851	FEL	
Detonerad sprängmängd	43,2	54	76	56,44	42,4	76,44	77,4
Spec.laddn/hål	0,48	0,48	0,41	0,46	0,46	0,44	0,44
Spec.laddn/hålm.	0,56	0,56	0,57	0,56	0,58	0,53	0,52
Spec.laddning	0,55	0,57	0,55	0,55	0,52	0,55	0,58
Avpassad volym; teor	75,6	94,5	154,7	103	81,1	139	133,7
Avpassat tonnage	226,8	283,5	464,1	309	243,3	417	401,1
Verkl spec.laddn./m3	0,57	0,57	0,49	0,55	0,52	0,55	0,58
Verkl spec.laddn./ton	0,19	0,19	0,16	0,18	0,17	0,18	0,19

## Bilaga 3.

Resultatet av siktning genom Hercules och Extec (ton)

<b>Hercules (ton)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<200	59,9	47,8	92,2	96,3	82,52	135,37	100,85
200-350	44	38,7	70,9	61,1	55,43	76,32	80,68
350-400	21,5	16,4	46,8	28,6	22,08	33,29	32,06
400-500	19,7	24,9	45,3	33,2	29,18	50,47	42,64
>500	47,6	110,9	136,1	94,8	72,81	90,22	80,79
<b>Totalt Hercules</b>	<b>192,7</b>	<b>238,7</b>	<b>391,3</b>	<b>314</b>	<b>262,02</b>	<b>385,67</b>	<b>337,02</b>

<b>Hercules och Extec (ton)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
0-25	13,3	6,3	11,6	23,3	18,46	38,02	27,2
25-90	21,6	13	27,1	21,1	21,17	35,98	18,9
90-120	12,5	11,5	23,2	25,8	22,62	31,58	30,9
120-200	17,4	13,9	23,9	22,1	19,86	30,9	24
200-350	44	38,7	70,9	61,1	55,43	76,32	80,68
350-400	21,5	16,4	46,8	28,6	22,08	33,29	32,06
400-500	19,7	24,9	45,3	33,2	29,18	50,47	42,64
> 500	47,6	110,9	136,1	94,8	72,81	90,22	80,79
Skut	92,6	97,9	145	89,9	57,1	112,74	193,13
Tot>500	140,2	208,8	281,1	184,7	129,91	202,96	273,92
<b>Totalt utlastat</b>	<b>285,3</b>	<b>336,6</b>	<b>536,3</b>	<b>403,9</b>	<b>319,12</b>	<b>498,41</b>	<b>530,15</b>

<b>Labbsikt (g)</b>	<b>Salva 1</b>	<b>Salva 2</b>	<b>Salva 3</b>	<b>Salva 4</b>	<b>Salva 5</b>	<b>Salva 6</b>	<b>Salva 7</b>
16-22,4	104	582,6	1692,3	3660,4	5629,1	6978,4	3210,8
8-16	815,2	1650,6	2450,2	4137,8	5105,9	4334	3102,8
4-8	1955,5	1981,7	1472,6	3890,2	3620,9	1867,4	1627,8
1-4	2976,1	2704,3	1138,8	2396,4	3724	1682,9	1534,5
<1	6384,7	5782,9	2633,4	5422,6	7703,9	4222,1	3376,1
<b>TOT</b>	<b>12235,5</b>	<b>12702,1</b>	<b>9387,3</b>	<b>19507,4</b>	<b>25783,8</b>	<b>19084,8</b>	<b>12852</b>

## Bilaga 4.

Passerande vikts % för salvorna (fraktioner i mm)

Fraktion	Salva 1	Salva 2	Salva 3	Salva 4	Salva 5	Salva 6	Salva 7
500	51,7	37,2	46,9	53,6	58,6	58,1	47,9
400	44,9	29,7	38,4	45,3	49,4	48	39,9
350	37,5	24,8	29,9	38,1	42,5	41,3	33,9
200	22,3	13,2	16,2	22,8	25,1	26	18,7
120	16,3	9	11,7	17,3	18,9	19,8	14,2
90	12	5,6	7,3	10,8	11,8	13,5	8,4
22,4	4,6	1,7	2,2	5,5	5,2	6,3	4,8
16	4,6	1,6	1,9	4,8	4,5	4,9	3,9
11,2	4,5	1,5	1,6	4,1	3,8	3,8	3,2
9,5	4,4	1,4	1,5	4,1	3,8	3,8	3,2
8	4,3	1,3	1,3	3,6	3,3	3,1	2,7
5,6	4	1,2	1,1	2,9	2,9	2,7	2,3
4	3,6	1,1	0,9	2,4	2,5	2,4	2
2	3	0,9	0,7	2	2	2	1,6
1	2,5	0,8	0,6	1,7	1,7	1,7	1,3
0,5	2,1	0,7	0,5	1,4	1,4	1,4	1,1
0,25	1,5	0,5	0,4	1	1	1	0,8
0,125	0,9	0,3	0,2	0,6	0,6	0,6	0,5
0,075	0,6	0,2	0,1	0,4	0,4	0,4	0,3



## Bilaga 5.

Passerande vikts % för salvorna (fraktioner i mm), korrigerade värden

Fraktion	Salva 1	Salva 2	Salva 3	Salva 4	Salva 5	Salva 6	Salva 7
500	51,7	44,6	61	70	76,1	69,7	62,2
400	44,9	35,6	50	59	64,2	57,6	51,9
350	37,5	29,8	38,5	49,5	55,3	49,6	44,1
200	22,3	15,8	21,1	29,6	32,6	31,2	24,3
120	16,3	10,8	15,2	22,5	24,6	23,8	18,5
90	12	6,7	9,5	14	15,3	16,2	10,9
22,4	4,6	2	2,9	7,2	6,8	7,6	6,2
16	4,6	1,9	2,5	6,2	5,9	5,9	5,1
11,2	4,5	1,8	2,1	5,3	4,9	4,6	4,2
9,5	4,4	1,7	2	5,3	4,9	4,6	4,2
8	4,3	1,6	1,7	4,7	4,3	3,7	3,5
5,6	4	1,4	1,4	3,8	3,8	3,2	3
4	3,6	1,3	1,2	3,1	3,3	2,9	2,6
2	3	1,1	0,9	2,6	2,6	2,4	2,1
1	2,5	1	0,8	2,2	2,2	2	1,7
0,5	2,1	0,8	0,7	1,8	1,8	1,7	1,4
0,25	1,5	0,6	0,5	1,3	1,3	1,2	1
0,125	0,9	0,4	0,3	0,8	0,8	0,7	0,7
0,075	0,6	0,2	0,1	0,5	0,5	0,5	0,4

## Appendix

### Korrelationsanalys

En korrelationsanalys av producerad mängd finandel och sprängparametrarna hos de sex salvorna i Bårarp gjordes enligt traditionell metod, se Tabell A.1.

Tabell A.1. Korrelationskoefficienter

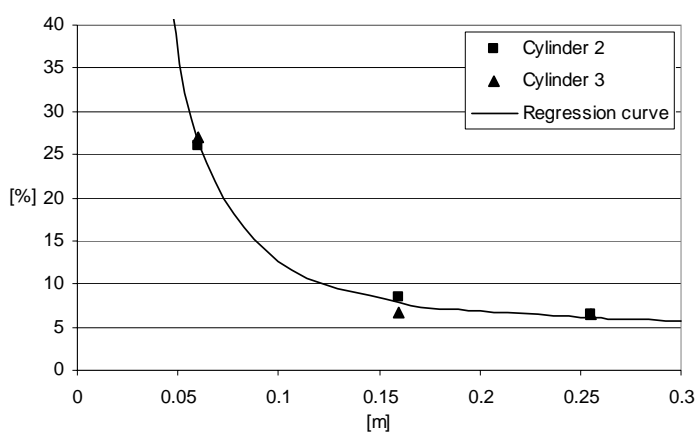
Parameter	$\rho_{x,y}$	Parameter	$\rho_{x,y}$
Försättning	-0,53	Total laddningslängd	0,54
Hålavstånd	-0,52	Totalt antal patroner	0,53
Pallhöjd	0,47	Laddningsvikt per hål	-0,51
Håldjup (verkligt)	0,09	Total laddningsvikt	-0,43
Håldiameter	<b>-0,87</b>	Teoretisk hålvolym	-0,54
Antal hål	0,50	Laddningsvikt per meter	-0,56
Teoretisk volym	-0,38	Utfyllnadsgrad	-0,31
Sprängämnesdiameter	-0,52	Längd förladdning	-0,67
Patronvikt	-0,53	Antal detonerande hål	0,34
Laddningsdiameter	-0,52	Detonerande laddningsvikt	-0,51
Kopplingsgraden	0,60	Specifik laddning per hål	0,4
Laddad längd per hål	0,56	Specifik laddning	-0,50
Patroner per hål	0,35	Laddningsvikt/area borrhål	-0,21

Koefficienterna indikerar ingen korrelation mellan finandelmängden och någon sprängparameter utom möjligtvis för håldiametern. När koefficienterna räknades ut första gången så inkluderades dock den andra frikopplade salvan vilket var ett misstag. När denna sedan togs bort så visade koefficienten ett svagare beroende; ett starkare förhållande och därmed ett bättre resultat hade varit mer förståeligt.

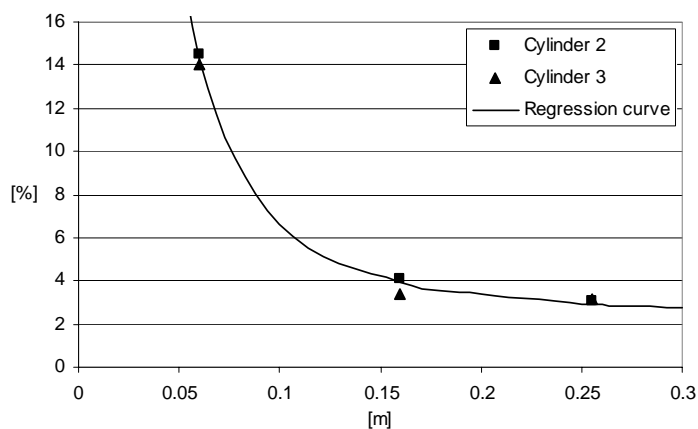
Resultaten från modellscaleförsöken, som presenterades i kapitel 9, indikerar att uppkrossning närmast borrhål är en stor källa till finandel oavsett vilken fraktion, 0 – 2, 0 – 4 eller 0 – 8 mm, som studeras. Om man anpassar en kurva (regressionsanalys) till data från siktingen ser denna ut enligt Figur A.1 – A.3.

Genom att studera kurvorna, med tillhörande ekvationer, kan man anta att två fragmenteringsmekanismer är inblandade; en konstant vilken representeras av den första termen i ekvationerna och en som varierar med avståndet från borrhålet.

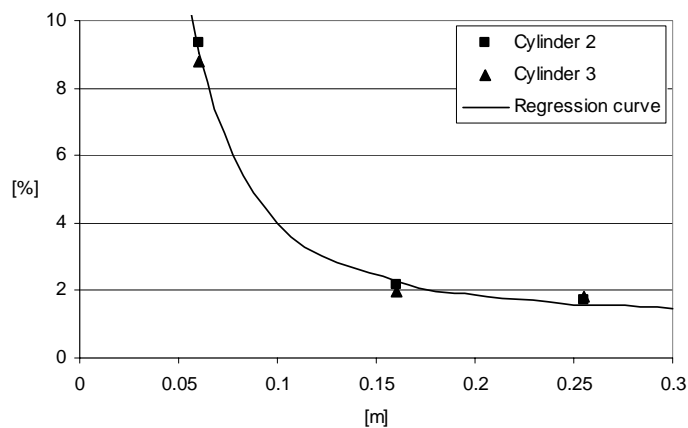
Den första termen representerar en ”generell” finandelskälla som uppstår i materialet oavsett var i pallen materialet befinner sig. Detta kan exempelvis vara resultatet av sprickpropagering och förflyttning av bergmaterialet. Finandelen skapad av den varierande fragmenteringsmekanismen skulle då motsvara det som kommer från uppkrossning närmast borrhål. Iakttagandet är dock baserat på tre observationspunkter i en relativt liten cylinder vilket gör att slutsatsen är spekulativ. Trots detta är kurvornas utseende väldigt intressant eftersom det innebär att uppkrossningen närmast borrhål inte skapar all finandel utan en annan källa har också identifierats.



Figur A.1. Andelen 0 – 8 mm som en funktion av avståndet från det laddade hålet för både cylinder 2 och 3. Kurvan är en regressionskurva,  $y = 4,56 + 0,023 (1/x^2)$ .  $R^2$  för kurvan är 99,7.



Figur A.2. Andelen 0 – 4 mm som en funktion av avståndet från det laddade hålet för både cylinder 2 och 3. Kurvan är en regressionskurva,  $y = 2,09 + 0,013 (1/x^2)$ .  $R^2$  för kurvan är 99,8.



Figur A.3. Andelen 0 – 2 mm som en funktion av avståndet från det laddade hålet för både cylinder 2 och 3. Kurvan är en regressionskurva,  $y = 1,02 + 0,008 (1/x^2)$ .  $R^2$  för kurvan är 99,6.

En generell ekvation för kurvorna i Figur A.1-A.3 skulle se ut enligt ekvation A1.

$$M_f = M_0 + c \frac{1}{x^2} \quad (\text{A1})$$

där  $M_f$  = finandelen [%]  
 $M_0$  = finandel från en ”generell” fragmenteringsmekanism [%]  
 $c$  = konstant [ $\text{m}^2$ ]  
 $x$  = avståndet från borrhålets centrum [m]

Storleken på  $M_0$  beror av volymen bergmaterial som sprängs. Om ekvationen vidareutvecklas (Svahn 2003) till att i detalj beskriva de ingående parametrarna ser den slutligen ut enligt ekvation A2.

$$M_f = \frac{c_2 \cdot r_b}{R_0^2} \cdot \ln \frac{R_0}{r_b} \quad (\text{A2})$$

där  $c_2$  = konstant [-]  
 $r_b$  = borrhålets radie [m]  
 $R_0$  = avståndet från borrhål som måste fragmenteras, d v s försättningen eller halva hålavståndet [m]

Mängden finandel beror både av borrhålets radie och det avstånd som varje laddat hål behöver sönderdela för att fragmenteringen av pallen ska bli tillfredställande. Konstanten  $c_2$  är platsspecifik och beror av geometriska, materialspecifika och sprängmedelstekniska parametrar. Att utreda mer i detalj hur den ser ut är inte möjligt utifrån de få salvor som skjutits inom ramen för detta projekt.

Om man antar att konstanten  $c_2$  är densamma för samtliga salvor, eftersom designen är identisk och platsen i stort sett samma, så är det av intresse att studera resten av ekvation A2. Håldiametrar och hålavstånd är summerade för salvorna 1 – 6 i Tabell A.2.

Tabell A.2. Parametrarna  $r_b$  och  $R_0$  för salvorna 1 – 6

Salva	Borrhålsdiameter ( $2r_b$ ) [mm]	Hålavstånd ( $2R_0$ ) [mm]	$\frac{r_b^2}{R_0^2} \cdot \ln \frac{R_0}{r_b}$	Finandelsmängd (0-8 mm) [%]
1	51	2100	0,0022	4,3
2	51/76	2100	0,0022/0,0043	1,3
3	76	3400	0,0019	1,3
4	51	2200	0,0020	3,6
5	38	1650	0,0020	3,3
6	64	2850	0,0019	3,1

Det borde inte, enligt fjärde kolumnen i tabellen ovan, vara någon skillnad i mängden producerad finandel vid de olika salvorna. Detta skulle kunna förklaras med att den specifika laddningen är konstant. Om den är konstant är också ekvation A3 konstant.

$$q = \frac{m_{ex}}{V_{berg}} = \frac{\rho_{ex} \cdot V_{ex}}{V_{berg}} = \frac{c_3 \cdot \pi \cdot r_b^2}{\pi \cdot R_0^2} = c_3 \cdot \frac{r_b^2}{R_0^2} = c_4 \quad (\text{A3})$$

där

- $q$  = specifika laddningen [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $m_{ex}$  = massan sprängmedel [kg]
- $V_{berg}$  = volymen berg [ $\text{m}^3$ ]
- $\rho_{ex}$  = sprängmedlets densitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $V_{ex}$  = sprängmedlets volym [ $\text{m}^3$ ]

Mängden finandel är approximativt lika stor för samtliga salvor.

Modellen som just beskrivits är ett sätt att studera krossningsfenomenet men det tar långt ifrån hänsyn till alla egenskaper hos sprängmedlet eller berget. Detta är alla parametrar som beaktas genom konstanten. Exempelvis påverkar detonationshastigheten troligen mängden genererad finandel, eftersom det är den egenskapen som kontrollerar pålastningshastigheten på bergmassan närmast borrhålet. Även om mängden tillförd energi är densamma för två salvor så är det också av betydelse hur denna distribueras.

Ett mått på hur mycket en bergmassa har fragmenterats är dess specifika yta. Specifik yta definieras som en partikels yta delat med dess volym. Ju finare fragmenterat berget är, desto högre specifik yta får materialet, det vill säga ju större mängd material i de finare fraktionerna desto högre specifik yta.

Den specifika ytan för Bårarpssalvorna har beräknats på två olika sätt. Det första baseras på den noggranna kartering som genomfördes innan sprängningarna ägde rum. Med antagandet att samtliga sprickor identifierats räknades dess ytor ut och blockens volymer. Detta gav den specifika ytan för *in situ* bergmassan i pallen. Det andra sättet att göra det på är att räkna fram arean under siktkurvan. Eftersom en *in situ* kurva hade modellerats fram användes denna. Den fragmenterade bergmassans specifika yta togs fram på samma sätt med de siktkurvor som togs fram (Tabell A.3).

Tabell A.3 Specifik yta för bergmassan före och efter sprängning

	<i>In situ</i> 1*	<i>In situ</i> 2**	Salva 1	Salva 2	Salva 3	Salva 4	Salva 5	Salva 6
<b>Spec. yta</b> [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]	2,1	1,7	65 042	23 640	24 707	50 373	51 117	55 355

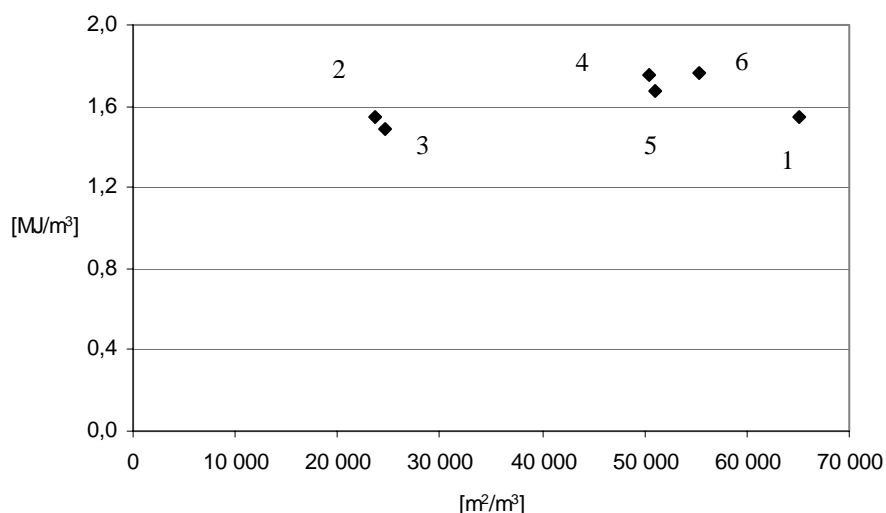
\* Från kartering \*\* Från modellerad *in situ* kurva

När den specifika ytan räknats fram kan denna relateras till den energi som åtgått för att skapa den nya specifika ytan i bergmassan. Sprängmedlet Emulite 100 (Salva 1-3) innehåller 2,7 MJ/kg och Kemix (Salva 4-6) 3,2 MJ/kg. Tabell A.4 redovisar tillförd energi per volym berg för salvorna.

Tabell A.4. Energi per volym berg

	Salva 1	Salva 2	Salva 3	Salva 4	Salva 5	Salva 6
<b>Energi</b> [MJ/ $\text{m}^3$ ]	1,54	1,54	1,49	1,75	1,67	1,76

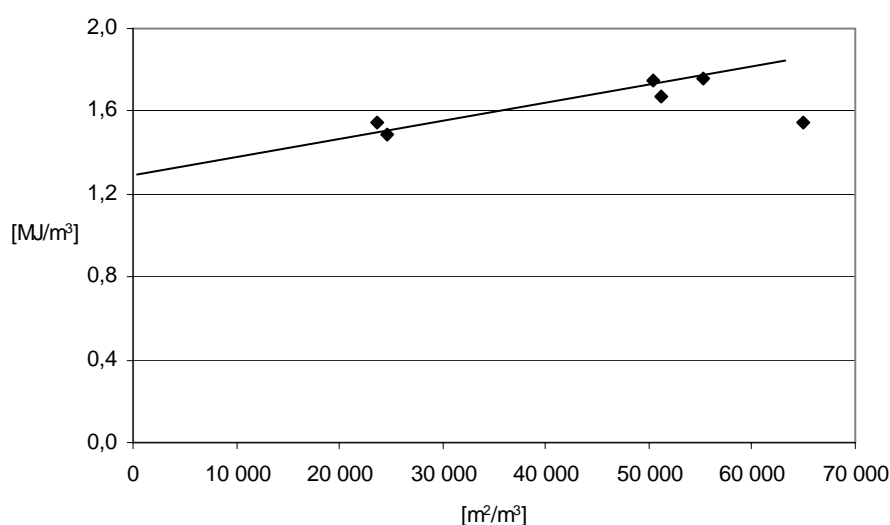
Ovanstående information plottat i ett diagram skulle ge indikationer på huruvida det finns något samband mellan tillförd energi och graden av fragmentering, se Figur A.4.



Figur A.4. Nyskapad specifik yta som en funktion av tillförd energimängd.

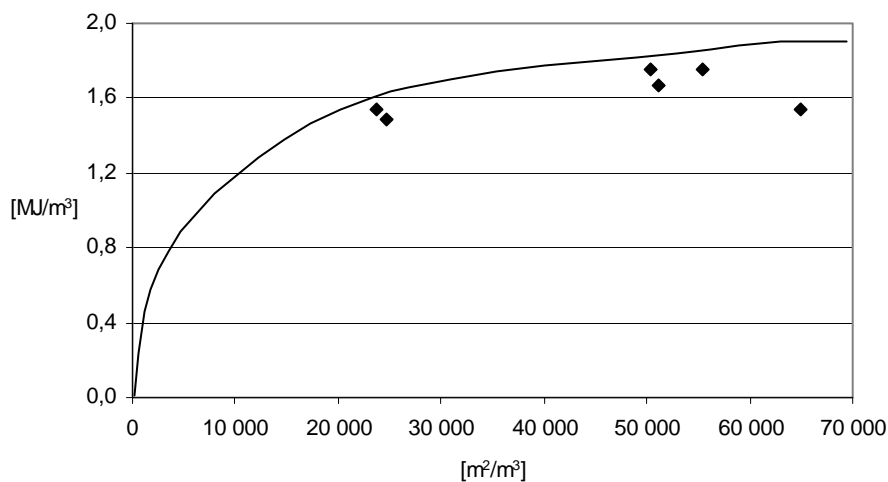
I figuren ovan kan ett kluster urskiljas av de tre sista salvorna vilket egentligen inte är någon överraskning eftersom salvorna skjutits med samma specifika laddning och fragmenteringen blev mycket likvärdig. Sprängningarna utfördes också i samma pall med likadan design och borde därför ge lika mycket finandel. De tre första salvorna skiljer sig dock mer ifrån varandra. Den första, 51 mm salvan, är mycket mer finfragmenterad än den andra och tredje vilket också syns i siktkurvorna. Det verkar därför vara svårt att se något samband mellan salvorna i stort. Eftersom salvan med störst håldiameter gav minst finandel, tillsammans med den frikopplade salvan, skulle det kunna vara den som står ut från de andra om det inte är den första salvan.

Om man betraktar samtliga salvor och antar att det är den första salvan som är avvikande då skulle förhållandet kunna beskrivas enligt Figur A.5.



Figur A.5. Linjen illustrerar idén om att det skulle vara ett rätlinjigt samband mellan tillförd energi och nyskapad specifik yta.

Sambandet visar att fragmenteringen har ett tröskelvärde som måste överstigas för att berget ska börja sönderdelas. Denna är dock alldeles för hög. Sambandet är långt ifrån klarlagt eftersom antalet punkter är alltför litet och variationen av tillförd energi för liten. Ett alternativt samband illustreras av Figur A.6.



Figur A.6. Linjen illustrerar idén om att det skulle vara ett icke-linjärt samband mellan tillförd energi och nyskapad specifik yta.

Detta samband skulle innebära att fragmenteringen påbörjas redan vid den första tillförda energin. När den tillförda energin blir större kommer den specifika ytan öka betydligt fastän väldigt lite extra energi tillförs.