

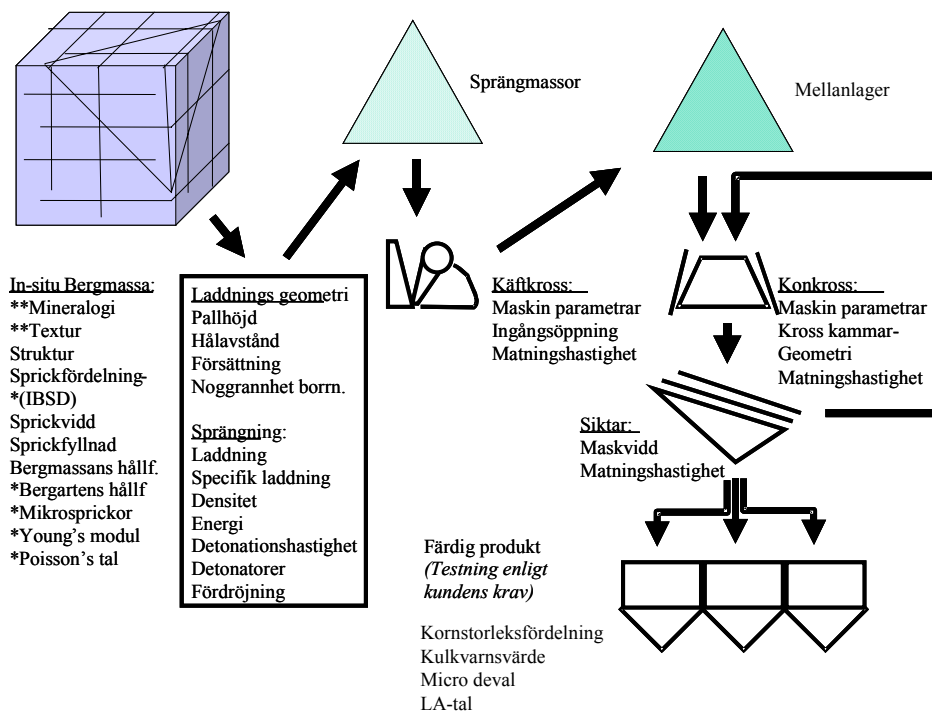
# Geologiska förutsättningar för ballastproduktion med fokus på sprängning och orsaker till finandelsproduktion

Mathias Jern

## Bakgrund

Ett avhandlingsarbete (Jern 2004b) har genomförts vid GEO-avdelningen, Chalmers, som behandlat hur det geologiska materialet fungerar vid och förändras under sprängning. I fokus har stått vilken påverkan sprängningen har för materialets kvalitetsegenskaper. Kopplingen till andra tillämpningar där man spränger i berg är dock tydlig. Projektet startades upp 1997. Liksom flera andra projekt som initierades ungefär samtidigt, var det orsaken till en allt för stor finmaterialproduktion i många bergtäkter, som var den huvudsakliga frågeställningen. Med finmaterial menas här fraktionen 0-2 mm Ø (ofta kallad maskinsand).

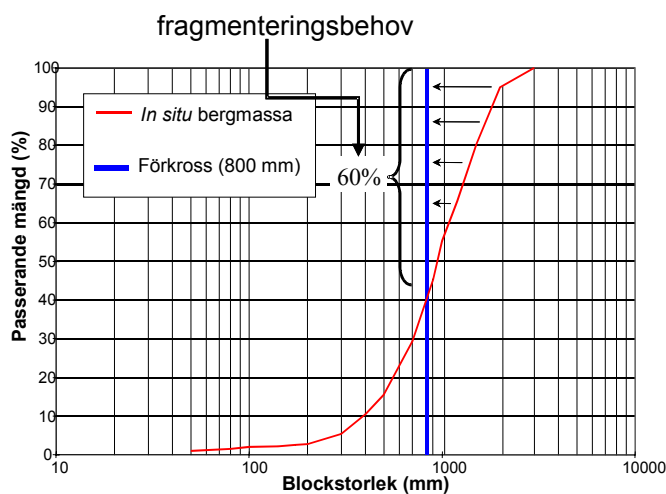
Principen vid ballastproduktion kan ses i figur 1. En ursprunglig bergmassa fragmenteras via sprängning och krossning ner till en önskad kornstorleksfördelning. De styrande parametrarna är följaktligen relaterade till dessa delar (geologiska förutsättningar, sprängtekniska parametrar samt krossningsförfarande) och de viktigaste parametrarna listas i figur 1. Det skall också noteras att de parametrar som är relaterade till bergmaterialets mekaniska egenskaper varierar under produktionsprocessen. Den stora mängden styrande parametrar samt svårigheter att på ett korrekt sätt mäta dessa parametrar gör ballastproduktion till ett komplext område.



Figur 1, Styrande parametrar vid ballastproduktion, \*betyder att parametern förändras under produktionen.

Projektet fokuserades redan från början på de geologiska förutsättningarna och den påverkan som sprängningen kan ha på det geologiska materialet. De rent sprängtekniska aspekterna har enbart studerats översiktligt. Projektets kan utförandemässigt delas in i två delar:

1. Den sprängskadade zonen undersöktes i två olika bergtäkter; syftet var att studera både makro- och mikrosprickbildning och hur dessa var beroende av den rådande geologin. Orsaken till att den sprängskadade zonen undersöktes istället för det redan utsprängda materialet var fördelen att kunna studera materialet i sin exakta position i relation till den utförda sprängningen. Nackdelen är naturligtvis att skadan är mindre i detta material eftersom det kommer att utsättas för ytterligare sprängning innan det går vidare i produktionen. En fördel kan vara att resultaten kan appliceras inom andra områden där sprängskada är intressant att studera t.ex. vid tunnlar och vägsärningar.
2. Att skapa en enkel metod för att bestämma *in-situ* blockstorleksfördelningen, kunskap om *in-situ* blockstorleksfördelningen ger möjlighet att bestämma ett fragmenteringsbehov i olika bergtäkter, dvs, om man jämför storleken på ingångsöppningen hos förkrossen med andelen *in-situ* berg som har större dimensioner, kan man bestämma hur effektiv fragmenteringen måste vara för att brytningen skall kunna ske på ett lönsamt sätt, se figur 2. En annan möjlighet med blockstorleksfördelningen *in-situ* är att den ger en övre gräns om man skall beräkna kornstorleksfördelningen efter sprängning.



Figur 2. Bestämning av fragmenteringsbehovet.

Det bör noteras att denna avhandling enbart behandlar hur det geologiska materialet uppträder vid produktion av ballast och att inga kommentarer görs på hur olika geologiska material fungerar som ballast. Skillnaden är viktig att notera eftersom man vid produktion av ballast fragmenterar materialet för att skapa önskade fraktioner. Detta innebär att vi tittar på hur denna fragmentering ser ut. Vid exempelvis sprängning är de verkande krafterna flera gånger större än bergmaterialets hållfasthet, detta är en helt annan process än de krafter som verkar när en ballast är på plats och i funktion.

Sprängning i berg är en komplicerad process där många parametrar är viktiga. Det är dock i allmänhet accepterat att processen kan delas in i två huvudmoment; 1) tryckvågen 2) det efterkommande gastrycket. Tryckvågen spelar störst roll när det gäller att initiera nya sprickor medan gastrycket huvudsakligen propagerar sprickor eller vidgar redan existerande. Vad det gäller geologins betydelse finns det även här ett antal kända fakta, exempelvis vet man att mängden producerat finmaterial varierar mellan olika bergarter. Generellt ger spröda (oftast = kvartsrika) bergarter upphov till mycket finmaterial. T.ex. porfyrier, sura vulkaniter, grovkorniga graniter och kvartsiter uppvisar ibland närmare 40 % av produktionen som finmaterial, medan produktion av ballast från basiska bergarter (gabbro och diabas) ger upphov till betydligt lägre andel finmaterial.

## Den sprängskadade zonen

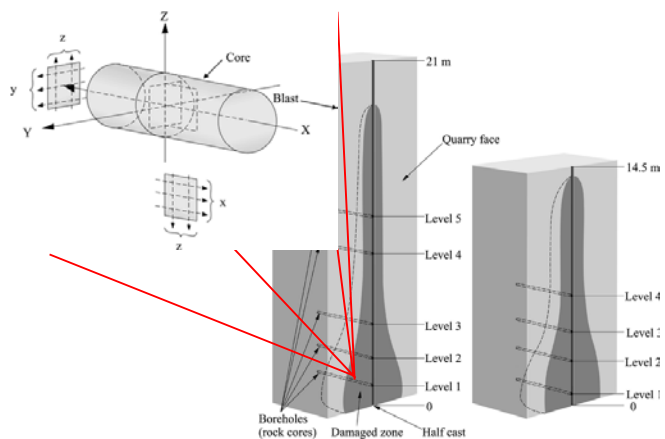
I två bergtäkter undersöktes den sprängskadade zonen. Detta skedde i Billingsryd utanför Skövde och Angeredstället utanför Göteborg, se figur 3. I båda dessa bergtäkter borrades horisontella hål in i pallen från kvarvarande spränghål, in till vad som förutsatts vara opåverkad bergmassa. Tanken var alltså att kunna studera hur det geologiska materialet hade förändrats nära sprängningen genom att jämföra det med material som var opåverkat. Ingen direkt koppling har gjorts mot laddningsmängd eller andra sprängtekniska parametrar, men det bör noteras att den specifika laddningen varit högre i Billingsryd ( $0,54 \text{ kg/m}^3$ ) än i Angered ( $0,44 \text{ kg/m}^3$ ), se Jern 2001b.



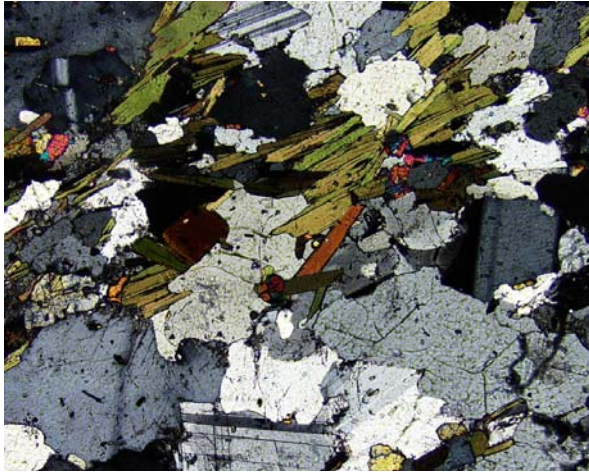
Figur 3, i den vänstra bilden ses Angered's bergtäkt och den byggnadsställning som bergkärnorna borrades från. I den högra bilden ses områden för försöken i Billingsryd.

10 meter långa borrkärnor togs ut på 5 nivåer i Billingsryd och på 4 nivåer i Angered (Se Fig.4). Dessa karterades (konventionell bergartskartering med fokus på sprängskada) och sågades sedan upp i provbitar om ca 10 cm varefter de polerades i ändarna för att kunna användas till att mäta den ultrasoniska hastigheten ( $V_p$ ). I redovisningen har 345 provbitar från Billingsryd och 299 från Angered använts.

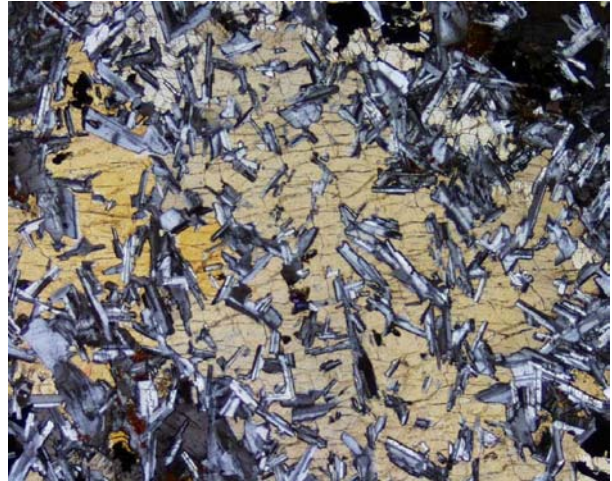
Figur 4, Positionering av borrkärnor från Billingsryd (vänstra exemplet) och Angered (till höger). Uppe i bildens vänsterkant visas hur tunnslipen togs ur provkroppen för att kunna kartera mikrosprickor i relation till både avstånd och riktning från sprängningen.



Dessutom togs ett antal tunnslip, 8 från Billingsryd och 20 från Angered. De togs i riktningen vinkelrät och parallellt med sprängningen (se figur 4) för att kunna analyseras på sitt mikrosprickinnehåll i relation till det kraftfält som sprängningen inneburit. I tunnslipen kan också mineralogi och textur analyseras (se figur 5). Av figuren framgår att bergarten från Billingsryd är en diabas huvudsakligen bestående av stora pyroxenkristaller med mindre plagioklasnålar inuti pyroxenkristallerna. Bergarten i Angered är en oftast medelkornig granodioritisk gnejs. För noggrannare data se Jern (2001a, 2004b)



Figur 5a. Gnejsen från Angered.



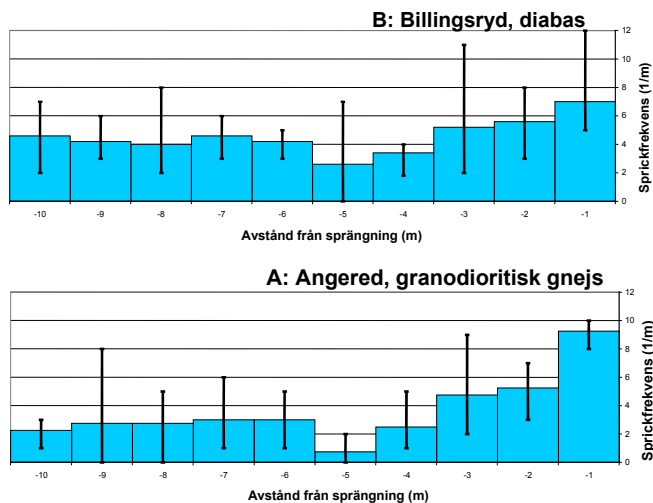
Figur 5b. Diabasen från Billingsryd.

## Resultat

Resultatet från undersökningen utvecklas mera i Jern (2001a, 2001b, 2004b) i det nedanstående ges en kortare sammanfattning.

### Makrosprickor

Resultaten från kartering av sprickor i borrhämnarna ses i figur 6. Antalet sprickor för varje meter, som inte kunde förklaras med lådkant eller upptag (dvs. sprickor som är rel. till borrhämningsförfarande), finns inlagt. Vad som direkt kan ses är att mängden sprickor är förhöjda i början av borrhämnarna och sedan går mot vad som är en "normalnivå". I Billingsryd kan denna effekt ses tydligt enbart den första metern medan samma effekt i Angered verkar vara närmare 2-3m. I sammanhanget bör noteras att mängden "gamla" sprickor (dvs sprickor som ses längre från sprängningen) är betydligt högre i Billingsryd >4 sprickor/meter än i Angered 2-3 sprickor/meter.

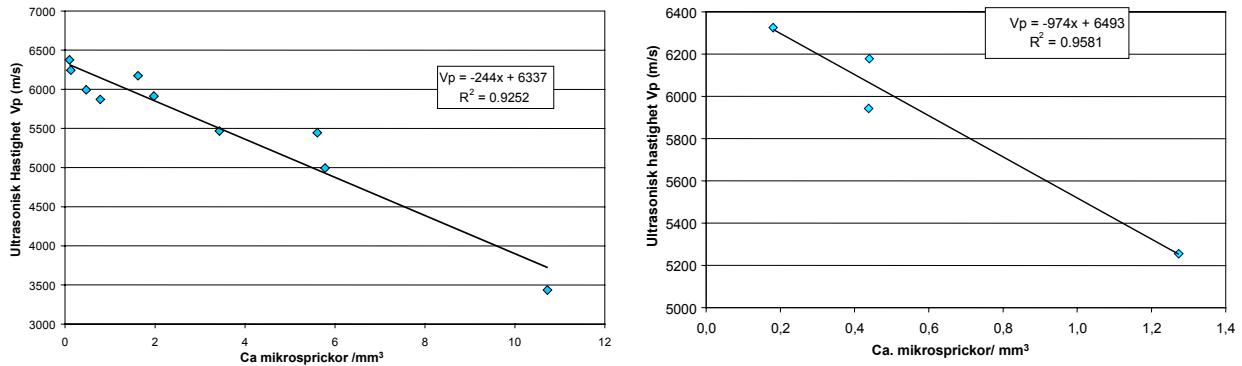


Figur 6. Kartering av makrosprickor. Staplarna representerar medelvärden för 5 borrhämnar i Billingsryd och 4 i Angered. Linjerna representerar max och min värde.



## Mikrosprickor

Mängden mikrosprickor mättes med ”linjekartering” i tunnslip i tre linjer x, y och z (se fig. 4). Dessa data korrelerades sedan med utförda ultrasoniska mätningar. Korrelationen mycket god som kan ses i fig. 7 är. Detta visar att de ultrasoniska mätningarna är ett bra sätt att visa mikrosprickmängd.

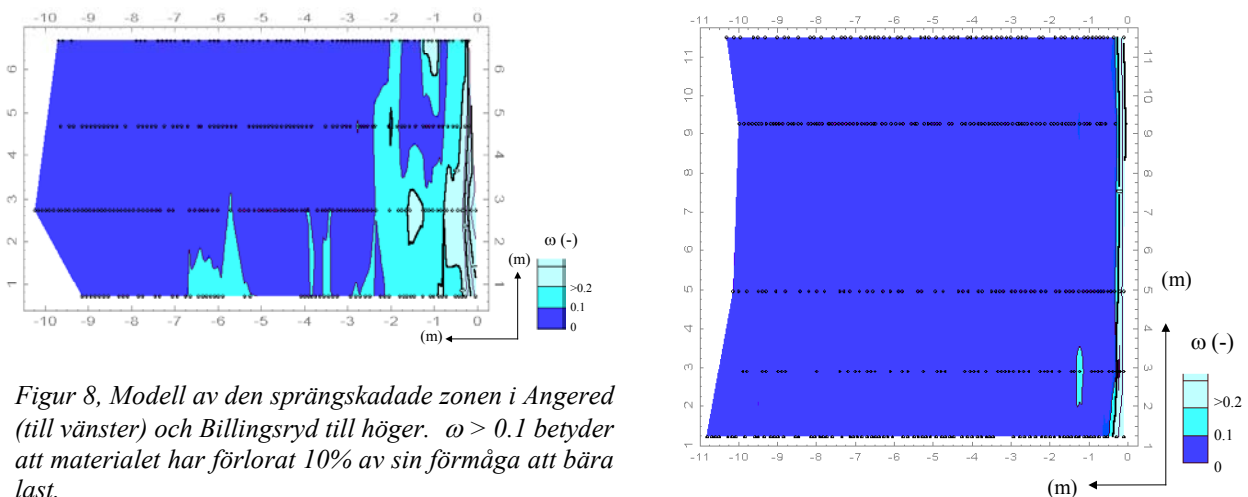


Figur 7. Korrelation mellan mikrosprickmängd och ultrasonisk hastighet ( $V_p$ ), Antalet sprickor/ $\text{mm}^3$  innebär att antalet sprickor/mm i de tre riktningarna x, y och z summerats.

Kopplingen mellan ultrasonisk hastighet ( $V_p$ ) och skada är välanvänt i litteraturen (se Kim & McKarter, 1998; Yang et al., 1996), Ofta använder man den sk. skadeparametern  $\omega$ , se Kashanov, 1986.  $\omega$  definierar hur mycket materialet förlorat sin egenskap att bära last och kan beräknas ur:

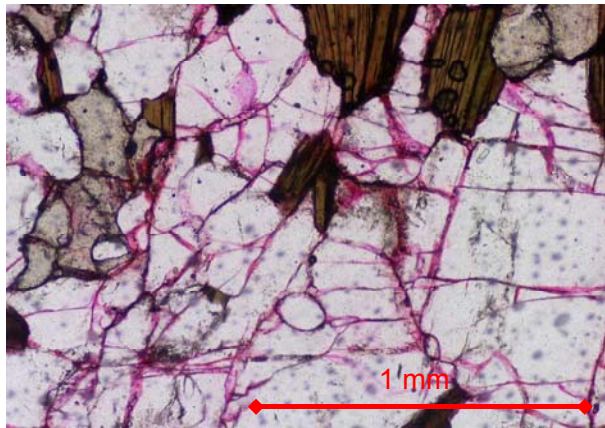
$$\omega = 1 - \left( \frac{V'_p}{V_p} \right)^2 \quad (1)$$

Genom att ansätta maxvärdet för varje borrhål som  $V_p$  i ekv. 1 och jämföra med det uppmätta värdet i varje punkt ( $V'_p$ ) kan ett värde för  $\omega$  räknas fram. Detta har sedan använts i figur 8 för att ge en uppfattning av sprängskadan i de två bergtäkterna. I figur 8 kan ses hur bergarten i Billingsryd i det närmaste är opåverkad av sprängningen (2-3 dm sprängskadezon) medan påverkan i Angered är kring 2,5 m. Detta skall ses i sammanhanget av att försättningen i Angered var 2.6 m dvs. hela den bergmassa som sprängs ut av nästkommande rad är redan tydligt försvagad från sprängningen i föregående rad.



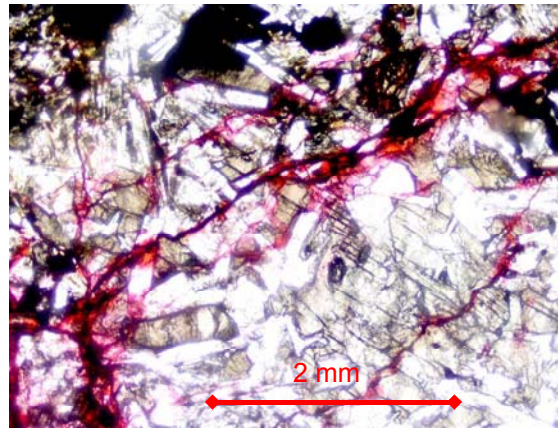
Figur 8, Modell av den sprängskadade zonen i Angered (till vänster) och Billingsryd till höger.  $\omega > 0.1$  betyder att materialet har förlorat 10% av sin förmåga att bära last.

En förklaring till dessa skillnader kan ses i tunnslipen. I figur 9b ses ett tunnslip från Billingsryd. Här syns ett fåtal långa sprickor som skär hela bilden. I bilden från Angered 9a ser man istället ett stort antal sprickor, ofta flera sprickor genom varje mineral Korn. Det är tydligt att processen hur sprickor bildas i sprängprocessen skiljer sig tydligt mellan de två bergtäkterna.



Angered: Nivå 2, 4 cm

Figur 9a, Mikrosprickor från Angered (rödfärgade), provet är tagit vinkelrät sprängningsriktningen och 4 cm från sprängning.



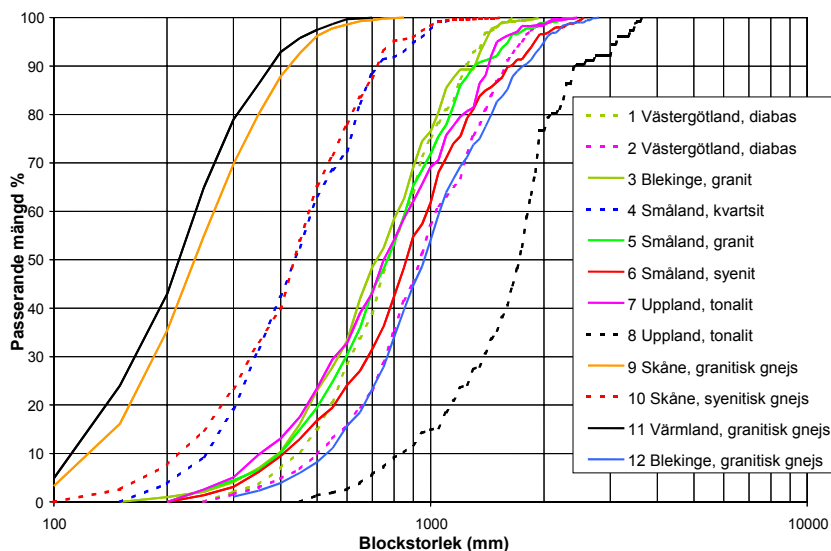
Billingsryd: Nivå 4, 4 cm

Figur 9b Mikrosprickor från Billingsryd (rödfärgade), provet är tagit vinkelrät sprängningsriktningen och 4 cm från sprängning.

I Billingsryd (Fig. 9b) är mikrosprickorna antingen korta (kortare än plagioklaskristallerna) eller långa (tvåar hela tunnsliplet). I Angered (Fig. 9a) är det helt annorlunda, mikrosprickor som passerar genom eller runt flera mineralkorn är vanliga. Gnejsen i Angered är följaktligen betydligt mer mottaglig för sprängskada. Detta beroende på ett antal faktorer: I Billingsryd (diabasen) är de stora pyroxenkristallerna sammanväxta med mindre, nålformiga, plagioklaskristaller. Detta skapar en närmast armerande effekt i bergarten, de små plagioklasnålar gör att spricktillväxt genom pyroxenkristallen försvåras genom att hela tiden stoppa upp sprickpropageringen. I Angered är istället mineralkornen mer rundade och ligger vid sidan av varandra, vilket gör det enklare för en spricka att hitta en väg genom eller runt mineralkornen. Förekomsten av glimmer, i Angered, verkar också vara en faktor som underlättar både sprickinitiering och sprickpropagering.

## Bestämning av Blockstorleksfördelningen (IBSD)

I projektet utvecklades även en metod för att bestämma blockstorleksfördelningen *in-situ*, dvs. storleken på block i den ursprungliga bergmassan som skärs av befintliga sprickor. Resultatet från undersökningar i 12 olika bergtäkter kan ses i figur 10. Metoden diskuteras närmare i Jern (1998, 1999, 2004a och 2004b)



Figur 10. In Situ blockstorleksfördelningen undersökt i 12 olika Svenska bergtäkter

## Diskussion

Griffith (1920) beskrev hur sprickor bildas. En spricka bildas vid de svagaste punkten, ”flaws” vilka även kallas Griffithsprickor. Hållfastheten i ett bergartsprov är beroende av hur dessa griffithsprickor ser ut. Det är dock viktigt att notera att även om griffithsprickan bestämmer hur lätt en (mikro)spricka initieras så är parametern hur lätt denna spricka propagerar vidare lika viktig. Dessa två parametrar är oberoende av varandra,

## Sprickinitiering

Orsaken till sprickinitiering kan delas upp i följande punkter:

1. **Existerande mikrosprickor:** Särskilt granit uppvisar mikrosprickor som bildats innan bergarten blivit påverkad. Sprunt och Brace (1974) noterade att gabbro och diabas ofta saknar mikrosprickor i korngränserna medan detta är mycket skiftande i granit. Orsaken till varför graniter ofta uppvisar sprickor i korngränserna är att de olika ingående mineralen har olika termo-mekaniska egenskaper (Seo *et al.*, 2002), dvs. bergarten spricker redan när den bildas (svalnar). En annan orsak till tidig mikrosprickbildning är avlastning (Krantz, 1983).
2. **Korngränser** (deras hållfasthet): Svaga korngränser är lättöppnade. Hållfastheten beror framförallt på vilka mineral som ligger jämte varandra. Generellt verkar korngränssprickor vara vanligare när kvarts utgör ett av mineralen (Moore och Lockner, 1995).
3. **Spaltplan:** Glimmer fungerar ofta som ”griffithsprickor”, vilka ger upphov till nya mikrosprickor, i viss mån även fältspater och amfiboler (Krantz, 1983; Siegesmund *et al.* 1991; Eberhart *et al.*, 1999; Seo *et al.*, 2002).

Nästa steg i sprickbildningen är vägen från en mikrospricka till en makrospricka (dvs. mesosprickbildning), mikrosprickan definieras oftast som mindre eller i samma storlek som kornstorleken och har följaktligen en betydelse för mineralkornens hållfasthet medan makrosprickan relaterar till hela bergmassans hållfasthet, övergången mellan dessa är mesosprickan. Hur stora dessa mesosprickor är innan en makrospricka utvecklas är direkt kopplat till geologin; olika geologiska material reagerar olika på sprängning.

## Sprickpropagering

Propagering av mikrosprickor kan generellt kopplas till följande geologiska faktorer:

1. **Kornstorlek:** En spricka propagerar lättare genom ett korn än genom flera, dvs. mindre kornstorlek ger bergarter med högre hållfasthet (Eberhart *et al.* 1999). Växande sprickor kan stoppas av korngränser såväl som tvärande icke-växande sprickor (Dienes, 1978). Å andra sidan, om kornstorleken är allt för liten så slutar materialet att fungera som ”kornigt” och uppträder mekaniskt som ett glas istället (chert, finkorniga vulkaniter)
2. **Korngränsgeometri:** Det kräver mindre kraft att propagera en spricka i en rak korngräns än genom en kurvig eller hackig.
3. **Spaltplan:** I vissa mineral följer mikrosprickorna normalt spaltplanen; i glimmer är hållfastheten längs med spaltplanen nära noll och öppnas lätt
4. **Sprödhet:** Spröda mineral uppvisar generellt mer mikrosprickor än andra, framförallt observeras detta hos kvarts i granitoider (Moore och Lockner, 1995; Krantz, 1983; Eberhart *et al.*, 1999).
5. **Textur:** Mineralkorn som är stokastiskt orienterade har ett bättre motstånd mot sprickbildning än bergarter med mer ordnad textur; jämför granit – gnejs, mineralkorn som växer in i varandra har också ett bättre motstånd mot sprickbildning, jämför granit – diabas.

Vägen från mikro till makrospricka varierar mellan olika bergmaterial. En spricka bildas alltid genom sammanlänkning av flera mikro- (eller meso-) sprickor. I ett material där mycket mikrosprickor bildas, kommer den längd dessa behöver för att växa samman vara relativt kort. Om istället materialet har få svagheter ("flaws") och följaktligen bildar få mikrosprickor kommer dessa att vara tvungna att växa långt innan de sammanläkas.

När man studerar vägen från mikro- till meso- sprickor verkar alltså den viktigaste parametern vara om bergarten vid deformation lättare bildar nya mikrosprickor eller propagerar från redan existerande. När man istället betraktar sprickbildning i en större skala kommer en annan parameter att styra mängden bildade makrosprickor (dvs. fragmenteringsgraden), nämligen mängden av redan befintliga makrosprickor.

Mängden av naturliga sprickor i bergmassan får en helt avgörande betydelse när man går upp i betraktelseskala och studerar fragmenteringen. Orsaken till detta är att en propagerande spricka ofta slutar att växa när den når fram till en befintlig, detta eftersom det kräver mindre energi att vidga en redan existerande spricka än att skapa en ny. Detta får konsekvensen att fragmenteringen kommer att bli mer omfattande i en bergmassa med få naturliga sprickor.

Det skall också noteras att andra geologiska fenomen har samma effekt som sprickor när det gäller att "stoppa" upp sprickbildning, t.ex., glimmerplan eller gångar av material som är svagare eller sprödare än omgivningen.

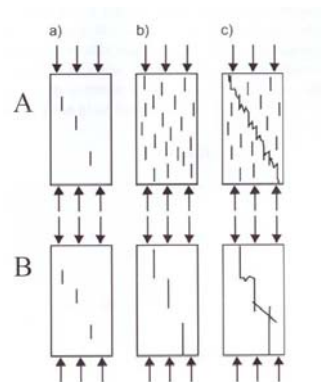
## Sprängkänslighet

Den tidigare diskussionen är viktig för förståelse av sprängprocessen:

För att förenkla diskussionen utgår vi från två olika material: A) ett geologiskt material där många mikrosprickor bildas innan spricktillväxt sker och B) ett material där förhållandevis få mikrosprickor bildas innan sprickpropagering inträffar se Fig. 11.

A: Den mesta mikrosprickbildningen sker innan makrosprickbildning, följaktligen försvagas hela bergmassan innan makrosprickor bildas; om sprängskadan skall minskas måste följaktligen laddningsmängden minskas.

B: Makrosprickbildning sker tidigt i sprickbildningsprocessen, sprängskada kommer att vara ett mindre problem.



Figur 11 Jämförelse mellan bergart A och B. Dessa exempel uppvisar olika vägar till fragmentering.

Om man accepterar att olika bergmaterial är olika sprängkänsliga innebär detta också att olika bergmaterial bör hanteras olika i relation till ballastproduktion.

I bergart A kommer sprängning alltid att orsaka tydlig sprängskada. En minskning av mängden sprängmedel kommer där följaktligen alltid att resultera i mindre sprängskada, detta material är följaktligen sprängkänsligt. I bergart B är sprängningen betydligt mindre problematisk, sprängningen kan användas som ett sätt att kontrollera produktionen utan onödig skada; högre laddning betyder inte självklart att man skadar materialet, detta material





är betydligt mindre sprängkänsligt än A. Det är alltså betydligt mer komplicerat att hitta ett optimalt sätt att utvinna ballast ur bergart A.

I vissa material bör man följaktligen spränga så skonsamt som möjligt (typ A): I all pallsprängning kommer de verkande krafterna i bergmassan, nära sprängladdningen, att överstiga bergartens tryckhållfasthet med flera gånger (Lizotte och Scoble, 1994). Sprängprocessen har dessutom en radiell riktning (när sprängladdningen är placerad längs ett borrhål) som innebär att trycket fördelas i hela bergmassan med störst kraft närmast sprängladdningen. Viss skada är ofrånkomlig eftersom laddningen måste vara tillräcklig kraftig för att loss göra bergmassan.

Att spränga med minsta möjliga påverkan i bergarter av typ (A) och låta krossarna utföra mer av jobbet skulle kunna vara ett sätt att höja kvalitén i ett sådant material. I krossprocessen sker fragmenteringen relativt homogent (även om större stenar prioriteras, se Evertsson 1998). Detta medan sprängningen påverkar bergmassan utifrån de linjer där sprängladdningen placeras och därför skapar stor skada närmast denna. Krossning påverkar istället stenarna mellan punkter av maxtryck, dvs. stenen kläms mellan krossens metallytor eller mellan närliggande korn. Om trycket är koncentrerat genom denna väg, kommer mikrosprickbildning att ske framförallt i denna zon vilket kan leda till mindre mikrosprickbildning i de bildade sprickornas omgivning.

## Rekommendationer till ballastindustrin

Nedan presenteras några rekommendationer utifrån avhandlingsarbetets slutsatser. Alla bergarter delas här in i fyra olika grupper som skall behandlas olika i enlighet varierande egenskaper gällande sprängkänslighet och *in-situ* blockstorleksfördelning:

<b>Sprängkänslighet</b>  hög låg	Spräng med så liten laddning som möjligt, all ökning av laddning kommer att resultera i förhöjning av sprängskadan samtidigt som fragmenteringsbehovet är mycket litet	Stort fragmenteringsbehov föreligger men all fragmentering kommer även att ge upphov till stora sprängskador. Detta är den mest komplicerade typen av berg och kräver noggranna undersökningar. Tester bör utföras med olika sprängtekniska lösningar för att finna en optimal laddningsgrad. Om större fragmenteringsgrad är ett krav är sannolikt minskad försättning och hålavstånd att föredra framför ökad laddning i borrhålen.
	Förändring i sprängplanen kommer att förändra resultatet från sprängningen mycket litet. Det enda som påverkas av varierande laddningsgrad är salvprofilen.	Stort fragmenteringsbehov föreligger samtidigt som berget är relativt okänsligt för sprängning. Om högre fragmenteringsgrad önskas bör detta kunna uppnås genom att ladda hårdare. Sprängskador kommer inte att vara ett stort problem.
liten  stor		<b>Blockstorleksfördelning (IBSD)</b>

## Referenser:

- Dienes, J.K. 1978. A statistical theory of fragmentation. Proc. 19<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp 51-55.
- Eberhart, E., Stimpson, B., Stead, D., 1999. Effects of Grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures. *Rock Mech. & Rock Eng.*, v 32(2), pp 81-99.
- Evertsson, C. M., 1998. Outcome Prediction of Cone Crushers. *Minerals Engineering*, v 11, pp 215-232.
- Griffith A.A. 1920. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philos. Trans. Roy Soc. London Series A, Math Phys. Sci.*, v 221(587), pp 163-198.
- Jern, M., 1998: Determination of the block size distribution and its use as a tool to define the degree of fragmentation needed in quarries, Proc. of the International Conference on Geomechanics/ Ground Control in Mining and Underground construction, Wollongong, 14 – 17 July 1998, pp 1039 – 1045.
- Jern, M., 1999. Bestämning av bergmassors blockstorleksfördelning. Rapport, Geologiska institutionen, Chalmers Tekniska högskola, Göteborg. B 464, 56 pp.
- Jern, M., 2001. Characterisation of blast damage in thin sections. Proc. of AGGREGATE 2001- Environment and Economy, Helsinki, 6 – 10 August 2001, Tampere University of Technology, Laboratory of Engineering Geology, Publ. no. 50, pp 105 – 112.
- Jern, M., 2001b. Determination of the Damaged Zone in Quarries – related to Aggregate Production. Bulletin of Engineering Geology and the Environment v 60, pp 157-166.
- Jern, M., 2002. Micro- and Macro Crack Growth as a Result of Blasting. Proc. of the 7<sup>th</sup> international symposium on rock fragmentation by blasting, Beijing Metallurgical Industry Press. Beijing, China, pp 155-161.
- Jern, M., 2004. Technical Note: Determination of *In situ* Block Size Distribution in Fractured Rock, An approach for comparing *In-situ* Rock with Rock Sieve Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v 37(5), pp 391-401.
- Jern, M., 2004b. The Geological Conditions for Aggregate production, with special focus on blasting and fines production. Ph D. Thesis. Department of GeoEngineering, Chalmers University of Technology, 65pp.
- Kranz, R.L., 1983. Microcracks in Rocks: A Review. *Tectonophysics*. v 100, pp 449-480.
- Kashanov, L.M., 1986. Introduction to damage mechanics. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, Netherlands, 135 pp.
- Kim, D.S., McCarter M.K., 1998. Quantitative Assessment of Extrinsic Damage in Rock Materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. v 31(1), pp 43-62.
- Lizotte, Y.C., Scoble, M.J., 1994. Geological control over blast fragmentation. *CIM Bulletin* v 87(983) September 1994, pp. 57-71.
- Moore, D.E., Lockner, D.A., 1995. The role of microcracking in shear fracture propagation in granite. *Journal of structural geology*, v 17(1), pp 95-114.
- Seo, Y.S., Jeong, G.C., Kim, J.S., Ichikawa, Y., 2002. Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression. *Engineering Geology*, v 63, pp 259-275.
- Siegesmund, S., Kern H., Vollbrecht, A., 1991. The effect of oriented microcracks on seismic velocities in an ultramylonite. *Tectonophysics*, v 186, pp 241-251.
- Sprunt, E.S., Brace, W.F., 1974. Direct observations of microcavities in crystalline rocks. *Int. J. rock mech. and min sci.* v 11(4), pp 139-150.
- Yang, R., Bawden, W., F., Katsabanis, P., D., 1996: A New Constitutive Model for Blast Damage. *International Journal of rock Mechanics, Mining Science and Geomechanical Abstracts*, v 33(3), pp 245 - 254.