

LADDNINGSGEOMETRINS INVERKAN PÅ KAST ORSAKAD
AV KRATERBILDNING VID PALLSPRÄNGNING.

A. Ladegaard-Pedersen och Roger Holmberg

DS 1973:28

12.12.1973

STIFTELSEN
SVENSK DETONIKFORSKNING
SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION

VINTERVIKEN – 117 48 STOCKHOLM
SWEDEN

LADDNINGSGEOMETRINS INVERKAN PÅ KAST ORSAKAD
AV KRATERBILDNING VID FALLSPRÄNGNING.

A. Ladegaard-Pedersen och Roger Holmberg

DS 1973:28

12.12.1973

Sammanfattning.

Kraterdjupets beroende av förhållandet mellan laddningslängd och diameter har vid modellförsök såväl som vid fullskaleförsök belysts med utgångspunkt från Livingstones kraterteori. Resultaten av modellförsöken visat att om förhållandet mellan laddningslängd och diameter l/d ökas erhålles en markant ökning av kraterdjupet vid toppinitiering medan kraterdjupet vid botteninitiering tenderar att hålla sig konstant. Vid botteninitiering blir sprickorna längre än vid toppinitiering. Fullskaleförsöken visar god överensstämmelse med Livingstones teorier. Vid långsträckta laddningar ($l/d = 36.4$) utan oladdad hållängd erhöles ett kraterdjup som överensstämmer med det kritiska laddningsdjupet enligt Livingstone för en cylindrisk laddning i samma hål med längden lika med diametern. Ingen krater har bildats vid $l/d = 20.8$ om den oladdade hållängden överskrider det kritiska laddningsdjupet för en laddning med längden $l = d$. Som ett led i en nu pågående försöksserie har gasfrontens rörelse ovan hålmynningen utvärderats för $4\frac{1}{2}$ och $7\frac{1}{2}$ tums hål med och utan förladdning. Största registrerade front-hastigheten uppgick till 428 m/s.

<u>Innehållsförteckning.</u>	sid.
Inledning	1
Kraterteori	1
Modellstudier i plexiglas	
a/ Inledning	5
b/ Försöksbetingelser	5
c/ Resultat	12
Fullskaleförsök i granit	
a/ Optimalt och kritiskt kraterdjup vid $l/d = 5.2$	12
b/ Kraterdjup och volym vid $l/d = 10.4$	14
c/ Botten- och toppinitiering vid $L > L_k$ och $l/d = 20.8$	16
d/ " " " " " $L < L_k$ och $l/d = 36.4$	16
e/ Resultat	18
Allmänt angående förladdningslängd	21
Utvärdering av filmmaterial, gasfrontens rörelse	21
Referenser	28

Inledning.

Enligt en tidigare intervjuundersökning /1/ framgår att grovhålssprängning samt plansprängning tillhör de farligare sprängningsmetoderna sett ur kastningssynpunkt. Detta beror på att förhållandet mellan pallhöjden och diametern är litet.

Tidigare undersökningar /2/ har även visat att kast från borrhålsmynningen ger den maximala kastvidden för salvor där inga speciella hänsyn tagits till förladdningslängd och täckningsmaterial.

Undersökningen i denna rapport har utförts med tanke på ovanstående problematik.

Kraterteori.

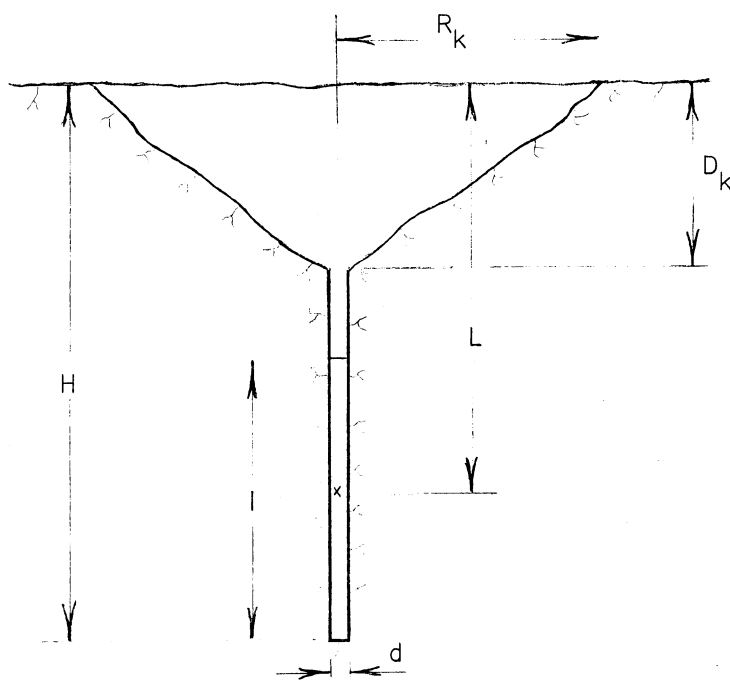


Fig. 1. Beteckningar vid kratersprängning.

Använda beteckningar.

- d , borrhålsdiametern
- D_k , kraterdjup
- H , borrhålsdjup
- l , laddningslängd
- L , laddningsdjup = avståndet från markytan till laddningens tyngdpunkt
- L_k , kritiskt laddningsdjup = det djup där en given laddning enbart ger sprickbildning

- L_o , optimalt laddningsdjup = det djup där en given laddning ger den maximala utsprängda kratervolymen
- P , kg/dm^3 sprängämnets packningsgrad
- S , effektfaktorn. Denna faktor bestäms genom praktiska försök och varierar för olika sprängämnen och material.

Livingstones kraterteori /4/ bygger på att en sfärisk laddning används. Om vi translaterar detta till det fall då laddningen packas i ett borrhål så bör laddningshöjden l vara lika med borrhålsdiametern d . Förhållandet l/d skall alltså vara 1.

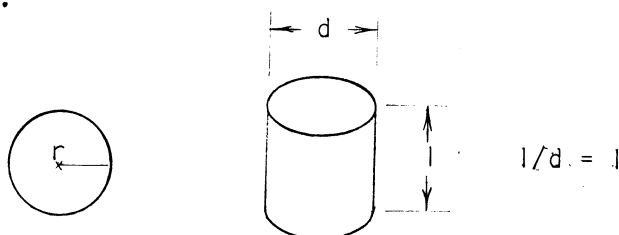


Fig. 2. Förhållandet l/d .

Det samband som Livingstone har mellan en laddning och dess kritiska djup beskrivs av hans "strain energy equation."

$$L_k = S \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (1)$$

där L_k ; Kritiska djupet (m)
 Q ; Laddningsvikten (kg)
 S ; "Strain-energy factor"

"Strain-energy" faktorn är beroende av sprängämnets egenskaper och bergmaterialet. Den bestäms genom praktiska försök.

Det kritiska djupet mäts vertikalt och är det djup för en bestämd laddning där vi enbart får sprickbildningar vid ytan. Om vi mäter det horisontellt eller vinkelrätt mot en sned yta kan vi kalla det för kritisk försättning.

Det optimala djupet L_o är det djup där maximala kratervolymen erhålles för en bestämd laddning och det mäts från laddningens tyngdpunkt till fria ytan.

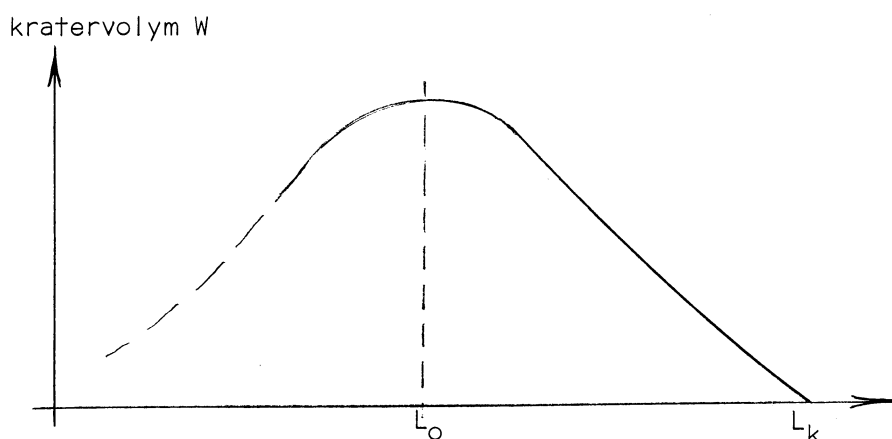


Fig. 3. Optimalt och kritiskt laddningsdjup.

Praktiska försök har visat att optimala djupet är linjärt beroende av det kritiska djupet:

$$L_o = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot L_k \quad (\text{m}) \quad (2)$$

Detta ger med (1)

$$L_o = \frac{S}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt[3]{Q} \quad (\text{m}) \quad (3)$$

Vid en packningsgrad P (kg/dm^3) för sprängämnet och en laddningsdiameter på d (mm) blir laddningsvikten om vi räknar på en cylindrisk laddning med $l = d$:

$$Q = \frac{P \cdot \pi \cdot d^2}{4} \cdot d \cdot 10^{-6} \quad (\text{kg}) \quad (4)$$

Effektfaktorn S bestäms praktiskt och för kombinationen granit-dynamex varierar den från 1.6 till 2.0.

Om resultatet (4) insättes i (3) får vi

$$L_o = \frac{S}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot \pi}{4}} \cdot \frac{d}{100} \quad (\text{m}) \quad (5)$$

I diagram 1 kan det optimala laddningsdjupet och den optimala laddningen utläsas för en given diameter och vid olika packningsgrader. En ökad packningsgrad medför för en given diameter enligt diagrammet, ett ökat laddningsdjup och en ökad viktsmängd sprängämne.

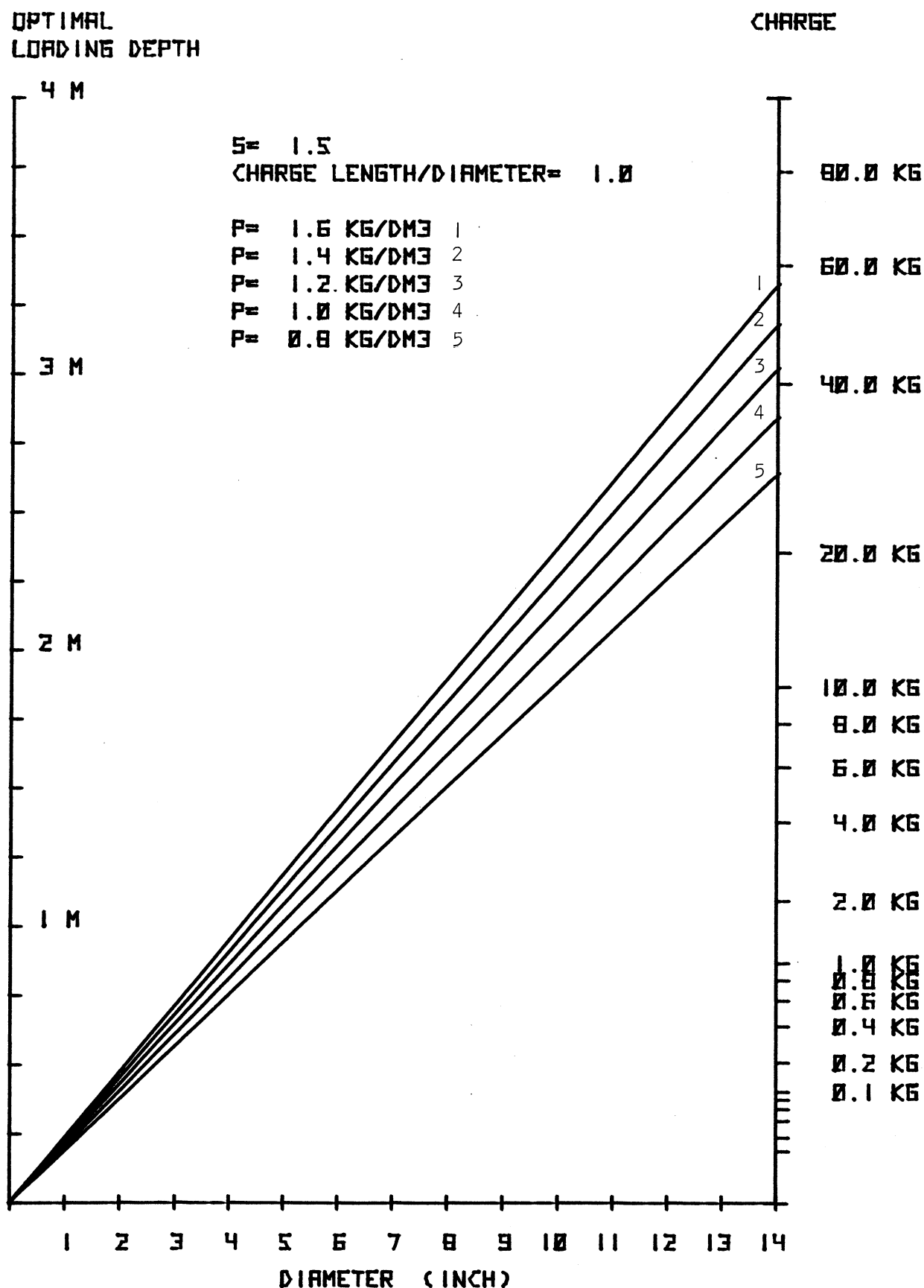


Diagram 1. Optimalt laddningsdjup och optimal laddningsvikt som funktion av borrhålsdiametern vid olika packningsgrader. Förhållandet mellan laddningslängd och diameter $l = d$. Effektfaktorn, $S = 1.5$.

Modellförsök.

I en tidigare rapport /3/ (DS 1973:13) har följande undersökts vid modellförsök i plexiglas; hastigheten på utkastat material som funktion av den specifika laddningen, riskerna vid dålig bergrensning samt olika förladdningars inverkan på sprickbilden kring hålmyningen.

Vid en jämförelse mellan krater- och pallsprängning i ovannämnda rapport framgår att största hastigheten på utkastade fragment kan förväntas vid kratersprängning.

Vid fullskaleförsök /3/ och i våra tidigare beräkningar har laddningsgeometrin varit punktformig eller laddningslängden har maximalt varit 6 gånger så stor som diametern.

Vid föreliggande undersökning i modellskala har förhållandet mellan laddningslängd och diameter l/d varierats mellan 3 och 36. Avsikten har varit att klarlägga om en utsträckt laddning i ett borrhål inverkar på kraterdjupet. Två försöksserier med samma laddning och laddningsgeometri har genomförts. I den första försöksserien har laddningen initierats från övre delen av borrhålen och i den andra försöksserien från nedre delen av borrhålen (toppinitiering respektive botteninitiering).

Försöksbetingelser.

Laddning.

Som sprängämne användes en blandning av blyazid, PbN_6 , och blytrinitroreorcinat, $C_6H(NO_2)_3(O_2Pb)$ i viktförhållandet 5:1. Packningsgraden för denna blandning i ett 1.5 mm borrhål har uppmätts till 2.6 g/cm^3 .

Initiering.

Urladdning av kondensator från 240 volt med därav följande gnistbildning från en koaxialledare med diametern 1.2 mm och en kapacitans på $3 \mu F$. Koaxialledaren var vid försöken fastklustrad i borrhålet på en längd av 3 mm från ytan medelst Araldit.

Modell.

I varje modellblock av plexiglas $100 \times 100 \times 60 \text{ mm}$, se fig. 4, borrades ett 1.5 mm hål i blockets mitt. I första försöksserien med toppinitiering varierades håldjupet från 7.5 till 57 mm. I andra försöksserien med botteninitiering borrades hålen i samtliga block till ett djup på 57 mm.

Laddningsgeometri.

Vid de två försöksserierna varierades laddningslängden l med följande värden; 4.5, 9, 18 och 54 mm, se fig. 4 och 5.

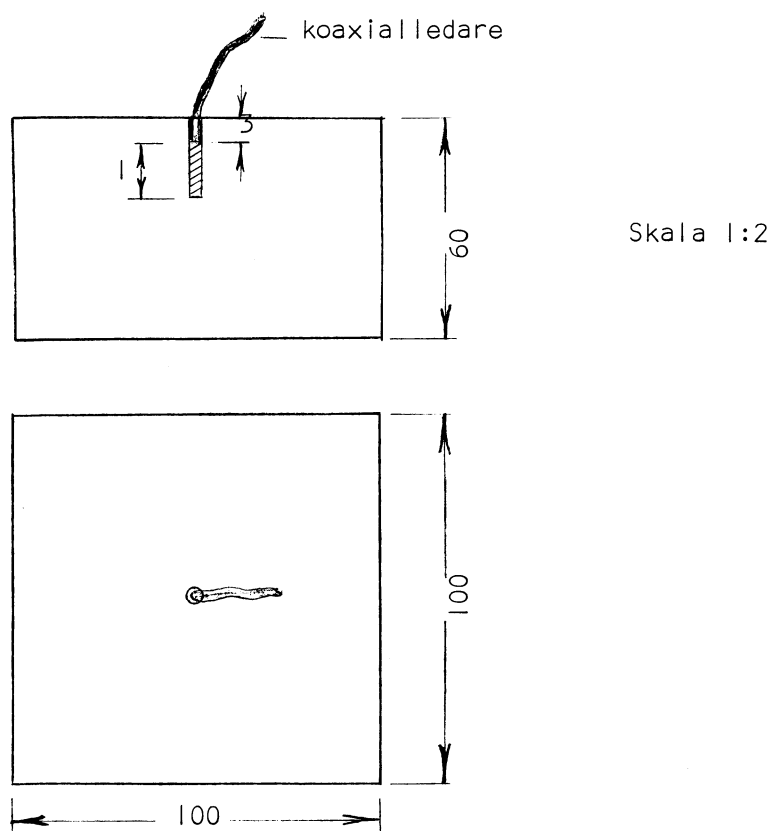


Fig. 4. Laddningsgeometri vid kratersprängning med toppinitiering.
Laddningslängden l varierades med följande värden. 4.5, 9, 18 och 54 mm

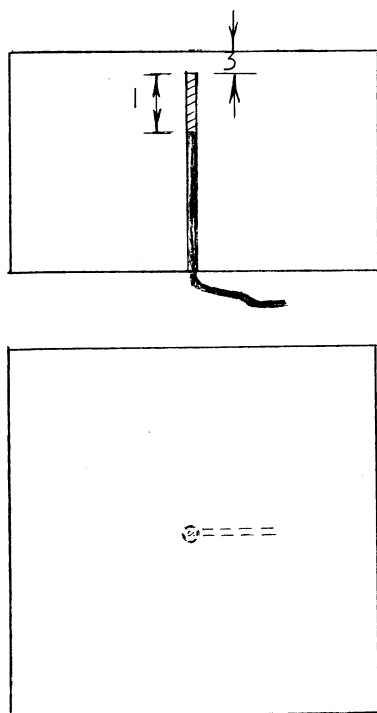


Fig. 5. Laddningsgeometri vid kratersprängning med botteninitiering.

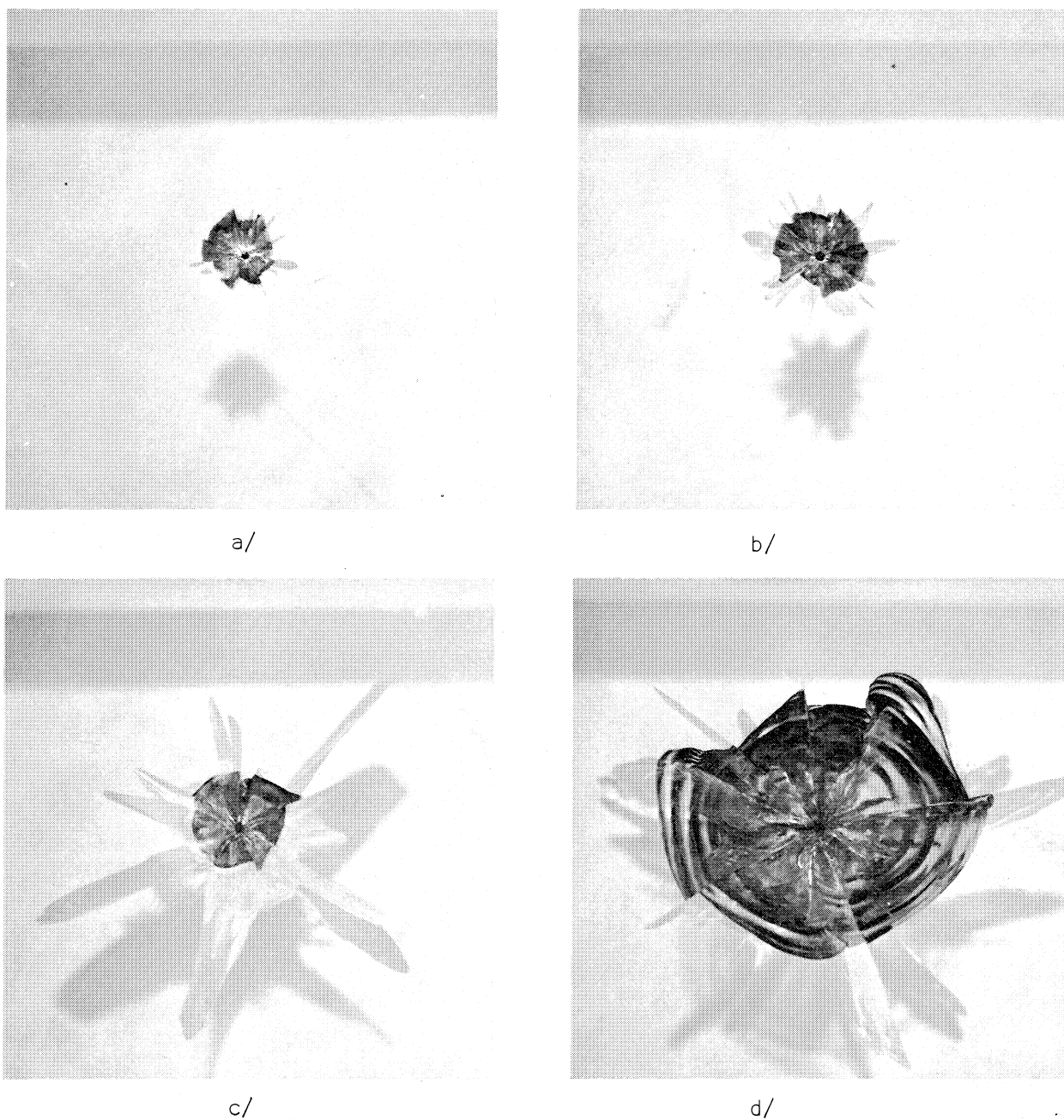
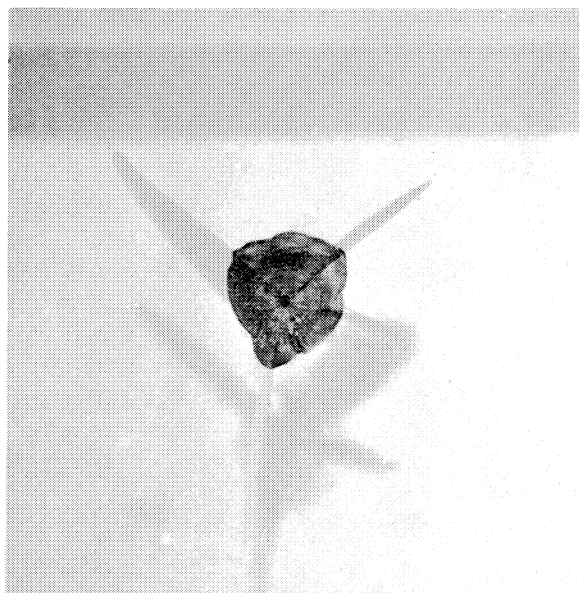
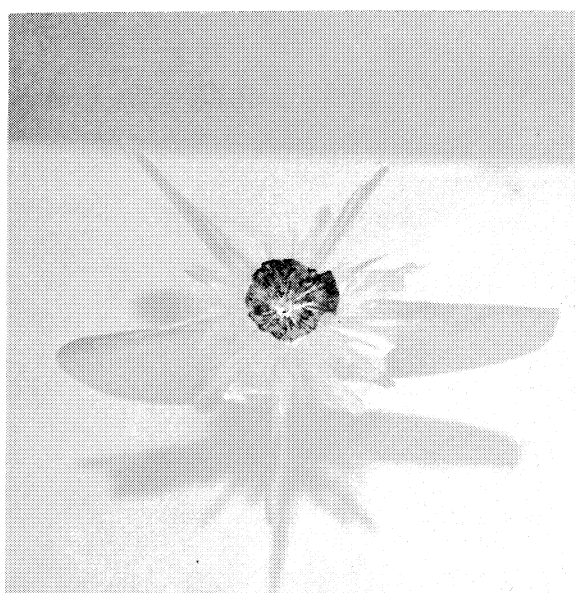


Fig. 6. Plexiglasmodeller skjutna med topp-initiering.

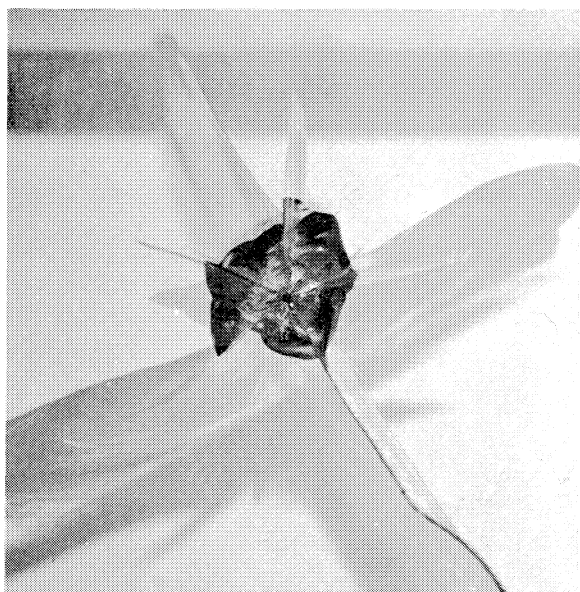
- a/ laddningslängd 4.5 mm
- b/ laddningslängd 9.0 mm
- c/ laddningslängd 18.0 mm
- d/ laddningslängd 54.0 mm



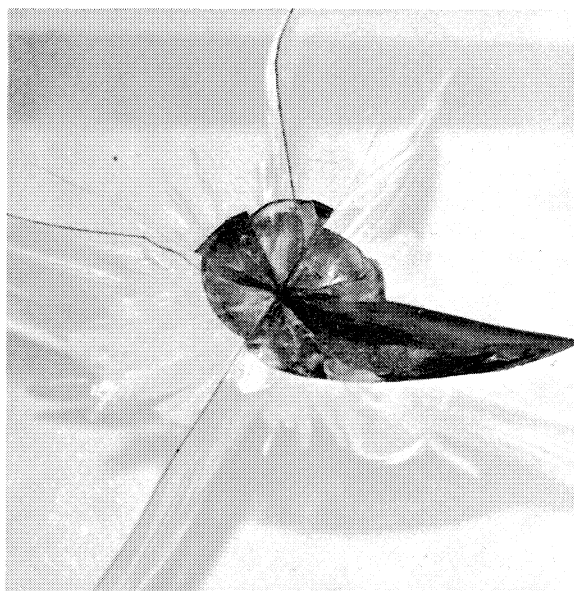
a/



b/



c/



d/

Fig. 7. Plexiglasmodeller skjutna med botten-initiering.

- | | | |
|----|----------------|---------|
| a/ | laddningslängd | 4.5 mm |
| b/ | laddningslängd | 9.0 mm |
| c/ | laddningslängd | 18.0 mm |
| d/ | laddningslängd | 54.0 mm |

Tabell 1.1. Laddnings- och kraterdata för plexiglas.

Skott	Laddning						Krater				
	Vikt Q mg	Djup L mm	Längd L mm	Diameter d mm	l/d	Initiering	Radie R _k mm	Djup D _k mm	Volym V _w mm ³	W/Q	Spricklängd mm
14726-2a	20.7	5.25	4.5	1.5	3	botten	8	3.2	214	10.34	27
14275-1b	41.3	7.5	9	1.5	6	botten	5.1	3.9	106	2.57	30
14726-3d	82.7	12.0	18	1.5	12	botten	7.5	4.1	242	2.93	42
14727-4a	248.0	30.0	54	1.5	36	botten	9	3.8	322	1.30	50
14729-a	20.7	5.25	4.5	1.5	3	topp	4.5	2.1	45	2.17	8.5
14729-b	41.3	7.5	9	1.5	6	topp	6	3	113	2.74	4.5
14729-c	82.7	12.0	18	1.5	12	topp	7.5	4	235	2.84	30.5
14729-d	248.0	30.0	54	1.5	36	topp	22	12	6082	24.52	41.1

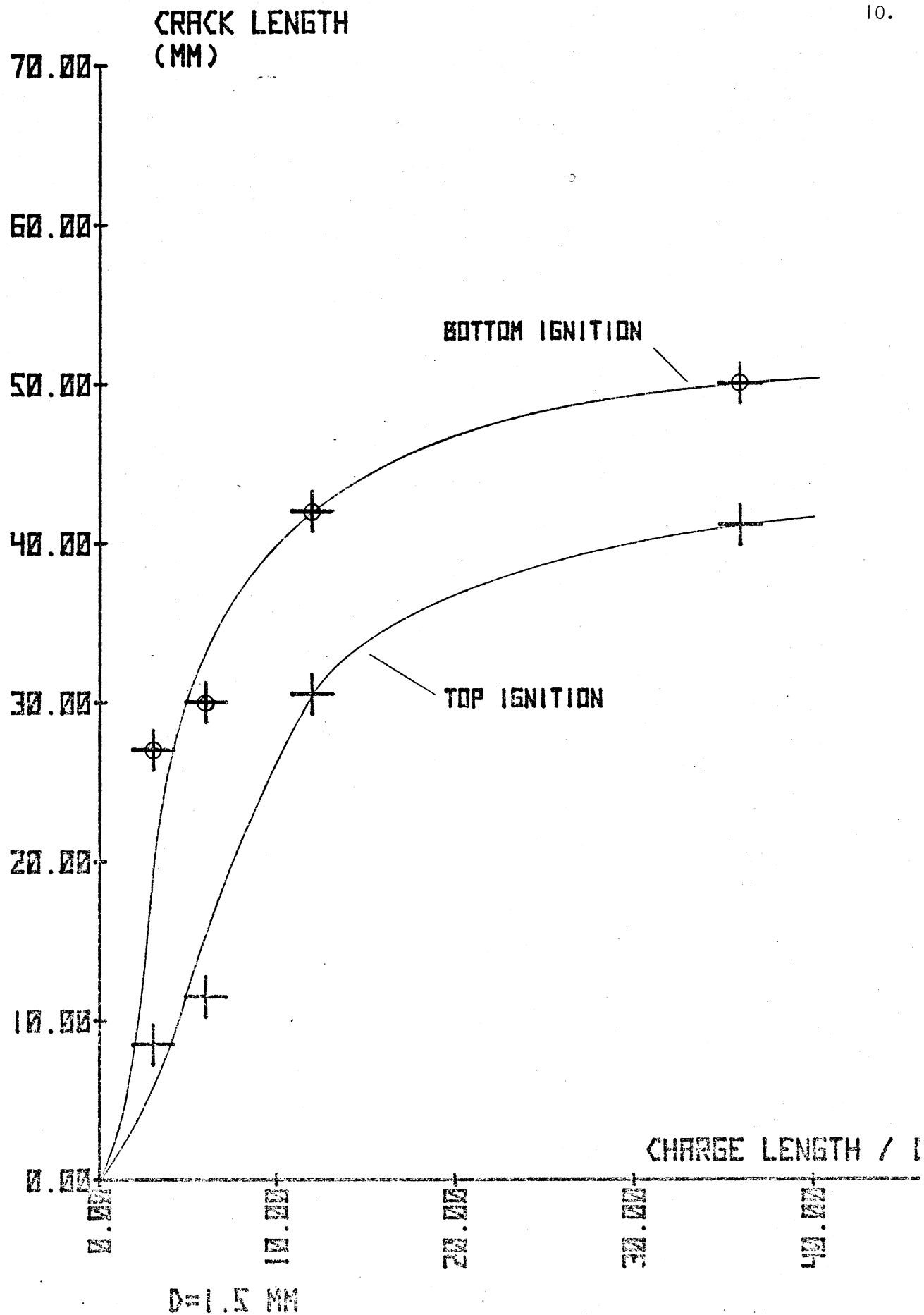


Diagram 2. Spricklängden i plexiglas som funktion av förhållandet l/d , vid topp- och botteninitiering.

KRATERDJUP (MM)

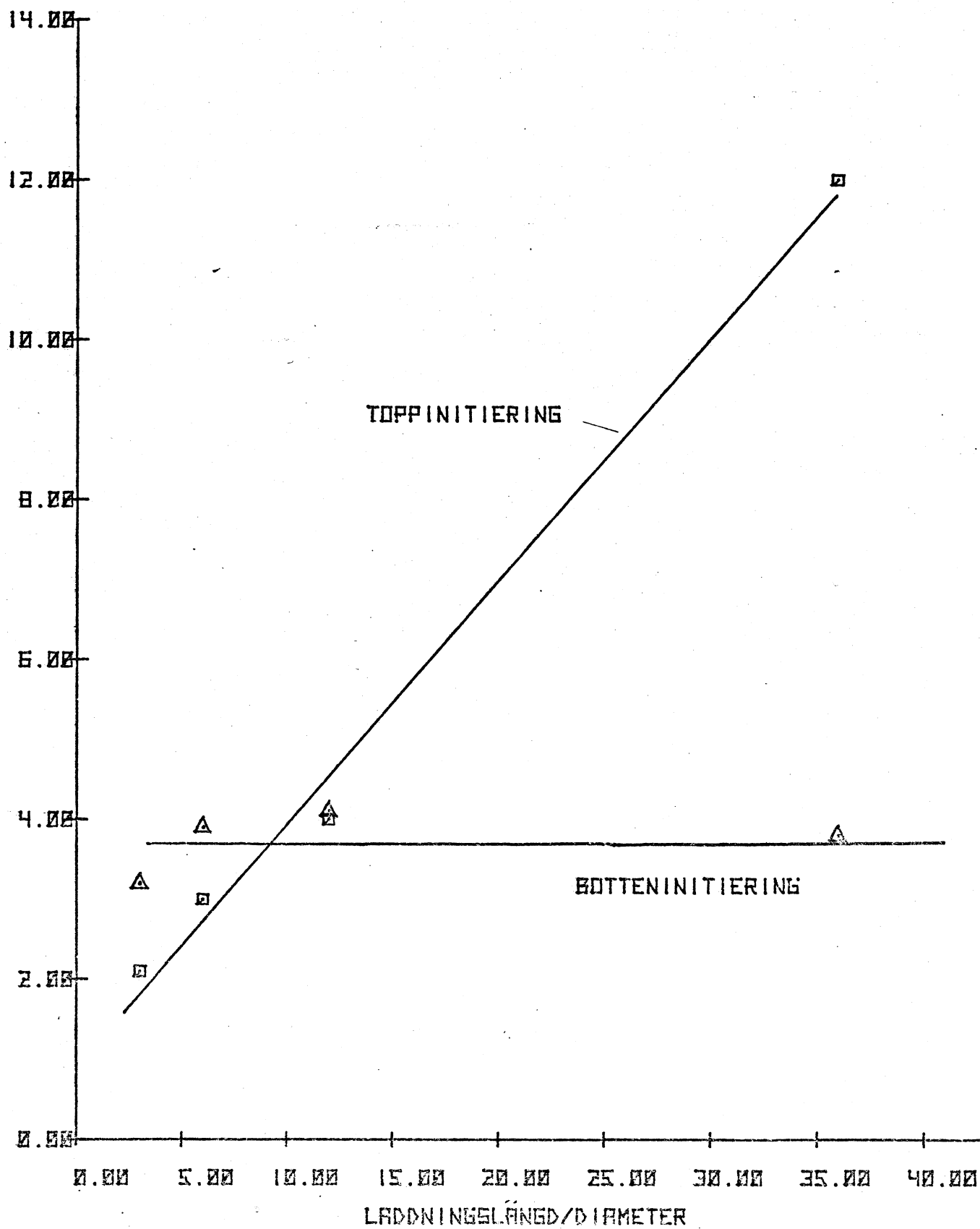


Diagram 3. Kraterdjupet i plexiglas som funktion av l/d , vid toppinitiering och botteninitiering.

Resultat av modellförsök.

Figurerna 7-8, tabell 1 och diagram 2-3 visar de erhållna resultaten.

I diagram 2 är spricklängden uppritad som funktion av l/d vid topp- resp. botteninitiering. Som framgår av diagrammet är spricklängden större vid botteninitiering.

Eftersom hålen i försöksserien var inspända med enbart en fri yta kan inga mer vittgående slutsatser dras enär man vid pallsprängning har möjlighet för utslag genom förekomsten av ytterligare en fri yta. Trots ovanstående ges en fingervisning om att botteninitiering är att föredra ur sönderbrytningssynpunkt.

Diagram 3 visar kraterdjupet som funktion av l/d vid toppinitiering och botteninitiering. Vid ökande l/d -förhållande erhålles en markant ökning av kraterdjupet vid toppinitiering medan kraterdjupet vid botteninitiering tenderar att hålla sig konstant.

Om förladdningen vid praktiska sprängningar är mindre än det kritiska djupet vid kratersprängning innebär detta att om toppinitiering sker så ökar risken för kast från borrhåls-mynningen. De linjer som lagts in i diagrammet är minsta-kvadrat-anpassade till de fyra mätvärdena i vardera försök men vid höga l/d -förhållanden kan man förvänta sig att kurvan vid toppinitiering kommer att närma sig en asymptot parallell med abskissan.

Fullskaleförsök.

För att i berg kontrollera resultaten av de tidigare redovisade modellsprängningarna genomfördes en rad försök i granit.

a/ Optimalt respektive kritiskt kraterdjup vid $l/d = 5.2$

Med laddkäpp packades 1 st Dynamex B patron, $\phi 22 \times 200$ mm, till längden 140 mm i hål med diametern 27 mm. Packningsgraden blev därvid 1.25 kg/l.

Tabell 2. Sprängningsdata för granit.

Skott	Sprängämnesvikt Q , g	Laddningsdjup L mm	Laddningslängd l mm	Håldiam. d mm	l/d
14732-1	100	75	140	27	5.2
14732-2	100	130	140	27	5.2
14732-3	100	230	140	27	5.2
14732-4	100	330	140	27	5.2

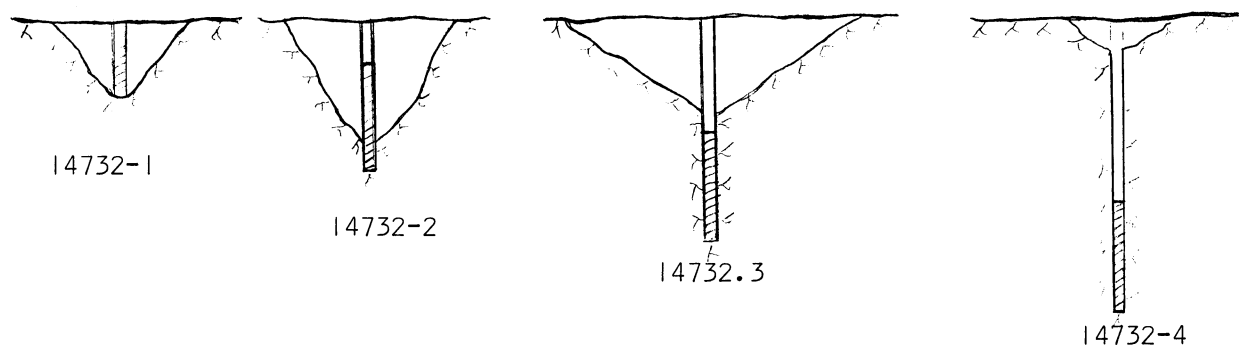


Fig. 8. Laddningsgeometri och kraterform, se även tabell 2.

Tabell 3. Kraterdata för granit.

Skott	Radie mm	Djup mm	Volym cm ³
14732-1	110	100	1270
14732-2	120	180	2713
14732-3	180	120	4070
14732-4	70	40	205

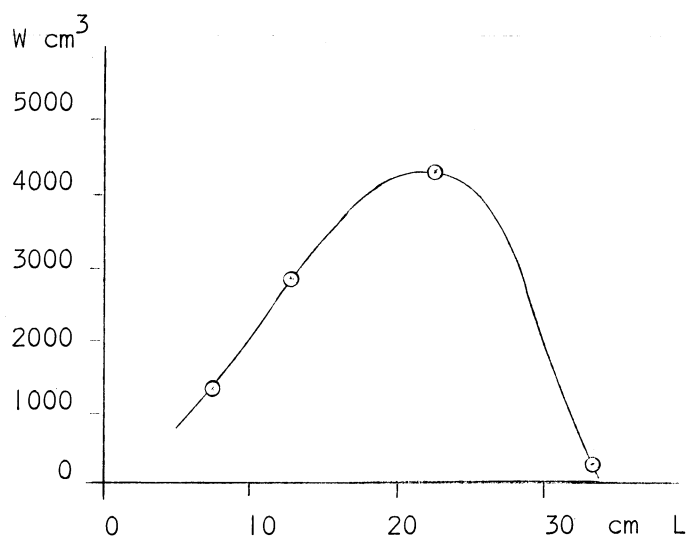


Fig. 9. Kraterkurva för granit med 100 g Dx.

Resultat:

Sprängningsdata redovisas i tabell 2 och kraterkurvan i figur 9. Av kraterkurvan framgår att det kritiska laddningsdjupet är ca. 35 cm om $l/d = 5.2$.

I diagram 4 sidan 15 finns kurvan över ovanstående försök för 1" håll inlagd och en extrapolering upp till 14" har skett.

b/ Kratervolym vid ett laddningslängd-diameter-förhållande = 10.4.

Vid föregående kraterprov bedömdes det optimala laddningsdjupet till ca. 200 mm, för en 140 mm lång laddning. Den oladdade hållängden i ovannämnda prov var 130 mm. Med samma oladdade hållängd utfördes ett prov, se fig. 10, där sprängningsdata var följande:

Sprängämnesvikt: 200 g
Hålldiameter : $\phi 27$ mm
 l/d : 10.4

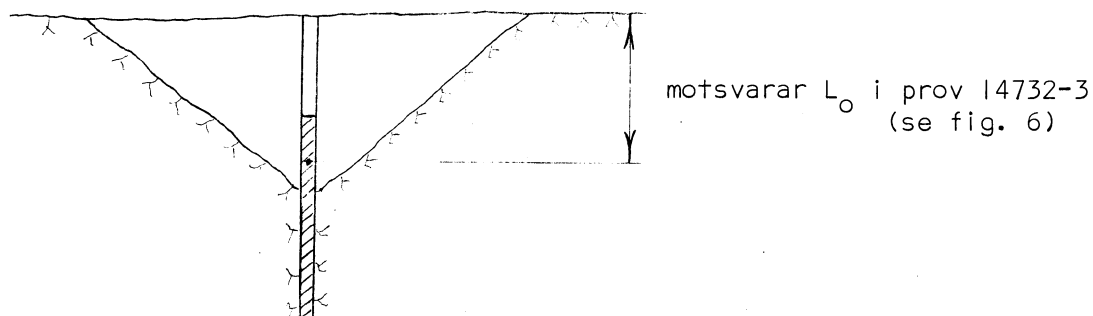


Fig. 10. Krater och laddningsgeometri.

Kraterdata:

Radie = 295 mm
Djup = 240 mm
Volym $\sim 22100 \text{ cm}^3$

Resultat:

Jämfört med resultatet vid $l/d = 5.2$ där kratervolymen vid optimalt laddningsdjup blev ca. 4000 cm^3 framgår det entydigt av detta prov, att kratervolymen såväl som kraterdjupet ökar med ökat värde på l/d upp till en viss gräns. Figur 10 visar den uppkomna kratern.

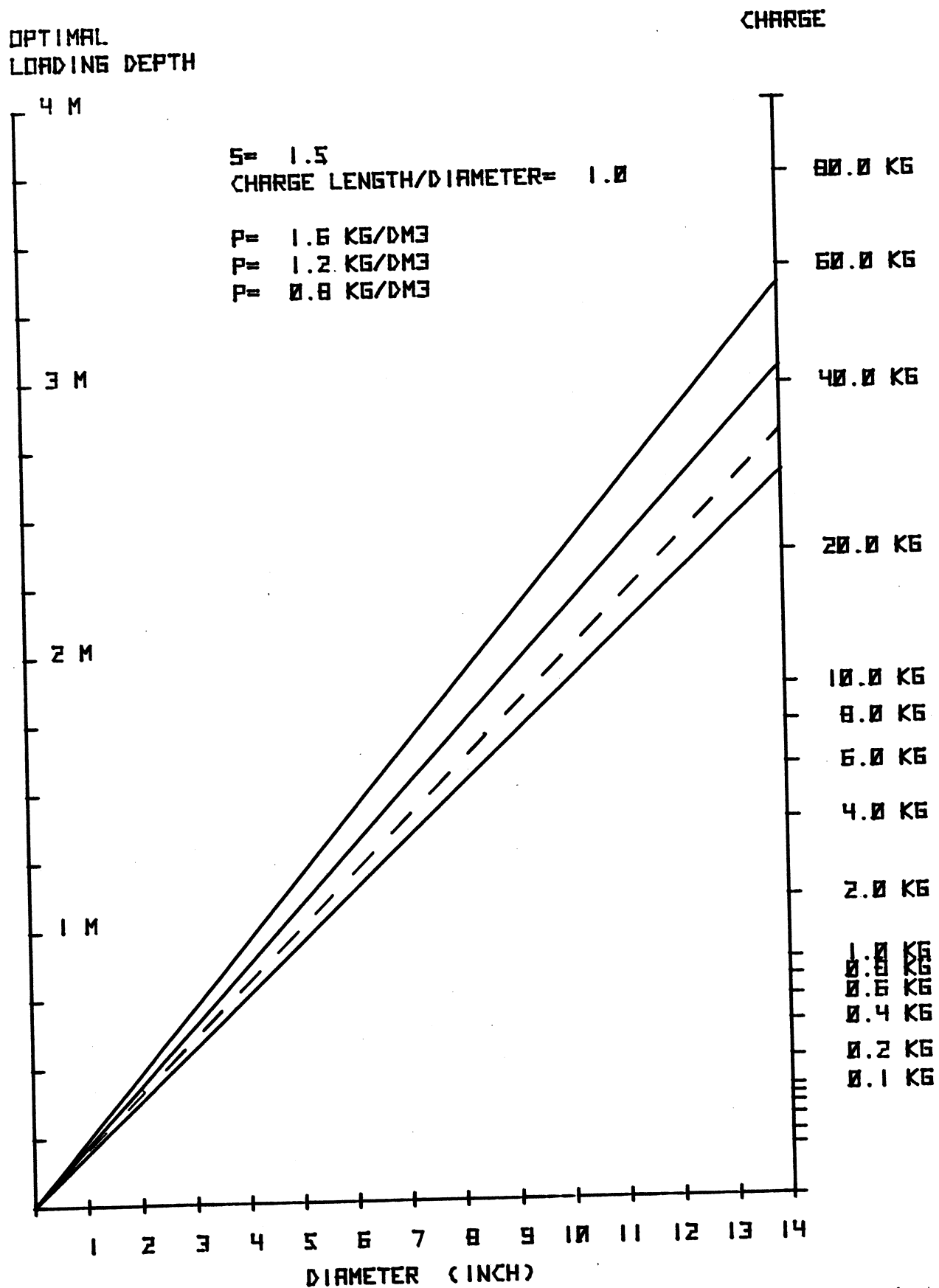


Diagram 4. Optimalt laddningsdjup och optimal laddningsvikt i granit som funktion av laddningsdiametern vid olika packningsgrader. Den streckade linjen utgör resultatet vid 1" hål extrapolerat till 14".

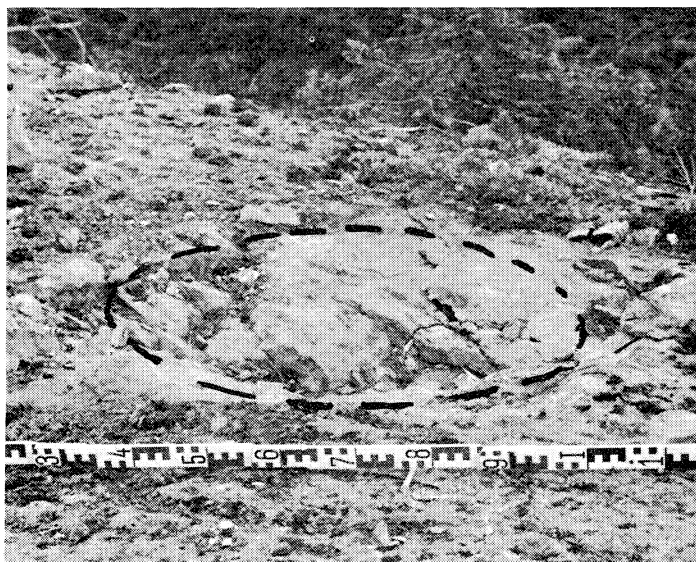


Fig. 11. Kraterbildning $l/d = 10.4$.

c/ Botten- resp. toppinitiering vid oladdat håldjup $> L_k$ och $l/d = 20.8$.

För att undersöka risken för eventuell kraterbildning och kast vid laddningsdjup överstigande det kritiska utfördes följande prov.

Laddningen placerades i borrhålet med avståndet 420 mm till markytan (oladdad hållängd). Som vid tidigare försök användes inte någon förladdning.

Sprängningsdata.

Sprängämnesvikt : 560 mm
 Laddningslängd : 420 mm
 Laddningsdiameter: 27 mm
 l/d : 20.8
 Botteninitiering : skott nr 14733-6
 Toppinitiering : skott nr 14733-7

Resultat:

Ingen kraterbildning vid botten- resp. toppinitiering.

d/ Botten- resp. toppinitiering vid oladdat håldjup $< L_k$ och $l/d = 36.4$.

Laddningsdata.

	Toppinitiering	Botteninitiering
Sprängämnesvikt	700 g	700 g
Håldiameter	27 mm	27 mm
Laddningslängd	980 mm	980 mm
l/d	36.4	36.4

Kraterdata för granit.

	Toppinitiering	Botteninitiering
Radie	580 mm	370 mm
Djup	310 mm	190 mm
Volym	109150 mm	27250 mm

Skala 1:125

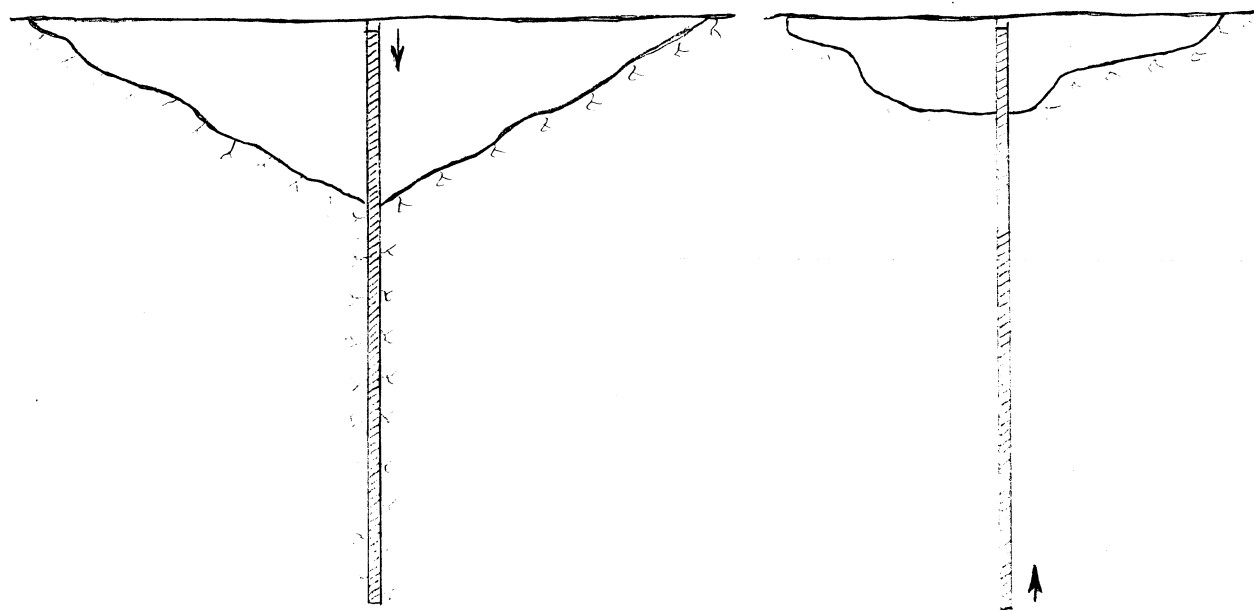


Fig. 12: Skott 14734, toppinitiering. Skott 14734, botteninitiering.

Resultat.

Resultatet av försöket med toppinitiering vid ett l/d -förhållande på 36.4 visas i diagram 5. I det ogynnsammaste fall där man laddat ända upp till borrhålsmynningen erhöles ett större kraterdjup än vid ett l/d -förhållande lika med 5.2. Inga försök har utförts med större värde på l/d än 36.4 men troligen bör kraterdjupet stagnera vid ett förhållande obetydligt högre än 36.4. I det inspända hålet har materialet ingen svällningsmöjlighet i en riktning vinkelrätt mot borrhålet vilket är fallet vid pallsprängning, varför kraterdjupet i sistnämnda fall svårligen kan överskridas. I samarbete med LKAB pågår för närvarande en försöksserie med 4 1/2" hål där den oladdade hållängden varieras och $l/d > 100$. Försöken är ej avslutade men i nuvarande läge har inga indikationer erhållits på att kraterbildning skulle fås vid en oladdad hållängd på två meter.

Om vi lägger in det optimala kraterdjupet som fås vid l/d lika med 36.4 i diagram 6 ser vi att den punkten ej ligger ovanför kurvan för det kritiska djupet som är karaktäristisk för en cylindrisk laddning med $l = d$.

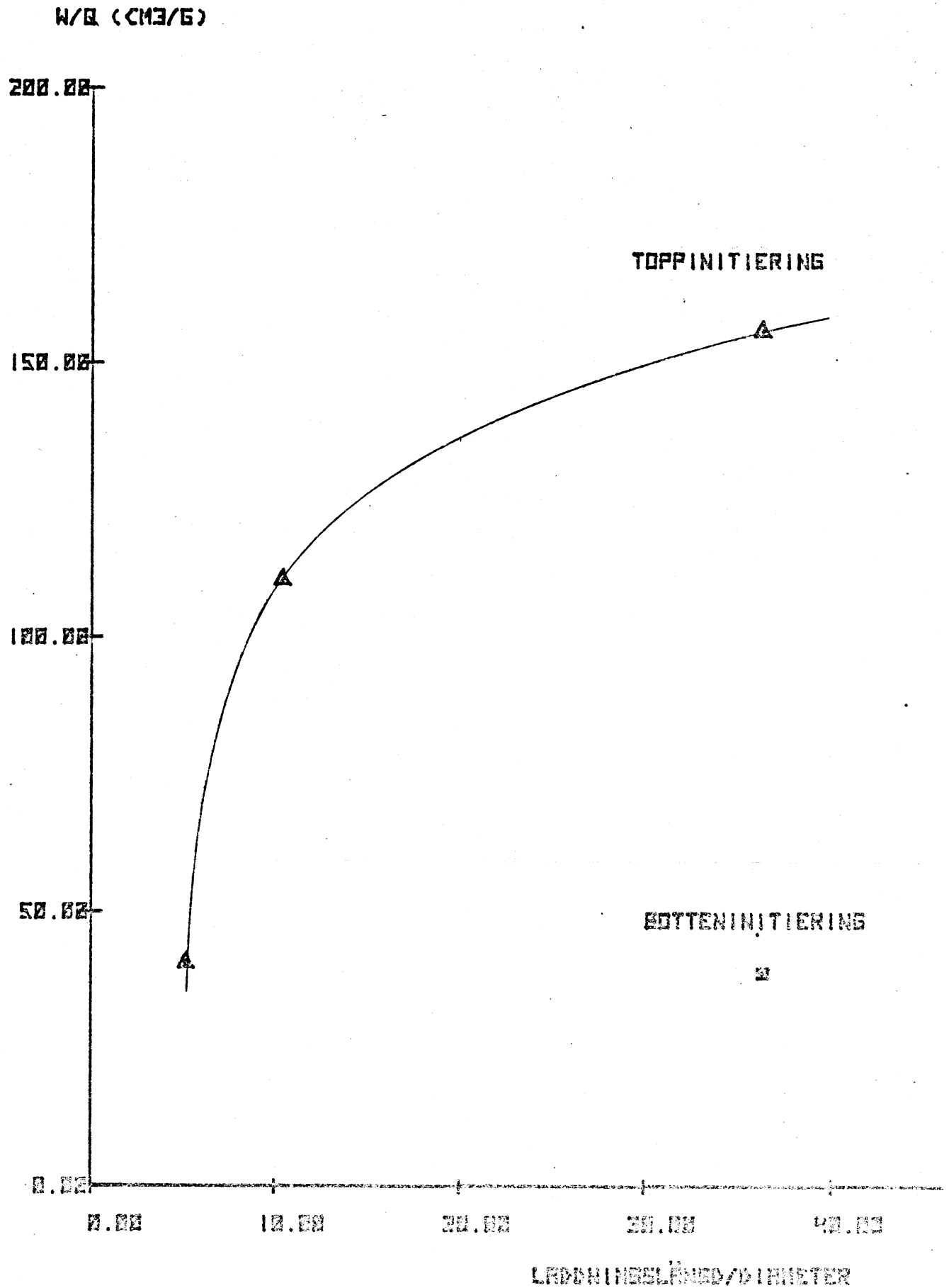


Diagram 5. Reducerad kratervolym W/Q för granit som funktion av l/d vid praktiska försök med topp- respektive botteninitiering i 1" hål.

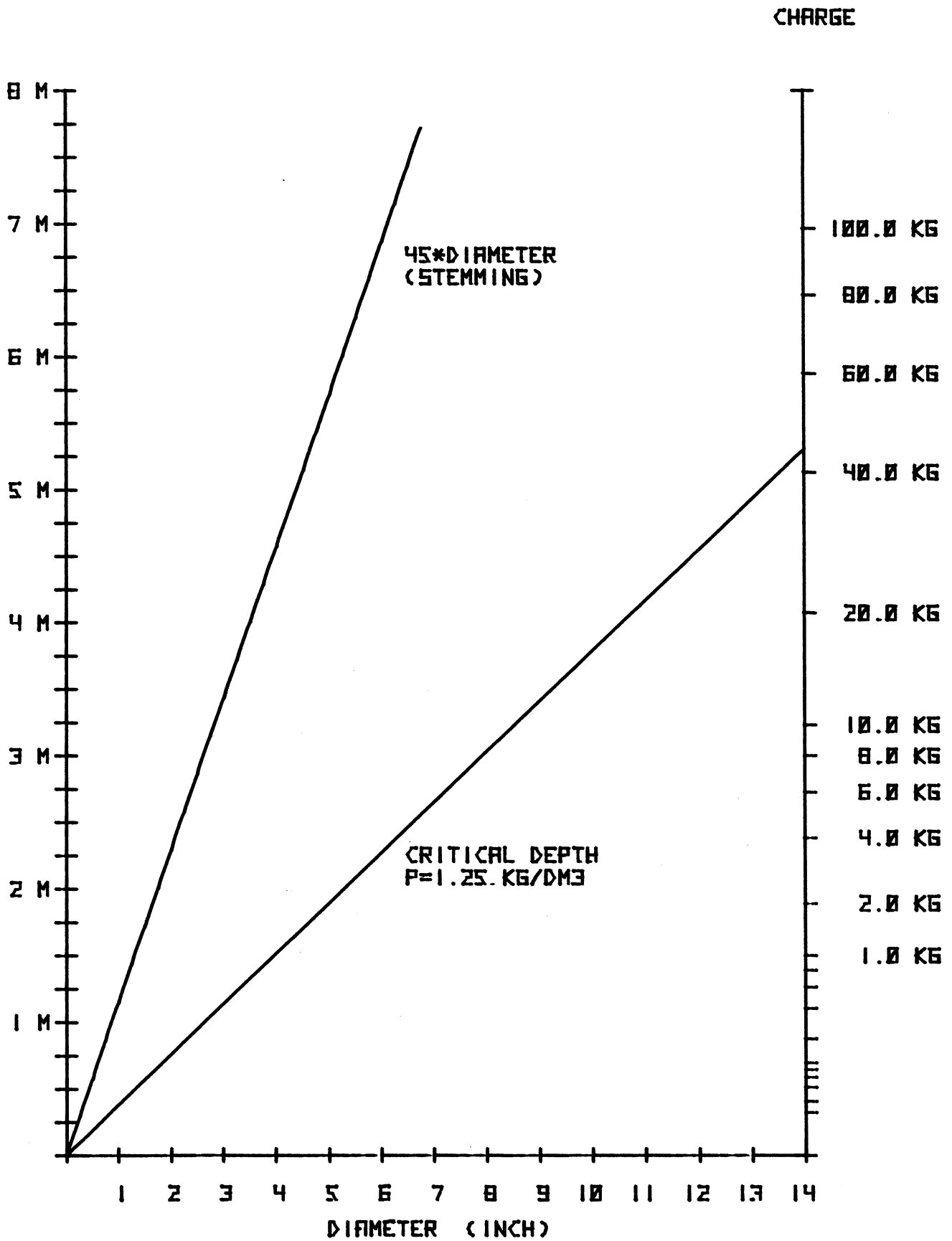


Diagram 6. Det kritiska djupet för en cylindrisk laddning med $l = d$ i bergmaterial som funktion av håldiametern.

Allmänt angående förladdningen.

I tillgänglig litteratur finns varierande förslag över förladdningens storlek. I en del litteratur ges rekommendationen att förladdningen skall vara densamma som den praktiska försättningen medan i andra fall den maximala försättningen anges. I Kungl. Arbetarskyddsstyrelsens spränganvisningar preciseras inte heller vilken försättning som skall användas. Vid en ökad pallhöjd reduceras emellertid den praktiska försättningen på grund av hänsyn till lutningsfelet vilket skulle innebära en minskad förladdning, varför det är mer korrekt att använda den maximala försättningen som är oberoende av pallhöjden. Den maximala försättningen kan approximeras med $45 \times$ håldiametern. I diagram 6 har denna kurva lagts in tillsammans med kurvan över det kritiska djupet för en cylindrisk laddning med laddningshöjden lika med diametern.

Diagrammet visar att om Kungl. Arbetarskyddsstyrelsens anvisningar efterföljs så har man en fullgod säkerhetsmarginal mot kast gentemot laddningar med laddningshöjden lika med laddningsdiametern. För att klart definiera gränsen för säker förladdningslängd vid praktiska borrhålsladdningar pågår ytterligare försök med $4 \frac{1}{2}$ " hål i samarbete med LKAB.

Utvärdering av filmmaterial, gasfrontens rörelse.

För att klarlägga mekanismen vid kastning från grovhålssprängning har Stiftelsen Svensk Detonikforskning inlett ett samarbete med den tekniska avdelningen vid LKAB. I det inledande skedet har filmning av konventionella salvor sprängda med $4 \frac{1}{2}$ " respektive $7 \frac{1}{2}$ " hål med och utan förladdning utförts. Eftersom gasens hastighet är en övre teoretisk gränshastighet för lossprängda stenar har huvudintresset vid utvärderingen av filmmaterialet varit att studera gasfrontens rörelse som funktion av tiden. Bildserien i fig. 12 sidan 23 visar en salva med $7 \frac{1}{2}$ " tums hål där den oladdade hållängden var ca. 2 m. Bilderna är karakteristiska för grovhålssprängningar. Avsikten med denna utvärdering har också varit att bilda underlag för pågående försök där den oladdade delen i borrhålet varieras.

Utvärderingen av filmmaterialet har utförts på ett analysbord med koordinatläsare av typ Vanguard.

Resultat.

Resultaten av utvärderingarna redovisas i diagrammen 7-10.

För att få ett mått på de maximala hastigheterna för den synliga gasfronten har ett medelvärde över de två första filmrutorna angivits där gasfronten är synlig, d.v.s. under tidsperioden $\frac{1}{32}$ sek.

Tabell.

Håldiameter	4 1/2"	4 1/2"	7 1/2"	7 1/2"
Förladdning	Nej	Ja	Nej	Ja
Diagram nr	7	8	9	10
Maximal medel- hastighet (m/s)	379	316	370	428

Den högsta stenhastighet som har utvärderats genom detta filmmaterial härrörde från ett 4 1/2" hål utan förladdning. Stenhastigheten var ungefär 96 m/s med en ekvivalent klotdiameter på cirka 0.5 m, vilket kan motsvara en kastlängd (vid 45° elevation) på 550 m.

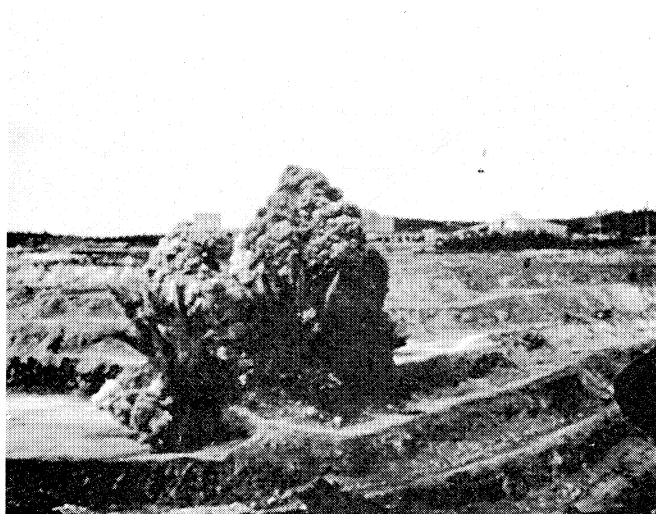
Vid stationär strömning ur ett cikulärt hål gäller att gasfrontens hastighet är direkt proportionell mot inverterade avståndet s från hålet

$$v = k_1 \frac{1}{s} \quad (k_1 \text{ beror av impulsflödet})$$

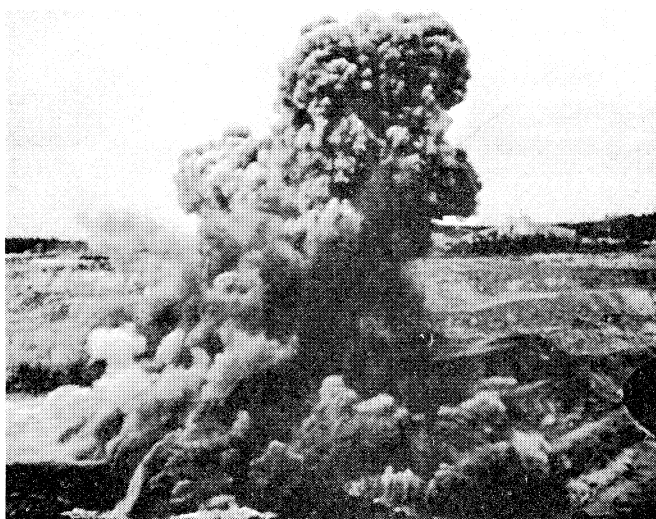
Författarna ber att få framföra sitt tack till Ingenjör B. Johansson, Västerbottens Grusförädling AB samt Bergsingenjör Bengt Aaro och Ing. Lars Larsson, LKAB som välvilligt har ställt arbetsplatser, filmmaterial och erfarenhet till vårt förfogande.



a/



b/



c/

Fig. 12. Sprängning av 10 meters pall med 41 st 7 1/2 tums hål innehållande totalt ca. 16000 kg slurrysprängämne.

a/ ca. 0.05 s efter initiering

b/ ca. 0.75 s " "

c/ ca. 4.05 s " "

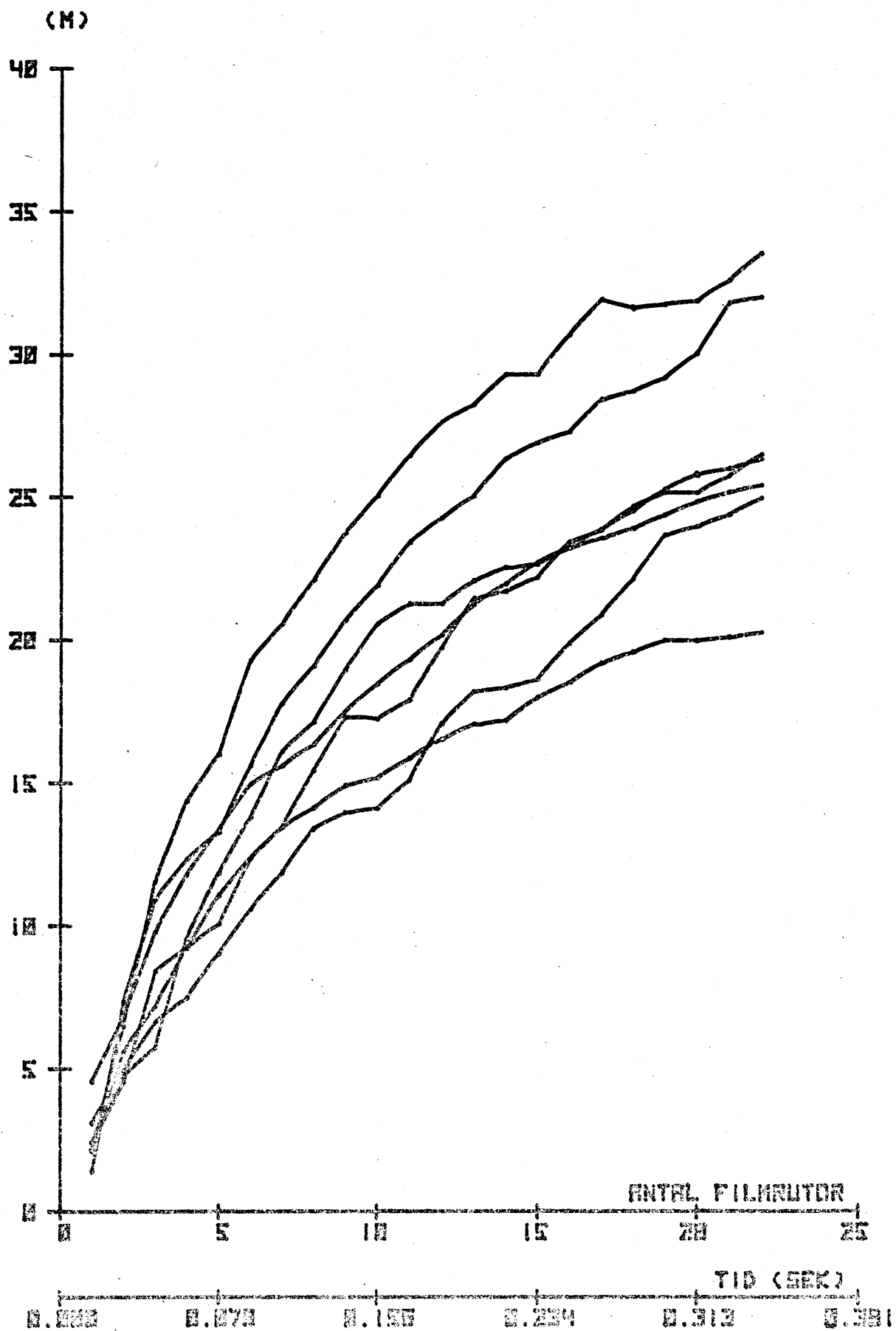


Diagram 7. Gasfrontens förflyttning som funktion av tiden.

Håldiameter 4 1/2" utan förladdning.

7 salvor. Maximal hastighet ca. 379 m/s.

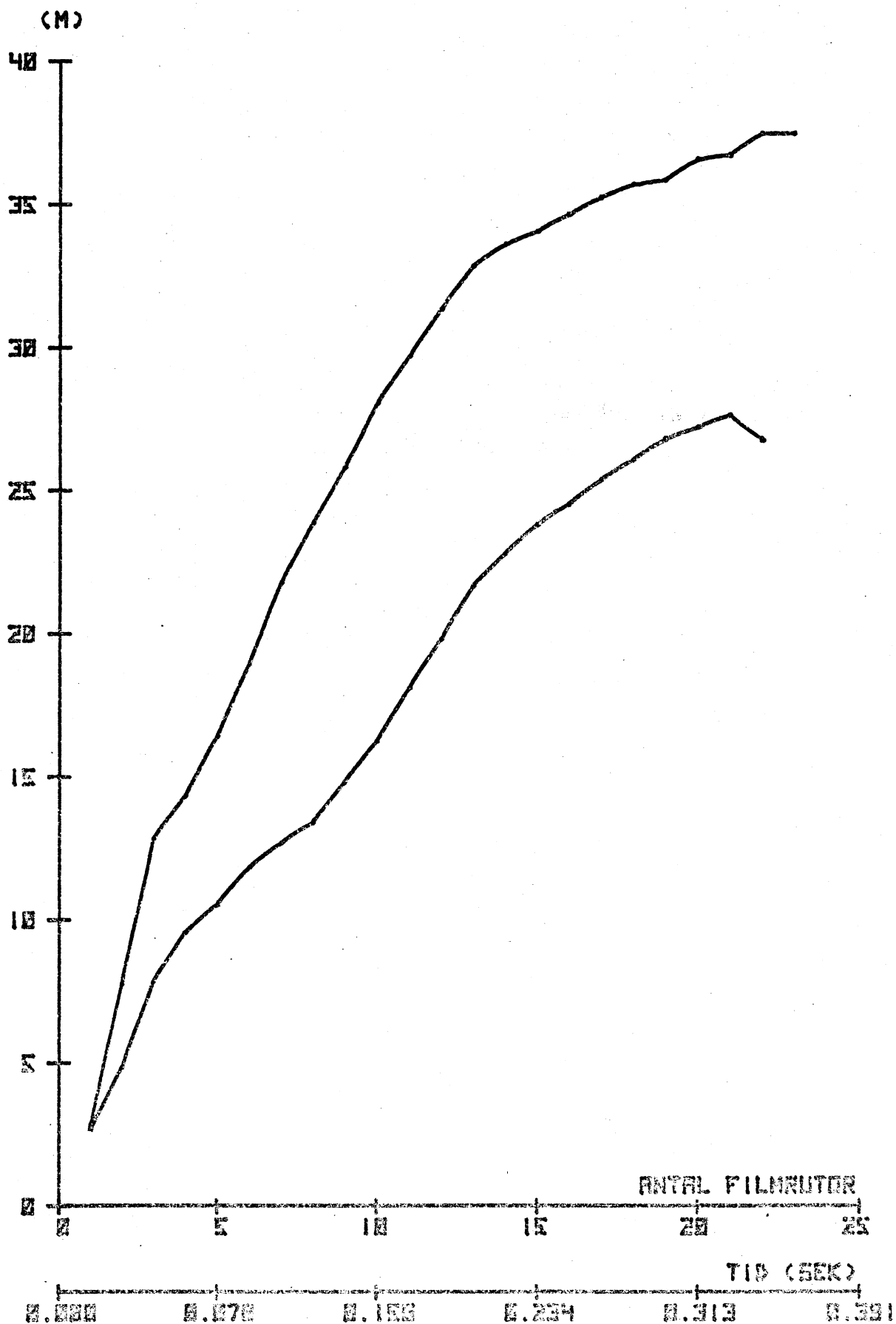


Diagram 8. Gasfrontens förflyttning som funktion av tiden.

Håldiameter 4 1/2" med 2-2.5 m lång förladdning.

2 salvor. Maximal hastighet ca. 316 m/s.

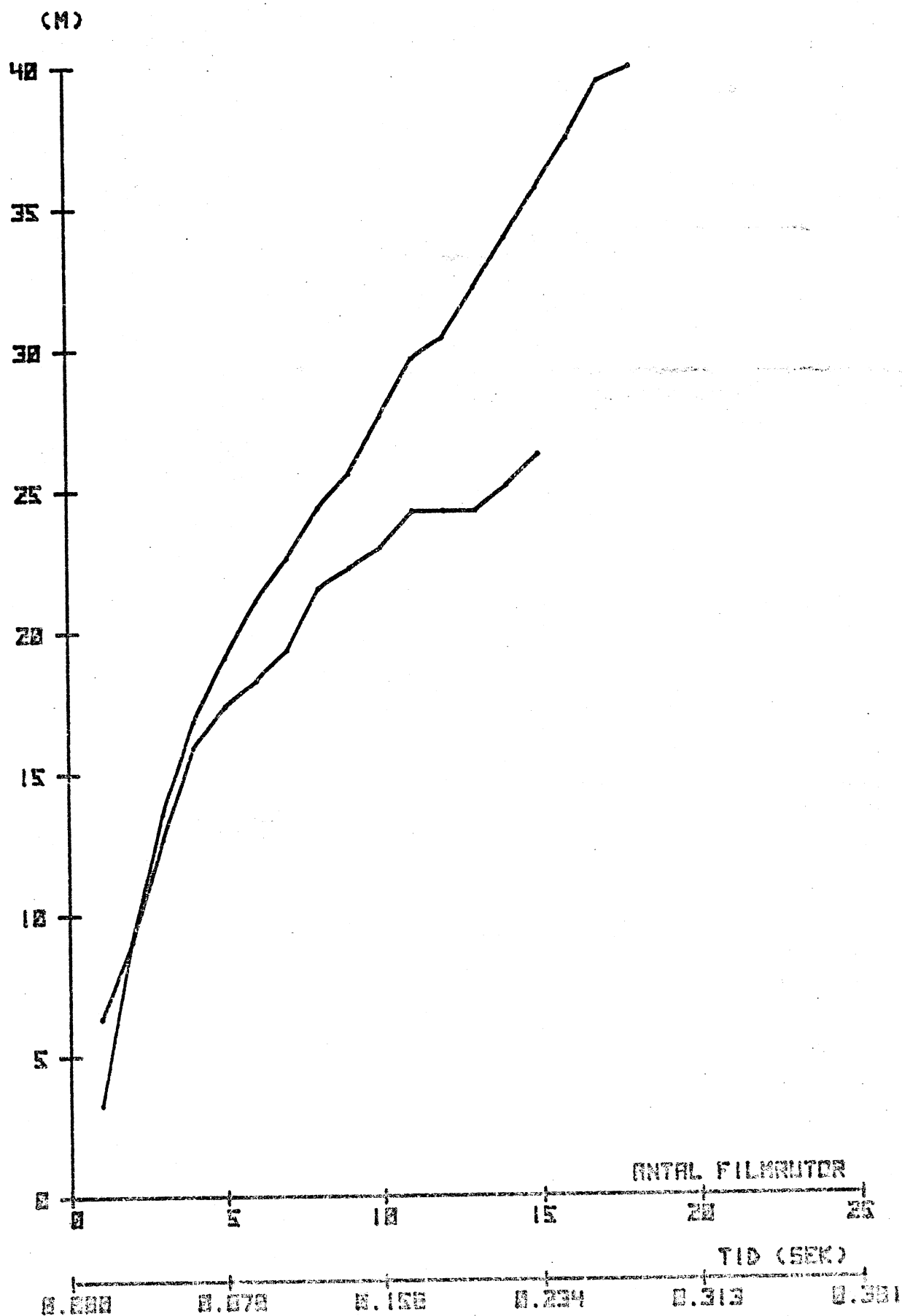


Diagram 9. Gasfrontens fortflyttning som funktion av tiden.

Håldiameter 7 1/2" utan förladdning.

2 salvor. Maximal hastighet ca. 370 m/s.

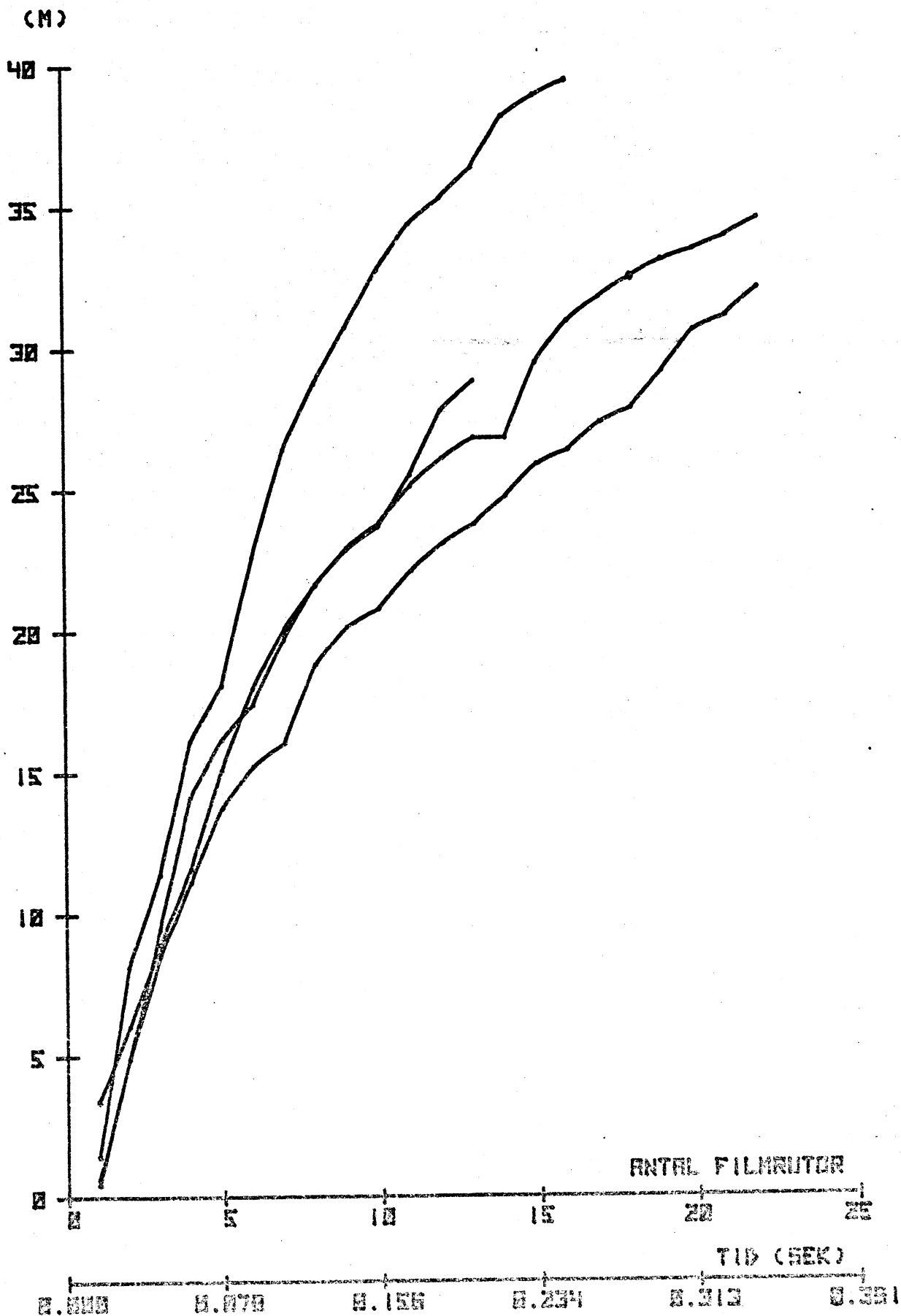


Diagram 10. Gasfrontens förflyttning som funktion av tiden.

Håldiameter 7 1/2" med 2-2.5 m lång förladdning.

4 salvor. Största medelhastighet under tidsintervallet 1/32 s.
Ca. 428 m/s.

