

**SPRICKUTBREDNING
VID FLERHÅLSSPRÄNGNING
Sammanfattande rapport
av försöksperioden 1993-96**

**Crack propagation in rock from multiple
hole blasting - Summary of work during
the period 1993-96**

Mats Olsson, SveBeFo
Ingvar Bergqvist, Nitro Nobel

SveBeFo Rapport 32

Stockholm 1997
ISSN 1104-1773
ISRN SVEBEFO-R--32--SE

FÖRORD

Inom sprängningstekniken är en viktig uppgift att minska eller eliminera sprängskador och sprickbildning utanför den sprängda konturen i kvarstående berg. Sedan flera år pågår fältförsök med skonsam sprängning i ett stenbrott i Vånga norr om Kristianstad. En mängd parametrar har varierats och många intressanta resultat har erhållits. Föreliggande rapport utgör en sammanfattande redovisning av försöksserier och resultat från Vångaprojektet under perioden 1993-96. Särskilt betonas värdet av att använda frikopplade laddningar och momentan upptändning för att begränsa sprickbildningen i det kvarstående berget.

Parallellt med dessa försök pågår en utveckling av formler för beräkning av sprängskador, som skall kunna ta hänsyn till parametrar som frikoppling, tändningsföljd mm, vilket inte kan göras i traditionellt använda formler. Inledningsvis har prognosekvationer tagits fram för radiell sprickbildning baserade på försöksresultaten i Vånga. De redovisas i SveBeFo rapport 31.

Ytterligare försök pågår inom det nya ramprogrammet 1997-99 med det övergripande målet att skapa underlag för nya rekommendationer för skonsam sprängning.

Projektet har genomförts av Mats Olsson, SveBeFo och Ingvar Bergqvist, Dyno Nobel, med stöd av en referensgrupp bestående av Leif Johansson och S-O Båvik, Vägverket, Jan Malmtorp, Banverket, Bengt Niklasson, Skanska, Anders Nordqvist, Kimit samt Finn Ouchterlony, SveBeFo.

Stockholm i oktober 1997

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Denna rapport är en slutredovisning av fältförsök i Vånga utförda under ramprogramperioden 1993-96. Tidigare utkommen rapport "Sprickutbredning vid flerhålssprängning", SveBeFo Rapport 18, behandlade resultat från fältförsök gjorda 93-94.

Rapporten beskriver fältförsök för studier av sprickors utbredning i berg vid flerhålssprängning under olika förutsättningar. Försöken har utförts i ett blockstensbrott i Vånga där berget utgörs av en homogen granit med få sprickor. Hålen borrades i pallar som var ca 5 m höga. Håldimensionen var huvudsakligen 51 mm eller 64 mm. Försättning, hålavstånd, frikoppling, förladdning, intervalltider och sprängämnestyper var några av de undersökta parametrarna. Efter sprängning av en försöksrad togs block ut bakom raden. Blocken sågades vinkelrätt mot försökshålen varefter en penetrant påfördes. Därefter kunde sprickor karteras. Hittills har ca 230 hål sprängts och över 300 sågsnitt karterats.

De viktigaste faktorerna för att reducera sprickor i kvarstående berg är att spränga momentant och att använda frikopplade laddningar. Försöken visar att vanliga Nonel- sprängkapslar med pyroteknisk fördröjning och med högt intervallnummer ger stor tändspridning, risk för utkast av laddningar och även betydligt längre sprickor än vid momentan sprängning med elektronisprängkapslar. Försöken visar vidare att ökad försättning endast marginellt påverkar sprickutbredningen men att bågformade sprickor kan uppträda vid ökat hålavstånd.

I rapporten lämnas rekommendationer för att erhålla kortast möjlig sprickbildning samt visas underlag till tabell över olika faktorerers inverkan på sprickbildning. Tabellen kan användas som komplement till de skadezonsvärden som idag tillämpas vid projektering av bergarbeten. Tabellen kommer att kompletteras under innevarande ramprogram 97-99.

SUMMARY

Crack lengths from explosives in multiple hole blasting have been studied by cutting blocks and spraying them with penetrants. The holes were drilled in 5 m high benches. The hole dimension was 51 mm or 64 mm. Totally some 230 holes were blasted. Different explosives, hole patterns, decoupling, initiation time and stemming were some of the examined parameters.

It was found that decoupling and simultaneous initiation were the factors that reduced crack lengths most. Ordinary caps with pyrotechnical delay increase the presence of undetonating cartridges and give, due to the scatter in delay time, longer cracks.

The report also presents a technique to study cracks in tunnel walls by cutting slots in the walls and spraying the sides of the slot with penetrants. Recommendations to reduce cracks from blasting are also presented in the report.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sida
1. BAKGRUND	1
1.1 Allmänt	1
1.2 Resultat från tidigare försök	2
2. MÅLSÄTTNING	3
3. GENOMFÖRANDE OCH RESULTAT	3
3.1 Intervalltidens inverkan på sprickbildning	4
3.2 Försättnings inverkan	8
3.3 Förladdningens inverkan	10
4. SPRICKUTBREDNING I TUNNELVÄGGAR	12
5. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	14
5.1 Slutsatser	14
5.2 Rekommendationer	18
6. FORTSATTA PROV	20
7. REFERENSER	21
APPENDIX	23

1. BAKGRUND

1.1 Allmänt

Bergsprängning är en process där två, ofta motsatta, önskemål skall förenas. För det första skall berget skadas så mycket att det fragmenteras, för det andra skall det kvarstående berget förbli oskadat. Dessa båda önskemål kan ibland vara svåra att förena eftersom all bergsprängning skadar berget. Det är därför mycket viktigt att skaffa kunskap om under vilka förhållanden skador uppstår och med vetskap om detta utnyttja kunskapen så att skador kan förhindras eller begränsas.

Teknik för skonsamt berguttag blir allt viktigare. Detta gäller t.ex i gruvor med höga stabilitetskrav och för ökade brytningsdjup, samt i övriga bergarbeten under jord där allt högre krav ställs på konstruktionen. Detta gäller speciellt för projekt i samband med den omfattande infrastrukturella utbyggnaden som för närvarande pågår (ex väg- och järnvägstunnlar).

Inom SveBeFo:s ramprogram, 93-96, drevs ett forskningsprojekt vars syfte var att fastställa orsakerna till sprängskador. Projektets namn var "Sprickbildning runt borrhål, fältförsök och rekommendationer för skonsam sprängning" /1/. Inledande försök hade utförts av SveDeFo, omfattade ett antal enhållsprängningar i granit och är tidigare rapporterade /2, 3/. Resultaten från dessa provsprängningar visade på stora skillnader i sprickutbredning för olika sprängämnen. Frikoppling reducerade drastiskt sprickutbredningen. Sprängämnen med hög detonationshastighet gav fler sprickor närmast hålet och bulksprängämnen gav längre sprickor än motsvarande patronerad laddningsmängd.

Sprängförsöken har under ramprogrammet 93-96 inriktats mot flerhållsprängning, som naturligtvis mer efterliknar den praktiska verkligheten. Försöksresultaten t.o.m. 1994 har avrapporterats i SveBeFo-rapport nr 18, delrapport 1, "Sprickutbredning vid flerhållsprängning" /4/ samt vid ett flertal konferenser /5, 6/. I rapporten beskrivs bl.a. inverkan av sprängämne, frikoppling och intervalltid.

Denna rapport, delrapport 2, beskriver resultaten från ett antal försök med andra variabler som gjorts i Vånga fram t.o.m. 1996. Rapporten inleds med en sammanfattning av resultaten från delrapport 1.

Förutsättningar för proven (provplats, geologi, försöksteknik, organisation mm) samt data om sprängämnen finns beskrivna i delrapport 1. Denna information kan även hittas i Appendix 1-3.

1.2 Resultat från tidigare försök, delrapport 1

I delrapport 1 /4/ redovisades tester av sprängämnen, håldiametrar, hålsättning samt intervalltider. Under denna period, 93-94, utfördes 6 delförsök och sprängdes mer än 130 hål. Slutsatserna från dessa försök kan sammanfattas med:

- 1. Spricklängden minskar med ökad frikoppling (lägre kopplingsgrad)**
- 2. Fulladdade hål uppvisar en mer komplex sprickbild än frikopplade hål**
- 3. Hög detonationshastighet ger många fina sprickor närmast hålet**
- 4. Spricklängden ökar med laddningsmängden**
- 5. För vissa sprängämnen ökar spricklängden med försättningen**
- 6. Bågformade sprickor mellan hålen kan uppträda vid ökat hålavstånd**
- 7. Intervalltiden har stor betydelse för sprickbilden. Spricklängden ökar då tiden mellan hålen ökar. Bästa resultat fås med momentan initiering**

2. MÅLSÄTTNING

Målsättningen med detta projekt är att undersöka orsakerna till sprängskador samt att utveckla teknik för att minimera dessa.

För proven i denna rapport har speciellt gällt att närmare undersöka inverkan av:

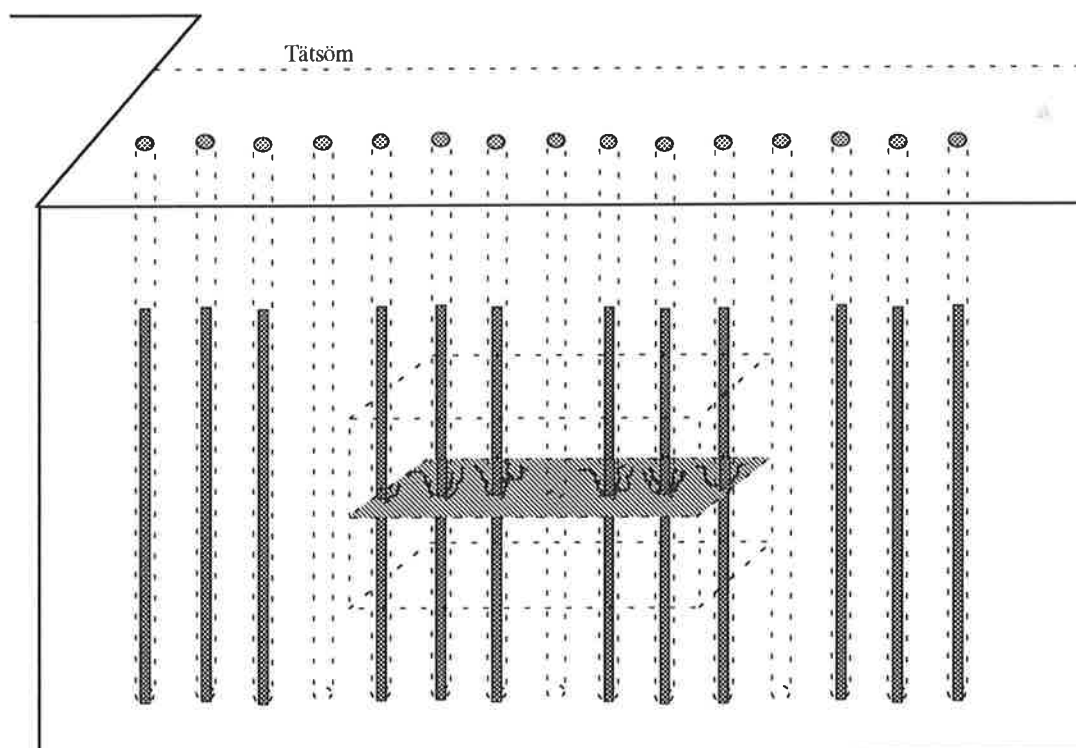
- intervalltid
- försättning
- förladdning

Vår hypotes var:

1. Vanliga sprängkapslar med pyroteknisk fördröjning, typ Nonel, ger längre sprickor än elektronisprängkapslar
2. Ökad försättning bör ge ökat mothåll och därmed längre sprickor
3. Förladdade hål håller inne gaserna en längre tid och bör därför ge längre sprickor

3. GENOMFÖRANDE OCH RESULTAT AV FÄLTFÖRSÖK

Försöken genomfördes på samma sätt som tidigare, dvs pallsprängning med efterföljande blockuttag. Försökshålen borrades med håldimensionen 51 mm eller 64 mm. Försättning och hålavstånd framgår av respektive delförsök. Försökshålen laddades i grupper om 3-4 hål, se figur 1. Olika sprängämnen för skonsam sprängning användes, men inom gruppen var det samma sprängämne. Dyno Nobels elektronisprängkapslar användes för exakt initiering. Detaljer om förutsättningar, geologi, försöksteknik och sprängämnen beskrivs mer i Appendix.



Figur 1. Flerhålssprängning i pall

3.1 Intervalltidens inverkan på sprickbildning

Våra tidigare försök med intervalltider visade att de kortaste spricklängderna uppnåddes med momentan initiering, dvs med $\Delta t = 0$ ms mellan närliggande hål /4/. Vid dessa försök användes elektronisprängkapslar. För att undersöka hur långa sprickor man får vid momentan initiering med vanliga Nonelsprängkapslar med samma nummer utfördes två fältförsök i Vånga. I det ena försöket initierades halva salvan med elektronisprängkapslar och den andra halvan med Nonelsprängkapslar. I det andra försöket initierades alla hål med Nonelkapslar. Figur 2 och figur 3 visar uppläggningsen av försöken. I båda försöken var såväl försättning och hålavstånd 0,5 m.

Konturhålen i en salva initieras normalt med höga intervallnummer och de flesta av hålen initieras med samma nummer. Man vill uppnå momentan initiering. Tyvärr är inte detta möjligt med vanliga sprängkapslar. Intervalltiden regleras här med en pyroteknisk sats och vid höga intervallnummer medför detta en stor tändspridning. Detta betyder att hålen ej kommer att detonera momentant.

För att undersöka hur tändspridning påverkar sprickbildning valde vi att initiera hålen med höga intervallnummer. Hålen initierades därför med Nonel LP nr 50. Dessa sprängkapslar används normalt i tunnelsprängning. Fördröjningstiden för detta nummer blir 5000 ms. För detta intervallnummer krävs, enligt Svensk Standard, att spridningen ligger inom ± 250 ms.

För att åstadkomma likartad initiering valdes 5000 ms fördröjning även för elektronisprängkapslarna. Nonel slangarna från hålen kopplades samman med detonerande stubin. Stubinen tändes, enligt figur 2, från två håll med 1 ms fördröjning med elektronisprängkapslar. Två typer av sprängämne användes, 17 mm Gurit och 22 mm Gurit.

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19
	⊕	⊗	⊗	⊗	⊕	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊕	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Håldim.	51	51	51	51	64	64	64	64	64	64	64	64	64	51	51	51	51	51	51
Spr.äm.	Gurit 17				Gurit 22				Gurit 22				Gurit 17						
Initiering	← Elektronisprängkapsel →				←				Nonel LP nr 50				→						
	← 5000 ms				→				← 1 ms +				5000 ms				+2 ms →		

Figur 2. Hållayout och upptändning för salva 1 (April-95)

I den andra salvan användes enbart 17 mm Gurit och alla hålen initierades här med Nonel LP nr 50, se figur 3.

O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12	O13	O14
⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Gurit 17 och Nonel LP nr 50													

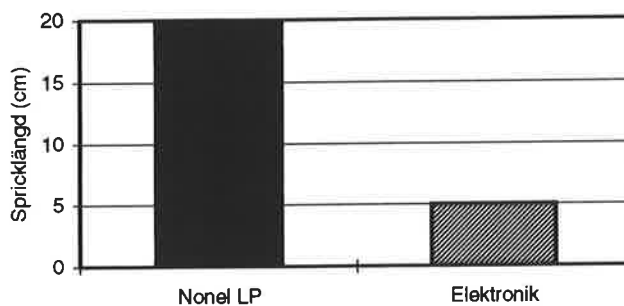
Figur 3. Hållayout och upptändning för salva 2 (Maj-95)

Resultat; intervalltider

Tunnelseriens kapslar, **Nonel LP**, gav en **sämre bergyta** med **färre synliga hålpipor** än elektronisprängkapslarna. Efter sprängning med Nonel LP hittades också ett stort antal **odetonerade Guritrör** i berghögen, ca 25 % av antalet laddade rör i salva 2. Detta är en relativt vanlig förekomst som ibland givit dessa laddningar ett dåligt rykte vilket snarare beror på tändspridningen än på sprängämnet.

Vid användning av elektronisprängkapslar med momentan initiering har oftast inga, och som mest något enstaka, rör hittats.

Medelspricklängden för Gurit 17 initierad med Nonel LP var > 20 cm. För Gurit 22 kunde endast ett hål utvärderas. Där var spricklängden 40 cm. Spricklängden för momentan initiering med elektronisprängkapslar var betydligt kortare. Figur 4 visar en jämförelse av spricklängder för de olika initieringstyperna för Gurit 17.



Figur 4. Spricklängder vid olika initieringstyper

Spricklängden för hål initierade med Nonel är ca 3 ggr längre än för motsvarande hål momentant initierade med elektronisprängkapslar.

Sprickbilden kring hål som initierats med Nonel LP är också en annan än den sprickbild som brukar uppträda vid momentan initiering med elektronisprängkapseln. Figur 5 visar sprickorna från 17 mm Gurit initierat med Nonel LP och figur 6 visar sprickbilden från samma sprängämne initierat med elektronisprängkapseln. Från den senare blir det enbart ett fåtal mycket korta sprickor.

Slutsatsen att hål initierade med Nonel ger längre sprickor än hål som initierats med elektronisprängkapseln gäller sannolikt inte bara för Nonel utan för alla sprängkapseltyper med pyroteknisk fördröjning.



Figur 5. Sprickutbredning för Gurit 17 och initiering med Nonel LP

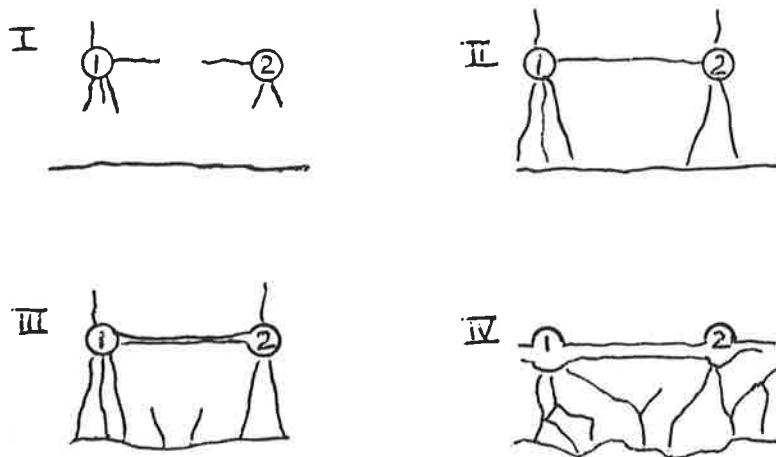


Figur 6. Sprickutbredning för Gurit 17 och momentan initiering

Sprickutbredningen för hål initierade med Nonel är jämförbar med den sprickutbredning man får vid enhållssprängning /2/. Den samverkan som man uppnår mellan hål som initieras momentant uteblir således vid initiering med vanliga sprängkapslar.

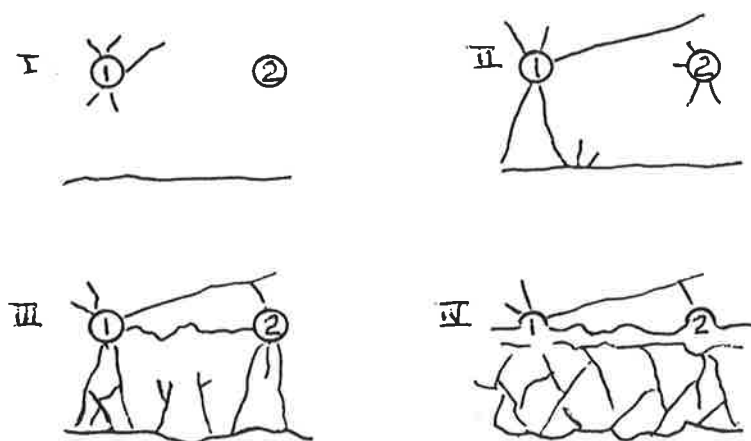
Om vi antar att vågutbredningshastigheten i berg, $c_p = 5300$ m/s och sprickutbredningshastigheten, $c_r = c_p \times 0,4 \sim 2000$ m/s, så gäller för de olika initieringsfallen:

A. Momentan initiering



Hål 1 och 2 detonerar samtidigt. Med konstant utbredningshastighet möts sprickorna på halva hålavståndet. Vid ett hålavstånd på 0,8 m tar det 0,2 ms innan sprickorna möts. Tändspridningen för elektronikkapslarna är $< 0,1$ ms. Då förbindelse uppnåtts börjar bergmassan att röra sig, gaser läcker ut och borrhålstrycket lättar. Vid små laddningsmängder är borrhålstrycket så lågt att det endast hinner bildas korta sprickor in i berget. Vid högre laddningsmängder, om sprängämnets diameter ökar, eller vid höga detonationshastigheter ökar borrhålstrycket och därmed kommer skador att uppstå även på det bakomvarande berget.

B. Hålen sprängs ej momentant



Sprickor hinner nu passera det närliggande hålet innan detta detonerar. I detta fall skulle då sprickbilden bli olika från hålen, vilket också är fallet vid $\Delta t \neq 0$. Några hål ser bra ut, se hål 2 som ligger i lä, medan andra får långa sprickor. Laddningen i hål 2 riskerar också att kastas ut. Då hålen nu ej kan samverka kommer trycket att ligga på under en längre tid och därmed ge upphov till längre sprickor in i berget.

3.2 Försättningens inverkan

Försättningens inverkan undersöktes i två fältprov. *Hypotesen var att en ökad försättning borde ge en ökad spricklängd* och därför valdes stora skillnader i försättningen:

Fältförsök	Försättning (m)	Hålavstånd (m)	VxE (m ²)	Volym (m ³)	Spec.laddn. (kg/m ³)
1	0,5	0,8	0,4	36	0,61
2	2,0	0,8	1,6	120	0,15

Skillnaden i volym utsprängt berg blev därför stor. Tre gånger mer berg sprängdes loss vid den större försättningen vilket gav en betydligt lägre specifik laddning.

Figur 7 och 8 visar laddningen av hålen i dessa fältförsök.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19
	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Håldim.	64	64	64	64	64	64	64	64	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
Spr.ämne	← Gurit 22 →			← Kimulux →			← Gurit 17 →			← Detonex 80 →									

Figur 7. Laddning av fältförsök 1 (April- 96)

	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10	U11	U12	U13	U14	U15	U16
	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Håldim.	51	51	51	51	51	51	51	64	64	64	64	64	64	64	64	64
Spr.ämne	← Det 80 →			← Gurit 17 →			← Gurit 22 →			← Kimulux →						

Figur 8. Laddning av fältförsök 2 (Nov- 96)

Resultat; försättning

Hålpiporna var fina från båda försöken. I försök 2 med försättningen 2 m var dock bergytan något mer skadad för sprängämnena med låg laddningskoncentration, 17 mm Gurit samt Detonex 80. Den stora försättningen resulterade också i mycket stora block, till skillnad från den fina fragmentering som normalt erhållits vid våra försök med mindre försättningar.

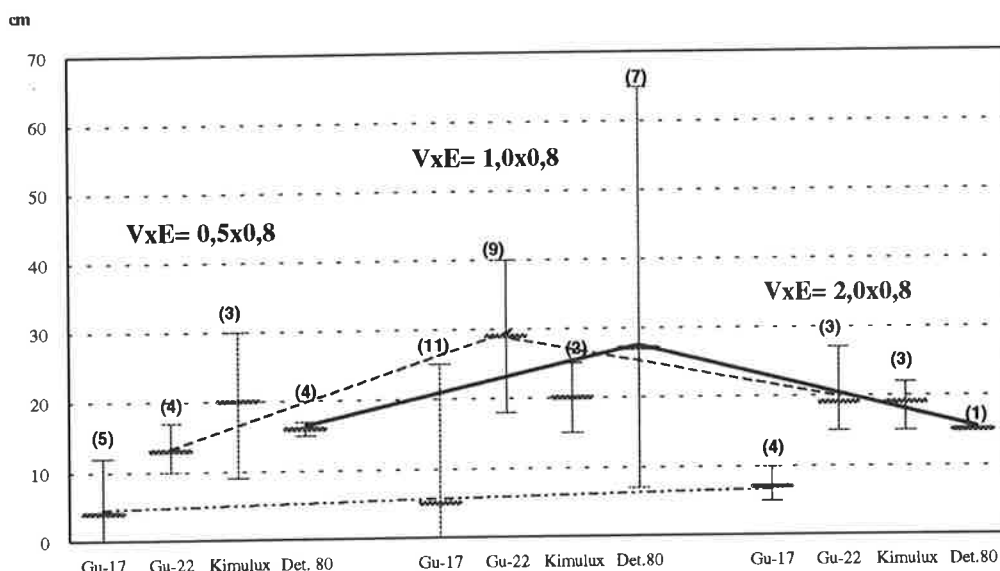
Försättningens inverkan på sprickutbredningen i kvarstående berg visas i tabell 1.

Tabell 1. Sprickutbredning för olika försättningar

Sprängämne	Medelspricklängder (cm)	
	V= 0,5 m	V= 2,0 m
Gurit 17	4	7
Gurit 22	13	19
Kimulux	20	19
Detonex 80	15	15

Resultaten visar alltså på en i absoluta tal marginell ökning av spricklängderna för Gurit 17 och Gurit 22 då försättningen ökas. Kimulux och Detonex uppvisar däremot oförändrade resultat. Dock har vi endast ett värde på Detonex med 2 m försättning varför detta värde är osäkert. En skillnad mellan dessa båda grupper är detonationshastigheten som är mer än dubbelt så stor i den senare gruppen.

Förutom prov med försättningarna 0,5 m och 2 m har prov tidigare utförts även med försättningen 1 m. Figur 9 visar samtliga dessa resultat inklusive variationsbredden och antal prov av resp sprängämne och försättning. Här framgår att spricklängderna (medelvärden) för Gurit 17 mm samt Kimulux i stort sett skulle vara oberoende av försättningen. För Gurit 22 mm samt Detonex 80 har vi däremot fått högre värden för 1 m försättning än för 0,5 m och 2 m försättning. För Detonex 80 bör dock observeras att spridningen av värdena är stor för 1 m försättning, samt att värdet för 2 m försättning är baserat på endast ett värde.



Figur 9. Spricklängder för olika försättningar och sprängämnen. I figuren finns såväl spridningsmått som antal prover också redovisade

Ökad försättning medför att en större volym berg skall förflyttas; ett större motstånd skall övervinnas. Till detta borde behövas en större kraft, men vår "kraft" = mängd sprängämne är lika stor fastän mängden berg ökar.

Genom flerhållssprängning fördelas kraften och släpps loss, tack vare den momentana initieringen, exakt vid samma tidpunkt. Detta innebär att stora mängder berg kan förflyttas trots att sprängämnemängden är liten. Tekniken att förflytta stora mängder berg med lite sprängämne används t.ex. i blockstensindustrin. Stora försättningar > 5m, tätt borrade hål laddade med små sprängämnemängder skapar en spricka mellan hålen och förflyttar berget några dm. Detta sker utan bakomvarande skador. Upptändningen sker momentant med detonerande stubin.

Att spränga momentant ger således speciella effekter. Om försättningen är stor och man ej har momentan upptändning så bör det ge betydligt mer skador i det kvarvarande berget.

Då provet med 2 m försättning resulterade i stora block kunde även dessa undersökas med avseende på sprickor. För såväl Gurit 17 mm som Gurit 22 mm liknade sprickbilden i det framförvarande berget det normala utseendet i det kvarstående berget. För Kimulux däremot blev det betydligt fler sprickor än normalt, se figur 10.

Här ser man också sprickor som börjar vid den fria ytan och går in i berget, sprickor som uppkommer genom dragpåkänningar. Berget framför hålet, försättningsberget, är så söndersprucket att det nästan helt fragmenterats som normalt vid mindre försättningar. Förklaringen till utseendet för Kimulux kan vara att Kimulux har betydligt högre VOD än Gurit vilket ger ett högre borrhålstryck.



Figur 10. Sprickutbredning i det lossprängda berget

3.3 Förladdningens inverkan

Inledande prov har gjorts för att undersöka förladdningens inverkan på sprickbilden. Proven som utfördes i augusti 1995 omfattar 11 hål. *Hypotesen var här att spricklängden borde öka vid förladdade hål.* Trycket skulle hållas inne under en längre tid och därmed kunna driva sprickorna längre än utan förladdning.

Hålen, som var 5 m långa, laddades till 4 m. Den översta metern proppades nu med grus i fraktionen 2/4 mm. Försättningen var 1,0 m och hålavståndet 0,8 m. Hålsättning och laddning framgår av figur 12.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
	⊗	⊗	⊗	⊕	⊗	⊗	⊗	⊕	⊗	⊗	⊗
Ø	51	51	51	51	64	64	64	64	64	64	64
Spräng- ämne	Gurit 17			Kimulux 42				Gurit 22			

Figur 12. Layout för test av förladdningens inverkan (Augusti- 95)

Resultat; förladdning

Vid sprängningen med förladdning var hålpiporna och bergytan lika fin som vanligt. Det fragmenterade berget var dock finare än normalt.

Sprickundersökningen gav en stor spridning av resultaten vilket innebär ett behov av betydligt fler undersökningar. Resultaten framgår av tabell 1.

Tabell 1. Spricklängder vid förladdade hål (parentes anger värden utan förladdning)

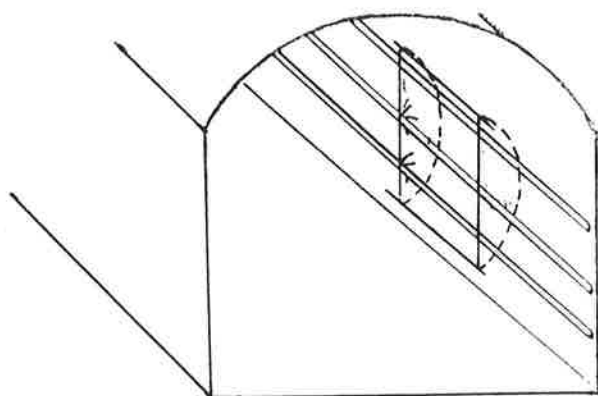
Sprängämne	Medelspricklängd <u>Mitthål</u> (cm)	Antal snitt (st)	Medelspricklängd <u>Alla hål</u> (cm)	Spridning <u>Alla hål</u>
Gurit 17	26 (5)	2	40	0-130
Gurit 22	16 (29)	2	31	12-75
Kimulux	28 (20)	2	44	25-75

Gurit 17 och Kimulux har fått en ökad spricklängd med förladdning medan spricklängden för Gurit 22 har minskat med förladdningen. Resultaten är inte helt lätt att tolka och kräver alltså fler prov. Gurit 17, med endast hälften av de övrigas laddningsmängd, påverkas mest av en förladdning. Gurit 22 och Kimulux som har ungefär samma laddningsmängd per meter verkar ha olika känslighet mot en förladdning. Spricklängden för Gurit 22 minskar med förladdning medan den ökar för Kimulux.

Vi har även tidigare sprängt några förladdade hål med Gurit 17 /4/ och även då fick vi en spricklängd på 25 cm.

4. SPRICKUTBREDNING I TUNNELVÄGGAR

SveBeFo har också utvecklat teknik för att studera sprickbildning vid tunneldrivning eller i bergskärningar. Tekniken innebär att ett antal parallella slitsar sågas i bergväggen, se figur 12.



Figur 12. Teknik för sprickkartering i tunnelväggar

De mellanliggande skivorna knackas bort varefter de kvarstående snittytorna beläggs med penetranter. På detta sätt framträder sprickor i bergväggen mycket tydligt och kan direkt mätas. Alternativet till denna teknik är de beräkningar av skadezonen som vanligtvis görs genom vibrationsmätningar.

Tekniken har använts i Dannemora, Äspö (SKB) /7/ samt hos LKAB /8/. I figur 13 visas resultatet från sprickkartering i LKAB.

Spricklängden i LKAB med strängladdad emulsion i $\varnothing$ 64 mm hål (en tunn sträng emulsion läggs längs hålet) blev ca 5 cm. Fulladdade emulsionshål gav däremot spricklängder på > 35 cm.

Samtliga våra mätningar av sprickor i tunnelväggar visar även här att det bästa resultatet, dvs kortaste sprickorna, erhålls vid frikopplade laddningar och med momentan initiering med elektroniksprängkapslar av konturhålen.

Metoden innebär att sprängningsresultatet relativt enkelt kan undersökas och kan användas vid höga krav på skonsam sprängning.



Figur 13. Sprickutbredning i tunnelvägg hos LKAB, Malmberget

5. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Försöken i Vånga har till dags datum, mars 1997, omfattat 225 hål i vilka vi undersökt sprickutbredning i 315 snitt. De undersökta parametrarna och antalet sprängda hål och sprickundersökta snitt finns sammanställda i tabell 2. Här framgår att underlaget för våra bedömningar i de allra flesta fall är mycket stort vilket betyder att resultaten kan anses ganska säkra. För vissa parametrar fordras dock mer undersökningar.

Med samma tabellhuvud som ovan kan man föra in samtliga resultat i en ny tabell, se tabell 3. Här finns även angivet hur många värden dessa spricklängder är baserade på.

5.1 Slutsatser

Resultaten av hittills utförda prov i Vånga omfattar inverkan av:

- sprängämne
- frikoppling
- försättning
- hålavstånd
- förladdning
- intervalltider

Resultaten från Vånga kan sammanfattas i följande punkter. En viktig förutsättning för dessa är dock att hålen sprängs momentant med elektroniska sprängkapslar. Resultaten avser också sprängning i Vångagranit.

1. Sprängämnen

Det är stor skillnad på sprickmönstret mellan de sprängämnen vi testat. Varje sprängämnestyp har sin egen specifika signatur.

- **Ökad laddningsmängd ger en ökad spricklängd**
- **Hög detonationshastighet ger mer sprickor**

2. Frikoppling

Prov med olika kopplingsgrader visar tydligt att förhållandet mellan laddningens diameter och hålets diameter har en mycket stor inverkan på sprickbilden.

- **Ökad kopplingsgrad ger en betydande ökning av spricklängden**
- **Frikopplade laddningar ger alltid kortare sprickor än fulladdade hål**

3. Försättning

Våra försök med 4-dubblad försättning visar att så länge man har utslag har inte försättningen någon nämnvärd betydelse för sprickutbredningen i det kvarstående berget.

- **Ökad försättning påverkar endast marginellt sprickutbredningen**

4. Hålavstånd

Några av försöken har visat att vid ökat hålavstånd börjar sprickor bilda bågar mellan hålen in i det kvarstående berget. Vi tror att sprickbildningen är mera känsligt för ett ökat hålavstånd än en ökad försättning.

- Ökat hålavstånd kan innebära långa bågformade sprickor in i berget

5. Förladdning

Förladdade hål ger en bättre fragmentering av materialet. Förladdade hål ger också i allmänhet en ökad sprickbildning.

- Förladdade hål ger i allmänhet längre sprickor än avladdade hål

6. Intervalltid

Resultaten för parametrarna ovan förutsätter momentan flerhålssprängning. Vi har använt elektroniska sprängkapslar. Sprängning med andra intervalltider än momentan eller spridning i tiderna ger längre sprickor.

- Momentan upptändning med $\Delta t = 0$ ms mellan närliggande hål ger kortast spricklängd
- $\Delta t \neq 0$ medför risk för ofullständig detonation och utkast av laddningar och betydligt längre sprickor från hål där laddning detonerat

Tabell 2. Undersökta parametrar i Vånga (siffran 30/23 anger 30 sågsnitt från 23 spränghål),
försättning = V, hålavstånd = E och EPD elektronikkapsel och Förl.= förladdat

Initiering	$\Delta t \neq 0$ EPD	$\Delta t \neq 0$ Nonel LP	$\Delta t = 0$ EPD	$\Delta t = 0$ EPD	$\Delta t = 0$ EPD	$\Delta t = 0$ EPD	$\Delta t = 0$ EPD	$\Delta t = 0$ EPD	$\Delta t = 0$ EPD Förl.	$\Delta t = 0$ EPD	Σ snitt/hål
VxE (m)	0,5x0,5	0,5x0,5	0,5x0,5	0,8x0,5	0,8x0,8	0,8x1,2	0,5x0,8	1,0x0,8	1,0x0,8	2,0x0,8	
17 mm Gurit 38 mm 51 mm	30/23	16/19	22/23	10/4	5/4		8/5	4/3 19/7	5/3	9/4	4/3 124/92
22 mm Gurit 24 mm 51 mm 64 mm		2/4	2/1 14/12	16/4	8/3	11/7	8/4	3/3 15/7	6/7	8/4	3/3 2/1 88/52
22 mm Kimulux 64 mm			8/9				8/4	9/11	5/3	6/4	36/31
Emulet 20 51 mm			7/8					11/9			18/17
Detonex 80 51 mm			12/10				7/6	14/7		3/3	36/26
Special Gu 22+pentyl			4/3								4/3
Σ snitt/hål	30/23	18/23	69/66	26/8	13/7	11/7	31/19	75/47	16/13	26/15	315/228

Tabell 3. Spricklängder för samtliga försök under perioden 93-96 (siffrorna anger medelvärdet och antal försök anges inom parantes),
försättning = V, hålavstånd = E och EPD elektronikkapsel och Förl.= förladdat

Initiering	$\Delta t \neq 0$ EDD	$\Delta t \neq 0$ Nonel LP	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 0$	$\Delta t = 0$ Förladd.	$\Delta t = 0$
VxE (m)	0,5x0,5	0,5x0,5	0,5x0,5	0,8x0,5	0,8x0,8	0,8x1,2	0,5x0,8	1,0x0,8	1,0x0,8	2,0x0,8
17 mm Gurit 38 mm 51 mm	>20	20 (6)	6(10)	14 (6)	10 (2)		4 (5)	15 (2) 5 (11)	15 (4)	7 (4)
22 mm Gurit 24 mm 51 mm 64 mm		40*	15(7)	18 (11)	22 (3)	47 (9)	13 (4)	90 (1) 29 (9)	16 (2)	19 (3)
22 mm Kimulux 64 mm			26 (5)				20 (3)	20 (2)	28 (2)	19 (3)
Emulet 20 51 mm			38 (5)					23 (7)		
Detonex 80 51 mm			21 (8)				16 (4)	27 (7)		15 (1)
Special Gu 22+pentyl			11 (2)							

* Endast ett hål

5.2 Rekommendationer

Rekommendationerna som lämnas här grundas på resultaten vi fått vid flerhålsprängning i pall i Vångagranit. Hur det blir i andra geologier kan vi ännu inte uttala oss om men resultaten i mer uppsprucket berg torde i alla fall inte ge upphov till kortare sprickor.

För kortast sprickbildning i kvarstående berg vid sprängning rekommenderas följande:

- Använd momentan initiering av konturhålen
- Använd om möjligt frikopplade laddningar
- Fyll aldrig hålen fulla med sprängämnen
- Använd korta hålavstånd
- Förladda ej hålen

Resultaten från våra försök ger en delvis ny bild av vilka skador- sprickor man kan förvänta sig vid kontursprängning. Ett verktyg som används idag vid sprängning är att beräkna skadezonen enligt den modell som Persson, Holmberg /10/ tagit fram. Denna modell används ofta vid design av sprängplaner. Modellen baseras på sambandet $V = kW^\alpha/R^\beta$ där V är svängningshastigheten, W är laddningsvikten och R är avståndet från laddningen medan α, β är konstanter beroende på bland annat berget. Man brukar säga att skador börjar uppstå vid svängningshastigheter mellan 700 och 1000 mm/s. Definitionen på skada är dock mycket otydlig. Modellen tar inte hänsyn till frikoppling vilket däremot Hustrulids /11/ skadezonsmodell gör. Ej heller tar modellen hänsyn till hålsättning och intervalltider.

Projekteringsanvisningar för den sk ringen /11/ i Stockholm och JärnvägsAMA /12/ anger "bedömt skadezonsdjup" för några vanliga sprängämnen. I Tabell 4 visas några av dessa värden tillsammans med resultaten från de sprängämnen som testats i Vånga.

Tabell 4. Skadezonsdjup för några sprängämnen

Förutsättningar	E, V = ? $\Delta t = ?$		V = E = 0,5 m $\Delta t = 0$
	<u>Skadezon i m</u>		<u>Spricklängd i Vånga</u>
Gurit 17 mm	0,3		0,05
Gurit 22 mm	0,5		0,15
Kimulux 42	0,7		0,25
Emulet 20	0,4		0,40
Detonex 80	0,3		0,20

Vångaresultaten avser här flerhålsprängning. Som synes skiljer sig de faktiskt uppmätta spricklängderna sig från de uppskattade skadezonsdjupen. Värdena är ej heller direkt jämförbara. Möjligen kan resultaten från enhålsprängning /2/, där spricklängderna är större, vara jämförbara med skadezonsvärdena, men dessa gjordes endast delvis för samma kombinationer av laddnings/håldiameter och då enbart i ett fåtal försök varför värdena inte direkt är jämförbara.

Eftersom den refererade modellen och dess framräknade skadezoner används vid design av sprängning så är det mycket viktigt att fastställa om dessa skadezoner är realistiska och vilken betydelse de kan ha t.ex. för behovet av bergförstärkning. Det finns således skäl till att ta fram underlag för nya rekommendationer till skonsam sprängning som komplement till de som nu används vid projektering.

SveBeFo har genom forskningen i Vånga fått unik kunskap om sprickor från sprängning. Vi har undersökt ett stort antal parametrar och hur dessa påverkar sprickbildning i berg. Det kan emellertid vara svårt att göra en enkel tabell för hur olika parametrar påverkar sprickbilden vid sprängning. I Tabell 5 visas ett förslag på hur en sådan tabell kan se ut. I tabellen beskrivs hur sprickutbredningen ändras vid olika hålsättningar, frikoppling, sprängämnestyp och intervalltider. Resultaten för intervalltidsskillnader $\Delta t \neq 0$ kan jämföras med de resultat som vi erhållit vid enhållsprängning. Det är också dessa värden som mest liknar skadezonerna enligt JärnvägsAMA. Tabellen kommer att uppdateras allt eftersom projektet fortskrider.

Tabell 5. Betydelsen av olika faktorer och sprängämnena för spricklängder; spricklängder i m

Spräng- ämnen	Håldim (mm)	Momentan initiering				Ej momentat	Enhåls- sprängning
		VxE 0,5x0,5 m	>V	>E	Minskad håldim.		
Gurit 17	51	← 0,1	← 0,1	?	> 0,1	0,1 →	0,25 →
Gurit 22	64	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	?	> 0,2	0,2 →	0,25 →
Kimulux 42	64	0,2 - 0,3	?	?	> 0,3	?	?
Detonex 80	51	0,15 - 0,2	?	?	> 0,2	?	?
Emulet-20	51	0,3 →	?	?	> 0,3	?	?

Tabellen måste också kompletteras med någon parameter som visar vad som händer med spricklängder i annat berg än i Vånga. Bergets naturliga sprickor påverkar starkt sprickutbredningen från sprängning. Sprickorna från sprängning kan både söka sig mot och hejdas av naturliga sprickor. De naturliga sprickorna kan således både förbättra resultatet vid skonsam sprängning som försämra resultatet.

6. FORTSATTA PROV

Trots det redovisade stora undersökningsmaterialet kvarstår många punkter att undersöka. I SveBeFo:s ramprogram 97-99 /13/ föreslås bl.a. följande punkter för området "Sprickbildning vid skonsam sprängning- fortsatta fältförsök i Vånga":

- förladdningens inverkan skall undersökas mer
- hålavståndets inverkan
- sprängämnets gasinnehåll/ gasenergi
- stötvågens inverkan
- andra sprängämnen
- geologins inverkan

Under början av perioden kommer undersökningarna att främst inriktas mot hålavstånd, förladdning och geologi.

Finn Ouchterlony på SveBeFo har börjat utvecklat en teoretisk modell att bestämma borrhålstrycket och därmed sprickbildningen /15/. Projektet är ett parallellprojekt till de fältförsök som görs i Vånga. En första ansats till detta visades i den tidigare sprickbildningsrapporten /4/. Modellen utgår från VOD och densitet för att ge borrhålstryck och slutligen spricklängder.

För att bättre kunna förklara uppkomsten av sprickor planeras ett samarbete med ICI. De har utvecklat ett avancerat datorprogram för simulering av sprängning /14/.

Borrhålstrycket har hittills inte kunnat mätas utan måste beräknas. Gunnar Persson på SveBeFo har nu utvecklat en sond för mätning av borrhålstrycket /16/. Med denna kan vi få betydligt bättre möjligheter att kontrollera olika modellers förutsägelse om trycknivåer och därigenom förklara uppkomsten av sprickor.

SveBeFo planerar att under hösten 1997 tillsammans med LKAB utföra skadezonsmätningar i tunnelväggar. Vibrationer från ett antal tillredningssalvor kommer att registreras och skadezonen beräknas. Därefter kommer sågning och sprickkartering att utföras i samma sektioner.

6. REFERENSER

1. Bergteknisk forskning. Ramprogram 1993-96. SveBeFo Rapport 1
2. Olsson, M., Bergqvist, I. Sprickutbredning i berg vid skonsam sprängning, SveBeFo Rapport 3, 1993
3. Olsson, M., Bergqvist, I. 1993. Crack Lengths from Explosives in Small Diameter Boreholes. Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Vienna 1993, sid 193-197, Balkema.
4. Olsson, M., Bergqvist, I. Sprickutbredning vid flerhållsprängning, SveBeFo Rapport 18, 1995.
5. Olsson, M., Bergqvist, I. Skonsam sprängning-oönskad sprickbildning. Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte 1996, sid 157-163.
6. Olsson, M., Bergqvist, I. 1996. Crack Lengths from Explosives in Multiple Hole Blasting. Fifth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Montréal 1996, sid 187-191, Balkema.
7. Olsson, M., Reidarman, L. Crack test from blasting at Äspö, Äspö Hard Rock Laboratory, Technical Note, TN-96-01z, 1996.
8. Fjellborg, S., Olsson, M. Grovhål i centrum, SveBeFo Rapport 27, 1986.
9. Holmberg, R., Persson, P.A. Design of Tunnel Perimeter Blasthole Patterns to Prevent Rock Damage. Proceedings, tunneling 1979, Institution of Mining and Metallurgy, London.
10. Hustrulid, W. The Practical Blast Zone in Drifting at the Kiruna Mine. Från rapport Skadezon vid tunneldrivning, Andersson, P., SveBeFo Rapport 8, 1993.
11. Niklasson, B., Sjöberg, C., Tenlén, G., Nilsson, L. Projekteringsanvisningar för skonsam sprängning i tunnlar inom yttre tvärleden. Nitro Nobels Sprängtekniska Konferens 1994.
12. Järnvägs AMA- Banverkets komplement till AMA 83.
13. SveBeFo:s ramprogram 97-99.
14. Minchington, A., Lynch, Peter. Fragmentation and heave modelling using a coupled discrete element gas. Fifth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Montréal 1996, sid 71-80, Balkema.

15. Ouchterlony, F. Prediction of crack lengths in rock after cautious blasting with zero inter-hole delay, SveBeFo Rapport 31, 1997.
16. Persson, G. LHM-metoden. SveBeFo Rapport 34, 1997.
17. Bergström, J., Shaikh, N. Malmer, industriella mineral och bergarter i Kristianstads län. SGU, Rapporter och meddelanden nr 22, Uppsala.

APPENDIX 1

Förutsättningar

Liksom vid tidigare sprängningar utfördes även flerhållssprängningarna i Vånga. Vånga ligger i nordöstra Skåne ca 2 mil norr om Kristianstad. På Vångaberget finns ett flertal blockstensbrott. Det första fältförsöket (1993) utfördes i blockstensbrottet ägt av dåvarande AKF, numera Emmaboda Granit, medan alla övriga försök är utförda i grannbrottet som ägs av Nilsson och Söner Granit AB, Nilsten.

Brotten exporterar den största delen av sin produktion i form av stora släthuggna stenblock. Dessa används sedan till gravstenar och fasadbeklädnad. Det är dock endast ca 20-25 % av uttaget berg som har tillräcklig kvalitet för försäljning.

Berget i Vånga består av en röd till rödgrå, i allmänhet medel- till grovkornig granit. Graniten är biotitstrimmig och ofta fältspatporfyrisk. Vångagraniten innehåller ca 40 % mikroklinpertit, ungefär lika mycket kvarts, högst 10 % plagioklas och några få procent biotit och muskovit /17/. Graniten har en tryckhållfasthet på 200-250 MPa och en draghållfasthet på 9-12 MPa. Ytterligare tester utförda på KTH, avd för jord- och bergmekanik, visar att E-modulen är ca 70 GPa, tvärkontraktionstalet ca 0,25 och P-vågens gånghastighet ca 5300 m/s.

Stenbrotten använder oftast Detonex 20 eller Detonex 40 vid sprängning av tätsömmar och liggarhål. Man borrar klena hål, Ø 41 mm med c-c 20-30 cm, 5-6 m långa i tätsömmar och betydligt längre vid liggarhål. Hålen borraras mycket raka och med den försiktiga sprängningen blir också väggar och sula mycket släta. Här har nog den vanliga bergarbetaren mycket att lära! Efter tätsömsprängning delas berget ner i mindre delar med Detonex, krut och kilteknik. Kilningstekniken är ett tungt hantverksjobb med mycket imponerande resultat då blockstensarbetarna kan styra sprickbildningen i önskad riktning. Resultatet blir mycket fina block utan sprängskador.

APPENDIX 2

Försöksteknik

Försöken utfördes i några speciellt utvalda pallar i brotten. Försöksmetodiken består huvudsakligen av 5 steg:

1. Borrning och sprängning av försökshål
2. Uttag av block bakom de sprängda försökshålen
3. Sågning av blocken
4. Penetrantvätska påföres sågsnitten
5. Kartering av sprickor

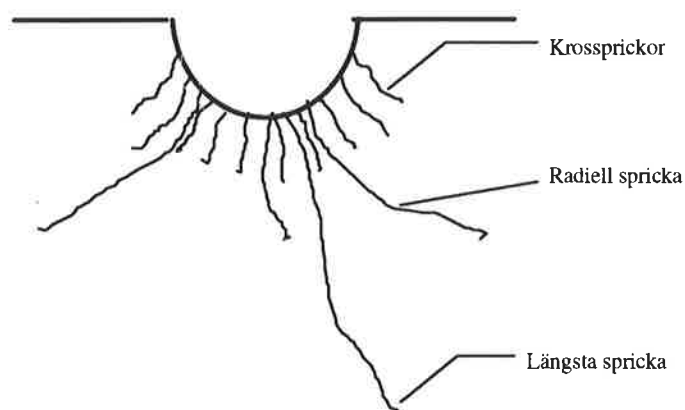
Även om berget i Vånga är av mycket god kvalitet så finns alltid vertikala och horisontella sprickor. Avståndet mellan de horisontella sprickorna är oftast > 1 m. Pallarna har också naturligt "svall" i botten, dvs naturliga slag finns vilket betyder att liggarhål ej behövt borraras.

Pallhöjden var ca 5 m och pallarna var 10-15 m långa. Borrningen utfördes med en Tamrock DHA 400 av brottets egen personal. De hjälpte också till vid blockuttag, neddelning och transport av blocken upp ur brottet.

Blocken transporterades därefter till Göinge Stenförädling AB, där de sågades vinkelrätt mot de sprängda försökshålen enligt uppmärkta snitt.

Sprickkarteringen med penetranter fungerade utmärkt. Metoden medger att även mycket små sprickor som ej skulle vara synliga utan penetrant framträder tydligt. Metoden kan dock vara tidskrävande då man måste vara noggrann med både rengöring och torkning av snittytan.

Sprickorna har indelats i olika grupper, den längsta sprickan, radiella sprickor och krossprickor, se figur 14. De radiella sprickorna har definierats som sprickor längre än 10 cm medan krossprickorna är sprickor kortare eller lika med 10 cm. **De spricklängder som redovisas i rapporten avser den maximala spricklängden.**



Figur 14. Definition av spricktyper

Varje sprängning omfattade hålgrupper av lika laddade hål. För att i största möjliga mån undvika randeffekter vid sprickkarteringen av sågsnitten har endast resultaten från mitthålet eller mitthålen i varje grupp tagits med i denna redovisning.

Utan den mycket duktiga och intresserade personalen, både i stenbrotten och vid sågen, hade projektet inte kunnat genomföras.

APPENDIX 3

Organisation

Projektet har styrts av en referensgrupp. Referensgruppen har bestått av:

Leif Johansson, ordförande	Vägverket
Ingvar Bergqvist, sekreterare	Dyno Nobel
S-O Båvik	Vägverket
Jan Malmatorp	Banverket
Torbjörn Naarttijärvi	Kimit AB
Bengt Niklasson	SKANSKA Teknik AB
Anders Nordqvist *	Kimit AB
Mats Olsson, projektledare	SveBeFo
Finn Ouchterlony	SveBeFo

* Ersatte Torbjörn Naarttijärvi under 1996.

APPENDIX 4

Sprängämnena

I försöken har vi använt de i Sverige vanligaste sprängämnena för skonsam sprängning, Gurit (17 mm och 22 mm), Kimulux 42, Detonex 80 samt Emulet 20. Sprängämnena skiljer sig åt, främst genom detonationshastigheten (VOD), se tabell 6.

Tabell 6. Specifikation av de använda sprängämnena

Spräng- ämne	Diameter (mm)	Hål- diameter (mm)	Fri- koppling *	Densitet (kg/l)	VOD (m/s)	Gas- volym (l/kg)	Energi (MJ/kg)	Laddnings- mängd (kg/m)
Gurit	17	51	0,33	1,00	2000	930	3,40	0,21
Gurit	22	64	0,34	1,00	2000	930	3,40	0,40
Emulet 20	Bulk	51	1	0,20	1800	1117	2,60	0,45
Kimulux 42	22	64	0,34	1,15	5000	903	3,43	0,43
Detonex 80	10,6	51	0,21	1,10	6500	780	5,90	0,08

* laddningsdiameter/håldiameter

Gurit och Kimulux är patronerade sprängämnen. Gurit är ett nitroglycerin/nitroglykol baserat sprängämne medan Kimulux är ett emulsionssprängämne. Detonex är en detonerande stubin med pentylkärna och har, jämfört med de andra sprängämnena, en mycket låg laddningsmängd per meter men en betydligt högre detonationshastighet. Emulet 20 är ett ANFO-baserat bulksprängämne, som helt fyller ut hålet, och där siffran 20 anger att volymstyrkan är 20% av ett fulladdat ANFO-hål.

Sprängämnena för projektet har tillhandahållits av Dyno Nobel och Kimit. Vid försöken har Dyno Nobels elektroniksprängkapslar använts för att garantera exakta initieringstider. Med dessa sprängkapslar kan man få så korta intervalltider som 1 ms och med endast 0,1 ms tändspidning.