



## **STÖTVÅGENS OCH GASENS INVERKAN PÅ SPRICKBILDNING VID SKONSAM SPRÄNGNING**

Mats Olsson  
Ingvar Bergqvist  
Finn Oucherlony



**STÖTVÅGENS OCH GASENS  
INVERKAN PÅ SPRICKBILDNING  
VID SKONSAM SPRÄNGNING**

**The influence of shock wave and gas  
pressure on blast induced cracks**

Mats Olsson  
Ingvar Bergqvist  
Finn Ouchterlony

SveBeFo Rapport 59

Stockholm 2002  
ISSN 1104-1773  
ISRN SVEBEFO-R--59--SE

## FÖRORD

Under en dryg tioårsperiod har SveBeFo (före 1993 SveDeFo) genomfört en serie väl kontrollerade sprängningsförsök i fält, till stor del i ett stenbrott i Vånga i Skåne, för att öka kunskapen om sprängningsförloppet och särskilt effekterna på det kvarstående berget. Huvudsyftet har varit att få ett bättre underlag för skonsam sprängning, dvs när man vill åstadkomma en jämn kontur med begränsad sprickbildning.

Resultaten av fältförsök och efterföljande analyser har under hand presenterats i rapporter, artiklar och föredrag, även internationellt. De har tagits väl emot och kommit att påverka både bygghandlingar och praktiskt sprängningsarbete i olika sammanhang. De har bland annat lett till modifieringar av en tidigare använd tabell för bedömning av skadezoner. De senaste årens resultat sammanfattas nu och en rapport kommer att tryckas denna vår för att ge ytterligare stöd för en förbättrad sådan tabell.

I föreliggande rapport redovisas erfarenheter från försöksperioden med tonvikt på betydelsen av stötvåg respektive gastryck för sprängningsförlopp och sprickbildning, en fråga som särskilt undersökts i en del av försöken under tiden 1998 - 2001. Intressanta resultat har framkommit som tyder på att det är stötvågen som leder till sprickor i kvarstående berg i dessa fall medan gastrycket huvudsakligen bidragit till fragmentering och framkast av det lossållna berget.

I och med publiceringen av dessa två rapporter, tillsammans med tidigare publikationer under försöksperioden, kan de s k Vångaförsöken betraktas som avslutade och avrapporterade. Att forskningen inom området därmed skulle vara avslutad är inte troligt. Erfarenheterna från praktisk tillämpning av dessa kunskaper, bland annat genom användning av en ny skadezonsanvisningar, kommer att ge uppslag och anledning till nya forskningsinsatser. Vi kan se fram emot en fortsatt kunskapsutveckling i nya projekt inom ett viktigt och intressant teknikområde!

Projektledare och forskare har varit Mats Olsson under medverkan främst av Ingvar Bergqvist, Dyno Nobel och Finn Ouchterlony, SveBeFo. Projektet har följts av en referensgrupp, vars medlemmar skiftat genom åren. Personer som särskilt förtjänar nämnas för engagerat stöd med idéer och råd är från den första tiden Leif Johansson och senare Sven-Olof Båvik vid Vägverket Produktion, därtill Bengt Niklasson, Skanska Teknik, Jan Malmtorp tidigare Banverket, Torbjörn Naartjärvi, LKAB samt Anders Nordqvist vid Kimit.

Stockholm i januari 2003

Tomas Franzén

## SAMMANFATTNING

Vid bergsprängning uppstår sprickor i berget runt borrhålet. Sprickor framför hålet samverkar, gas tränger in, sprickorna utvidgas och berget börjar brytas loss. Sprickbildning bakom hålen, i det kvarstående berget, har under en längre tid undersökts av SveBeFo. Vi vet genom vår forskning vilka faktorer som påverkar sprickbildningen och hur sprickbildningen i det kvarstående berget kan reduceras. Men hur uppstår egentligen sprickorna? Den vanligaste förklaringen till sprickbildning har att göra med en kombination av gas- och stötvåg. Vid detonationen ger stötvågen upphov till sprickbildning varefter gas tränger in i sprickorna som förlängs och utvidgas. En annan teori har presenterats av Brinkmann. Han hävdar att sprickbildningen främst beror av stötvågen medan gasen huvudsakligen kastar fram berget.

SveBeFo har vidare undersökt stötvågens och gasens inverkan på sprickbildning genom ett antal fältförsök i några utvalda blocksstenbrott. Ett stort antal hål har sprängts med Gurit, Detonex samt Kimulux. För att isolera gasen har sprängämnet laddats i Swellexbultar som blåsts upp i borrhålen. I andra borrhål har vi undersökt förladdningens inverkan på sprickbildning dvs gasen hålls inne under en längre tid. För jämförelsens skull har vi också undersökt avladdningens inverkan på sprickbildning. I syfte att undersöka hur borrhålstrycket påverkar sprickbildningen sprängdes även ett antal stenblock. I varje block sprängdes två hål och ett av dessa hål försågs med en tryckmätningcell.

Resultatet från dessa undersökningar visade att spricklängden för samma sprängämne inte ändras nämnvärt vid av- eller förladdning. Fältförsöket med laddning i Swellexrör gav samma spricklängd som avladdade hål i detta försök. Tryck-tidkurvan från emulsion liknar tryck-tidkurvan från ett ideellt sprängämne, dvs. en snabb tryckhöjning och därefter en snabb trycksänkning. Gurit har en annorlunda tryck-tidkurva. Här faller trycket inte lika snabbt och detta medför troligen att spricklängderna för Gurit kan påverkas mer vid ändringar av ladd- och tändplaner jämfört med emulsionssprängämnena.

Slutsatsen blir att det är stötvågen som ger sprickbildning i kvarstående berg medan gasen troligen mest bidrar till fragmentering och framkast.

Författarna tackar särskilt Shulin Nie för hans insatser vid blockförsöken.

## SUMMARY

In blasting, a few or many cracks are driven from the borehole into the rock. But what causes the cracks? The most common theory of breakage consists of two stages, first the shock wave causes radial cracks to form around the hole then the gases penetrate into the cracks, and widen them and make them longer. Another theory presented by Brinkmann suggests that the back damage is primarily controlled by shock and that the gas penetration is the mechanism controlling breakout of the burden.

Recent research at SveBeFo has examined this matter further. Several tests including four explosives have been carried out in dimension stone quarries. The explosives were Gurit (a nitroglycerine/nitroglycole sensitised explosive), Emulite and Kimulux (cartridged emulsion) and Detonex (detonating cord). A large number of holes have been blasted simultaneously and the cracks in the remaining rock were then studied. In some of these holes tubular Swellex bolts were inflated and decoupled charges put inside the tubes without stemming. Other holes were identically charged but without the lining. Finally some holes were also stemmed. In another test some granite blocks were charged as above and the bore hole pressures were measured.

For the same explosive there was no significant difference in crack lengths between holes charged normally (no stemming) and holes with stemming. In the test with charged steel liners the crack lengths were nearly the same as the crack lengths from unstemmed holes. The pressure curve from the emulsion is similar to that of an ideal explosive, a short rise time and a quick drop of pressure. While, on the other hand, the duration of the pressure curve from Gurit is longer and probably more sensitive to different influences.

The tests further showed that the shock wave travels into the rock and causes cracks in the remaining rock while the gases seem more responsible for moving the rock.

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	INLEDNING/BAKGRUND	1
	1.1 Olika teorier	1
2.	MÅLSÄTTNING	2
3.	GENOMFÖRANDE	2
	3.1 Test med stålklädda hål och inledande test med förladdning	2
	3.2 Test i stenblock	7
	3.3 Fortsatta försök med förladdning	10
4.	SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER	17
5.	REFERENSER	19
6.	BILAGOR	20

## 1. INLEDNING/BAKGRUND

Bergsprängning innebär en kombination av två önskemål. Berget framför de laddade borrhålen skall sönderdelas samtidigt som det kvarstående berget bakom hålen skall vara intakt. Sprängämnet i borrhålet känner inte till dessa önskemål. Vid all bergsprängning trycksätts borrhålets väggar, borrhålet utvidgas och krossprickor uppstår närmast hålet. En stötvåg sprider sig i berget från hålet. Vid den fria ytan uppstår dragspänningar och om bergets draghållfasthet överskrids bildas sprickor och sönderbrytning av berget påbörjas. Gastrycket utvidgar hålet ytterligare och gasen börjar tränga in i naturliga sprickor samtidigt som den börjar pressa den fria ytan framåt. Ytterligare sprickor uppstår och fragmenteringsprocessen är nu inne i sitt intensivaste skede. Delar av den fria bergytan börjar att lossna och accelereras utåt av den påtryckande gasen. Den fria bergytan spricker upp ytterligare och gastrycket i hålet minskar kraftigt.

Förloppet vid bergsprängning består således av två huvudskeden en stötvågsfas och en efterföljande gasinträngningsfas.

Vad händer då närmast hålväggarna och i det kvarstående berget vid sprängning? Jo beroende på hur hålen laddats, hålavstånd och hur hålen initierats uppstår även sprickor i det kvarstående berget. En viktig fråga för bedömning av sprickutbredningen är vilket skede som egentligen orsakar dessa sprickor, är det stötvågs- eller gasinträngningsfasen? Här följer nu några olika teorier för sprickornas uppkomst.

### *Olika teorier*

Den vanligaste uppfattningen är att stötvågen ger upphov till radiella sprickor runt hålet och att gasen sedan tränger in i dessa och förlänger och vidgar sprickorna. Denna teori hittar man bl.a. i Langefors och Kihlströms bok *Rock Blasting* /1/. Om detta är riktigt borde spricklängden öka med den tid som hålet utsätts för gastryck.

En annan teori presenterades av Brinkmann på den 2:a och 3:e Fragblastkonferenserna /2,3,4/. Brinkmann hade gjort försök i stålrör som placerades i borrhål. Stålrören laddades sedan med sprängämnen vilket innebar att gasen ventilerades bort ur rören ungefär som i en skorsten. Två olika sprängämnen testades, dels en emulsion med hög VOD (detonationshastighet) och dels en dynamit med lägre VOD. Trycket mättes i stålrören och rörelsen i berget mättes såväl framför som bakom hålen. Brinkmann drog följande slutsatser:

- trycket från emulsionen hade en snabbare stigtid och föll därefter snabbare än för dynamit
- gasen är den dominerande mekanismen för kasthastigheten på berget medan stötvågen reglerar sönderbrytningen
- sönderbrytningen var störst för emulsion
- uppsprickningen i det kvarstående berget blev störst från emulsion
- styckefallet och sprickor i kvarstående berg beror på stötvågen

SveBeFo har under ett antal år undersökt sprickbildning i kvarstående berg /5,6,7,8,9/. Mer än 500 hål har sprängts i vertikala pallar i blockstensbrott. Vi har också sprängt många tunnel-salvor samt en längre vägs kärning. I samtliga salvor har vi undersökt sprickbildningen bakom de sprängda raderna. Antingen har block tagits ut och sågats vinkelrät mot spränghålen eller så har slitsar sågats in i bergväggarna. Genom att spraya en penetrantvätska på sågsnittet framträder sprickorna tydligt. Försöken har visat att när allt annat är lika:

- spricklängden minskar vid frikoppling (laddningsdiameter/håldiameter)

- momentan initiering reducerar spricklängden
- hög VOD ger ett stort antal fina sprickor nära hålet
- spricklängden för Gurit ökar med ökat hålavstånd
- vatten i hål ger ökad sprickbildning

Data från dessa undersökningar behandlas och ger input till underlag för nya skadezonstabeller /10/.

Resultaten från Brinkmann och våra tidigare sprickundersökningar bidrog till ett beslut att göra en fördjupad studie om orsaken till sprickbildning på SveBeFo.

## 2. MÅLSÄTTNING

Målsättningen med dessa försök var att undersöka vad som orsakar sprickbildning i kvarstående berg, stötvåg eller gastyck.

## 3. GENOMFÖRANDE

Följande fyra fältförsök har genomförts för att undersöka gasen resp. stötvågens inverkan på sprickbildning i kvarstående berg:

- test med stålklädda borrhål
- test med förladdade hål
- test i stenblock
- test med förladdade hål

Samtliga tester har gjorts i blockstensbrott. De två första testerna gjordes i Vånga (Kristianstad), stenblockstesterna i Svenneby (Vikbolandet) och det sista testet i Hallinden (Lysekil).

### 3.1 Test med stålklädda hål och inledande test med förladdning

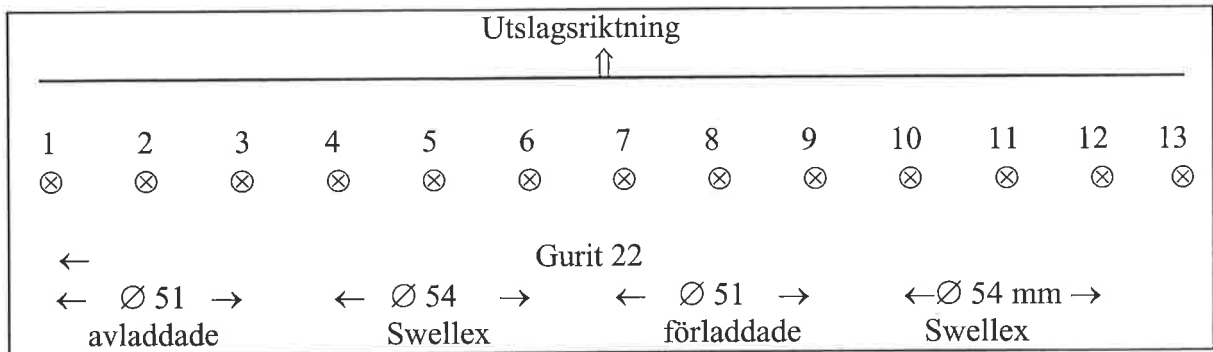
För att efterlikna Brinkmans försök med sprängning i stålrör där gasen hindras tränga in i sprickorna beslöt vi att använda Swellexbultar som infodring.

Innan fältprovet i Vånga undersökte vi vilka Swellex-rör som skulle vara lämpliga. Detta prov utfördes i Atlas Copco:s provgruva. Vi kom fram till att ett uppblåst Midi-Swellex skulle passa bra i 54 mm hål men för att behålla samma kopplingsgrad vid sprängningarna utan Swellex beslöts att håldimensionen vid fältförsöket skulle vara på 51 mm. För vårt prov i berg, där vi inte ville skada berget, rekommenderade Atlas Copco uppblåsning till 120-150 bars tryck (normalt tryck för att blåsa upp Swellex är 300 bar).

Vid fältförsöken användes 6 m långa Midi-Swellex med 2 mm godstjocklek och sprängämnet var 22 mm Gurit från Dyno Nobel.

Fältförsöket genomfördes i maj 1998 i Nilstens blockstenstäkt i Vånga och fick följande layout, se figur 1. Atlas Copco tillhandahöll Swellexrör, pump och borrhåll.





Försättning (V): 1,0 m  
 Hålavstånd (E): 0,8 m  
 ExV : 0,8 m<sup>2</sup>

Figur 1. Borr- och laddplan för försöket hos Nilsten

Swellexrören stoppades ner i hålen och blåstes upp. De hade en tendens att vrida sig i hålet och behövde hållas fast under uppblåsningen. De längsgående skarvarna på rören vändes mot utslagsriktningen. Efter uppblåsningen skars rören av och blåstes rena från vatten varefter de laddades med 22 mm Gurit. Hål 7-9 förladdades med 2 m grus med kornstorlek 2-4 mm.

Hypotesen för försöket var :

Stötvågen ger sprickbildning i kvarstående berg om  $L_i = L_o$

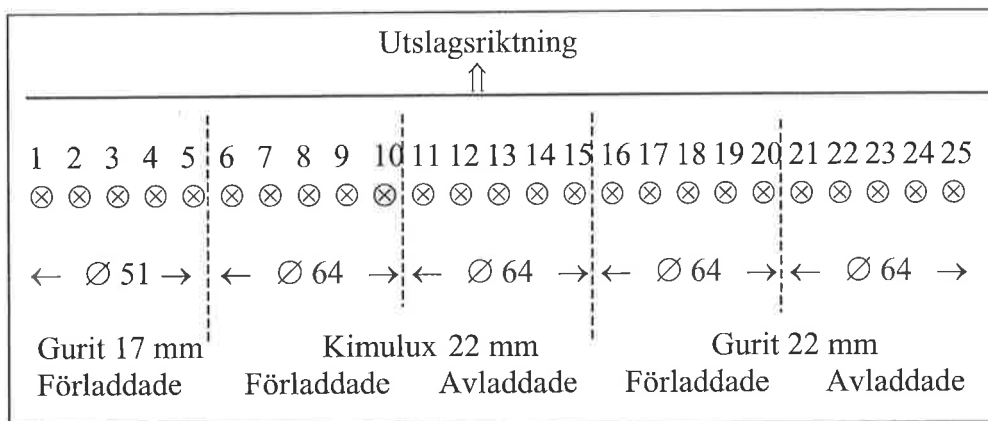
Gasen ger sprickbildning om  $L_i < L_o < L_f$

Där  $L_i$  = spricklängd i inklätt hål

$L_o$  = spricklängd avladdat hål

$L_f$  = spricklängd i förladdat hål

Det andra försöket utfördes också i Vånga men i Swimpex täkt. Syftet med det andra testet var att undersöka inverkan av förladdade hål. Borr- och laddplanen för detta försök framgår av figur 2. Sprängämnenäna var Gurit från Dyno Nobel och Kimulux 42 från Kimit.



Försättning (V): 1,0 m  
 Hålavstånd (E): 0,8 m  
 ExV : 0,8 m<sup>2</sup>

Figur 2. Borr- och laddplan för försöket hos Swimpex

## Resultat

Fint utslag och fina hålpipor åstadkoms i båda försöken. Resultatet av karteringen framgår av tabell 1 (försök 1) och 2 (försök 2).

Tabell 1. Resultat efter sprickkartering - försök 1. Alla hål laddade med 22 mm Gurit

Hål/Snitt	Maximal spricklängd (cm)	Radiella sprickor (cm)	Antal (st)	RxA (cm)	Kross-sprickor (cm)	Antal (st)	KxA (cm)	Övrigt
Y1:2	20	12	3	36				Båge m 2:2
Y1:4	18	15	3	45				Spricka //yta 0,2 m från ytan
<b>Y2:2</b>	<b>40</b>	15	4	60	5	4	20	Naturlig spricka
<b>Y2:4</b>	<b>20</b>	20	2	40	5	5	25	
Y3:2	0	0	0	0	0	0	0	
Y3:4	12,28	15	2	30				
Y4:2	10				5	10	50	Stopp mot spricka
Y4:4	0	0	0	0	0	0	0	Oladdat här!
<b>Y5:2</b>	<b>35</b>	30	2	60	5	10	50	
<b>Y5:3</b>	<b>22</b>	20	3	60				Lång spricka
<b>Y5:4</b>	<b>38</b>	38	1	38	5	8	40	Lång spricka Båge mot 6
Y6:2	44,45,18	25	4	100	5	4	20	Båge mot 7
Y6:3	30	15	4	60	5	>5	>25	
Y6:4	20	20	1	20	5	≥10	>50	Båge mot 7
Y7:2	0	0	0	0	0	0	0	?
Y7:3	16	16	1	16				
Y7:4	15	15	2	30				Båge mot 6
<b>Y8:2</b>	<b>20</b>	20	4	80	3	6	18	Båge 8,9:2
<b>Y8:3</b>	<b>13</b>	13	4	52	5	10	50	Spricka // yta
Y9:2	17	12	4	48				Svårtolkad
Y9:3	16	16	1	16	5	5	25	
Y10:3	Swellex ej i botten							
<b>Y11:2</b>	<b>15</b>	15	1	15				Få sprickor!
<b>Y11:3</b>	<b>(50)</b>	20	4	80	10	≥5	>50	Spricka // yta
<b>Y12:2</b>	<b>30</b>	20	3	60	10	>10	>100	Båge mot 13
Y13:2	(0)	Ø 54 mm						

### Förklaring:

- Maximal spricklängd = den längsta sprickan  
 Radiell spricklängd = genomsnittlig längd på sprickor > 10 cm  
 Krosssprickor = sprickor ≤ 10 cm  
 RxA = sammanlagd spricklängd  
 Mitthålen i hålgrupperna har markerats med fetstil  
 ( ) = spricklängd som tagits bort (ej relevant värde)

Tabell 2 Resultat efter sprickkartering - försök 2

Hål/ Snitt	Spräng- ämne	Maximal spricklängd (cm)	Radiell (cm)	Antal (st)	RxA (cm)	Kross- sprickor (cm)	Antal (st)	KxA (st)	Övrigt
1:2	Gu-17	34	34	1	34	2	2	4	
3:2	"	11	11	1	11	10	1	10	
4:2	"	40	40,15	2	55	-	-	-	?
5:2	"	0	-	-	-	-	-	-	Detonerat?
6:2	Kim-22	32	32,20,23	5	115	10	10	100	
7:2	"	32	32,25	5	118	10	10	100	Lång spricka naturlig?
8:2	"	38	25	4	100	10	>10	100	
9:2	"	30	22	6	132	10	>10	100	
12:3	"	30	30,25	4	91	10	>10	100	
12:4	"	40	40,20,22 24,20,30	6	156	10	>20	>200	Spindelvävs- mönster
13:3	"	30	30	6	180	10	>10	>100	"
13:4	"	33	33	5	165	10	>20	>200	
14:3	"	30	30	4	120	10	>10	100	
16:2	Gu-22	20	20,15	3	50	8	10	80	
16:3	"	26	26,19,21	3	66	8	10	80	
17:2	"	15	15	3	45	5	5	25	
17:3	"	22	20	7	140	7	10	70	
18:2	"	27	12,27,20	3	59	5	3	15	Båge mot 17,19
19	"	16	16	1	16	5	1	5	
19:2	"	42	42,40	4	133	8	10	80	Båge mot 18
20	"	0	-	-	-	-	-	-	I förladdning
21	"	26	26,15,26	3	67	-	-	-	
21:2	"	15	15	1	15	8	5	40	Spricka // ytan
22:2	"	(0)	-	-	-	-	-	-	??
23:2	"	15	15	2	30	5	6	30	
24:2	"	17	17	1	17	5	4	20	

## Förklaring:

Rastrerade partier är förladdade hål; orastrerade avladdade hål

Gu-17 = 17 mm Gurit

Gu-22 = 22 mm Gurit

Kim-22 = 22 mm Kimulux 42

( ) = spricklängd som tagits bort (ej relevant värde)

Snitt 4:2 (med 17 mm Gurit) uppvisar stor spridning i spricklängden.

En sammanställning av spricklängderna för de båda försöken visas i tabell 3. För att undvika påverkan från kanthål visas här spricklängderna från mitthålen i varje sektion.

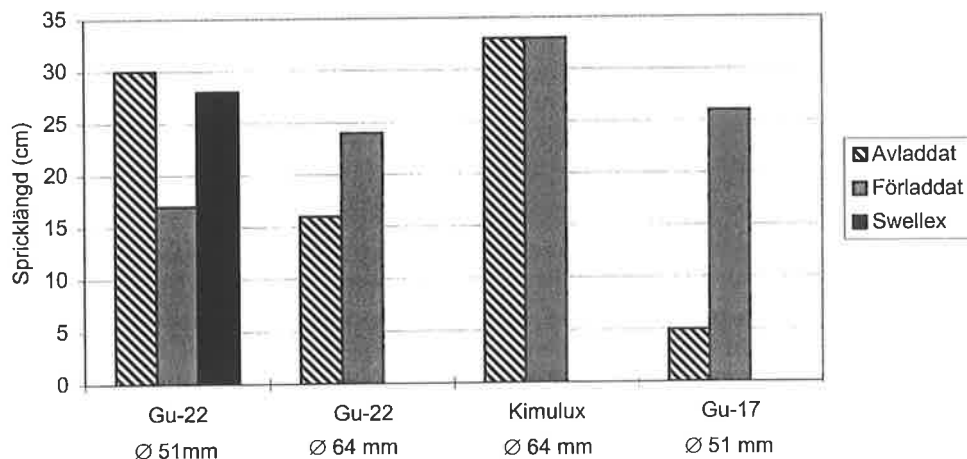
Tabell 3. Sammanställning av uppmätta spricklängder

Sprängämne	Laddat	Håldimension	Mitthål i grupp	Medelvärde
22 mm Gurit	Avladdat	51 mm	40,20	30
22 mm Gurit	Avladdat	64 mm	15,17	16
22 mm Kimulux	Avladdat	64 mm	30,40,30,33,30	33
22 mm Gurit	Swellex	54 mm *	35,22,38,15,30	28
22 mm Gurit	Förladdat	51 mm	20,13	17
22 mm Gurit	Förladdat	64 mm	15,22,27,16,42	24
17 mm Gurit	Förladdat	51 mm	11,40	26
22 mm Kimulux	Förladdat	64 mm	32,38,30	33

Förklaring:

\* Swellex-röret med godstjocklek på 2 mm ger  $\varnothing_i = 50$  mm (håldimension 54 mm). Detta innebär för laddning med Swellex en frikoppling på  $22/50 = 0,44$ . Håldimensionen utan Swellex rör var 51 mm och därför blir frikopplingen  $22/51 = 0,43$

Dessa resultat visas även i stapeldiagram, se figur 3. Diagrammet har kompletterats med spricklängden för 17 mm Gurit, avladdat i 51 mm hål.



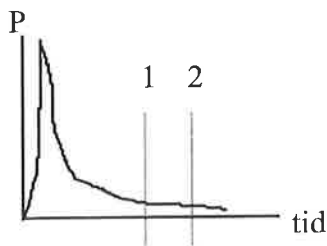
Figur 3. Resultatet från de olika försöken med stöt/gasvåg

Figur 3 visar att det inte är någon större skillnad på spricklängder mellan avladdade hål och sprängning i Swellex-rör vilket kan tyda på att *det är stötvågen som orsakar sprickorna*. Resultaten från försöken med förladdning är svårtolkade. Här ökar spricklängden för 22 mm Gurit i 64 mm hål medan spricklängden minskar för samma sprängämne i 51 mm hål. Däremot tycks inte spricklängden påverkas för Kimulux. En förklaring till detta skulle kunna vara de olika sprängämnenas tryck-tid förlopp.

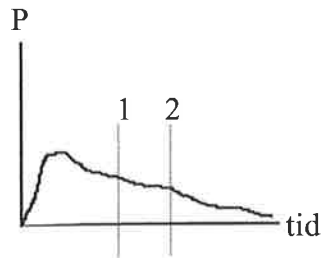
Man brukar skilja på två typer av detonationsförlopp, ideal resp. icke ideal detonation. Vid en ideal detonation frigörs hela den kemiska energin i detonationsfronten. Dessa förlopp kan man hitta främst hos militära sprängämnen. Hos civila sprängämnen är förloppet normalt inte detsamma. Här frigörs inte hela energin direkt utan det finns en förbränningszon bakom detonationsfronten. Man brukar benämna detta för en icke ideal detonation och anledningen till de ofullständiga förbränningen beror bl.a. på sprängämnet, på inneslutningen samt på kopplingsgraden (förhållandet sprängämnesdiameter/håldiameter). Emulsioner har ett förlopp som påminner mer om ideal detonation än Gurit. Då en emulsion detonerar stiger trycket snabbt till högre värden och sjunker därefter också snabbt. För ett mer icke idealt sprängämne

som Gurit är topptrycket lägre men trycket behålls under en längre tid och kan därför var känsligare för yttre påverkan, se figur 4.

Ideellt (**Kimulux**)



Icke ideellt (**Gurit**)



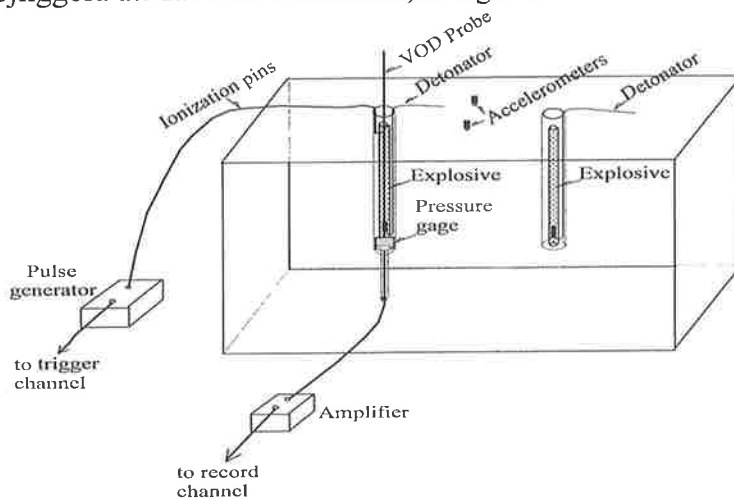
Figur 4. Principbild av tryck-tidförlopp där 1 anger avlastning av tryck (P) utan förladdning och 2 avlastning av tryck (P) med förladdning

Det är liten tryckskillnad mellan 1 och 2 för mer ideala emulsionssprängämnen som Kimulux. Emulsioner kan följaktligen vara mindre känsliga för sprickutbredning oavsett om hålen är förladdade eller ej. Skillnaden är större mellan 1 och 2 för icke ideella sprängämnen som Gurit. Här betyder det mer om hålen förladdats då ju kurvan är flack och trycket hålls uppe en länge tid.

Vi önskade nu ta reda på mer om tryck-tid förloppen och då det är svårt att mäta tryck i full skala beslöt vi gå vidare med halvskaleförsök i block /11/.

### 3.2 Test i stenblock

Denna test utfördes i Göinge stens blockstensbrott i Svenneby. Försöken genomfördes genom sprängning i sammanlagt åtta stenblock med volymer varierande mellan 2-4 m<sup>3</sup>. Två hål borrades i varje block med Ø 38 mm eller Ø 41 mm beroende på om hålen skulle kläs in med stålrör eller inte. Hålavståndet var 0,8 m och håldjupet några dm kortare än blockhöjden. Ett av de två hålen, mät hålet, förlängdes och borrades med klenare dimension genom blocket för att möjliggöra att där ta ut mätkabeln, se figur 5.



Figur 5. Principskiss för blockmätningarna

I fyra stenblock trycktes stålrör ner i borrhålen. Innerdiametern på stålrören var 38,5 mm och de hade en godstjocklek på 1,5 mm. Hålen borrades här till 43 mm och det lilla gapet mellan

rör och hålvägg fylldes med epoxilim. Två olika sprängämnen användes, 17 mm Gurit samt 17 mm Emulite från Dyno Nobel. Samtliga borrhål laddades. Hålen med stålrör lämnades öppna efter laddning (för att gasen skulle kunna ventilera ut) medan övriga hål förladdades, se tabell 4.

I ett av blockets borrhål sattes en tryckcell, en LHM-cell i botten för mätning av borrhålstrycket /11/. Detta hål försågs också med en ”mätpinne” för registrering av VOD (detonationshastighet). Mellan borrhålen monterades två accelerometrar på ytan för att kunna mäta tillförd energi. Båda hålen sprängdes samtidigt (meningen med detta var att blocken skulle klyvas). Detonationen videofilmades och blocken skickades sedan iväg för sågning för att bestämma sprickutbredningen.

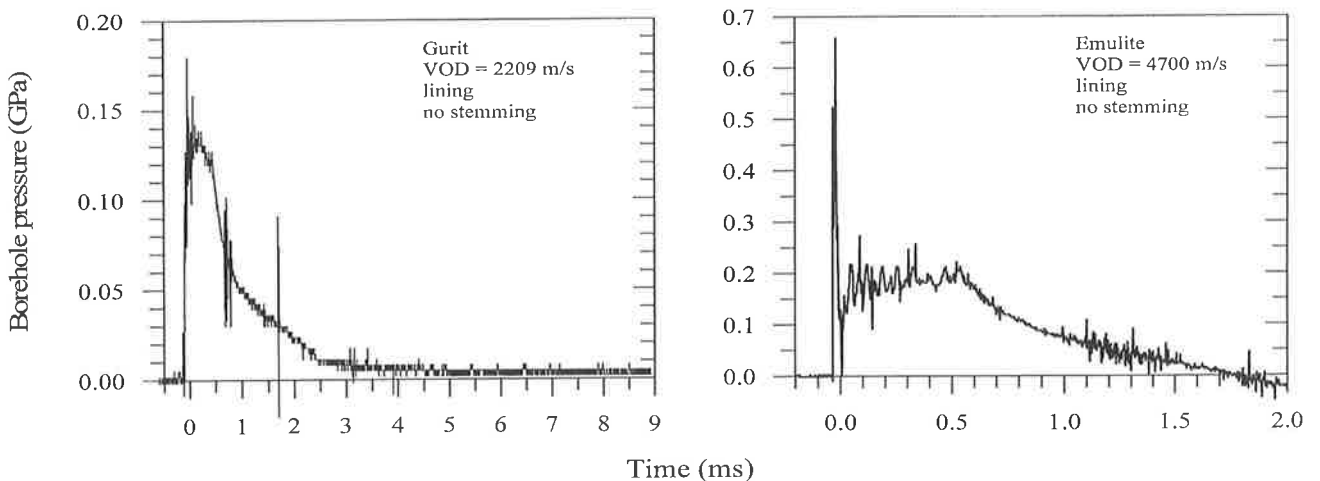
Tabell 4. Laddning av blocken

Försök	Sprängämne	Stålrör/förladdat	Håldimension (mm)
1	17 mm Gurit	Stålrör	43
2	”	”	43
3	”	Förladdat	38
4	”	”	38
5	17 mm Emulite	Stålrör	43
6	”	”	43
7	”	Förladdat	38
8	”	”	38

## Resultat

Blocken med förladdade hål sprack sönder medan blocken med laddade stålrör inte gick sönder. I två av blocken med stålrör blev det dock en spricka mellan hålen och för det ena av dessa, laddat med Emulite, sprack blocket vid bearbetning.

Borrhålstryck och VOD kunde avläsas vid samtliga sprängningar. Signalerna från accelerometrarna var svårtolkade, troligen beroende på att de hade en alltför hög frekvens för vårt mätsystem. Generellt kan man säga att trycksignalerna från Gurit, som har låg VOD, som väntat har en ”mjukare” kurva än för Emulite. Borrhålstrycket från Gurit faller långsammare än för Emulite som har en kort och hög puls, se figur 6.



Figur 6. Borrhålstryck för Gurit och Emulite

Det är troligt att den höga pulsen ger en kraftigare påverkan på borrhållsväggarna än från ett sprängämne med lägre VOD. Trycket under den flackare delen av kurvan är för Gurit 0,1-0,15 GPa och något högre för Emulite 0,15-0,20 GPa medan maxtrycket för Gurit är 0,18 GPa och 0,65 GPa för Emulite. Borrhållstrycket kan också beräknas enligt följande formel:

$$P_b = 1/8 \cdot (\rho_0 \cdot VOD^2) \cdot (d_e/d_b)^2$$

där:  $P_b$  = borrhållstrycket (Pa)  
 $\rho_0$  = sprängämnets densitet (kg/m<sup>3</sup>)  
 VOD = detonationshastigheten hos sprängämnet (m/s)  
 $d_e$  = laddningsdiameter (m)  
 $d_b$  = borrhållsdiameter (m)

Då blir borrhållstrycket för Gurit 0,15 GPa medan trycket för Emulite blir 0,7 GPa vilket stämmer hyfsat med mäta topptryck i block och bekräftats tidigare av Nie /12 /.

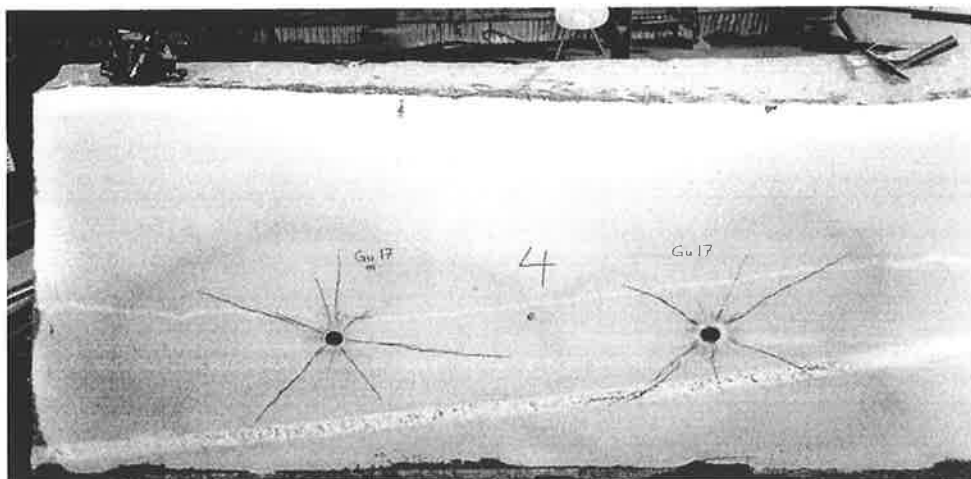
För Gurit lyckades LHM-cellen mäta hela förloppet men konstigt nog så verkar hålen vara trycksatt längre vid sprängning i stålrör än då hålen förladdats. En förklaring till detta kan vara att de förladdade hålen expanderar snabbare än vid sprängning i stålrör och att den snabba expansionen då ger upphov till en trycksänkning.

För Emulite fick vi inte hela tryckförloppet, troligtvis beroende på en upphettning av motståndet i LHM-cellen. Blocken sågades och därefter utfördes sprickkartering. Spricklängden vid sprängning i stålrör blev 30 cm för Gurit och 40 cm för Emulite. Spricklängden vid förladdning blev ca 30 cm för både Gurit och Emulite. Utvärderingen här var dock svår att göra då stenbitarna från de förladdade hålen var relativt små. De längsta sprickorna har delat blocken och kan därför inte mätas men en trolig spricklängd är >50 cm. En sammanställning av resultaten visas i bilaga 1. Dessa resultat sammanfattas i tabell 5.

Tabell 5. Slutsatser

Sprängämne	Rör/ Förladdat	VOD (m/s)	Tryck (MPa)	PPV (m/s <sup>2</sup> )	Spricklängd (cm)
Gurit-17	R	2330	180	18600	29
”	F	2500	150	9100	31
Emulite-17	R	4720	460	27200	40
”	F	4670	340	31900	33

I figur 7 visar sprickutbredningen från Gurit i stålrör. Sprickriktningen från de två hålen överensstämmer med varandra men som synes finns ingen kontakt mellan sprickorna från hålen. Detta beror troligen på att hålavståndet varit för stort ty i ett annat block, med samma uppställning men med kortare hålavstånd, mötte sprickorna varandra.



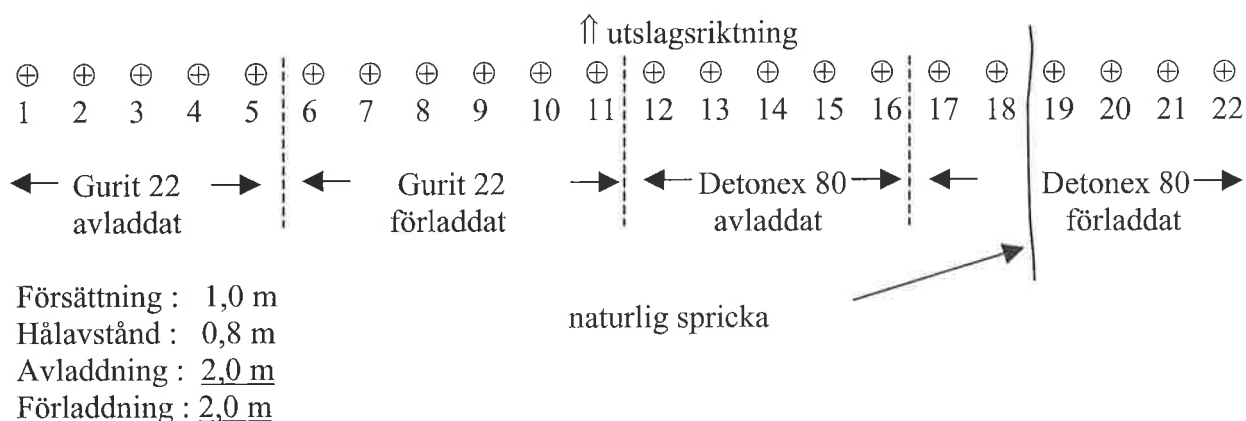
Figur 7. Sprickutbredning från Gurit i stålrör

Fältförsöken och resultaten har redovisats av Mats Olsson vid Explo 2001 /13/.

### 3.3 Fortsatta försök med förladdning

Tidigare försök med stötvåg/gas i Vånga (Swellexrör), Vånga (förladdning) samt i stenblock har delvis givit motsägande resultat. Det första försöket i Vånga med Swellex gav oförändrad spricklängd mellan avladdade hål och sprängämne laddat i Swellexrör. Detta talar för att det är stötvågen som ger upphov till sprickbildningen. De förladdade hålen fick dock kortare spricklängder vilket var oväntat. Vid nästa försök med förladdning ökade spricklängden för Gurit men ej för Kimulux. Förklaringen kan vara att Kimulux, som är ett mer ideellt sprängämne, är mer okänsligt för förändringar än Gurit. Ett mer ideellt sprängämne har en hög kort tryckamplitud och berget hinner därför inte påverkas så länge. Ett ytterligare försök med sprängning i stenblock gjordes för att på så sätt kunna mäta borrhålstrycket. Det var svårt att utvärdera trycket, dock följer kurvan utseendet för ideellt och icke ideellt sprängämne. Sprickutvärderingen blev ännu svårare då de förladdade blocken sprack sönder i många delar och de rörladdade blocken inte alls sprack.

Det bestämdes att göra ytterligare försök med förladdning och denna gång med Gurit samt ett ideellt sprängämne som Detonex. Försöket utfördes i maj 2001 i Hallindens stenbrott nära Lysekil. Pallen var 7-10 m hög och ca 20 m lång. Gurit 22 samt Detonex 80 användes. Figur 8 visar borrhings- och laddningsdata och figur 9 pallfronten innan sprängning.



Figur 8. Borr-och laddplan



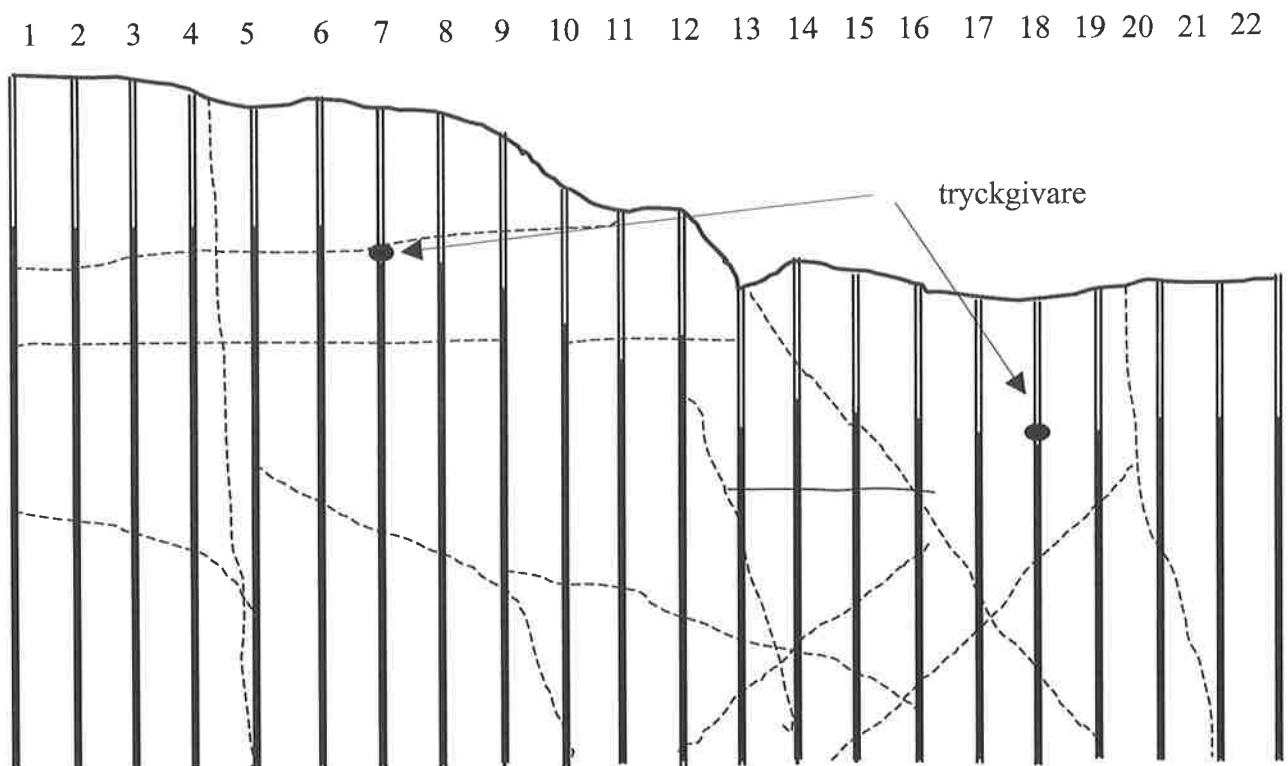
Samtliga hål hade en håldiameter på 51 mm. Denna dimension valdes eftersom den också använts vid försöken med Swellex.



Figur 9. Pallyta innan sprängning

Borrhålstrycket mättes i hål 7 (förladdad Gurit) samt i hål 17 (förladdad Detonex). Givarna sattes ovanpå laddningarna. Ovan givare tryckte vi ner en papperspropp varefter hålen förladdades med grus.

Innan sprängning karterades ovanyta och front på sprickor, se figur 10. Samtliga hål botten-initierades med hjälp av en primer med elektroniska sprängkapslar, se figur 11. Momentan initiering användes i samtliga hål.



Figur 10. Sprickkartering av front



Figur 11. Primer och elektronikkapsel i Detonex 80

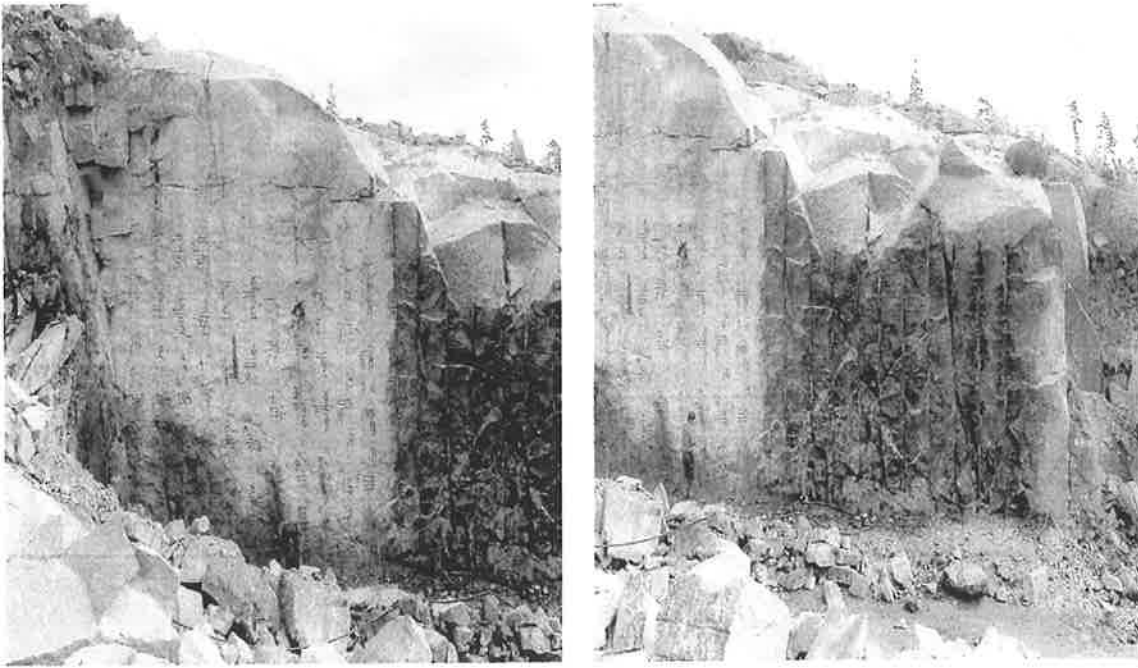
Tabell 6 visar en sammanställning på de håldjup, laddningslängder, avladdningar och förladdningar som användes. Hållängd och laddlängd har varierat beroende på grund av varierande pallhöjd. Av- och förladdning har i snitt legat på 1,9 m.

Tabell 6. Sammanställning av borrh- och ladddata

Hål	Hållängd	Laddlängd	Avladdning	Förladdning
1	10,15	8,0	1,9	
2	10,15	8,0	1,9	
3	10,10	8,0	1,85	
4	9,95	8,0	1,7	
5	9,70	8,0	1,5	
6	9,85	8,0		1,6
7	9,70	7,5		2,0
8	9,60	7,5		1,9
9	9,20	7,0		1,9
10	8,50	6,5		1,8
11*	8,10	6,0		1,95
12	8,30	6,3	2,0	
13	7,0	5,0	2,0	
14	7,3	5,3	2,0	
15	7,1	5,1	2,0	
16	7,0	5,0	2,0	
17	6,75	4,8		2,0
18	6,80	4,8		2,0
19	6,90	4,9		2,0
20	7,0	5,0		2,0
21	7,0	5,0		2,0
22	7,1	5,1		2,0
Medel	8,3	6,0	1,9	1,9

\*vatten på 6,6 m djup

Samtliga borrhålspipor var synliga efter sprängning, vilket framgår av figur 12. Fotot visar också uppmärkningen av pallytan innan tätsömsprängning.

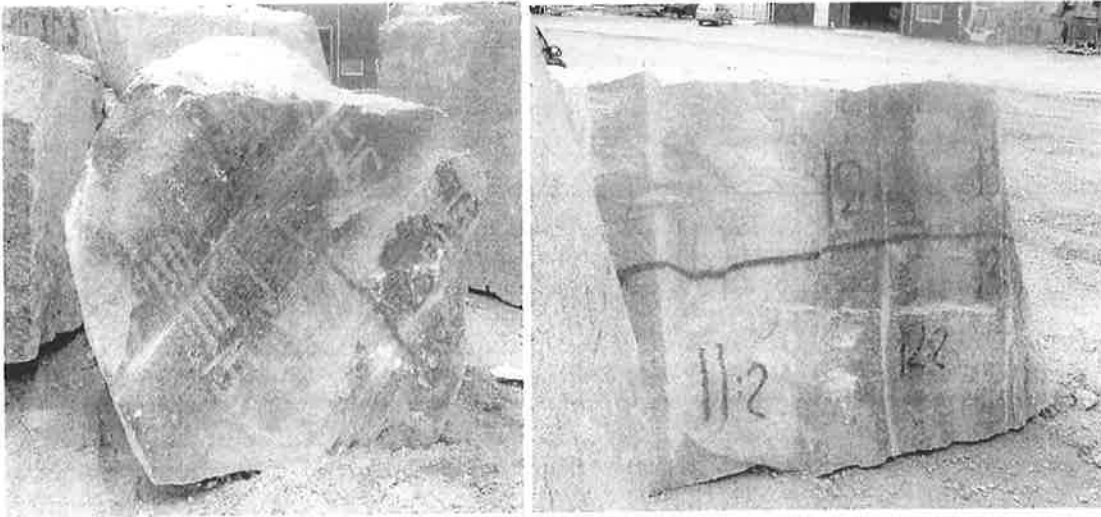


Figur 12. Uppmärkt pallfront efter sprängförsök och innan sprängning av tätsöm

En tätsöm sprängdes på sedvanligt försiktigt sätt ca 2 m bakom försöksraden vilket gav ett förväntat utfall av stora block, se figur 13, vilka sedan delades ner för transport till sågning. Figur 14 visar några av dessa block med utsatta sågsnitt.



Figur 13. Stenblock efter sprängning av tätsöm



Figur 14. Uppmärkta block för transport till sågning

### Resultat

Till sågning skickades 10 block om tillsammans 55 ton. Figur 15 visar sprickkarteringen från avladdade 51 mm hål med 22 mm Gurit. Den maximala spricklängden blev 40 cm, vilket är längre än tidigare försök med för- och avladdning. Dock verkar spricklängden rimlig då berget i Hallinden är grovkornigare än i Vånga och enligt uppgift mer lättsprucket. Fotot visar också att det finns en del naturliga sprickor i berget som påverkar sprickutbredningen. Vissa sprängsprickor har sökt sig mot dessa naturliga sprickor och stannat där medan andra sprickor från sprängningen passerat de naturliga sprickorna.

Figur 16 visar sprickbilden för 22 mm Gurit med förladdning. Sprickbilden är lite tydligare här men den maximala spricklängden är även här ca 40 cm.

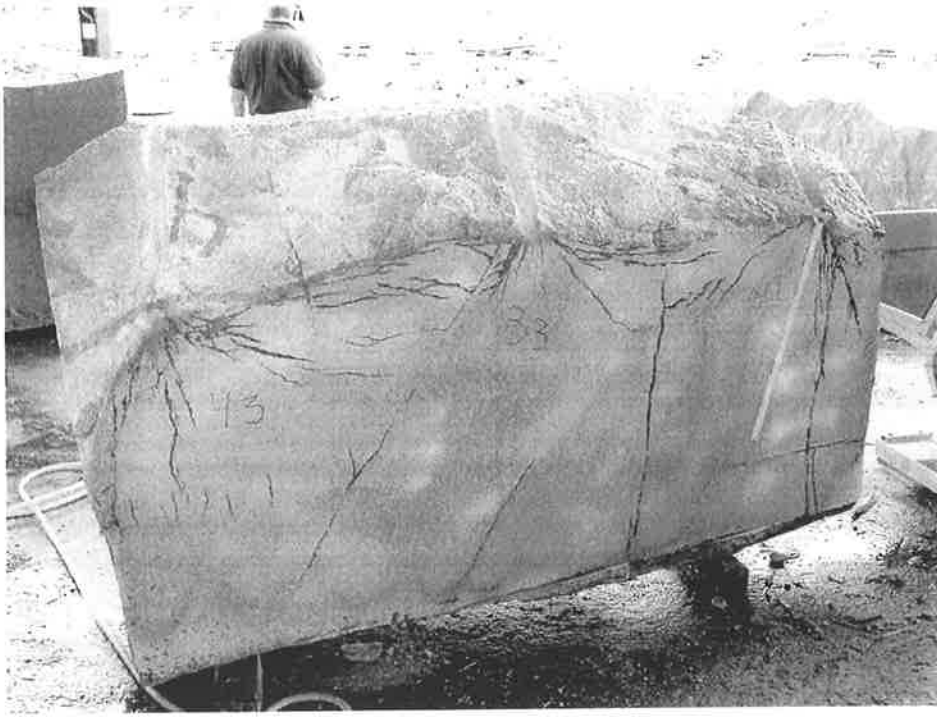
Sprickbilden för Detonex ser annorlunda ut och påminner i figur 17 (Detonex avladdat) om en nebulosa. Spricklängden är här ca 19 cm och kan jämföras med förladdade Detonexhål, som fick en spricklängd på 15 cm, se figur 18.

En total spricksammanställning för detta försök finns i bilaga 2, och en sammanfattning i tabell 7.

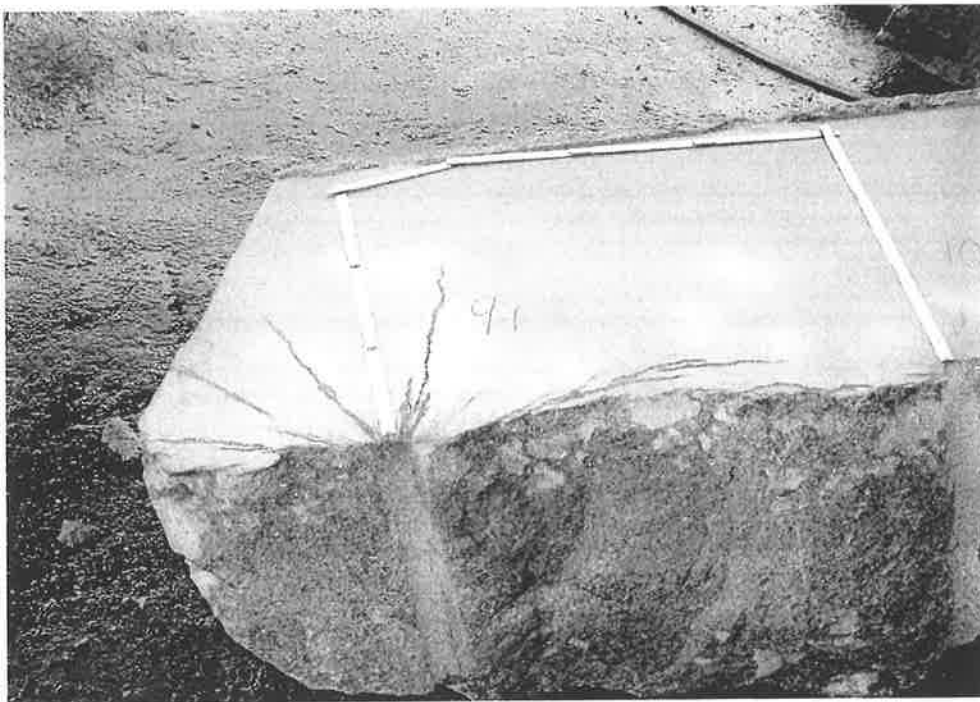
Tabell 7. Spricksammanställning

Sprängämnen	Avladdning	Förladdning	Spricklängd	Spridning
Gurit 22 mm	x		40	38-45
”		x	36	17-60
Detonex 80	x		20	17-22
”		x	15	12-18

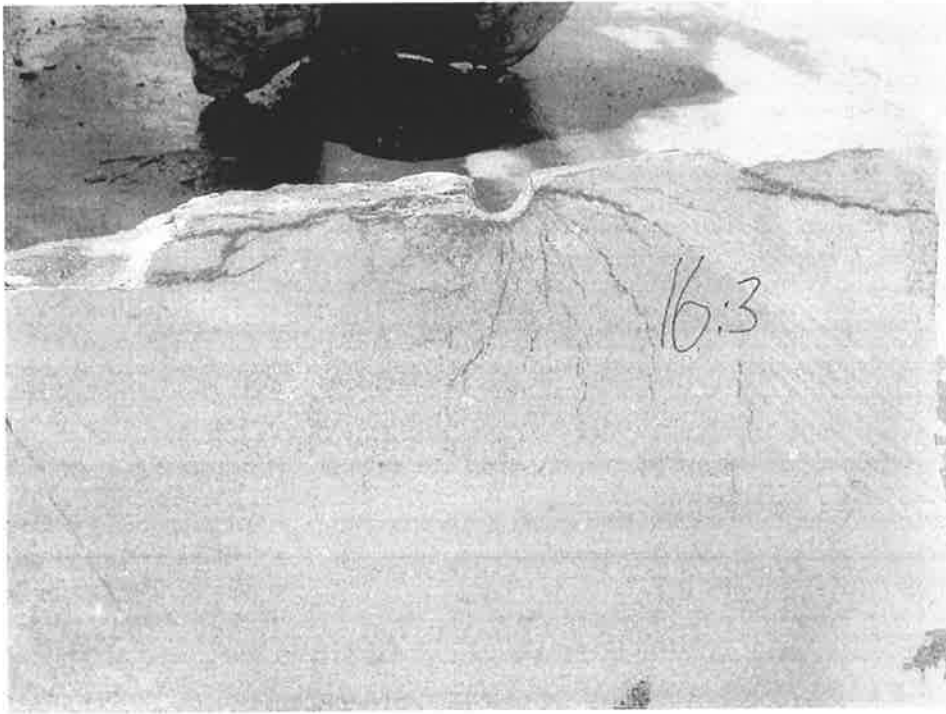
Sammanställningen av sprickdata visar att spricklängden inte ändras mycket då hålen förladdats jämfört med uppmätta spricklängder för avladdade hål. Möjligen skulle man kunna dra slutsatsen att spricklängden minskar med förladdning, men spridningen i spricklängderna är ganska stor.



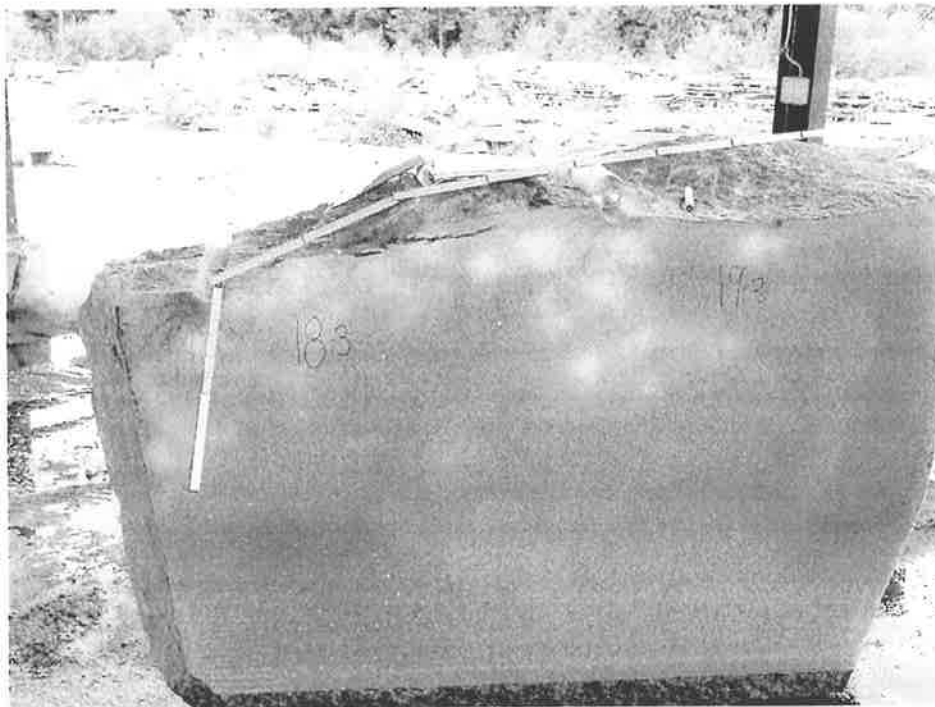
Figur 15. Gurit 22 hål 2, 3 och 4 är avladdade



Figur 16. Gurit 22 hål 9 och 10 är förladdade



Figur 17. Detonex 80 hål 16 är avladdat



Figur 18. Detonex 80 hål 18 och 19 är förladdade

## 4. SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

Fullskaleprov med flerhållsprängning har utförts vid tre tillfällen för att kartlägga vad som orsakar sprickbildning i kvarstående berg. Sammanlagt har 60 hål sprängts och i försöken har tre olika sprängämnen använts. Försöken har omfattat avladdade hål, förladdade hål samt stålinkladda hål. Resultatet från sprickarteringen vid försöken har sammanfattats i tabell 8.

Tabell 8. Spricklängder (i cm) vid tre sprängförsök

Håldim (mm)	Datum	Sprängämne	Avladdning		Förladdning		Förladdad längd i m	Swellex	
			Medel	Alla	Medel	Alla		Medel	Alla
51	Maj-98	Gurit 22	30	40,20	17	20,13	2	28	35,22 38,15 30
64	Maj-99	Gurit 22	16	15,17	24	15,22,27 16,42	1		
64	Maj-99	Kimulux 22	33	30,40,30 33,30	33	32,38,30	1		
51	Maj-99	Gurit 17			26	11,40	1		
51	Maj-01	Gurit 22	40	38,45,38	36	40,60,17 27	2		
51	Maj-01	Detonex- 80	20	22,22,18 17	15	18,16,15 12,15,15	2		

Gurit och Kimulux angivna i dimensioner på sprängämnet

Slutsatserna av detta blir, med vissa undantag, att spricklängden, för samma sprängämne och håldimension, är lika för avladdade hål som för stålinkladda hål samt att spricklängden också är lika i avladdade och i förladdade hål (stämmer dock inte för Gurit 22 i maj -98 och maj -99 men dessa försök har haft kortare förladdning).

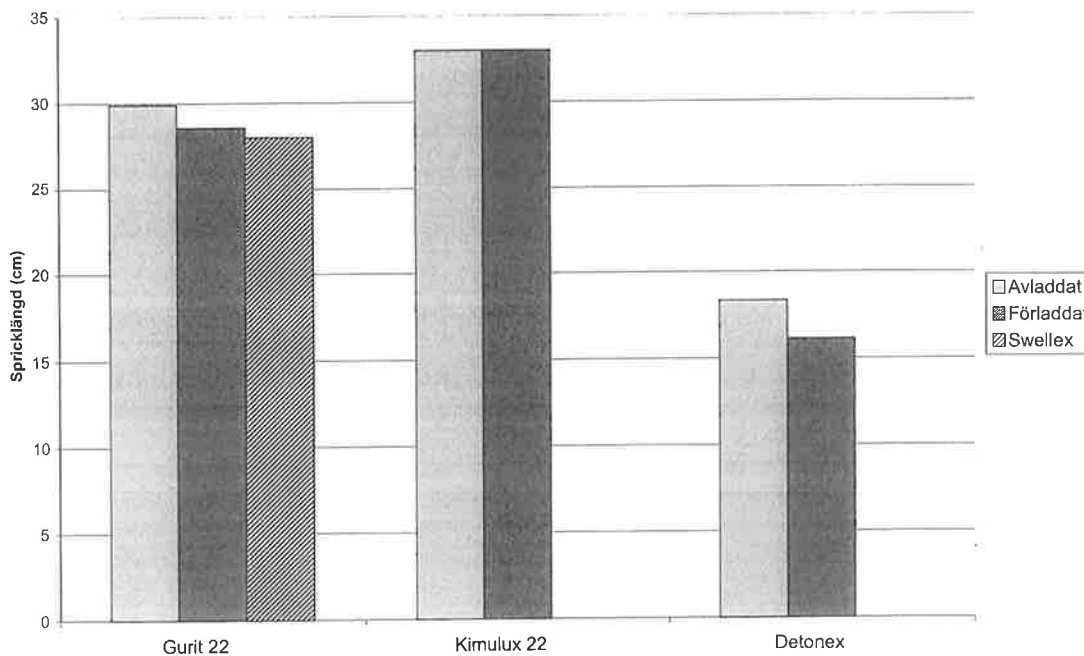
Om man går igenom sprickarteringen ytterligare och speciellt kontrollerar sprickornas riktning, närhet till naturliga sprickor m.m. innebär detta att vissa likheter ytterligare accentueras. Till exempel beror den längsta sprickan i 1998 års försök, (40 cm) för 22 mm Gurit, på närheten till en naturlig spricka och kan därför plockas bort. Sammanställningen ger nu reviderade värden vilket framgår av tabell 9.

Tabell 9. Reviderade spricklängder (cm)

Håldimension	Datum	Sprängämne	Avladdning	Förladdning	Swellex
51	1998	Gurit 22 mm	20 <sup>1)</sup>	17	28 <sup>1)</sup>
64	1999	"	16	20 <sup>1)</sup>	
64	"	Kimulux 22 mm	33	33	
51	"	Gurit 17 mm		11 <sup>1)</sup>	
51	2001	Gurit 22 mm	40	36	
51	"	Detonex 80	18 <sup>1)</sup>	16 <sup>1)</sup>	

Not 1: korrigerade värden

Spricklängden för Swellex uppvisar nu det högsta värdet bland 1998 års försök. En möjlig förklaring är att uppblåsningen av Swellexrören trots allt orsakat en förspänning av hålen som underlättat sprickbildningen. Om man istället bildar medelvärden av försöken med 22mm Gurit i 51 mm hål och jämför dessa värden med försöksdata från Kimulux och Detonex blir det små skillnader i spricklängder mellan avladdning, förladdning och Swellex, vilket figur 19 visar.



Figur 19. Avladdningens och förladdningens betydelse för spricklängder hos några sprängämnen.

Avladdade hål saknar förladdning och borrhålet påverkas av en kortvarig tryckpuls som vi kallar stötvågsfasen. I förladdade hål hålls gastrycket inneslutet längre och en fas tillkommer där tryckverkan på hålet och gasinträngning i sprickorna är möjlig. *Det är ingen nämnvärd skillnad mellan maximala spricklängder i kvarstående berg för av- och förladdade hål.*

Därför drar vi slutsatsen att dessa sprickor i huvudsak är färdigbildade under stötvågsfasen. Vi hävdar alltså att en förlängd gastrycksverkan i hålet och eventuell gasinträngning i sprickorna inte givit något bidrag. Gasinträngning i kvarstående berg är inte heller särskilt trolig då sprickorna inte är fullt utbildade, dvs. i princip slutna.

Ett gastryck i hålet ökar normalt spänningskoncentrationen vid sprickspetsarna. Två avlastningsmekanismer är möjliga. Den ena är att långa öppna sprickor som spänningsavlastar kortare sprickor redan bildats, t.ex. sprickorna längs borrhålets sammanbindningslinje.

Den andra mekanismen är att sådana öppna sprickor släpper in gas från borrhålet och avlastar trycket. För att de skall hinna ge önskad effekt måste de hinna verka innan förladdningen börjar verka, dvs. inom loppet ett par millisekunder.



## REFERENSER

1. Langefors, U., Kihlström, B. *The Modern Technique of Rock Blasting*. Almqvist och Wiksell, Stockholm, 1973.
2. Brinkmann, J R. Separating Shock Wave and Gas Expansion Breakage Mechanisms. *Proc. Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 2*, sida 6-15. Society for Experimental Mechanics 1987.
3. Brinkmann, J R. An Experimental Study of the Effects of Shock and Gas Penetration in Blasting. *Proc. Third International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 3*, sida 55-66. AA Balkema, Rotterdam 1990.
4. Sarracino, R S., Brinkmann, J R. The Modelling of Shock Effects in Blasthole Liner Experiments. *Proc. Third International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 3*, sida 199-203. AA Balkema, Rotterdam 1990.
5. Olsson, M., Bergqvist, I. Sprickutbredning vid flerhålssprängning. *SveBeFo Rapport nr 18, 1995*.
6. Olsson, M., Bergqvist, I. Crack Lengths from Explosives in Multiple Hole Blasting. *Proc. Fourth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 4*, sida 193-196. AA Balkema, Rotterdam 1993.
7. Olsson, M., Bergqvist, I. Crack Lengths from Explosives in Multiple Hole Blasting. *Proc. Fifth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 5*, sida 187-191. AA Balkema, Rotterdam 1996.
8. Olsson, M., Bergqvist, I. Sprickutbredning vid flerhålssprängning. Sammanfattande rapport av försöksperioden 1993-96. *SveBeFo Rapport nr 32, 1997*.
9. Ouchterlony, F., Olsson, M., Båvik, S-O. Perimeter Blasting in Granite with Holes with Axial Notches and Radial Bottom Slots. *Proc. Sixth International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, FRAGBLAST 6*, sida 229-239. AA Balkema, Rotterdam 1999.
10. Ouchterlony, F., Olsson. Dags att komplettera befintlig skadezonstabell? *Bergsprängningskommitténs diskussionsmöte, BK 2000*, sida 155-178, Stockholm 2000.
11. Nie, S. Borehole pressure in blast holes. Measurements in granite blocks versus estimations. *SveBeFo Rapport nr 42, 1999*.
12. Nie, S., Deng, J., Ouchterlony, F. Expansionsarbete av ett emulsionssprängämne i borrhål. Mätning och simulering. *SveBeFo Rapport nr 48, 2000*.
13. Olsson, M., Nie, S., Bergqvist, I., Ouchterlony, F. What Causes Cracks in Rock Blasting. *EXPLO 2001*, sida 191-196. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2001.

## BILAGA 1

Tabell B1. Sammanställning av resultaten

Laddning 17 mm	Rör/ Förladdning	VOD (m/s)	Max tryck (Mpa)	Tryck efter 0,2 ms (Mpa)	PPV Kanal 1 (m/s <sup>2</sup> )	PPV Kanal 2 (m/s <sup>2</sup> )	Antal block (st)	Spricklängd (cm)
Gurit	Rör	2209	175	175	13995	20566	1	26
"	"	2456	180	140	23214	18477	1	31
"	Förladdat	2514	130	110	9914	25969	>5	31
"	"	2485	175	175	8301	21876	>5	14
Emlite	Rör	4743	260	140	30801	63866	1	32
"	"	4700	660	200	>24000	80850	1	33
"	Förladdat	4708	325	200	33352	75950	3	30-40
"	"	4639	360	140	30467	61008	>5	40

## BILAGA 2

Spräng- ämne	Avladdn/ Förladdn	Snitt	Spricklängder					Längsta sprickan (cm)	Radiella (cm)	Antal (st)	RxA (cm)	Kross (cm)	Antal (st)	KxA (cm)	Övrigt
			(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)								
Gurit 22	Avladdn	<b>2:4</b>	21	33	38	80 <sup>1)</sup>		<b>38</b>	20	3	60	10	>5	>50	Fin pipa
"	"	<b>3:4</b>	45	20	15	25		<b>45</b>	15	4	60				"
"	"	<b>4:4</b>	38	25	38	38		<b>38</b>	25	3	75	10	5	50	"
"	Förladdat	<b>8:2</b>													Ej detonerat
"	"	<b>9:1</b>	40	17	40	19		<b>40</b>	12	>5	>60				Fin pipa
"	"	<b>9:2</b>	60	38	30	25	11	<b>60</b>	30	4	120	6	>10	>60	"
"	"	<b>10:1</b>	17	15				<b>17</b>	15	3	45	9	>10	>90	Mkt fin pipa
"	"	<b>10:2</b>	15	12	15	27		<b>27</b>	15	4	60	8	>10	>80	"
"	"	<b>11:2</b>	50	30	17	80 <sup>1)</sup>		<b>50</b>	30	3	90	10	4	40	
Det-80	Avladdn	<b>12:2</b>	15	9	15			<b>15</b>	15	2	30	8	10	80	Mkt fin pipa
"	"	<b>13:2</b>	22	22	20	9		<b>22</b>	22	3	66	5	3	15	"
"	"	<b>14:2</b>	22	20	11			<b>22</b>	15	4	60	8	10	80	"
"	"	<b>15:2</b>	18	18	15			<b>18</b>	18	3	54	8	10	80	"
"	"	<b>15:3</b>	17	13	15	10		<b>17</b>	15	3	45	5	5	25	"
"	"	<b>16:3</b>	14	17	18	14	14	<b>18</b>	15	7	105	5	>10	>50	"
"	Förladdn	<b>18:3</b>	18	14	14	14		<b>18</b>	14	8	112	5	>10	>50	"
"	"	<b>19:3</b>	16	13	11	13		<b>16</b>	13	5	65	5	>10	>50	"
"	"	<b>20:1</b>	40 <sup>1)</sup>	15				<b>15</b>	15	4	60	7	>10	>70	Fin pipa
"	"	<b>20:2</b>	12	5				<b>12</b>	12	1	12	4	>5	>20	Vid blockkant
"	"	<b>21:1</b>	7	15				<b>15</b>							Fin pipa
"	"	<b>21:2</b>	8	8	15			<b>15</b>	12	2	24	4	>5	>20	"
"	"	<b>22:2</b>	11	11	15	9		<b>15</b>	11	4	44	5	>10	>50	"

förklaring

<sup>1)</sup> naturlig spricka

mitthålen i varje grupp är skrivna med fetstild