

METALLACCELERATIONSFÖRMÅGA HOS HEXOTOL
OCH HEXOTOL MED 15% ALUMINIUM ELLER INERT
MATERIAL. NÅGRA TIDSUPPLÖSTA MÄTNINGAR I
CYLINDERGEOMETRI

Gert Bjarnholt

DS 1974:10

18.11.1974

STIFTELSEN
SVENSK DETONIKFORSKNING
SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION

VINTERVIKEN - 117 48 STOCKHOLM
SWEDEN

METALLACCELERATIONSFÖRMÅGA HOS HEXOTOL
OCH HEXOTOL MED 15% ALUMINIUM ELLER INERT
MATERIAL. NÅGRA TIDSUPPLÖSTA MÄTNINGAR I
CYLINDERGEOMETRI

Gert Bjarnholt

DS 1974:10

18.11.1974

Sammanfattning

Några hexotolbaserade sprängämnesblandningars förmåga att accelerera ca 2.3 mm tjocka cylindriska kopparskal med 25 mm innerdiameter har undersökts genom svepkameraregistrering (cylinderexpansionstest).

En jämförelse mellan ren hexotol och hexotol med 15% aluminium respektive inert material (LiF) tyder på att aluminium med ca 30 och 60 μm medelkornstorlek ej i nämnvärd grad reagerat före CJ-planet. En betydande del har dock hunnit reagera några mikrosekunder efter detonationsfronten.

Skalets sluthastighet vid 25 mm laddningsdiameter blev ca 2-4% lägre för hexotol med 15% aluminium än för ren hexotol. Det begränsade utbytet av aluminiumreaktionen kan förklaras av de provade aluminiumkornens relativt långa förbränningstid samt av att aluminium förbränns till Al_2O_3 som är en fast reaktionsprodukt. Fasta reaktionsprodukter minskar gasmängden vilket medför att energitillskottet manifesterar sig mer som en temperaturhöjning än som en tryckökning. Vid de snabba expansioner som gäller här kan även bristande termodynamisk jämvikt mellan fasta och gasformiga reaktionsprodukter vara en begränsande faktor.

Större laddningar och ökat förhållande metallmassa/sprängämnesmassa samt mindre kornstorlek hos aluminiet borde kunna öka hexotolens prestanda så att sluthastigheten hos metallskalet blir åtminstone jämförbar med den som hexotol 60/40 ger vid jämförelse på volymbasis.

Cylindertestet har visat sig vara ett utmärkt precisionsinstrument för tidsupplöst studium av metallskals acceleration. Mätmetoden ger möjligheter till reaktionskinetiska studier i sprängämnen samt bestämning av en tillståndsekvation för reaktionsprodukterna. Speciellt vid studium av icke ideala sprängämnens detonationsegenskaper kan metoden ge svar på frågeställningar som idag inte kan behandlas tillfredsställande enbart genom teoretiska beräkningar.

Arbetet har utförts inom ramen för ett samarbetsavtal mellan FOA och Stiftelsen Svensk Detonikforskning.

Innehåll

Sammanfattning

Inledning

Symbollista

1. Mätteknik och anslutande teori

11. Kort beskrivning av cylinderexpansionstestet
12. Svepkamera Koska 8
13. Argonblix för bakgrundsbelysning
14. Specifikationer på kopparcylindern
15. Initieringssystem för sprängämne och argonblix
16. Detonationshastighetsmätning
17. Korrektur för fel som uppstår vid optisk lägesbestämning av cylinderytans läge
18. Utvärdering av svepkameraregistreringarna
19. Anpassning av ett analytiskt uttryck till radie-tid-koordinaterna

2. Diskussion av mätresultaten

21. Inledning
22. Detonationshastigheter
23. Expansion av kopparcylindern
24. Uppskattning av det mekaniskt utvinnbara arbetet
25. Detonationsdata beräknade med BKW-programmet
26. Sammanfattande kommentar

3. Referenser

4. Tabeller

5. Figurer

6. Appendix

- A1. Sprängämnen och sprängladdningar.
- A2. Beräkning av fel som uppstår vid optisk lägesbestämning av cylinderytans läge beroende på ljusbrytning i luftstötstången runt cylindern.
- A3. Bestämning av sann partikelhastighet hos skalet ur hastighet bestämd genom differentiering av radie-tiddata.
- A4. Uppskattning av det mekaniskt utvinnbara arbetet.

Inledning

Många metaller frigör avsevärda energimängder när de förbränns (se tabell 1). Termokemiska beräkningar visar att inblandningen av aluminium i hexotol ger en avsevärd höjning av den kemiskt frigjorda energien (se tabell 3). Då aluminium inblandas i ett sprängämne minskar dock gasmängden beroende på att aluminiet förbränns till Al_2O_3 som är en fast reaktionsprodukt. Denna sänkning av gasmängden tillsammans med aluminiets relativt långa förbränningstid är två faktorer som begränsar möjligheterna att i praktiken få en höjning av sprängämnets mekaniska arbetsförmåga.

Detonationshastigheten och detonationstrycket sjunker vid inblandning av Al i högbrisanta sprängämnen /1,2/. En stor del av energitillskottet kan dock utvinnas som mekaniskt arbete när sprängämnet får detonera fördämt, t.ex. under vatten /3,4,5/. Sprängämnet är då ordentligt fördämt så att relativt lång tid står till förfogande för reaktionsprodukternas expansion och dessutom utträttas en avsevärd del av det mekaniska arbetet (bubbelpulsenergien) vid relativt låga tryck i reaktionsprodukterna.

Målsättningen med denna undersökning har varit att försöka bestämma när och hur mycket av aluminiumreaktionen i 85 hexotol/15 Al som frigöres som mekaniskt arbete i form av kinetisk energi till en metallcylinder som omsluter sprängämnet. Resultaten avses ge ett förbättrat experimentellt underlag för bedömning av hexotonals prestanda vid metallacceleration både i cylindergeometri (spränggranater t.ex.) och vid "head on" accelerationer. Försöken avser dessutom att ge en bättre förståelse av de mekanismer som i praktiken begränsar möjligheterna att utvinna aluminiumreaktionens energitillskott som nyttigt arbete.

Då relativt litet har publicerats tidigare om den mätmetod med svepkameraregistrering av cylinderutans rörelse som använts vid undersökningen behandlas problem med anknytning till mätmetoden relativt utförligt. Några av dessa problem behandlas i appendixdelen.

Symbollista

R'	=	cylinderytterytanens skenbara radie beräknad från svepkamera-registrering
R_s	=	luftstöt vågsfrontens radie
R_{yo}	=	R_o = cylinderytanens ursprungliga ytterradie
R_y	=	R = " ytterradie
R_{io}	=	cylinderytanens ursprungliga innerradie
$(R-R_o)$	=	cylinderytanens förflyttning mätt från svepkameraregistrering med spalten vinkelrätt mot cylinderaxeln
S	=	$(R_{yo}-R_{io})$ = ursprunglig skaltjocklek hos kopparcylindern
Δr	=	korrektion för effekt som beror på ljusbrytning i luftstöt vågen
n_o	=	brytningsindex för den ostörda luften
n	=	" för luften mellan cylinderytan och luftstöt vågsfronten
η	=	V_o/V = kompressionen av luften mellan cylinderytan och luftstöt vågsfronten
v_n	=	hastigheten hos cylinderytan i en riktning som är normal mot ytan
v_c	=	hastighet hos cylinderytan i en riktning vinkelrätt mot cylinderaxeln (fås genom differentiering av cylindertestdata)
v_{co}	=	den hastighet cylinderytan får i radiell riktning när detonationsvågen passerar ut genom ytan (fria ytans hastighet)
v_p	=	den hastighet med vilken en partikel i cylinderskalet rör sig
θ	=	den vinkel som cylinderskalet avböjs från cylinderaxeln
D	=	detonationshastigheten i sprängämnet
t	=	tiden från början av expansionen beräknad ur en anpassning till de experimentella punkterna
t_e	=	den experimentellt bestämda tiden räknad från början av expansionen
W	=	det mekaniska arbetet som sprängämnet uträttar vid sin expansion
ρ_o	=	laddningsdensiteten hos sprängämnet
ρ_c	=	densiteten hos metallskalet

1. Mätteknik och anslutande teori11. Kort_beskrivning_av_cylinderexpansionstestet_

Som mätmetod för prestanda hos de sprängämnen som provades valdes cylinderexpansionstestet. Denna mätmetod innebär att man mäter hur skalet till en sprängämnesfylld kopparcylinder expanderar i radiell riktning som funktion av tiden sedan sprängämnet detonerat /6,1/. Standarduppställningen består av en ca 25 mm innerdiameter, ca 30 mm ytterdiameter och ca 300 mm lång kopparcylinder fylld med det sprängämne som skall provas. Sprängämnet initieras från ena änden och en svepkamera registrerar den radiella rörelsen hos kopparskalet ca 200 mm från initieringsändan med hjälp av konventionell skuggteknik (fig. 1). Vid varje skott mätes dessutom detonationshastigheten.

Ur svepkameraregistreringen (fig. 2) erhålles radie-tiddata varur cylinderväggens läge, hastighet, acceleration och energi som funktion av tiden kan beräknas. Ur accelerationen kan dessutom trycket i reaktionsprodukterna beräknas. Tillsammans med data på detonationshastighet och detonationstryck kan resultaten också användas för att beräkna en tillståndsekvation för sprängämnets reaktionsprodukter. Detta har dock inte gjorts i denna undersökning.

12. Svepkamera_Koska_8_

För registrering av cylinderväggens rörelse används FOA-2G:s svepkamera Koska 8.

Avbildningsskalan valdes till 1:1, svephastigheten var ca 2 mm/ μ s och spaltbredden 0.05 mm. Som frontlins användes ett Rodenstockobjektiv med diametern 65 mm och brännvidden 600 mm. Linsen var nedbländad till f/16 eller f/22. De svepriktningsmarkeringen i kanten på filmen ej gick att få helt skarp försågs spalten med en tunn tråd med diametern 0.02 mm nära mitten av spalten varigenom svepriktningen kunde bestämmas exaktare. Bildbredden var 40 mm.

För exakt bestämning av avbildningsskalan fotograferades en ljuslåda som var försedd med avståndsmarkeringar in på stillbilden.

Upplösningen på stillbilden var 25-30 dubbellinjer/mm.

Den film som användes var Ilford FP4 som framkallades i Refinal, 5 min i 20°C.

13. Argonblixt_för_bakgrundsbelysning

Som ljuskälla bakom kopparcylindern användes en sprängämnesdriven argonblix

t med speciell utformning. För att ljusmörkergränsen vid cylinderns yta skall bli skarp fodras att de ljusstrålar som passerar omedelbart utanför cylinderytan är inbördes nära parallella och har en riktning som nära överensstämmer med en linje från den del av cylinderytan som observeras, till objektivet

s optiska centrum. Strålarna får dock ej vara för parallella, då detta omöjliggör observation av området mellan cylinderytan och luftstöt

vågsfronten (slirbildseffekt).

För att tillgodose dessa krav utformades argonblix

t (se fig. 2,3 o. 4) så att det lysande området begränsades i utsträckning och följde den expanderande cylinderväggen.

14. Specifikationer_på_kopparcylindern

Som utgångsmaterial användes kopparrör av kvaliteten SIS 5013 (99.7% Cu) med innerdiametern 24.96 ± 0.005 mm och ytt

erdiametern 30 ± 0.1 mm. Rören kapades i längder på 300 mm varefter ytt

erdiametern svarvades ned tills godstjockleken var ca 2.30 mm. För mätning av detonationshastigheten borrades två hål med diametern 0.7 mm 125 respektive 295 mm från initeringsänd

en. Cylindrarna värmebehandlades sedan stående på änden i inert gasatmosfär i 10 min vid 500°C.

Högst en dag före skott högglanspolerades ett ca 5 cm² stort område omkring det ställe av cylinderytan som kameran skulle se (se fig 5). Som slippasta användes karborundum och vatten som försatts med några droppar ammoniak. Området tvättades sedan först med destillerat vatten och därefter med metylalkohol. Efter poleringen bestämdes godstjockleken nära det område som kameran betraktade.

15. Initieringssystem för sprängämne och argonblix

En planvågslins med diametern 52 mm av barriär

typ samt en booster av pressad flegmatiserad pentyl med diametern 24.9 mm och längden 20 mm användes för att initiera sprängämnet i kopparcylinderns ena ände.

Vid skott utlöstes en sprängkapsel av typ GTI som i sin tur via ett par gram sprängdeg och två vanliga stubinsprängkapslar initierade två separata bitar detonerande stubin av typ Nitrocord. Med hjälp av en av dessa stubiner överfördes detonationen till planvågslinsen och med den andra till argonblix

t

argonblixten längre än till planvågslinsen fördröjdes blixstens tändning till ett par mikrosekunder innan detonationsvågen nådde mätstället på kopparcylindern. (Se fig 1).

16. Detonationshastighetsmätning

Detonationshastigheten i varje skott mättes på konventionellt sätt genom att tidsintervallet mellan slutning av två jonisationskontakter som placerats på laddningen enl fig. 5 mättes. Jonisationskontakterna bestod av en 0.65 mm ytterdiameter koaxialkabel som via ett 0.7 mm hål borrarat i kopparcylindern kom i kontakt med sprängämnets ytteryta. Då hexotonal skulle kunna kortsluta jonisationskontakten redan vid införandet i sprängämnet täcktes kontaktytorna med en tunn hinna cliffilm.

17. Korrektion för fel beroende på ljusbrytning i luftstötstången

Den optiska observationen av cylinderytans expansion påverkas av den stötstång som alstras i den omgivande luften (se fig 2 och 20). Den korrektion Δr som behövs för att bestämma cylinderytans verkliga läge från en svepkamera-registrering med spalten vinkelrät mot cylinderaxeln blir:

$$\Delta r = R' \left[\frac{\eta(n_o - 1)}{n_o} - 1 \right] \quad (1)$$

Den verkliga radien R hos cylinderytan fås då ur:

$$R = R' - \Delta r;$$

Närmare härledning av formel (1) finns i appendix 3.

Δr kan skrivas $\Delta r = f(R-R_o, \eta)$ där kompressionen η är en funktion av cylinderskalets hastighet v_p som i sin tur är en funktion av $(R-R_o)$ vid ett givet sprängämne. Variationen i $\Delta r = f(R-R_o)$ som fås mellan de i denna undersökning provade sprängämnena är så små att de ej påverkar korrektionen Δr nämnvärt. Samma korrektion $\Delta r = f(R-R_o)$ (se fig. 6) har därför använts för samtliga skott i denna undersökning.

Som syns i fig 6 ökar korrektionen med expansionen och är vid $(R-R_o) = 30$ mm ca 0.08 mm d.v.s. ca 0.3%. Korrektionen är alltså mycket liten men har medtagits vid utvärderingen då mätmetoden ger en upplösning på ca ± 0.01 mm. Reproducerbarheten av radietiddata vid dublettexperiment är bättre än 0.5% och alltså av ungefär samma storlek som korrektionen.

18. Utvärdering av svepkameraregistreringar

Inmätningen av svepkameraregistreringarna (se fig 2) gjordes i FOA2 G:s mätmikroskop av fabrikat Cambridge Instrument Co med en mätnoggrannhet på ca ± 0.01 mm. Avbildningsskalan bestämdes först från stillbilden. Därefter bestämdes filmkrympningen genom att märken vid filmbanans ytterkant med känt inbördes avstånd mättes in. Svepregistreringen riktades sedan in under mätmikroskopet så att svepriktningen blev parallell med en koordinat-axel. Svepriktningskoordinaten för närmaste spegelvinkelmarkering samt ca 60 punkter som beskriver cylinderytans rörelse bestämdes sedan

Med hjälp av den mätta rotationsfrekvensen hos spegeln samt ovan-nämnda data kan nu de 60 punkterna omräknas till radie-tid data (se tabell 6).

De från svepkameraregistreringen erhållna läges-tid koordinaterna korrigerades sedan med hjälp av fig 6 för ljusbrytningen i stöt-vågen runt cylindern.

19. Anpassning av radie-tid koordinater till en analytisk radie-tid funktion

Ett analytiskt uttryck av formen /7/:

$$t = A + B(R-R_0) + Ce^{\frac{D(R-R_0)}{C}}; \quad (2)$$

$$\text{där } \begin{cases} t = \text{tiden från början av expansionen;} \\ A, B, C \text{ och } D \text{ är konstanter,} \end{cases}$$

anpassades sedan med minsta kvadratmetoden till radie-tid-koordinaterna för $(R-R_0) = 5,6 \dots\dots\dots 30$ mm. Den första delen av expansionen från $(R-R_0) = 0$ till 5 mm där stötvågseffekter i cylinderskalet ännu gör sig gällande har ej tagits med i anpassningen då dessa stötvågseffekter ej kan återges av (2).

Fig. 8 visar hur (2) ansluter sig till de experimentella punkterna för de olika skotten. Att skott nr 4 visar en dålig anpassning i början av expansionen beror på att kopparcylinderns yta ej polerats. Observationen av cylinderytans läge under den första delen av expansionen försvårades här troligen genom att "en spray" av små partiklar kastades ut från cylinderytan när stötvågen passerade ut ur ytan.

Argonblixten som användes vid detta skott gav dessutom ett ljus

som var för divergent vilket gav en diffus ljusmörkergräns.

20. Normalisering av radie-tid-data till skaltjocklek 2.28 mm

Cylinderskalets tjocklek varierade mellan 2.28 mm och 2.31 mm för de i denna undersökning redovisade experimenten. Radie-tid-data normaliserades till skaltjocklek 2.28 mm på följande sätt. Om $t' = f(R-R_0)$ gäller för skaltjockleken S beräknas den till 2.28 mm skaltjocklek normaliserade $t = f(R-R_0)$ enligt:

$$t = t' \sqrt{\frac{S}{2.28}} \quad (3)$$

2. Diskussion av mätresultaten

21. Inledning

Vid val av sprängämne togs följande synpunkter i beaktande:

1. Laddningarna måste ha hög kvalitet vad beträffar homogenitet och en väl bestämd densitet.
2. Aluminiumhalten bör ha en sådan nivå att de förväntade effekterna av inblandningen blir signifikanta vid mätningarna.
3. Aluminiumkornen bör vara så små som möjligt för att säkerställa att de hinner förbrännas under mättiden.
4. Sprängämnena bör om möjligt vara av en typ som är av betydelse i praktiken.

De sprängämnen som utifrån synpunkterna 1-4 ovan valdes till undersökningen blev hexotol 60/40 och 85 hexotol/15 Al (hexotonal 15) (se tabell 2). För att uppfylla punkt 1 ovan valdes den minsta medelkornstorleken hos aluminiet till ca 30 μm vid 15% inblandningsnivå. Mindre kornstorlekar av det använda sprutade (atomiserade) aluminiet som har relativt oregelbundet formade korn ger en så stor viskositetsökning vid gjutningen att det kan äventyra kvaliteten på laddningarna. För att säkerställa en tillräcklig låg viskositet i hexotonalen valdes dessutom ett RDX/TNT förhållande på 50/50. För att lättare kunna bedöma när aluminiumreaktionen avger sin energi prövades ett sprängämne där aluminiet ersattes med litiumfluorid. Litiumfluorid bör vara i huvudsak inert under den ca 25 μs långa mättiden. Densitet, smältpunkt och kompressibilitet (V/V_0) överensstämmer mycket nära med motsvarande värden för aluminium (se tabell 4). Aluminium har dock en avsevärt större termisk konduktivitet än LiF medan litiumfluoriden har ett högre specifikt värme.

22. Detonationshastigheter

Vid experimenten mättes detonationshastigheten vid samma tillfälle som svepkameraregistreringen gjordes. Tabell 5 presenterar resultaten från detonationshastighetsmätningarna.

Detonationshastigheten hos hexotol 60/40 var 7.82 mm/ μs vid

$\rho_0 = 1.691 \text{ g/cm}^3$ och för hexotonal 1580, hexotonal 15100CS och hexotolif 1580 noterades 7.50 mm/ μs vid $\rho_0 = 1.758 \text{ g/cm}^3$.

Låt oss betrakta förloppet när en detonationsvåg går fram i ett sprängämne innehållande 15% av aluminium eller litiumfluorid då vi betraktar aluminiet och litiumfluoriden som inert i detonationsvågen.

Detonationsvågen har en amplitud av ca 250 kbar och drivs av en kemisk reaktion i hexotolen som frigör ca 4.7 MJ per kilo hexotol. Den kemiska energien frigöres inom ca 0.1 - 0.2 μ s och all energi som frigöres senare kan ej i nämnvärd grad påverka detonationshastigheten. Detonationsvågen komprimerar aluminium och LiF-kornen varvid de upphettas till ca 300°C respektive 170°C. Energien som åtgår för denna temperaturhöjning är ca 1% av hexotolens detonationsenergi. De heta reaktionsprodukterna med en temperatur på över 3000°K värmer sedan upp partiklarna ytterligare genom värmeledning.

Vid en medelkornstorlek på ca 50 μ m hinna dock endast det yttersta skalet av kornen värmas upp nämnvärt genom värmeledning under 0.1-0.2 μ s. En överslagsberäkning visar att ett 50 μ m aluminiumkorn endast värms upp så mycket under ca 0.1-0.2 μ s att det motsvarar 1-2% av hexotolens detonationsenergi. För ett 50 μ m LiF-korn reduceras detta ytterligare en storleksordning p.g.a. litiumfluoridens lägre termiska diffusivitet.

Utgående från detta resonemang kommer alltså vid inblandning av 15% 50 μ m Al respektive LiF i hexotol ca 1-2% mindre energi att finnas tillgänglig för detonationsvågens förplantning i fallet aluminium under förutsättning att vi betraktar aluminiet och litiumfluoriden som inert.

Antagandet att litiumfluoriden kan betraktas som inert i detonationsvågen är säkert riktigt. En del av det yttersta skalet på ca 2-3 μ m av aluminiumkornen som hinna upphettas till en temperatur över aluminiumets smältpunkt inom ca 0.1-0.2 μ s kan dock tänkas hinna oxideras inom denna tid.

Experimentellt har dock ingen skillnad i detonationshastighet vid aluminiuminblandning (30-60 μ m) och litiumfluoridinblandning ($\approx$ 60 μ m) kunnat noteras (se tabell 5).

23. Expansion av kopparcylindern

I tabell 5 presenteras uppmätta primärdata för skott nr 5. Dessa utgör ett exempel på de data som ligger till grund för beräkning av det analytiska uttrycket $t = f(R-R_0)$ som anpassats till varje skott för $(R-R_0)$ från 5 till 30 mm. Två skott av respektive hexotol 60/40, hexotonal 1580 och hexotonal 15100CS har skjutits. Med hexotolif 1580 sköts dock bara ett skott.

I fig. 9, 10 och 11 kan man jämföra hastigheterna mellan parallella skott. I skott 4 hade kopparskalet ej polerats före skott varför troligen en

"spray" av små partiklar kastats ut från ytan och försvårat observationen av den första delen av expansionen. För skott 9 kunde expansionen endast följas till $(R-R_0) = \text{ca } 22 \text{ mm}$ då bakgrundsblitzen placerats något felaktigt. Som representativa för de sprängämnen som provats har valts # 5 för hexotol 60/40, # 6 för hexotonal 1580, # 8 för hexotonal 15100CS och # 10 för hexotolif 1580. Data på de anpassade konstanterna A, B, C och D i uttrycket $t = f(R-R_0)$ tillsammans med de därur beräknade tiderna, hastigheterna, accelerationerna och trycken samt kinetiska energien hos skalet presenteras i tabell 6, 7 och 8 samt fig. 12, 13, 14 och 15.

Hexotol 60/40 har givit den högsta hastigheten under hela expansionen. Hexotonal 15100CS och 1580 gav sluthastigheter som låg 3.5 respektive 4.1% lägre än den för hexotol 60/40 medan hexotolif 1580 som alltså nära simulerar aluminium inert gav ca 10% lägre sluthastighet än hexotol 60/40.

De värden på skalets acceleration (tabell 8) som beräknas ur (2:19) är troligen behäftade med fel som kan vara en storleksordning större än för hastigheten, tiden och rörelseenergien. Detta beror på att uttrycket (2) i avsnitt 19 ej helt korrekt kan återge tryckvariationerna under expansionen, speciellt då nära $(R-R_0) = 5 \text{ mm}$.

Ur fig 12, 13, 14 och 15 kan man dra slutsatsen att aluminiumet åtminstone delvis förbrännts under mättiden på ca 22 μs . Enligt fig 14 ger hexotonal 15100CS en acceleration av skalet som ligger 5-14% högre än för hexotol 60/40 under expansionen från 5 till 30 mm. Då detonationstrycket och trycket under de 1-2 första mikrosekunderna är högre i hexotol 60/40 och skalet under denna tid redan hunnit få en avsevärd del av sin slutliga kinetiska energi räcker det senare trycktillskott som aluminiumreaktionen ger, inte till för att kompensera det lägre initialtrycket varför sluthastigheten blir lägre för hexotonalen.

Observeras bör att den registrering man får vid svepkameraregistrering enligt fig 1 ej exakt beskriver rörelsen hos en och samma punkt av cylinderskalet. Den hastighet man får genom direkt differentiering av svepkameradata är därför inte den sanna partikelhastigheten utan snarare en fashastighet (se fig 16). Skillnaden mellan de två hastigheterna är dock så liten att den i de flesta fall kan försummas. Vid de här aktuella experimenten är partikelhastigheten v_p hos skalet ca 1.5% lägre än den hastighet v_c vi fått genom differentiering av svepkameraregistreringen. Problemet behandlas utförligare i appendix 3.

24. Uppskattning av det mekaniskt utvinbara arbetet från ett sprängämne

Det mekaniska arbetet W som ett sprängämne kan uträtta vid en nära isentrop expansion av reaktionsprodukterna kan uppskattas genom en summering av de olika energiformerna vid cylindertestet. Uppdelningen på olika energiformer vid cylindertest behandlas närmare i appendix 4. För hexotol 60/40 t.ex. ger en sådan uppskattning värdet 4.5 MJ/kg vid expansion till 1 bar vilket är 96% av detonationsenergin $Q = 4.69$ MJ/kg. För ideala sprängämnen är expansionsarbetet W nästan oberoende av expansionstiden. För icke ideala sprängämnen där en stor del av den kemiska energin frigörs relativt långt bakom CJ-planet (t.ex. aluminiumhaltiga sprängämnen) kan man däremot förvänta sig att W stiger med stigande expansionstid.

Ofta är det svårt att teoretiskt beräkna W för dessa sprängämnen då reaktionskinetiken är komplicerad. Vid cylindertestexperiment kan dock W bestämmas experimentellt vid valda expansionshastigheter genom att man varierar expansionstiden för cylinderskalet. Expansionstiden kan varieras t.ex. genom att förhållandet sprängämnesmassa/metalldensitet (fördämningen) och/eller laddningsdiametern ändras.

25. Detonationsdata beräknade med BKW-programmet

Resultat från beräkningar som utförts av Roger Holmberg vid detta laboratorium på de i denna undersökning provade sprängämnen med ett dataprogram för detonationsdataberäkningar kallat BKW med en Becker-Kistiakowski-Wilkins tillståndsekvation för reaktionsprodukterna visas i tabell 3 /8,9/. Där kan man bl.a. notera att detonationshastigheten blir ca 5% lägre om aluminiumet får reagera före CJ-planet än om det bara smälter och uppträder inert. Detta trots att detonationsenergien höjs ca 55% när aluminiumet reagerar. Dessa resultat bekräftar Chaikens beräkningar på sprängämnet 80 RDX/20 Al vid densiteten 1.94 g/cm^3 (100% TMD)/15%. Han noterade en sänkning av detonationshastigheten med ca 4% när aluminiumet reagerar före CJ-planet jämfört med när det uppträder inert och enbart får smälta. I tabell 3 kan man också se att aluminiumreaktionen ej inverkar nämnvärt på detonationstrycket samt att detonationstemperaturen höjs avsevärt av aluminiumreaktionen. Energien från aluminiumreaktionen överförs alltså ej till detonationsvågen utan manifesterar sig som en höjning av den termiska energien i reaktionsprodukterna.

Jacobs /17/ har föreslagit en modell varmed det isentropa expansionsarbetet kan beräknas när man känner partikelhastigheten i CJ-punkten samt trycket i reaktionsprodukterna längs isentropen genom CJ-punkten.

Med denna modell fås expansionsarbetet W

$$W = \int_{p_1}^{p_0} p dV - \frac{u_1^2}{2} \quad (4)$$

p_1 = trycket i CJ-punkten

p_0 = sluttrycket efter expansionen

u_1 = partikelhastigheten i CJ-punkten

Med denna modell och data från BKW-beräkningarna har W beräknats för de sprängämnen som provats i denna undersökning (fig. 24).

Det med formel (4) beräknade expansionsarbetet W för hexotol 60/40 vid expansion till ca 280 bar blir ca 5.2MJ/kg (fig. 24) medan det experimentellt bestämda till samma sluttryck blir ca 3.8MJ (se appendix 4).

Denna undersökning bekräftar alltså Kury's påpekande /6/ att Ruby-programmet och BKW-programmet som är i huvudsak identiska ej korrekt återger P-V-E sambandet för reaktionsprodukterna. Enligt Kury et al /6/ kan relativa prestanda dock förutsägas väl för många sprängämnen med beräkningarna. Då BKW-programmet endast kan beräkna ideala detonationer blir dock även relativa jämförelser vanskliga för sådana sprängämnen som i praktiken detonerar långt ifrån idealt, t.ex. alla aluminiumhaltiga sprängämnen och de flesta sprängämnen för civil användning.

Beräkningarna av W som presenteras i fig 24 kan dock ge intressanta upplysningar om hur de i denna undersökning provade sprängämnenas relativa prestanda skulle förhålla sig om aluminiumet reagerar helt före CJ-planet (ideal detonation) respektive uppträder helt inert. Under helt ideala förhållanden kan man alltså enligt fig 24 förvänta sig att hexotonal 15 ger ett större expansionsarbete än hexotol 60/40 vid jämförelse på viktsbas, när expansionsarbete kan uträttas till tryck som är lägre än ca 3 kbar, och vid jämförelse på volymsbas när expansionsarbetet kan uträttas till tryck som är lägre än ca 10 kbar.

Jämförelse av detonationsenergier beräknade med BKW-programmet och experimentella värden från detonationskalorimeterförsök, undervattens-testdata och cylindertestdata visar att BKW-beräkningarna på sprängämnen med högt syreunderskott ger för hög detonationsenergi. Jämviktsberäkningarna med BKW-tillståndsekvationen visar betydligt högre halter fritt kol i reaktionsprodukterna än vad detonationskalorimeterförsöken ger. Detta innebär en ökning av detonationsenergien. Fortsatta experimentella och teoretiska studier fordras för att skapa en bättre förståelse av orsakerna till avvikelserna mellan experiment och teoretiska beräkningar.

26. Sammanfattande kommentar

Resultaten tyder på att 30-60 μm Al är i huvudsak inert före CJ-planet samt att energien från Al-reaktionen börjar ge trycktillskott ett par mikrosekunder efter detonationsvågens passage. Detonationshastigheten och detonationstrycket har sänkts vid Al inblandning. De termokemiska beräkningarna visar dessutom att detonationshastigheten sänks ytterligare om aluminiumet hinner reagera före CJ-planet. Enligt dessa beräkningar påverkas detonationstrycket däremot ej av om aluminiumet reagerar eller ej före CJ-planet.

Ur cylindertestresultaten och BKW-beräkningarna kan man uppskatta att aluminiumreaktionen gett ett tillskott i expansionsarbete som är ca 50% av det man kan förvänta sig vid helt ideal detonation följt av en isentrop expansion med termodynamisk jämvikt mellan fasta och gasformiga reaktionsprodukter.

Vid acceleration av metallskal där skalet kan accelereras upp till ca 20 μs ger hexotonal 15 med 30-60 μm Al en lägre sluthastighet än hexotol 60/40. Prestandamätningar på sprängämnen som får detonera under vatten visar dock att aluminiuminblandning (ca 30-100 μm Al) i högbrisanta sprängämnen ger en höjning av stötvågsenergi, impuls och bubbelenergi /3, 4, 5/. Fig 18 visar schematiskt minskningen av reaktionsprodukternas inre energi som funktion av tiden vid cylindertest vid $\varnothing$ 25 mm och $\varnothing$ 50 mm samt vid undervattensdetonation av ca 25 g sprängämne /11/. Enligt figuren skulle ett uppskalat cylindertest till $\varnothing$ 50 - 100 mm ge ungefär samma tidsförlopp som 25 gramsladdningen under vatten våd beträffar minskningen av den inre energien.

En ännu opublicerad undersökning av författaren med undervattensdetonation med 200 grams laddningar av de i denna undersökning provade sprängämnena visar att hexotonal 15100CS ger ca 13% högre stötvågsenergi än hexotol 60/40 per massenhet av sprängämnet räknat. Experiment med undervattensdetonation av 70 grams laddningar av hexotonal med 0-30% Al ca 60 μm /5/ samt 25 gramsladdningar av aluminiumblandad sprängdeg /4/ visar att aluminiuminblandning ger en signifikant impulshöjning i detonationsstötvågen i vattnet.

Utifrån jämförelsen i fig 18 av tidsförloppet för reaktionsprodukternas inre energiminskning och resultaten från undervattensskjutningarna kan man bedöma att det torde vara möjligt att få prestandaförbättringar även vid metallacceleration med hexotonal om tidsförloppet vid expansionen förlängs genom ökning av laddnings-

storleken och/eller en ökning av förhållandet metallmassa/spräng-
ämnesmassa.

Om man använder Al-pulver med snävare kornstorleksfördelning och med sfäriska korn som ger avsevärt mindre viskositetshöjande effekt vid gjutningen än de här provade Al-pulvren med oregelbundet formade korn, kan man gå ned i kornstorlek till kanske ca 10 μm vid 15% inblandningsnivå och därigenom vinna något. En komplettering av denna undersökning med några experiment med ett cylindertest uppskalat av fyrafaktor samt användning av sfäriskt ca 10 μm Al bör ge ett definitivt svar på dessa spekulationer.

Författaren ber att få framföra sitt tack till FOA 2G och speciellt där till de personer inom institution 25 som bidragit till att denna undersökning kunnat genomföras, samt till Roger Holmberg vid detta laboratorium som utfört de termokemiska beräkningarna med BKW-programmet och skrivit programmet för minsta kvadratanpassningen till de experimentella punkterna.

Arbetet har utförts inom ramen för ett samarbetsavtal mellan FOA och Stiftelsen Svensk Detonikforskning.

3. Referenser

1. Finger, M., Hornig, H.C.,
Lee, E.L., and Kury, J.W. Metal Acceleration by Composite
Explosives.-
Proceedings Fifth Symposium
(International) on Detonation.
Office of Naval Research-Department
of the Navy (1970).
2. Cook, M.A. The Science of high Explosives.-
Reinhold Publishing Corp.,
New York (1958).
3. Bjarnholt, G. Data från undervattensskjutningar
med 39 olika sprängämnen.-
Stiftelsen Svensk Detonikforskning,
Stockholm, rapport DS 1973:7 (1973).
4. Lamnevik, S. Aluminiumblandad sprängdeg.-
FOA I Rapport A 1341-F1102 (1966).
5. Blomqvist, G. Om undervattensverkan av hexotol och
hexotonal.-
FOA I Rapport A 1339-F/102 (1966).
6. Kury, J.W., Hornig, H.C.,
Lee, E.L., Mc Donnel, J.L.,
Ornellas, D.L., Finger, M.,
Strange, F.M., and,
Wilkins, M.L. Metal Acceleration by Chemical
Explosives.-
Proceedings Fourth Symposium
(International) on Detonation.
Office of Naval Research-Department
of the Navy (1965).
7. Hoskin, N.E., Allan, J.W.S.,
Brially, W.A., Lethaby, J.W.,
and Shidmore, I.C. The Motion of Plates and Cylinders
Driven by Detonation Waves at Tangen-
tial Incidence.-
Proceedings Fourth Symposium
(International) on Detonation.
Office of Naval Research-Department
of the Navy (1965).
8. Mader, C. A Code for Computing the Detonation
Properties of Explosives.-
Los Alamos Scientific Laboratory
Report LA 3704, Los Alamos, New Mexico,
USA (1967).
9. Holmberg, R. Introduktion till termokemiska beräk-
ningar för sprängämnen.-
Stiftelsen Svensk Detonikforskning,
Stockholm, rapport DS 1973:12 (1973).
10. Price, D. Aluminized organic Explosives.-
Naval Ordnance Laboratory,
Report No LTR 72-62 (AD 745725),
White Oak, Silver Spring, Maryland, USA.

11. Persson, P.A., Lundborg, N.,
and Johansson, C.H. The Basic Mechanisms in Rock Blasting.-
Proceedings of the Second Congress of
the International Society for Rock
Mechanics, Beograd (1970).

12. Deal, W.E. Shock Hugoniot of Air.-
Journal of Applied Physics, 28, 7 (1957).

13. Kennedy, J.E. Gurney Energy of Explosives:
Estimation of the Velocity and Impulse
Impacted to Driven Metal.-
Sandia Laboratories, Sandia Corporation,
Livermore, California, USA (1970).

14. Hornig, H.C. Private information (1973).

15. Chaiken, R.F. Comments on the Ruby Code.-
App. II of Vol. II of Project Sophy-
Solid Propellant Hazards
Program AFRPI-TR-67-211 (1967).

16. Rice, M.H., Mc Queen, R.G.,
and Walsh, J.M. Compression of Solids by strong shock
waves.-
Solid State Physics, Vol. 6,
Academic Press Inc. (1958).

17. Jacobs, S.J. Navord Report 4366
Naval Ordnance Laboratory,
White Oak, Silver Spring,
Maryland, USA. (1956).

Tabell 1. Förbränningsvärme för några metaller.

Ämne	Densitet g/cm ³	Förbränningsvärme ¹⁾	
		KJ/g	KJ/cm ³
Be	1.85	67.0	124
Mg	1.74	25.0	44
Al	2.70	29.0	80
Ti	4.43	19.0	85
Zi	6.49	12.0	76
Zn	7.13	5.4	39
Ce	6.8	6.9	47
Th	11.7	5.3	62

¹⁾ Som jämförelse frigör hexotol 60/40 4.7 KJ/g eller 7.94 KJ/cm³ vid sin detonation.

Tabell 2. Data på sprängämnen.

Hexotol 60/40 NSK19

RDX 58.9%
TNT 39.9%
VAX 1.2%

$\rho_o = 1.691 \text{ g/cm}^3$
TMD¹⁾ = 1.7106 "
porvolym = 1.1%

Hexotonal 1580 och 15100CS

RDX 42.1%
TNT 42.1%
Al²⁾ 15.0%
VAX 0.8%

$\rho_o = 1.758 \text{ g/cm}^3$
TMD = 1.800 "
porvolym = 2.3%

Hexotolif 1580

RDX 42.1%
TNT 42.1%
LiF²⁾ 15.0%
VAX 0.8%

$\rho_o = 1.758 \text{ g/cm}^3$
TMD = 1.796 "
porvolym = 2.1%

¹⁾ Vid beräkning av teoretisk maximal densitet (TMD) har följande data på maximala densiteter för ingredienserna använts.

Ämne	Densitet	
TNT	1.64	g/cm ³
RDX	1.80	"
LiF	2.635	"
Al	2.702	"
VAX	0.85	"

²⁾ Se fig. 19 för kornstorleksfördelning.

Tabell 3. Resultat från BKW-beräkningar.

Sprängämne	hexotol 60/40	hexotonal 15	hexotonal 15	hexotolif 15
Anmärkning		Al $\rightarrow$ Al ₂ O ₃ före ² CJ-planet	Al inert (enbart smältning)	LiF inert (enbart smältning)
Densitet kg/m ³	1690	1758	1758	1758
Det.hastighet m/s (experim.värde m/s)	7921 (7820)	7414 (7490)	7795 (7490)	7745 (7510)
Det.tryck kbar	269	238	242	237
Det.energi ¹⁾ vid CJ-punkten MJ/kg på isentropen vid 1 kbar MJ/kg	5.91 5.80	7.71 6.78	4.97 4.82	4.98 4.84

1) De absoluta värdena på detonationsenergin som fås vid BKW-beräkningar på sprängämnen med stor neg. syrebalans stämmer dåligt överens med experimentella värden från detonationskalorimeterförsök. För hexotol 60/40 fås t.ex. 4.69 MJ/kg vid detonationskalorimeterförsök /14/. Vid relativ jämförelse ger dock BKW-resultat bättre överensstämmelse med experimentella värden. Den energi som beräknats vid 1 kbar motsvarar närmast den vid detonationskalorimeterförsök bestämda energien.

Tabell 4. Några fysikaliska data på Al och LiF.

		Al	LiF
Densitet	kg/m ³	2700	2635
Smältpunkt vid 1 bar	°K	932	1121
" " 250 kbar ²⁾	°K	2578	-
Kokpunkt vid 1 bar	°K	2736	1966
" " 250 kbar ²⁾	°K	>6000	-
Smältvärme vid 1 bar	kJ/kg	395	1044
Spec.värme (s) vid 1 bar (300°K)	kJ/kg·°K	0.903	1.617
" (l) " 1 bar (1500°K)	kJ/kg·°K	1.1	2.5
Kompressibilitet vid 250 kbar	V/V ₀	0.845	0.835

2) Data från ref. /10/.

Tabell 5. Resultat av detonationshastighetsmätningar.

Skott nr	Sprängämne	Densitet kg/m	Detonations- hastighet (m/s)
4	Hexotol 60/40	1690	7820
5	" 60/40	1691	7810
6	Hexotonal 1580	1757	7490
7	" 1580	1756	7490
8	Hexotonal 15100CS	1759	7510
9	" 15100CS	1760	7490
10	Hexotolif 1500	1758	7510
	Hexotol 50/50 (uppskattat)	1681	7650

Tabell 6. Primärdata för cylindertest nr 5 13.9.1973.

Sprängämne: Hexotol 60/40

kopparcylinder $\emptyset_i = 24.96 \text{ mm}$

$$\rho_o = 1.691 \text{ g/cm}^3$$

$$\emptyset_y = 29.52 \text{ mm}$$

$$\emptyset_y = 24.94 \text{ mm}$$

kamera: Koska 8 (FOA 2G)

$$\text{Avbildningsskala } a_r = \frac{\text{verklig storlek}}{\text{storlek på film}} = 1.0010$$

$$\text{Filmkrympning } k_r = 0.998$$

$$\text{Spegelrotationscountervärde } c = 8.23 \text{ kHz}$$

$$\text{Spegelrotationsfrekvens } f = c/8 = 1.029 \text{ kHz}$$

$$\text{Spegelgrader vid } t_o \text{ (accelerationens början)} = 112^\circ$$

$$\text{Detonationshastighet } D = 7.82 \pm 1 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

Upplösning på stillbild: ca 32 dubbellinjer/mm

Tidskoord. på film rel. t_o (mm)	Rumskoord. på film rel. R_o (mm)	Svephast. på film mm/ μs	Verklig tids- koordinat t_e (μs)	Rumskoord. ($R^1 - R_o$) (mm)	Rumskoord. korr. för ljusbrytn. i luftstöt v. ($R - R_o$) (mm)
0.00	0.00	2.142	0.00	0.00	0.00
0.72	0.25	"	0.34	0.25	0.25
1.49	0.50	"	0.70	0.51	0.50
2.17	0.74	"	1.01	0.75	0.73
2.65	0.99	"	1.24	1.00	0.98
3.13	1.24	2.143	1.46	1.25	1.23
3.68	1.49	"	1.71	1.51	1.49
4.14	1.73	"	1.93	1.75	1.73
4.61	1.98	"	2.15	2.00	1.98
5.07	2.23	2.144	2.37	2.25	2.23
5.48	2.48	"	2.56	2.51	2.49
5.85	2.72	"	2.73	2.75	2.73
6.33	2.97	"	2.95	3.00	2.97
7.09	3.47	"	3.31	3.51	3.48
7.90	3.96	2.145	3.69	4.00	3.97
8.69	4.46	"	4.05	4.51	4.48
9.47	4.95	"	4.42	5.00	4.97
10.16	5.45	"	4.74	5.51	5.48
10.91	5.94	2.146	5.09	6.00	5.97
11.65	6.44	"	5.43	6.50	6.47
12.35	6.93	"	5.76	7.00	6.97
13.03	7.43	"	6.08	7.50	7.47
13.75	7.92	2.147	6.42	8.00	7.96
14.49	8.41	"	6.76	8.49	8.45
15.18	8.91	"	7.08	9.00	8.96
15.83	9.41	"	7.39	9.50	9.46
16.54	9.90	2.148	7.72	10.00	9.96
17.21	10.40	"	8.03	10.50	10.46
17.89	10.89	"	8.35	11.00	10.96
18.56	11.39	"	8.66	11.50	11.46

Tabell 6. (fortsättning)

Tidskoord. på film rel. t_0 (mm)	Rumskoord. på film rel. R_0 (mm)	Svephast. på film mm/ μ s	Verklig tids- koordinat t_e (μ s)	Rumskoord. ($R^I - R_0$) (mm)	Rumskoord. korr. för ljusbrytn. i luftstöt v. ($R - R_0$) (mm)
19.25	11.88	2.149	8.98	12.00	11.96
19.93	12.38	"	9.30	12.50	12.46
20.57	12.87	"	9.59	13.00	12.96
21.21	13.37	"	9.89	13.50	13.46
21.90	13.86	2.150	10.21	14.00	13.96
22.56	14.35	"	10.52	14.49	14.45
23.22	14.85	"	10.82	15.00	14.95
23.83	15.34	"	11.11	15.49	15.44
24.51	15.84	2.151	11.42	16.00	15.95
25.17	16.33	"	11.73	16.49	16.44
25.83	16.83	"	12.04	17.00	16.95
26.46	17.33	2.152	12.33	17.50	17.45
27.10	17.82	"	12.63	18.00	17.95
27.75	18.32	"	12.93	18.50	18.45
28.42	18.81	"	13.24	19.00	18.95
29.04	19.31	2.153	13.53	19.50	19.45
29.69	19.80	"	13.83	20.00	19.94
30.94	20.79	"	14.41	21.00	20.94
32.22	21.78	2.154	15.00	22.00	21.94
33.51	22.77	"	15.60	23.00	22.94
34.75	23.76	2.155	16.18	24.00	23.94
36.00	24.75	"	16.76	25.00	24.94
37.30	25.74	2.156	17.36	26.00	25.93
38.55	26.73	"	17.94	27.60	26.93
39.78	27.72	2.157	18.51	28.00	27.93
41.02	28.71	"	19.09	29.00	28.93
42.27	29.70	2.158	19.67	30.00	29.93
43.53	30.69	"	20.25	31.00	30.92
44.74	31.68	2.159	20.81	32.00	31.92
46.00	32.67	"	21.39	33.00	32.92

Tabell 7. Cylindertestresultat normaliserade till kopparcylinder $\phi_i = 24.96 \text{ mm}$, $S = 2.28 \text{ mm}$

Skott	Sprängämne	Densitet kg/m ³	Tid t(μs)/hastighet v _c (mm/μs), vid(R-R ₀)= (mm)						t = A + B(R-R ₀) + C exp D(R-R ₀)			
			5	10	15	20	25	30	A	B	C	D
5	Hexotol 60/40	1691	$\frac{4.44}{1.45}$	$\frac{7.74}{1.57}$	$\frac{10.85}{1.64}$	$\frac{13.86}{1.68}$	$\frac{16.80}{1.71}$	$\frac{19.71}{1.72}$	2.573	0.5733	-1.778	-0.1142
6	Hexotonal 1580	1757	$\frac{4.84}{1.35}$	$\frac{8.38}{1.47}$	$\frac{11.69}{1.55}$	$\frac{14.86}{1.60}$	$\frac{17.96}{1.63}$	$\frac{21.01}{1.65}$	3.118	0.5989	-2.240	-0.1124
8	Hexotonal 15100CS	1759	$\frac{4.77}{1.34}$	$\frac{8.31}{1.48}$	$\frac{11.59}{1.57}$	$\frac{14.73}{1.62}$	$\frac{17.79}{1.65}$	$\frac{20.81}{1.66}$	3.038	0.5945	-2.281	-0.1220
10	Hexotolif 1580	1758	$\frac{4.81}{1.32}$	$\frac{8.45}{1.42}$	$\frac{11.87}{1.49}$	$\frac{15.19}{1.53}$	$\frac{18.44}{1.55}$	$\frac{21.66}{1.56}$	2.616	0.6364	-1.845	-0.1240

Tabell 8. Cylindertestresultat normaliserade till kopparcylinder $\phi_i = 24.96 \text{ mm}$, $S = 2.28 \text{ mm}$

Skott	Sprängämne	Acceleration ($\text{m/s}^2 \cdot 10^{-7}$)/tryck ¹⁾ (kbar) vid $(R-R_0) =$ (mm)				
		5	10	15	20	25
5	Hexotol 60/40	$\frac{40.2}{6.19}$	$\frac{28.5}{3.41}$	$\frac{18.4}{1.82}$	$\frac{11.3}{0.97}$	$\frac{6.7}{0.51}$
6	Hexotonal 1580	$\frac{39.4}{6.07}$	$\frac{29.2}{3.49}$	$\frac{19.5}{1.93}$	$\frac{12.2}{1.04}$	$\frac{7.4}{0.56}$
8	Hexotonal 15100CS	$\frac{44.5}{6.85}$	$\frac{32.4}{3.87}$	$\frac{20.9}{2.06}$	$\frac{12.5}{1.06}$	$\frac{7.2}{0.54}$
10	Hexotolif 1580	$\frac{34.8}{5.37}$	$\frac{23.7}{2.84}$	$\frac{14.6}{1.44}$	$\frac{8.4}{0.73}$	$\frac{4.7}{0.38}$

1) Trycket i reaktionsprodukterna har beräknats ur accelerationen med antagandet att luftens mottryck är konstant lika med 40 bar.

Tabell 9. Metallaccelerationsförmåga relativt hexotol 60/40 ($\rho_0 = 1.69 \text{ g/cm}^3$). Jämförelse på lika volymbas ur data¹⁾ från $\varnothing 25 \text{ mm}$ cylindertest.

Sprängämne	Densitet g/cm^3	Kinetisk energi hos metallskalet	
		1 geometrier karaktiserade av "Head-on" ³⁾ detonationer	1 geometrier karaktiserade av strykande ⁴⁾ detonationer
HMX	1.89	1.48	1.37
PETN	1.77	1.32	1.27
OKTOL 78/22	1.82	1.27	1.21
TNT	1.63	0.76	0.78
NITROMETAN	1.13	0.56	0.59
COMP. B 64/36	1.72	1.05	1.05
42RDX/42TNT/ 15Al/1vax ²⁾	1.76	0.85	0.93
HEXOTOL 60/40	1.69	1.00	1.00

1) Data från denna undersökning och från ref. / 6 /

2) Medelpartikelstorlek hos Al ca $30 \mu\text{m}$

3) Ur jämförelse vid $(R-R_0) = 5 \text{ mm}$

4) Ur jämförelse vid $(R-R_0) = 19 \text{ mm}$

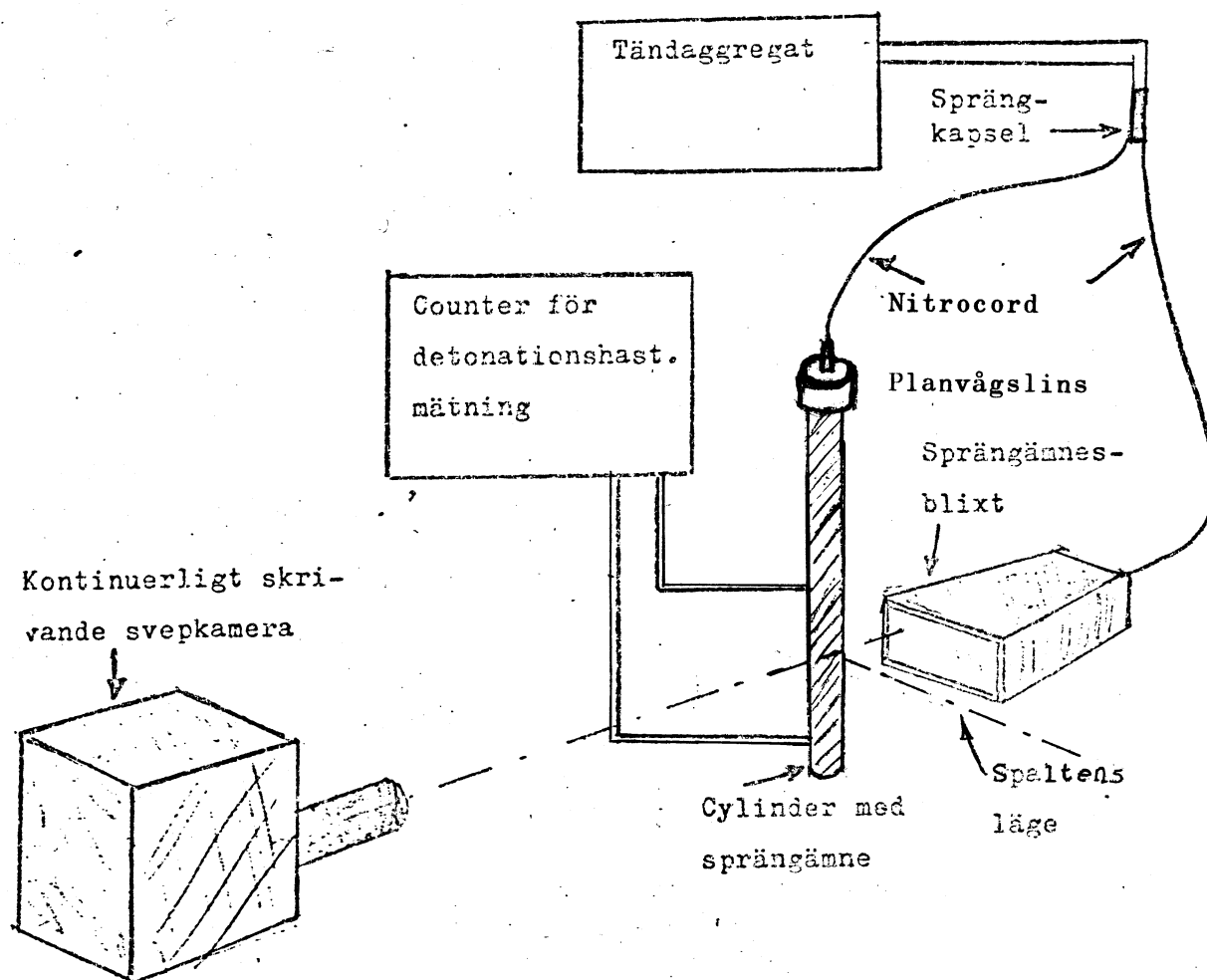


Fig 1. Cylinderexpansionstest för sprängämnen. Princip för experimentellt arrangemang.

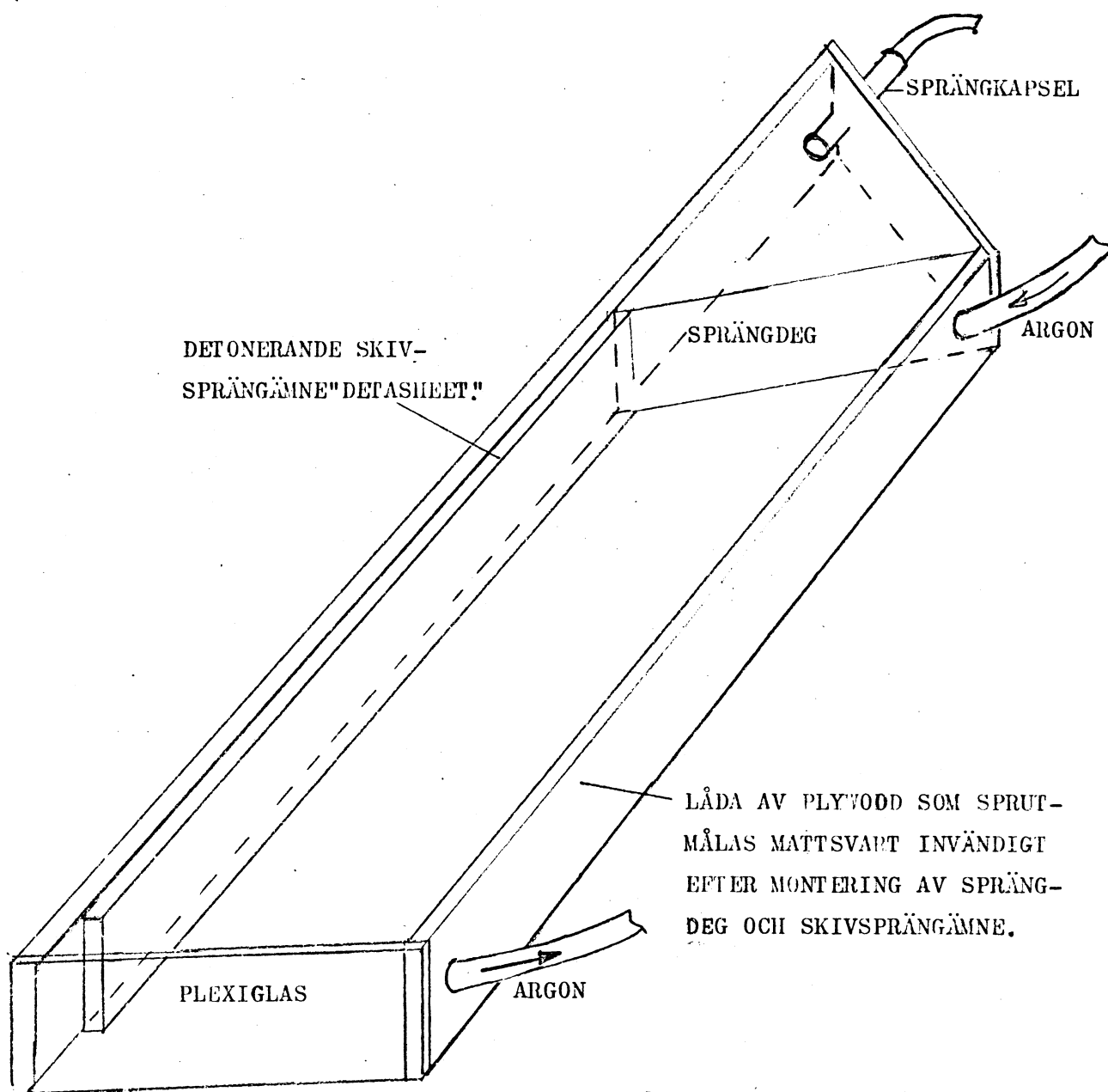


FIG 3. SPRÄNGÄMNESDRIVEN ARGONBLIXT FÖR BAKGRUNDS-
BELYSNING VID CYLINDERTEST.

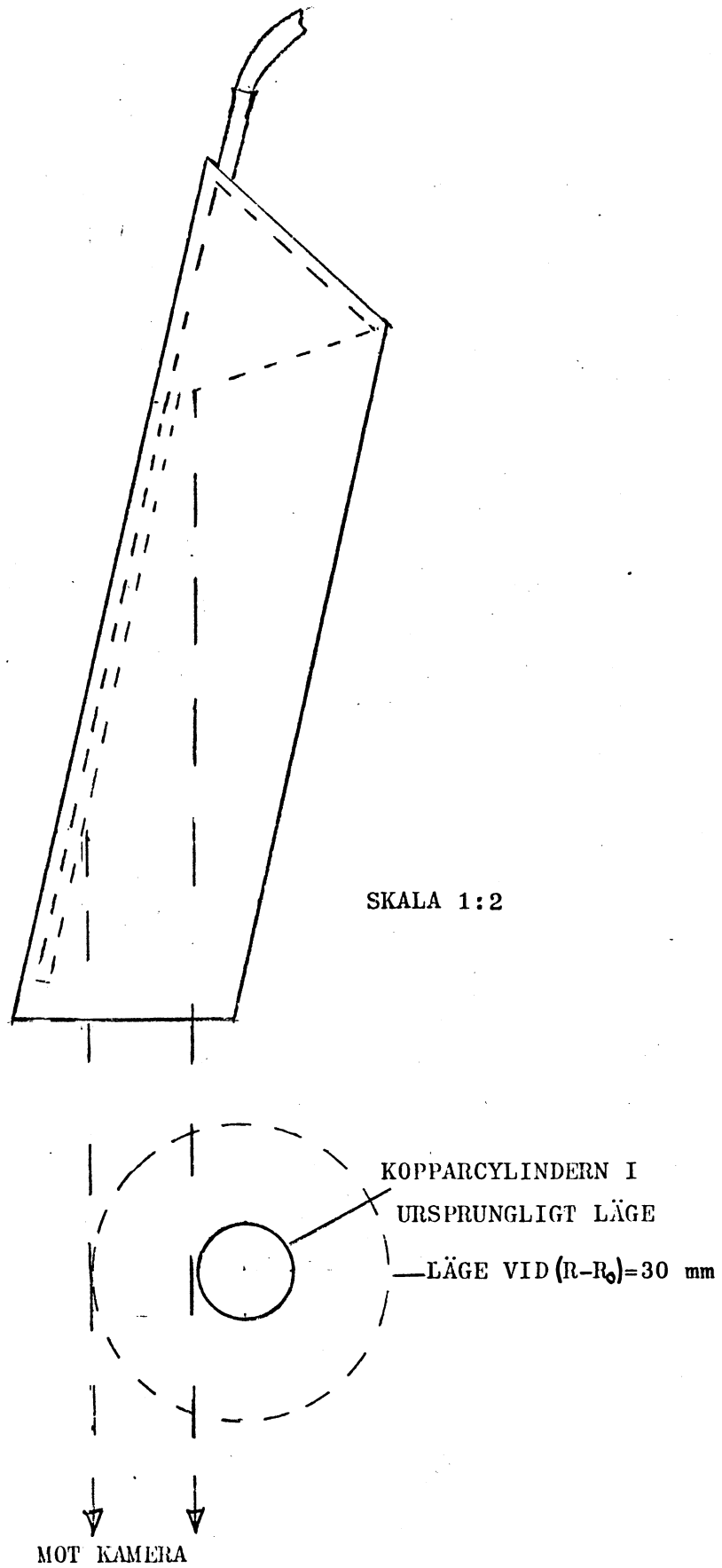


FIG 4. PRINCIP FÖR ARGONBLIXTENS PLACERING

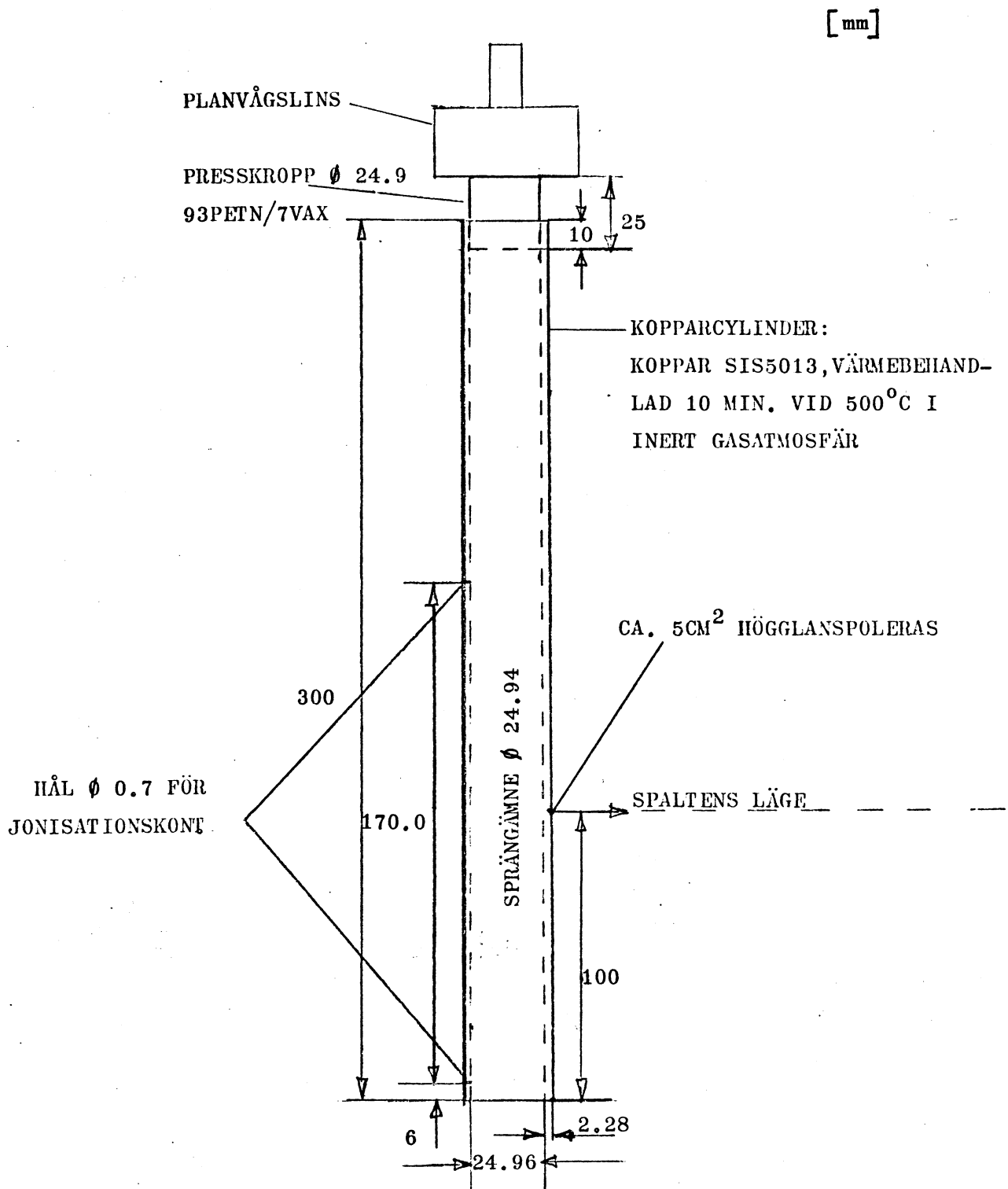


FIG 5. SPECIFIKATIONER PÅ UPPSTÄLL-
NING FÖR CYLINDERTEST

Korrektion för ljusbrytning i
luftstötvägen vid $\phi 30$ mm
cylindertest. $\Delta r = f(R - R_0)$

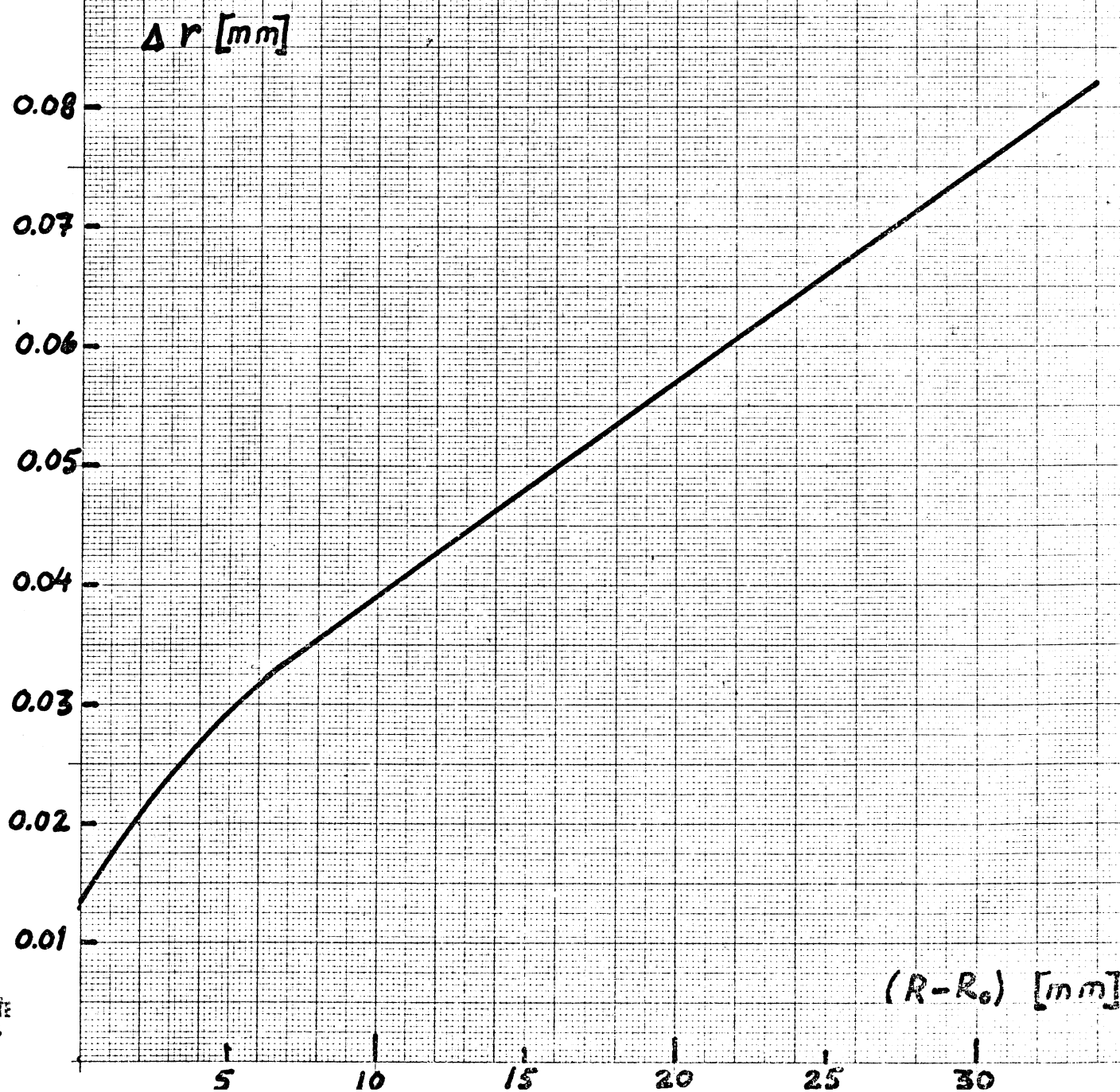
Fig 6

27.

G.B. 1973

Beräknad från $v_c = f(R - R_0)$ för hexotol 60/40 och

$$\Delta r = R \left[\eta \left(\frac{n_0 - 1}{n_0} \right) - 1 \right]$$



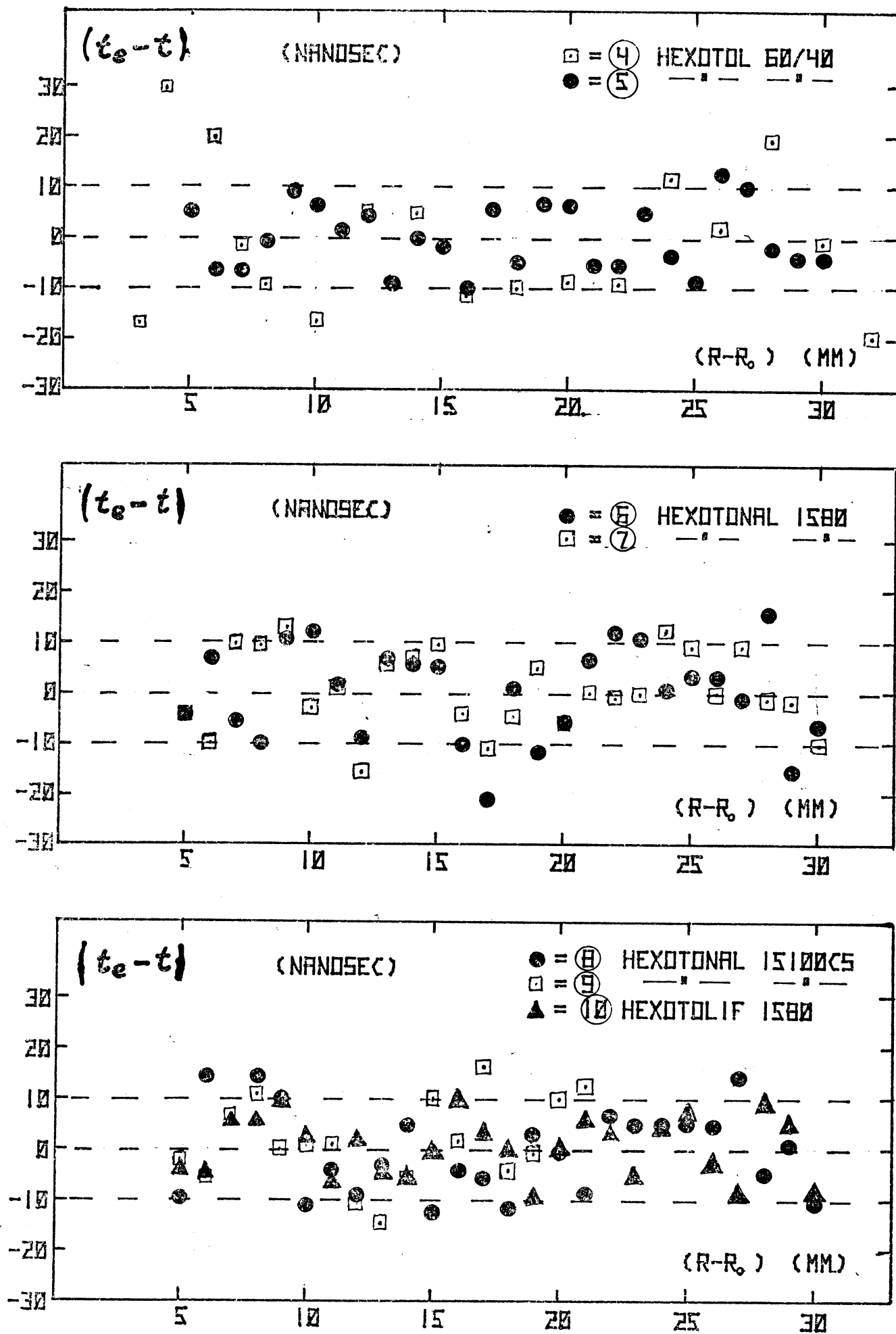


FIG 8. SKILLNAD MELLAN EXPERIMENTELLT BESTÄMD TID t_e OCH
TID BESTÄMD UR $t = f(R - R_0)$

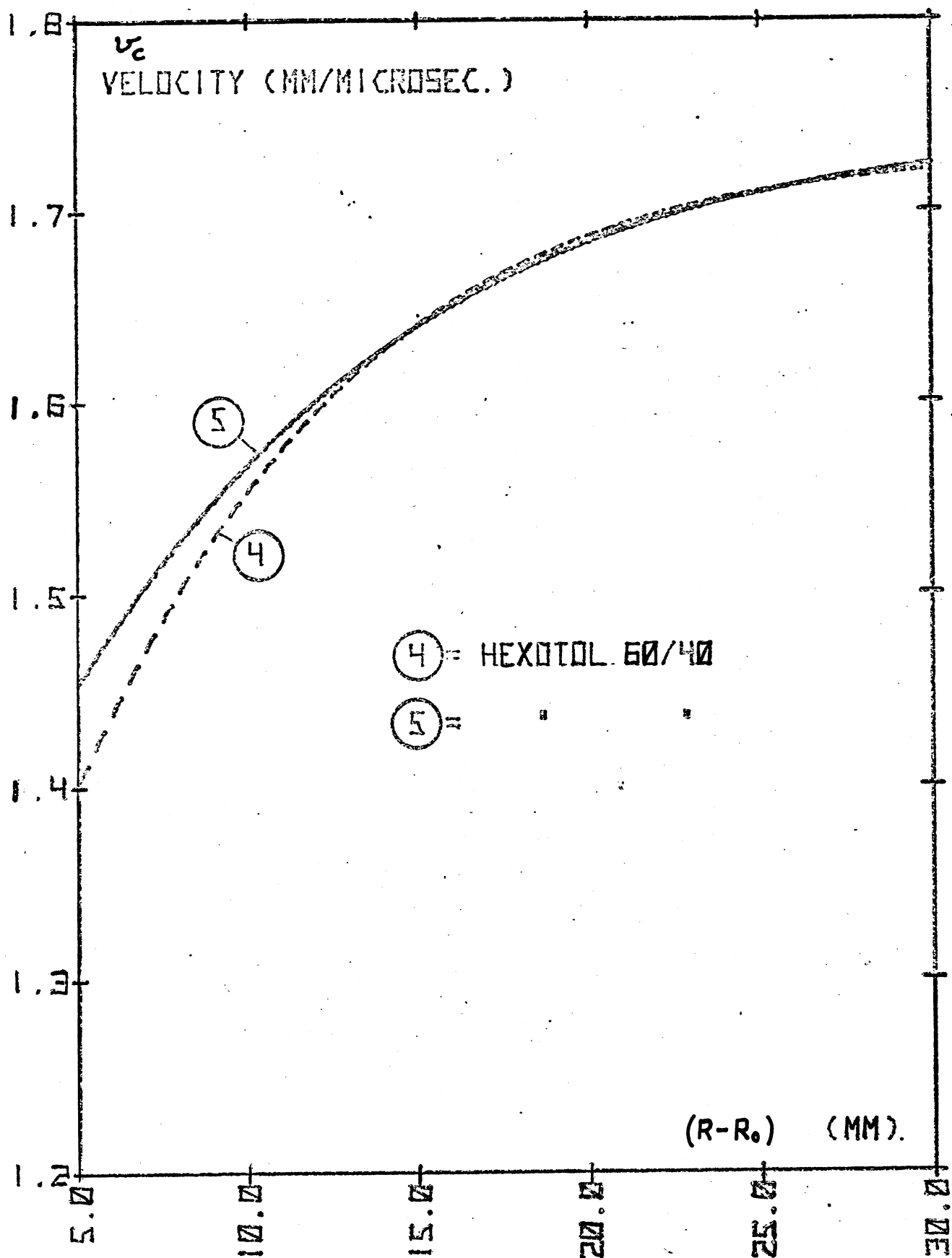


FIG 9. HASTIGHET v_c FÖR PARALLELLA SKOTT
 MED HEXOTOL 60/40

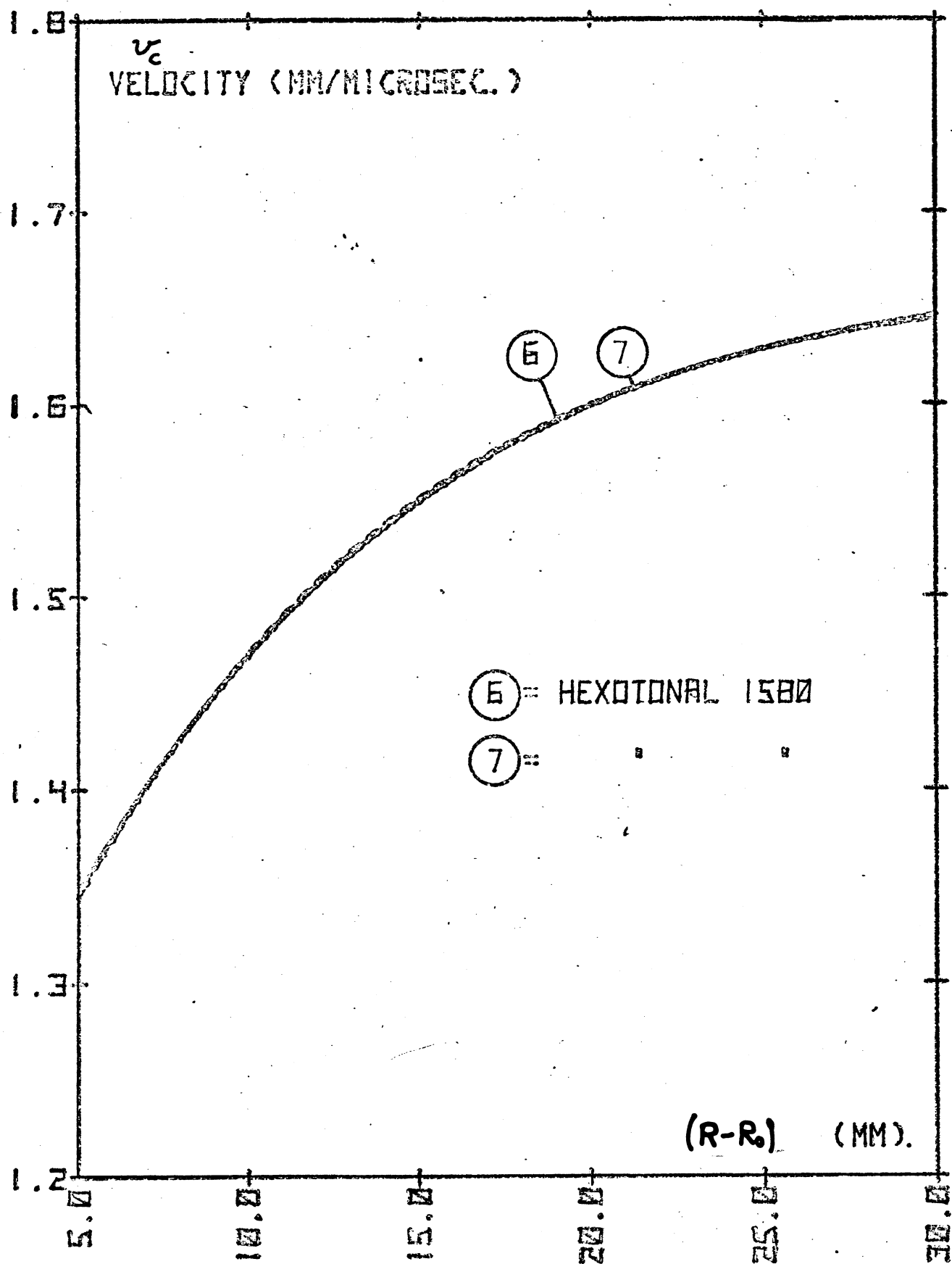


FIG 10. HASTIGHET FÖR PARALLELLA SKOTT-
MED HEXOTONAL 1580

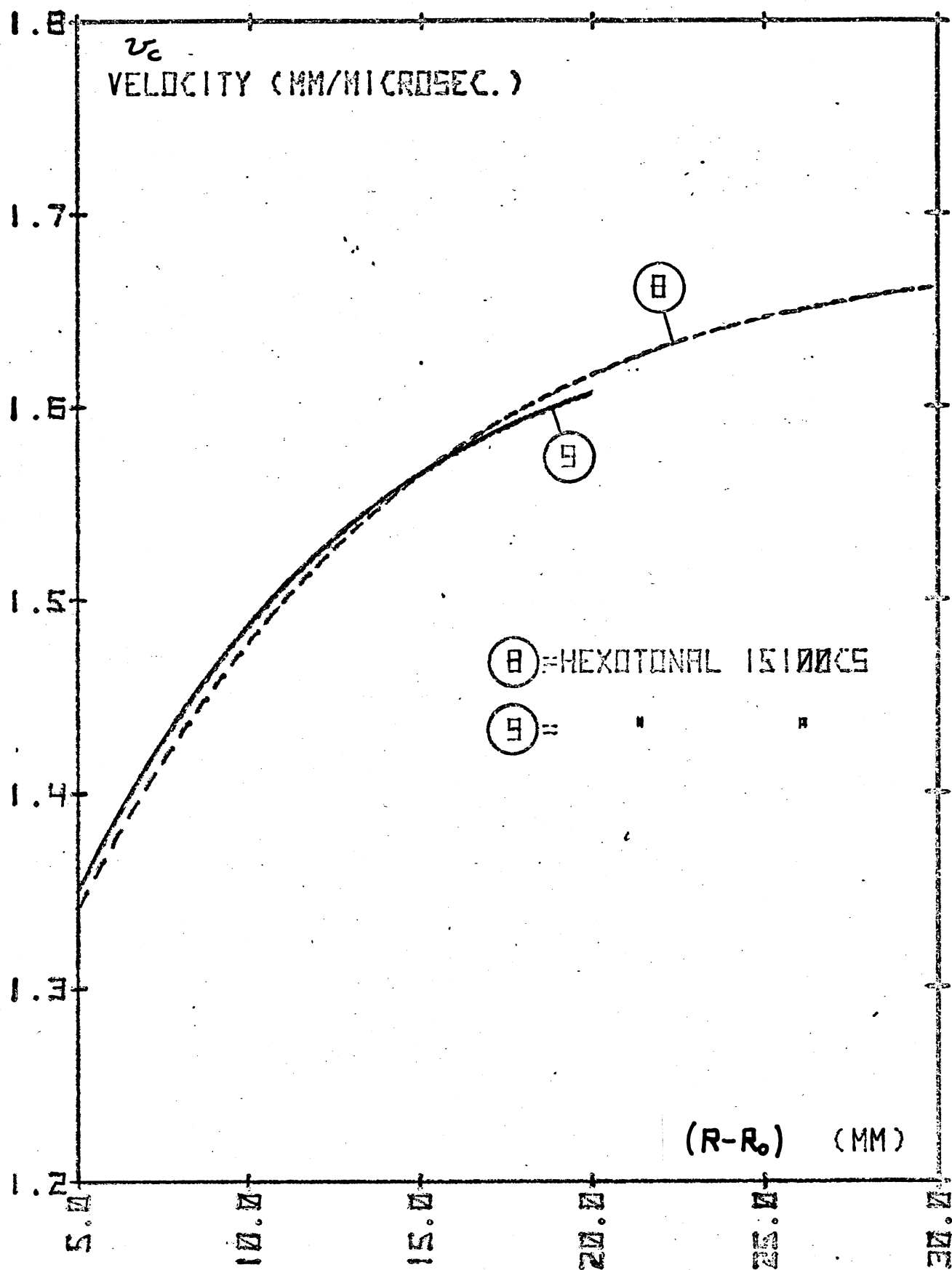


FIG. 11. HASTIGHET v_c FÖR PARALLELLA SKOTT
MED HEXOTONAL 15100CS

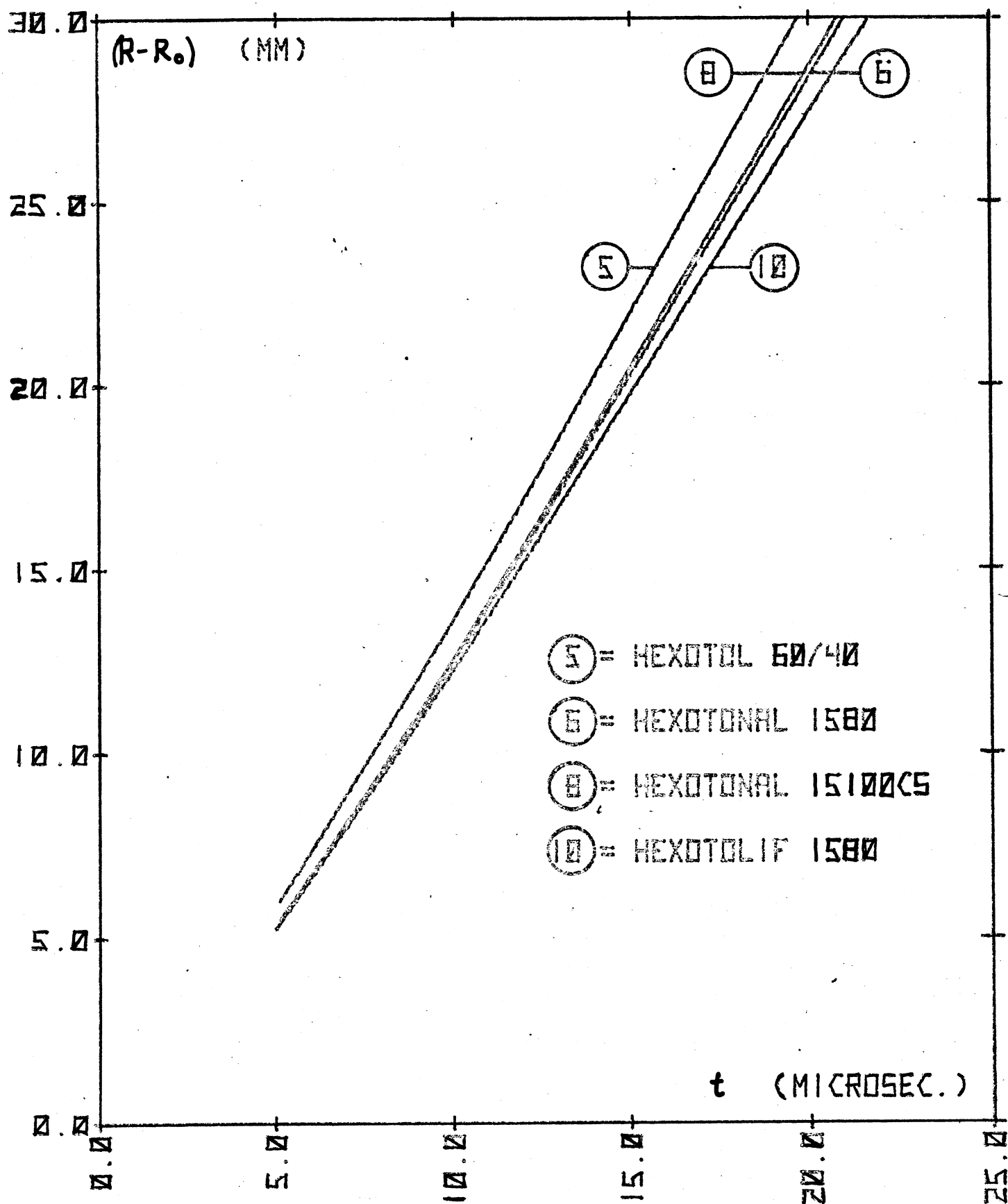


FIG 12.

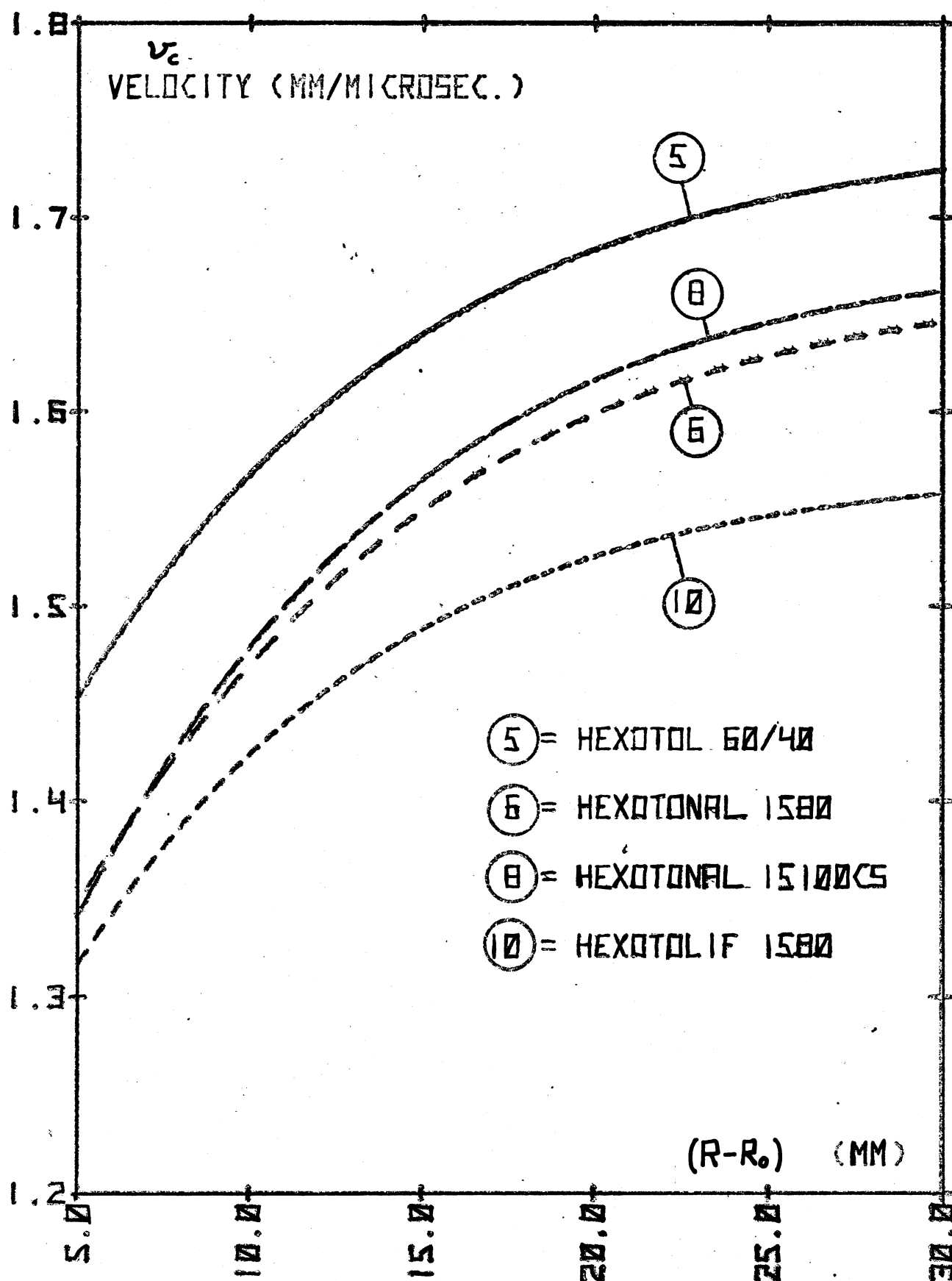


FIG 13.

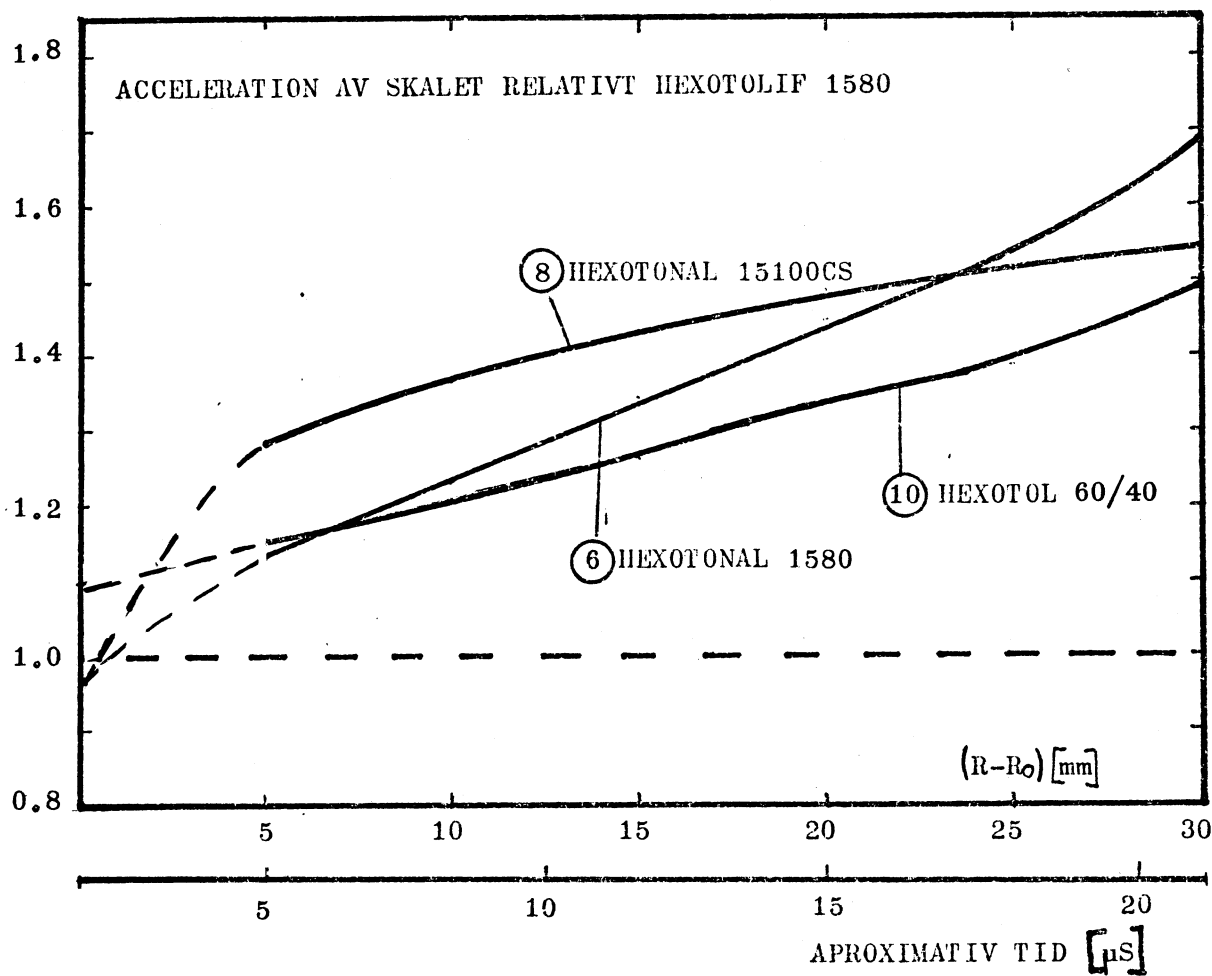
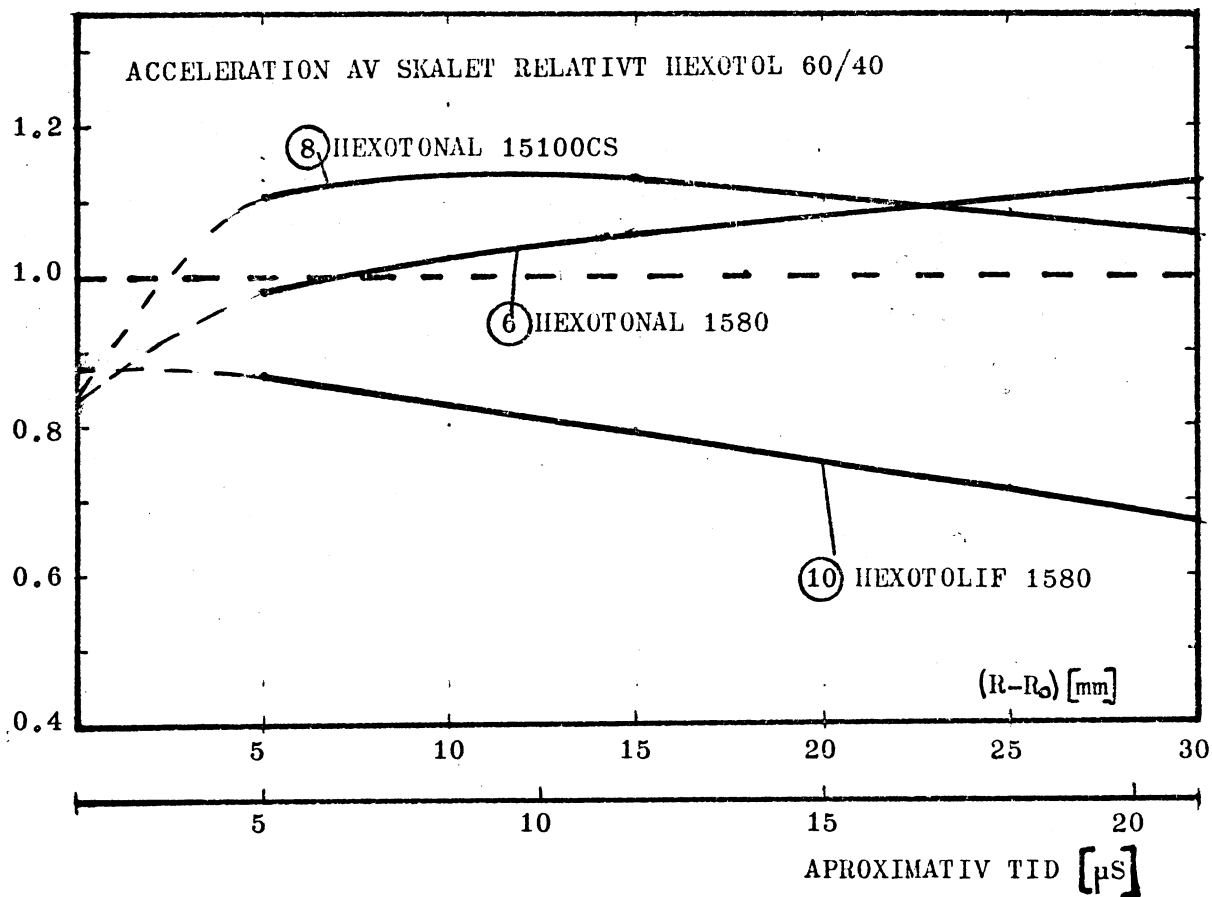


FIG 14.

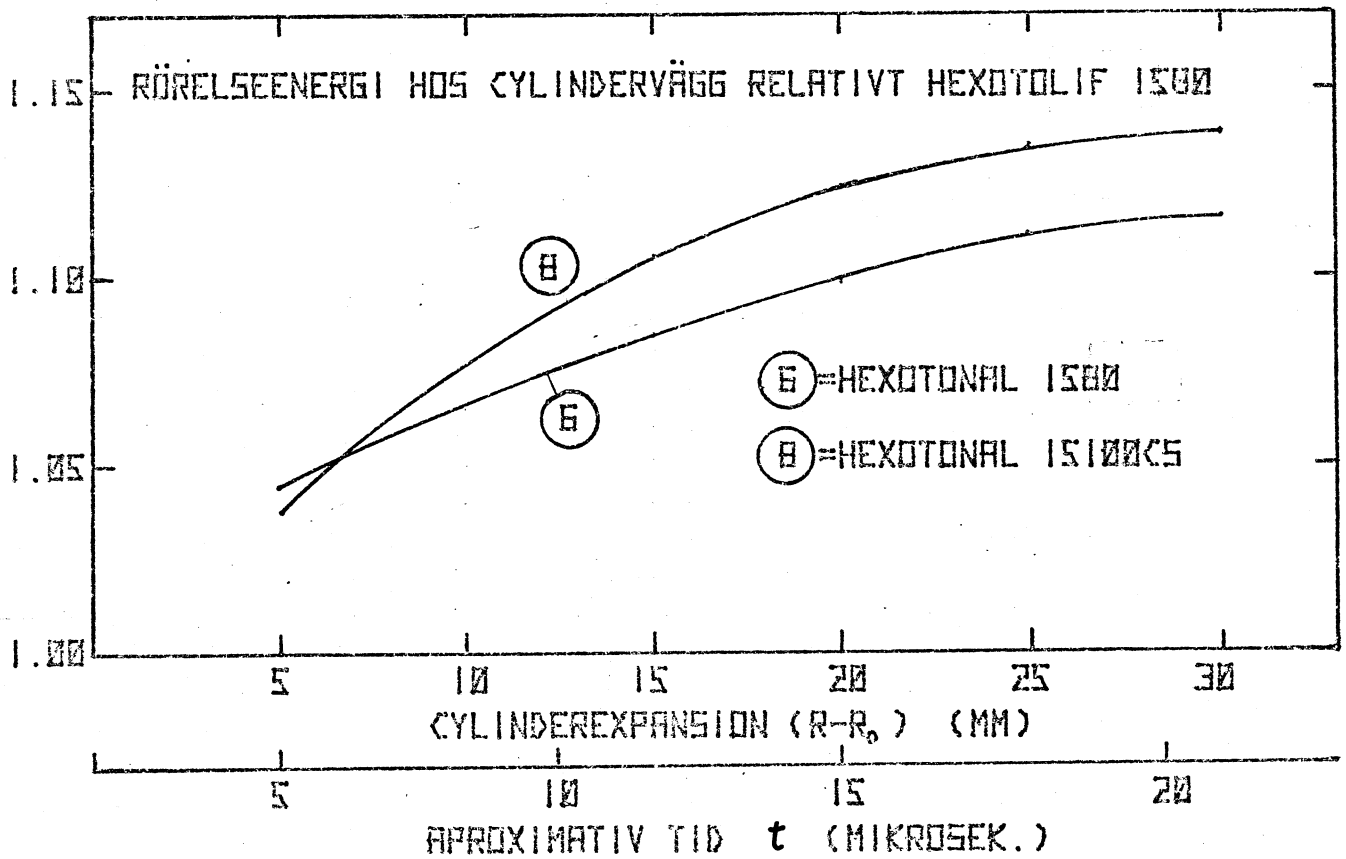
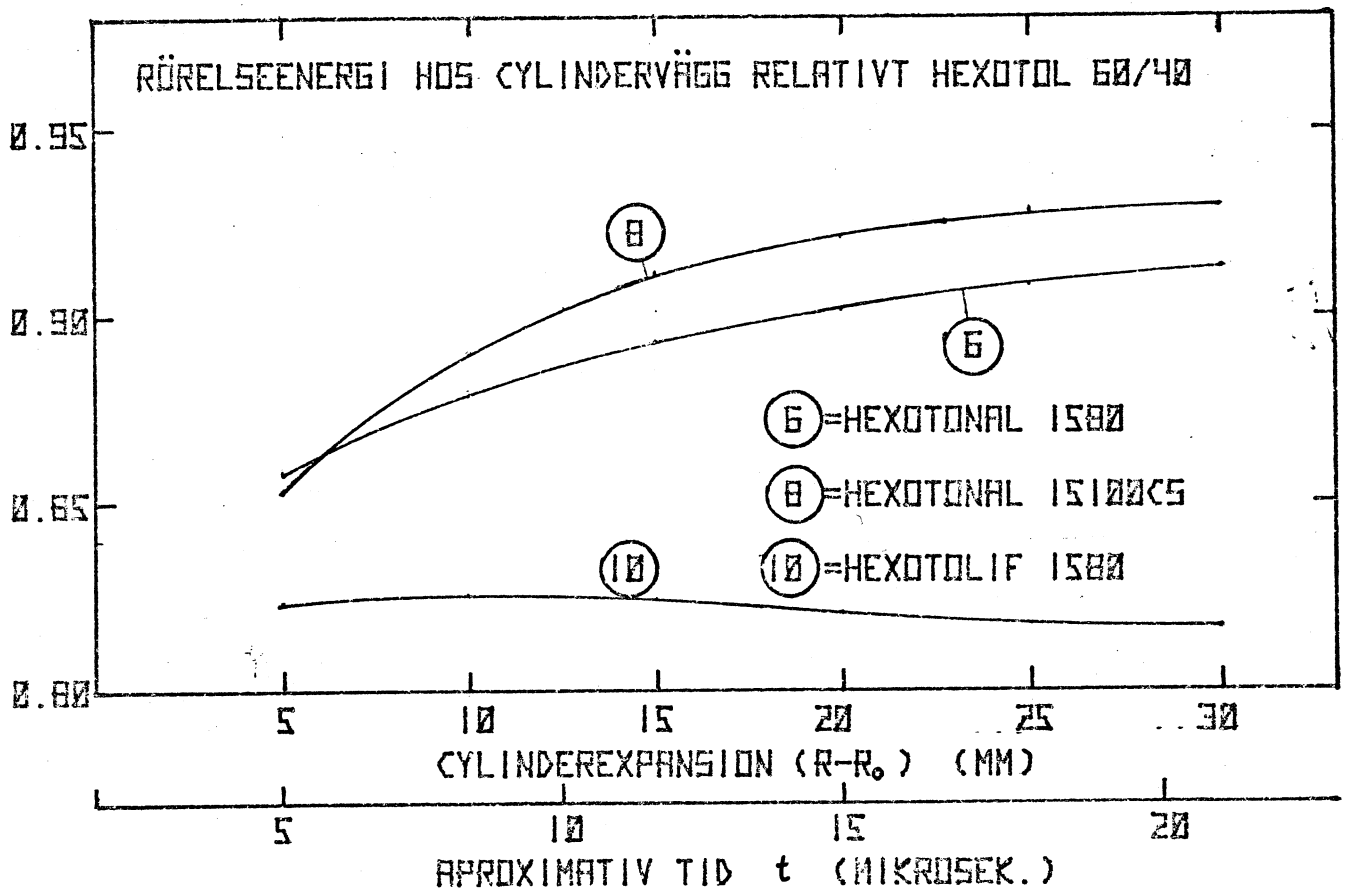


FIG 15.

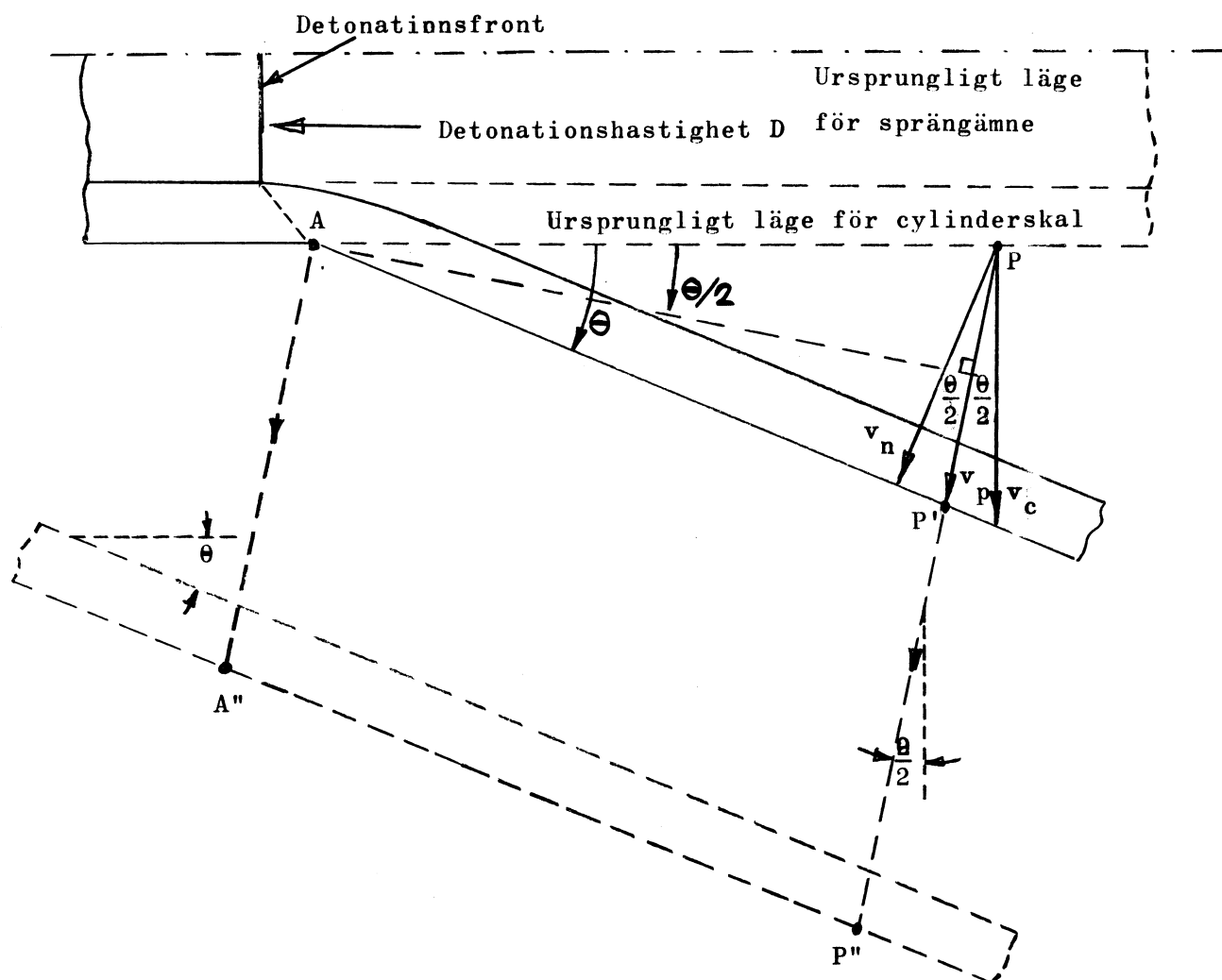


FIG 16. METALLSKALET'S UTKASTRIKTNINGAR
VID CYLINDERGEOMETRI

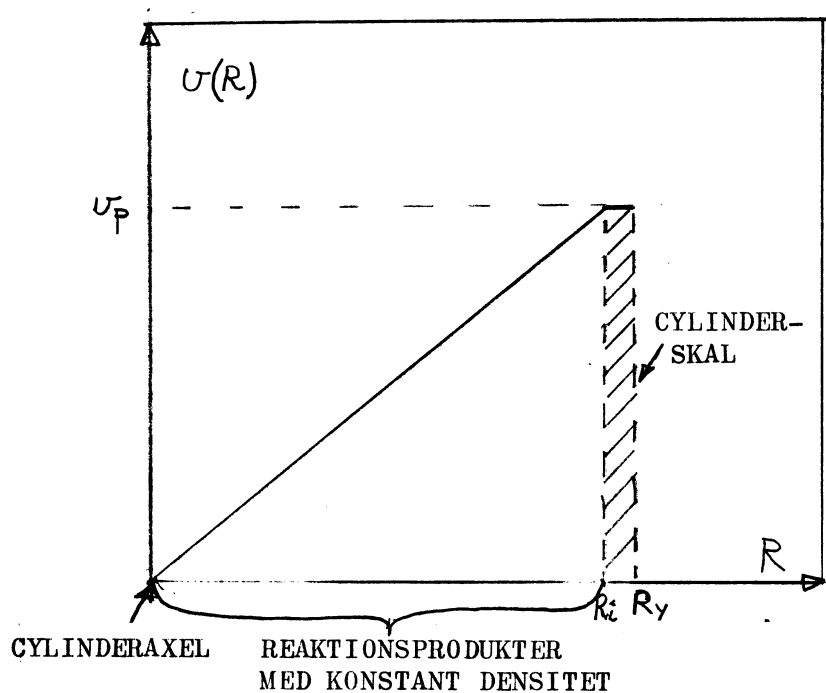


FIG 17. HASTIGHETSFÖRDELNING I REAKTIONSPRODUKTERNA
ENLIGT GURNEY- APROXIMATIONEN

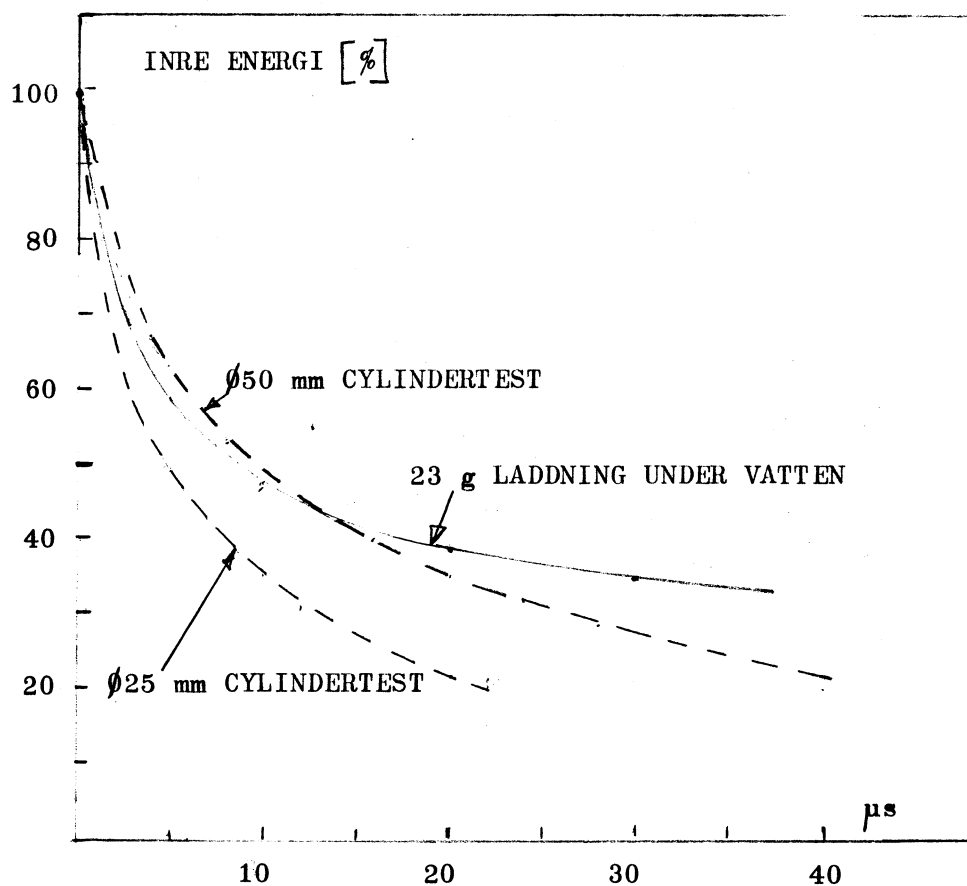
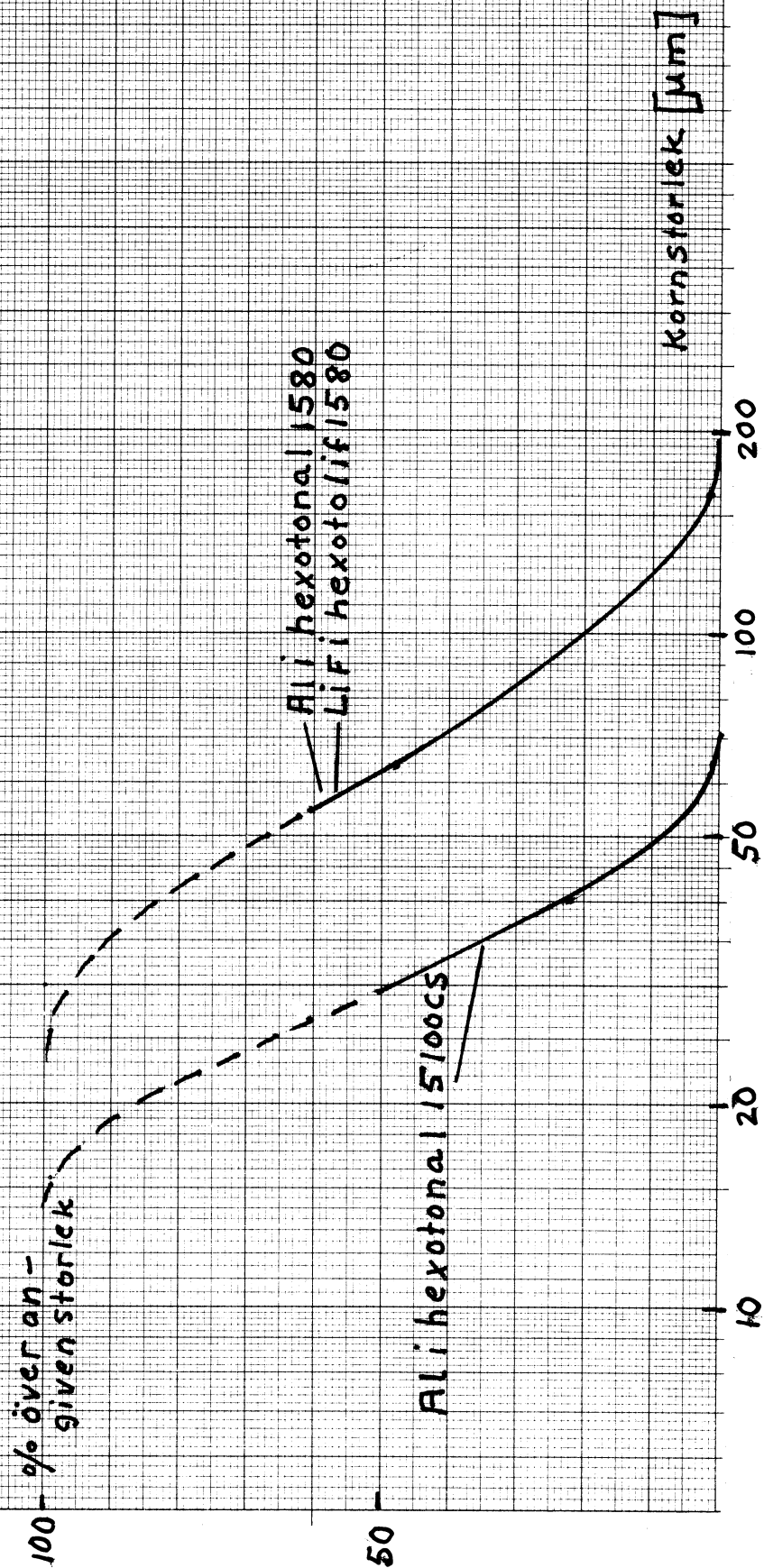


FIG 18. INRE ENERGI HOS REAKTIONSPRODUKTERNA SOM FUNKTION
AV TIDEN, FÖR NÅGRA FÖRSÖKSGEOMETRIER

Fig 19. Kornstorleksfördelning hos Al
och LiF i sprängämnen.



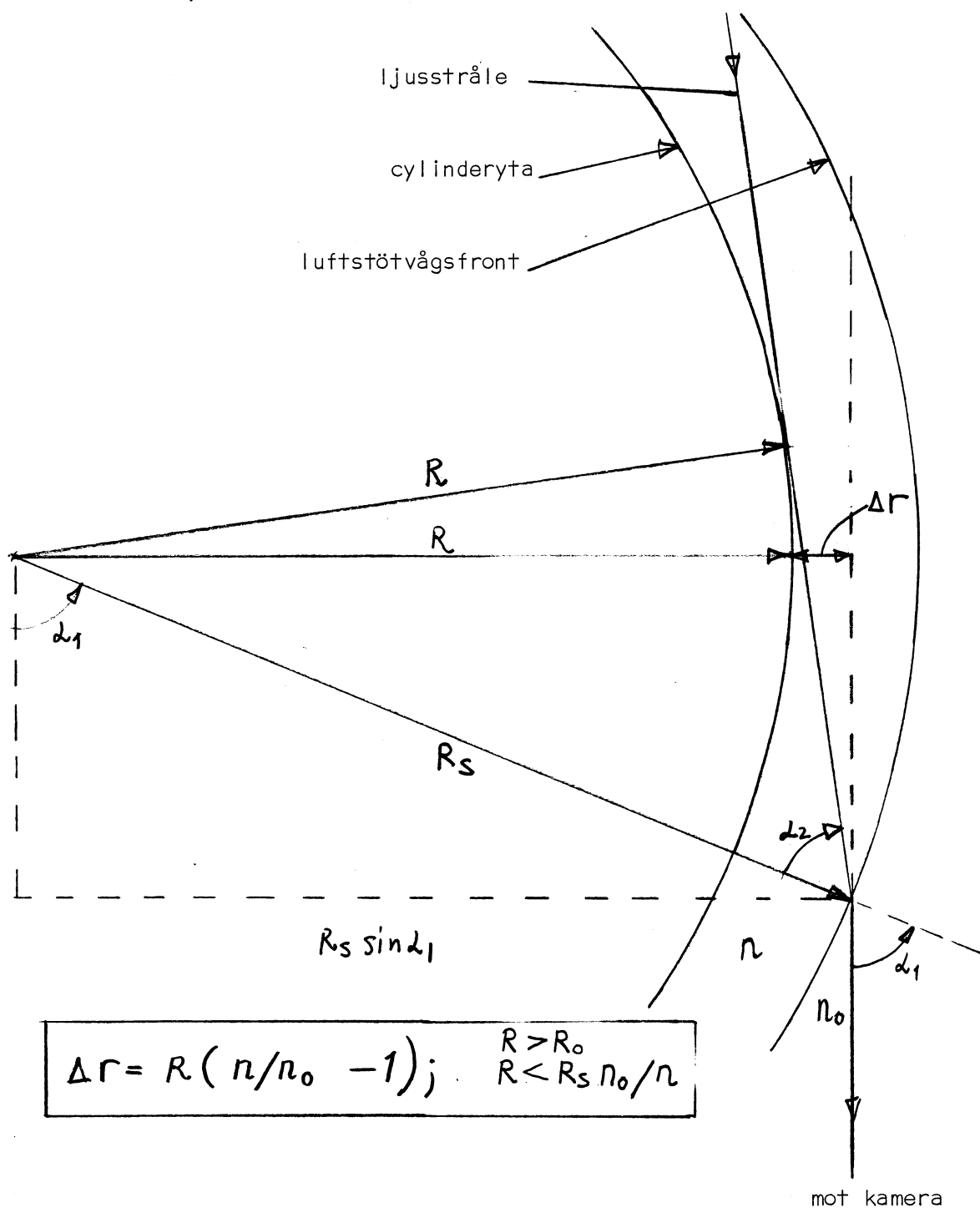


FIG 20. GEOMETRI VID LJUSBRYTNING
I LUFTSTÖTVÅGEN

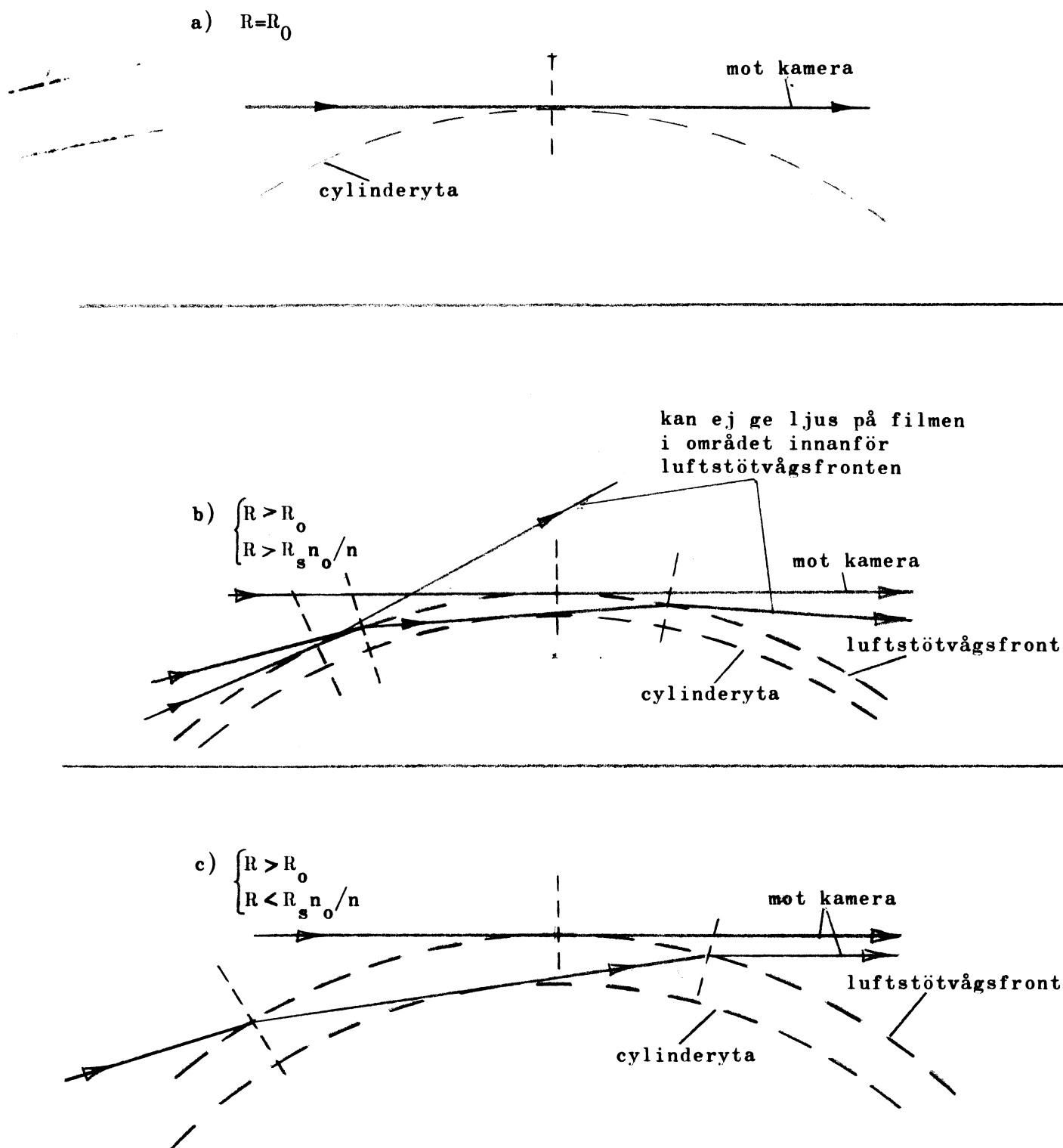
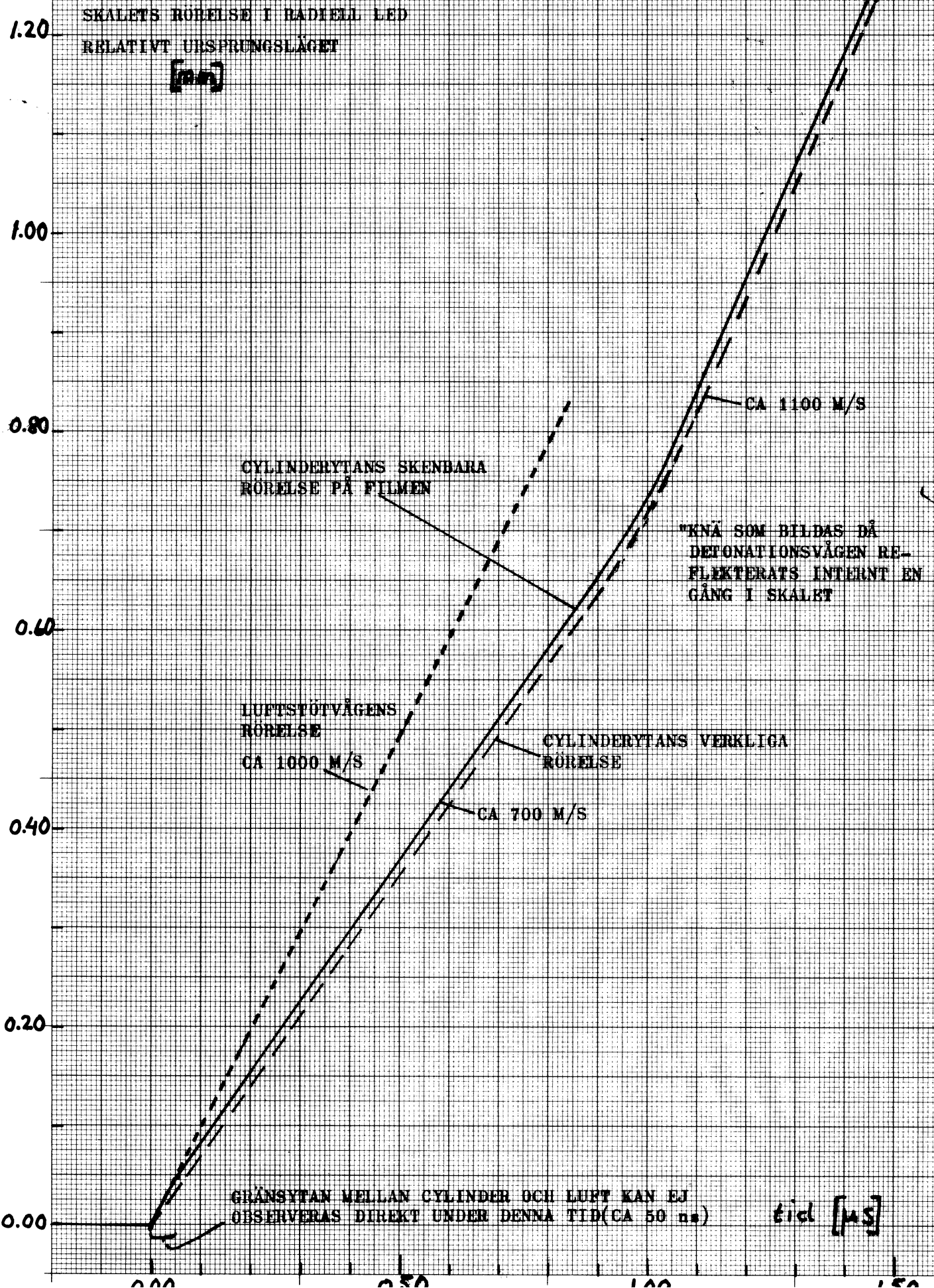


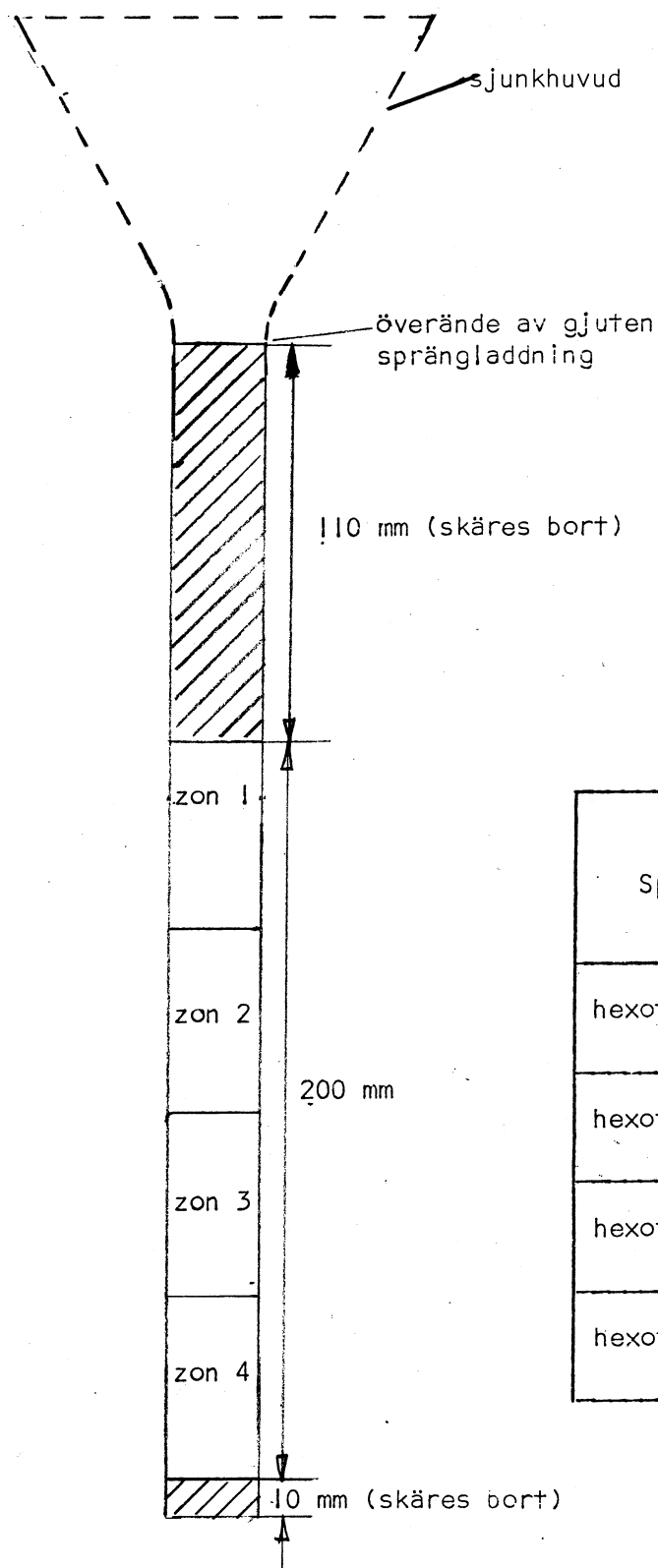
Fig 21. Strålgång vid cylinderytan
under den första rörelsen

FIG 22. SVEPKAMERAREGISTRERING AV SKALET'S
FÖRSTA RÖRELSE VID CYL.-TEST.
LUFTSTÖTVÄGENS INVERKAN PÅ REGI-
STRERINGEN. DATA FRÅN SKOTT # 5.

42.

GB 1974





Sprängämne	Densitet (g/cm ³) i zon nr			
	AL (LiF) i zon nr (%)			
	1	2	3	4
hexotol 60/40	<u>1.687</u> -	<u>1.687</u> -	<u>1.688</u> -	<u>1.690</u> -
hexotonal 1580	<u>1.755</u> 15.0	<u>1.757</u> -	<u>1.757</u> -	<u>1.762</u> 15.2
hexotonal 15100CS	<u>1.756</u> 15.0	<u>1.755</u> -	<u>1.759</u> -	<u>1.762</u> 15.2
hexotolif 1580	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>1.760</u> 15.1

Fig. 23. Resultat från undersökning av provladdningar.

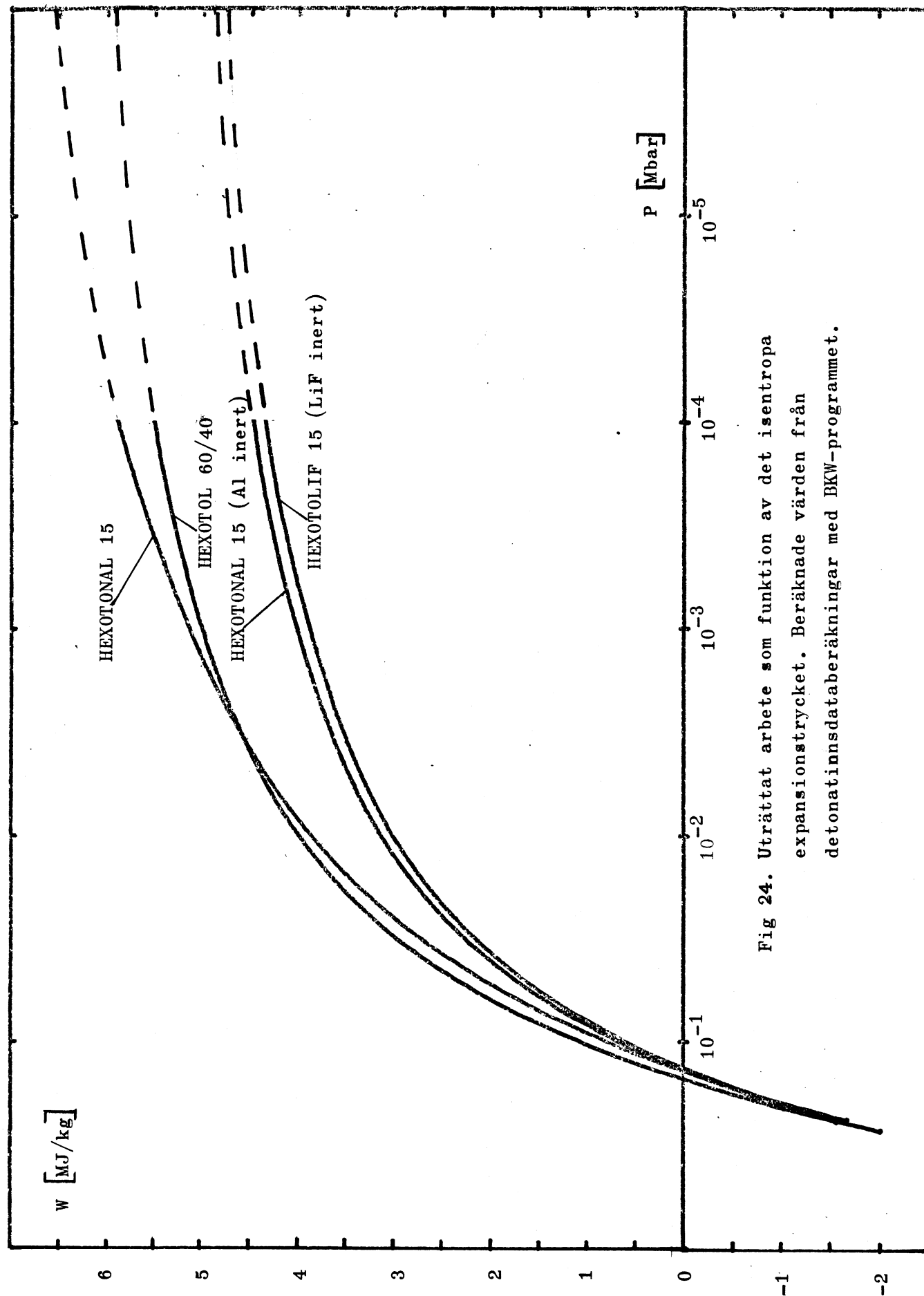


Fig 24. Uträttat arbete som funktion av det isentropa expansionsstrycket. Beräknade värden från detonationsdataberäkningar med BKW-programmet.

Al. Sprängämnen och sprängladdningar

Data på de sprängämnen som provats finns sammanställda i tabell 2. Hexotolen var av Bofors tillverkning och hade beteckningen hexotol NSK 19 charge 71-43.

Trotylen var också av Bofors tillverkning med beteckningen NFT 10

Aluminiumpulvret var Karlfors bruks A80 och Al00CS med en halt fritt aluminium på 98.5 respektive 98.8%. Kornstorleksfördelningen hos pulvren kan ses på fig. 19.

Litiumfluoriden var purumkvalite av Mercks tillverkning med beteckningen "korngrösse unter 1 mm". Denna kvalite maldes i mortel tills den fick samma kornstorleksfördelning som aluminium A80 vid kontrollsiktning.

Sprängämnena gjöts i kopparrör med innerdiameter 24.96 ± 0.005 mm, ytterdiameter 30 mm och längden 320 mm. Ett trattformat sjunkhuvud med ungefär samma volym som kopparröret användes och laddningarna fick svalna vid rumstemperatur.

Sprängämnets temperatur vid gjutningen var $83-84^{\circ}\text{C}$ och formarna var förvärmda till $ca\ 85^{\circ}-90^{\circ}$.

För att behålla god gjutbarhet och därigenom få hög kvalitet på de laddningar som innehöll aluminium eller litiumfluorid ökades trotylhalten i dessa så att sammansättningen m.a.p. RDX/TNT blev 50/50.

För varje typ av sprängämne gjöts 3 st identiska laddningar (för hexotolif 1580 dock endast en) från samma smälta inom ca 30 sekunders tid. Efter avsvälning togs laddningarna ur sin form och inspekterades okulärt. De nedersta tio millimetrarna svarvades sedan bort så att nederändan blev plan. Laddningarnas längd justerades sedan till 290 mm genom att överändan svarvades av plant. En laddning av varje sort användes som provladdning och styckades upp i cylindrar med längden ca 50 mm med planparallella ändytter. Dessa små cylindrar inspekterades okulärt med avseende på sprickor och kaviteter samt mättes och vägdes för densitetsbestämning. Litiumfluorid- och aluminiumhalten bestämdes genom vägning av den torkade olösta resten efter upplösning och tvättning med aceton.

Figur 23 sammanfattar resultaten från undersökningarna av provkropparna.

A2. Beräkning av fel som uppstår vid optisk lägesbestämning av cylinderytan beroende på ljusbrytning i luftstöt vågen runt cylindern

Vi antar enligt fig 20 att alla ljusstrålar ligger i ett plan som är vinkelrätt mot cylinderns axel samt att partikelhastigheten i området mellan cylindern och luftstöt vågsfronten momentant har en konstant partikelhastighet med ett värde lika med cylinderytans momentana hastighet. Området mellan cylindern och luftstöt vågsfronten kommer då att vid en given tidpunkt ha ett konstant brytningsindex n som kan beräknas med Lorentz-Lorenz ekvationen

$$n = \eta (n_0 - 1) + 1; \text{ som gäller för } n_0 - 1 \ll 1; \quad (1)$$

n = brytningsindex hos den chockade gasen

n_0 = " " " ostörda "

$\eta = V_0/V$ = kompressionen av gasen

Enligt geometrin i fig 20 fås dessutom:

$$\Delta r = R_s \sin \alpha_1 - R; \quad (2)$$

$$n_0 \sin \alpha_1 = n \sin \alpha_2; \quad (3)$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{R}{R_s}; \quad (4)$$

(2), (3) och (4) ger:

$$\Delta r = R \left[\eta \frac{n}{n_0} - 1 \right]; \quad (5)$$

$R' \approx R$ och (1) ger:

$$\Delta r = R' \left[\frac{\eta (n_0 - 1) + 1}{n_0} - 1 \right]; \quad (6)$$

Om vi räknar på det praktiska fallet vi har här kan förloppet under den första delen av expansionen beskrivas enligt följande.

1. Innan detonationen har nått den punkt vi betraktar kan situationen beskrivas av fig 21a.
2. När stöt vågen från detonationen passerar ut genom kopparskalet accelererar ytterytan av skalet på en bråkdel av en mikrosekund till en hastighet v_{CO} som är lika med 2 gånger stöt vågens partikelhastighet i skalet.
I det praktiska fallet med hexotol 60/40 i kopparcylindern blir denna hastighet ca 700 m/s. I den intilliggande luften

alstras en stötvåg som rör sig med en hastighet på ca 1000 m/s. Partikelhastigheten i luften mellan cylindreskalet och luftstötvågsfronten blir densamma som skalets hastighet d.v.s. ca 700 m/s. Detta innebär en kompression av luften och en ökning av brytningsindex inom detta område. Med hjälp av stötvågsdata för luft [12] kan vi uppskatta kompressionen $\eta = V_0/V$ till ca 4. Formel (1) ger då $n/n_0 = 1.00087$ om vi som brytningsindex n_0 för den ostörda luften använder värdet $n_0 = 1.00029$. Fram till ca 50 ns efter stötvågens passage ut i luften kommer situationen att vara som i fig 21b. och vi kan alltså fram till denna tid endast registrera luftstötvågsfrontens rörelse, medan en observation av cylinderytans rörelse ej är möjlig.

3. När det stötvågskomprimerade området mellan cylinderytan och luftstötvågsfronten efter ca 50 ns fått en tjocklek av ca 0.013 mm, kan vi på nytt börja observera cylinderytan igen. Situationen beskrivs nu av fig 21c.

På grund av ovan angivna orsaker kommer svepkameraregistreringen (fig. 2) av den första delen av expansionen att se ut som i fig 22.

Utgående från formel (6) och uppmätta hastigheter hos cylinderväggen i standarduppställningen med hexotol 60/40 som sprängämne, har korrektionskurvan $\Delta r = f(R-R_0)$ i fig 6 ritats upp. Då korrektionen Δr är relativt okänslig för de skillnader i hastighet som fås med de sprängämnena som provats i denna undersökning, har samma korrektion $\Delta r = f(R-R_0)$ använts för samtliga skott.

A3. Bestämning av sann partikelhastighet hos cylinderskalet ur hastighet beräknad genom differentiering av radie-tiddata från svepkamera-registrering.

En svepkameraregistrering med spalten vinkelrät mot cylinderaxeln enligt fig 1 registrerar inte rörelsen hos en och samma punkt av cylinderskalet eftersom detta ej rör sig vinkelrätt mot cylinderaxeln. Den hastighet man får genom differentiering av svepkameradata är därför inte den sanna partikelhastigheten utan snarare en fashastighet.

Fig 7 visar ett kerrcellkameraskott på en sprängämnesfylld kopparcylinder. Ur fig 7 kan man se att skalet avlänkas en vinkel θ som efter ett par mm av expansionen blir nästan konstant. Man kan också konstatera att skalet deformeras obetydligt i sin längsled under expansionen. För att beräkna avlänkningsvinkeln θ och relationen mellan de aktuella fas och partikelhastigheterna kan vi alltså enligt fig 16 antaga att skalet momentant acceleras till sin sluthastighet varvid det avlänkas vinkeln θ från cylinderaxeln samt att ingen deformation av skalet i längsled förekommer. Detta ger

$$AP = A'P' = A''P'' \quad (1)$$

där AP betecknar längden mellan punkt A och P.

Om vi drar normalen mot PP' från A kommer denna att bli bisektris till vinkeln θ då triangeln APP' enligt (1) är likbent. En partikel i cylinderskalet kommer därför att röra sig längs $PP'P''$ med en hastighet v_p med riktningsvinkeln $\theta/2$ i detonationens riktning från cylinderaxelns normal. Svepkameran registrerar hastighetskomponenten v_c som är vinkelrät mot cylinderaxeln medan v_n är hastighetskomponenten vinkelrätt mot det avlänkade cylinderskalet.

Enligt geometrin i fig 16 fås:

$$v_n = D \sin \theta; \quad (2)$$

$$v_c = D \operatorname{tg} \theta; \quad (3)$$

$$v_p = 2 D \sin \theta/2; \quad (4)$$

(2) och (3) ger:

$$v_p = 2D \sin (0.5 \operatorname{arctg} v_c/D); \quad (5)$$

När svepkameran registrerat en expansion $(R-R_0)$ har den registrerat rörelsen hos punkter på en längd x av cylindern där

$$x = \frac{(R-R_0)}{v_c} \left[\sqrt{D^2 + v_c^2} - D \right]; \quad (6)$$

Den punkt vi betraktar vid ett givet $(R-R_0)$ ligger alltså x längdenheter längre bak på cylinderytan än den punkt vi betraktade vid expansionens början. Den partikel vi betraktar vid ett givet $(R-R_0)$ har alltså hastigheten v_p och har accelererats under en tid t_p där

$$t_p = t + \frac{x}{D} \quad (7)$$

Om vi applicerar formlerna ovan på ett praktiskt fall t.ex. cylindertest nr 5 gäller vid $(R-R_0) = 30 \text{ mm}$.

$$D = 7.82 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$$v_c = 1.724 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$$t = 19.71 \text{ } \mu\text{s}$$

Detta ger:

$$v_n = 1.684 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$$v_p = 1.697 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

$$\theta = 12.43^\circ$$

$$x = 3.27 \text{ mm}$$

$$t_p = 20.13 \text{ } \mu\text{s}$$

$\therefore v_p$ och v_n är ca 1.6 respektive 2.3% lägre än v_c .

Mätning av θ i kerrcellbilden i fig 7, ger 11.8° . En beräkning med formel (3) och det för bilden aktuella värdena $D = 7.82 \text{ mm}/\mu\text{s}$ och $v_c = 1.67 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ger $\theta = 12.0^\circ$.

A4. Energifördelning vid cylindertest och uppskattning av det maximalt utvinnbara arbetet.

Den kemiska energi som frigörs när sprängämnet detonerar inneslutet i kopparcylindern överförs till olika energiformer. Den kemiskt frigjorda energien Q per massenhet av sprängämnet kan vid en given expansion

$(R-R_0) = \gamma$ anses fördela sig enligt

$$Q \rightarrow \begin{cases} A = \text{kinetisk energi hos skalet} \\ B = \text{kinetisk energi hos reaktionsprodukterna} \\ C = \text{inre energi som överförts till skalet genom stötvågsuppvärmning} \\ D = \text{inre energi som överförts till skalet genom deformationsarbete till } (R-R_0) = \gamma \\ E = \text{energi som överförts till den omgivande luften} \\ F = \text{Kvarvarande inre energi i reaktionsprodukterna} \end{cases}$$

A. Den kinetiska energin A hos skalet beräknas ur

$$A = \frac{mv_p^2}{2}; \quad (1)$$

$$\text{där} \begin{cases} m = \text{skalets massa} \\ v_p = \text{skalets hastighet} \end{cases}$$

B. Den kinetiska energin hos reaktionsprodukterna kan beräknas enligt den modell för hastighets och densitetsfördelning i reaktionsprodukterna som uppställts av Gurney /13/ (se fig 17).

Låt oss betrakta ett snitt av cylindern vinkelrätt mot cylinderns axel. Gurneymodellen innebär då att densiteten hos reaktionsprodukterna i hela snittet är konstant vid en given tidpunkt

$(\rho = \rho(t), \rho \neq \rho(r))$, samt att produkterna endast har hastighetskomponent i radiell riktning som dessutom är linjär i radien R enligt:

$$v(R) = \text{konstant} \cdot R; \quad (2)$$

Om vi beräknar produkternas kinetiska energi B per massenhet av sprängämnet vid en given tidpunkt t med denna modell får vi:

$$B = \frac{v_p^2(t)}{4}; \quad (3)$$

- C. Den termiska energihöjningen som kvarstår i kopparskalet sedan detonationsvågen passerat och metallen i skalet avlastats igen (stötstågsvärmning) kan fås ur tabeller i ref. /14/ när stötstågstrycket i skalet är känt. Stötstågstrycket i sin tur bestäms ur partikelhastigheten u_p i stötstågen. För u_p gäller $u_p = v_{co}/2$ där v_{co} är den hastighet som skalet momentant accelereras till när stötstågen passerar ut i den omgivande luften.
- D. Den termiska energihöjningen i skalet orsakad av stelt idealplastiskt deformationsarbete kan beräknas ur deformationsarbetet D per massenhet av sprängämnet.

$$D = \frac{2y}{\rho_o R_{i_o}^2} \left[(R_{y_o}^2 - R_{i_o}^2) \ln \sqrt{R_{y_o}^2 - R_{i_o}^2 + x^2} + x^2 \ln \left(\frac{\sqrt{R_{y_o}^2 - R_{i_o}^2 + x^2}}{x} \right) \right]_{x=R_{i_o}}^{x=R_i} \quad (4)$$

- E. PdV-arbetet mot den omgivande luften beräknas ur:

$$E = \int_{V_o}^V PdV; \quad (5)$$

där $\begin{cases} P = \text{trycket i luften vid cylinderns yta.} \\ V = \text{yttervolymen av cylindern.} \end{cases}$

- F. Av den vid $(R-R_o) = y$ kvarvarande inre energin F hos reaktionsprodukterna kan en avsevärd del utvinnas som mekaniskt arbete F_A när reaktionsprodukterna får expandera ytterligare till t.ex. atmosfärstryck, medan en del F_T blir kvar som inre energi.

Expansionsarbetet F_A vid isentrop expansion från tillståndet (P_1, V_1) vid $(R-R_o) = y$ till tillståndet (P_2, V_2) kan beräknas enligt följande:

Om vi antar att trycket i expansionsprodukterna sjunkit till några hundra bar vid $(R-R_o) = y$ kan den fortsatta expansionen med god noggrannhet antagas vara en isentrop expansion med ett konstant värde $\gamma = - \ln p / \ln V$ som ligger nära värdet för en idealgas.

Det expansionsarbete F_A som reaktionsprodukterna kan uträtta vid sin isentropa expansion från P_1 till P_2 kan beräknas som pdV integralen längs isentropen från P_1 till P_2 . Per massenhet av sprängämnet fås

$$F_A = \frac{P_1 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right] \left[y^2 + 2yR_{y_o} + R_{i_o}^2 \right]}{(\gamma - 1) R_{i_o}^2 \cdot \rho_o} \quad (6)$$

Om detonationsenergin Q är känd kan den kvarvarande inre energien F_T uppskattas indirekt ur

$$F_T = Q - (A+B+C+D+E+F_A) \quad (7)$$

Det utvinnbara arbetet W vid expansion till trycket P_2 blir

$$W = A+B+C+D+E+F_A \quad (8)$$

Ex.: För skott nr 5 med hexotol 60/40 gäller:

$$\begin{aligned} R_{yo} &= 1.476 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ R_{io} &= 1.248 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ \rho_c &= 8930 \text{ kg/m}^3 \\ Y_* &= 10^8 \text{ N/m}^2 \\ \rho_o &= 1691 \text{ kg/m}^3 \\ D &= 7810 \text{ m/s} \\ v_{co} &= 720 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Vid $(R-R_o) = 30 \text{ mm}$ gäller dessutom:

$$\begin{aligned} v_c &= 1.72 \text{ mm}/\mu\text{s} \\ p_l &= 280 \text{ bar} \end{aligned}$$

Med hjälp av formel (A3:5) kan vi beräkna v_p .

$$v_p = 1.69 \text{ mm}/\mu\text{s}$$

Vid $(R-R_o) = 30 \text{ mm}$ kommer energien att fördela sig enligt följande om vi räknar på ett kilo sprängämne och sätter detonationsenergin $Q = 4.69 \text{ MJ/kg}^{1/}$.

Kinetiska energin hos skalet.	A	3.01 MJ, (0.64Q)
" " " reaktionsprod.	B	0.71 MJ, (0.15Q)
Ökning av termisk energi i skalet genom stötvågsuppvärmning.	C	0.04 MJ, (0.01Q)
Ökning av termisk energi i skalet genom deformationsuppvärmning.	D	0.04 MJ, (0.01Q)
PdV-arbete mot den omgivande luften.	E	0.02 MJ, (0.01Q)
Isentropiskt expansionsarbete från trycket 280 bar vid $(R-R_o) = 30 \text{ mm}$ till $p_2 = 1 \text{ bar}$ ($\gamma = 1.3$).	F_A	0.67 MJ, (0.14Q)
$A+B+C+D+E+F_A =$	W	4.49 MJ (0.96Q)