

Concept

DATA FRÅN UNDERVATTENSSKJUTNINGAR
FÖR 39 OLIKA SPRÄNGÄMNER

Gert Bjarnholt

DS 1973:7

4.4.1973

STIFTELSEN
SVENSK DETONIKFORSKNING
SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION

VINTERVIKEN – 117 48 STOCKHOLM
SWEDEN

DATA FRÅN UNDERVATTENSSKJUTNINGAR
FÖR 39 OLIKA SPRÄNGÄMNER

Gert Bjarnholt

DS 1973:7

4.4.1973

Sammanfattning

Laddningar av 39 olika sprängämnen har detonerats nedsänkta i vatten. Tryck-tidförloppet i vattnet som omger sprängämnet har registrerats med piezoelektrisk tryckmätare. Ur dessa registreringar har maximaltrycket, impulstätheten och stötvågsenergin i vattenstötvågen samt energin i gasklotet (bubbelpulsenergin) utvärderats.

Rapporten redovisar en metod att ur mätvärdena göra en absolut bestämning av det mekaniskt uträttade arbetet och explosionsvärmets. Undervattensskjutning ger därmed möjlighet till kontroll av olika ingrediensers deltagande i explosionsreaktionen, t.ex. vid formulering av nya sprängämneskompositioner.

De undersökta sprängämnena omfattar 10 dynamit- och nitroglycerinsprängämnen från olika tillverkare, 13 vattengelsprängämnen, 10 pulverformiga ammoniumnitratsprängämnen innehållande aluminium och 6 militära och civila högbrisanta sprängämnen.

<u>Innehållsförteckning</u>	sid
1. Inledning	1
2. Symbollista	2
3. Försöksutrustning och mätteknik samt utvärdering av data	3
4. Sprängladdningar och initiering	3
5. Sprängämnenas beräknade explosionsvärmen Q , gasvolymen V_g och viktstyrkor s	4
6. Kommentarer till mätvärdena	5
7. Bestämning av mekaniskt uträttat arbete A vid undervattensskjutning samt därur beräknad explosionsenergi Q_e	6
8. Presentation av mätvärdena samt feluppskattning	9
9. Några kommentarer till de olika sprängämnenas prestanda	10
10. Slutkommentar	11
11. Referenser	13
12. Tabeller	15
13. Figurer	25

1. Inledning

När en sprängladdning på ca 0.5 kg detonerar på ca 2.5 meters vattendjup överförs hela laddningen på något tiotal mikrosekunder till en gas med mycket högt tryck och hög temperatur. Detta gasklot expanderar mot det omgivande vattnet och en stötvåg bildas i vattnet som inom ca 100 μ s har förlorat kontakten med gasklotet. Då den sfäriska stötvågen efter c:a 1500 μ s når vattenytan är dess maximaltryck c:a 140 bar och gasklotets radie c:a 0.2 m (TNT). Gasklotet fortsätter emellertid att uträtta arbete mot det omgivande vattentrycket tills klotet efter ca 90 millisekunder når ett maximum, varefter det vänder och trycks ihop igen till ett minimum för att åter expandera etc. Genom att mäta tryck-tidförloppet i vattnet, t.ex. 2 m från laddningen, kan maximaltrycket, impulsen och energin i stötvågen beräknas. Dessutom får man tiden för gasklotets första hela svängning (förstabubbelpulsperioden) som tiden mellan primärstötvågen och den stötvåg som sänds ut vid gasklotets första minimum. Bubbelpulsenergin som definieras som det arbete som spränggaserna uträttat för att expandera gasklotet till sitt första maximum mot det hydrostatiska tryck som finns på laddningsdjupet kan sedan beräknas ur bubbelpulsperioden /1/.

2. Symbollista

- R = avstånd mellan laddning och tryckmätare
 h = laddningens djup under vattenytan
 p_a = atmosfärens statiska lufttryck
 ρ = sprängämnets laddningsdensitet
 W = sprängämnets laddningsvikt¹⁾
 P_m = maximaltrycket i vattenstötstången på avståndet R från laddningen
 θ = tidskonstanten " " " " (den tid det tar för trycket i vattenstötstången på avståndet R från laddningen att falla till P_m/e , d.v.s. till 37% av maximaltrycket)
 I = impulstätheten i vattenstötstången på avståndet R från laddningen (integrerad till 6.7θ)
 p_m = reducerat maximaltryck = $P_m \cdot R/W^{1/3}$
 i = reducerad impulstäthet = $I \cdot R/W^{2/3}$
 e_s = energien i vattenstötstången per viktsenhet sprängämne på avståndet R från laddningen
 T_B = tiden för gasklotets första period (bubbelpulsperioden)
 e_B = gasklotsenergin (bubbelpulsenergin) per viktsenhet sprängämne (det arbete som spränggaserna uträttat mot det omgivande vattentrycket för att expandera gasklotet till sitt maximum)
 Q = termokemiskt beräknat explosionsvärme per viktsenhet hos sprängämnet
 V_g = gasvolym per viktsenhet hos sprängämnet vid NTP
 s = viktstyrka hos sprängämnet (relativt LFB+dynamit) = $\frac{5}{6} \frac{Q}{Q_0} + \frac{1}{6} \frac{V_g}{V_{g0}}$,
 där $Q_0 = 5.0 \text{ MJ/kg}$ och $V_{g0} = 0.850 \text{ m}^3/\text{kg}$ när Q mäts i MJ/kg och V_g i m^3/kg
 η = den teoretiskt maximala mekaniska verkningsgraden för sprängämnet vid isentrop expansion till sluttrycket 0.04 bar
 μ = faktor för att extrapolera den vid tryckmätaren mätta stötstågsenergin, e_s till stötstågsenergi vid laddningen μe_s
 A = $\mu e_s + e_B$ = det mekaniska arbete som sprängämnet uträttat vid undervattensskjutning
 Q_e = $\frac{\mu e_s + e_B}{\eta}$ = explosionsvärme beräknat ur undervattensskjutningsdata
 P_d = detonationstryck

¹⁾ inkluderar vikten av sprängkapseln och primerns laddning

3. Försöksutrustning och mätteknik samt utvärdering

Huvuddelen av försöken utfördes på den försöksplats vid Vinterviken i Stockholm som finns beskriven i fig 1 som visar arrangemanget i ett snitt vinkelrätt mot kajkanten. Blockdiagrammet i fig 2 visar principen för mätutrustningen. Då behov fanns att skjuta större laddningar än de ca 0.5 kg man maximalt kunde ha på denna försöksplats utfördes några mätningar med större laddningsvikter vid Dyno Industriars skjutstation i Engene några mil sydväst om Oslo /2/ som tillåter laddningar på över 10 kg.

Dessa skott utfördes på ett djup av 10.0 m med tryckmätare på 15.1 m (pos 1) och 30.3 m (pos 2) från laddningen. Mätutrustningen var i princip densamma som i fig 2. En utförligare beskrivning av försöksplats och mätutrustning vid stationen i Vinterviken samt redogörelse för hur maxtryck, impuls, stöt-vågsenergi och bubbelpulsenergi beräknats finns i /1/. Bubbelpulsenergin beräknades i Engene ur formeln (3.1) nedan som är av samma form som formel (4.14) i /1/.

$$e_B = - \frac{1.63 \cdot 10^4}{W} \left[\sqrt{1 - 0.572 T_B} - 1 \right]^3 \quad (3.1)$$

där W = laddningsvikten i kg
 T_B = första bubbelpulsperioden i sek
 e_B = bubbelpulsenergin i MJ/kg

Vid försöken i Engene mättes detonationshastigheten hos sprängämnet i varje skott med en elektronisk tidintervallmätare.

4. Sprängladdningar och initiering

Sprängladdningar och initiering finns beskriven i fig. 3.

Vid beredning av ANFO-Al blandades Prillit med blandningen 81.6 AN-Prills/18.4 Al i sådana proportioner att den önskade aluminiumhalten erhöles. Dessa blandningar hade syrebalans till CO_2 , H_2O och Al_2O_3 . Blandningen 80.1 AN/1.7 FO/18.2 Al hade dock negativ syrebalans (-6%) till CO_2 , H_2O och Al_2O_3 . 95 Startex/5 Al och 90 sprängdeg/10 Al bereddades genom att aluminiumpulvret knådades in i sprängämnet för hand tills en homogen blandning erhöles.

De aluminiumpulver som användes var standardkvalitéer tillverkade av Karlfors Bruk. Fig 4 visar kornstorleksfördelningen hos de atomiserade kvalitéerna (sfäriska eller oregelbundet formade korn). Dessutom användes T5000 en 'stampad' kvalité som hade flingformade korn med en tjocklek på ca 100 μ . Täckytan på vatten var ca 6000 cm^2/g .

Sprängämnenas packades utan emballage (patronpapper eller plastfolie) i erlenmeyerkolvarna.

5. Sprängämnenas explosionsvärmen Q , gasvolymen V_g och viktstyrkor s

Reaktionsprodukternas sammansättning för de sprängämnen av C-H-N-O-M-typ (M = metall) där sammansättningen var känd och som hade en syrebalans mer positiv än -6% till CO_2 , H_2O och de metalloxider som bildas beräknades enligt följande antaganden.

1. Förbränn all metall (M) till de mest exoterma metalloxider som kan bildas.
2. Bilda sedan så mycket $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ som syret räcker till.
Låt eventuellt överblivet väte vara H_2 .
3. Låt eventuellt överblivet syre bilda CO_2 .
4. Låt eventuellt överblivet kol bli grafit.
5. Låt eventuellt överblivet syre bli O_2 .
6. Om natriumnitrat ingår i sprängämnet, låt Na_2CO_3 bildas i reaktionsprodukterna genom $2\text{NaNO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{N}_2 + 2.5\text{O}_2$ följt av $\text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3$ där koldioxiden tas från spränggaserna.

Ur den enligt ovanstående principer beräknade sammansättningen hos reaktionsprodukterna bestämdes sedan explosionsvärmets Q vid konstant volym och gasvolymen V_g vid NTP med hjälp av termokemiska tabeller. Explosionsvärmets kan ej bestämmas tillförlitligt med ovan beskrivna metod om syrebalansen är mer negativ än ca -10%. För dessa sprängämnen har används detonationskalorimetervärden på $Q/3$ varur V_g sedan uppskattats. I de fall sammansättningen ej varit känd är det angivna explosionsvärmets och gasvolymen givna av fabrikanten.

Anledningen till att ANFO-Al 10% (T5000) fått ett lägre värde på Q (5.27 MJ/kg) än de övriga ANFO-Al 10% (5.47 MJ/kg) är att aluminiumkvaliteten T5000 endast innehöll 93% fritt aluminium.

Eftersom sprängämnenas sköts utan emballage (patronpapper eller plastfolie) är de beräknade explosionsenergierna Q beräknade på det "nakna" sprängämnet utan emballage.

Ur explosionsvärmets Q och gasvolymen V_g har också viktstyrkan s relativt LFB-dynamit beräknats

$$s = \frac{5}{6} \frac{Q}{5.00} + \frac{1}{6} \frac{V_g}{0.850} \quad (5.1)$$

där Q skall anges i MJ/kg och V_g i m^3/kg .

6. Kommentar till mätvärdena

a. Maximaltrycksvärden

Maximaltrycket i vattenstötstången regleras främst av trycknivån i reaktionsprodukterna i och närmast bakom detonationszonen. Ett högt tryck i detonationsstången som sedan faller snabbt kan dock ge ett lägre maximaltryck i vattenstötstången vid tryckmätarens position än ett lägre tryck med ett mindre brant tryckfall. Vid jämförelse mellan olika sprängämnen används lämpligen det reducerade maximaltrycket p_m som i praktiken kan betraktas som oberoende av den reducerade radien $\frac{R}{w^{1/3}}$ om denna ej varierar mer än ca 20%.

b. Stötstångsenergi värden

Stötstångsenergin i vattenstötstången kan betraktas som det tryckvolymarbete som spränggaserna uttvättat under sin expansion från ursprungsvolymen V_0 till volymen V där $V/V_0 \approx 1.5-3$. Vid en laddningsvikt på ca 0.5 kg tar denna expansion ca 5 mikrosekunder för sprängämnen med de högsta detonationstrycken medan motsvarande tid för de lägsta detonationstrycken kan öka till ca 100 mikrosekunder. Under stötstångens gång från laddning till tryckmätare övergår en del av stötstångens energi till termisk energi i närområdet runt laddningen. Denna förlust ökar med ökande detonationstryck.

När maximaltrycket i vattenstötstången under dess gång från laddningen och utåt sjunkit till något hundratal bar blir förlusterna små, varför stötstångsenergin endast sjunker några procent när den reducerade radien $\frac{R}{w^{1/3}}$ ökar från ca 2.5 $\text{m/kg}^{1/3}$ (försöksplats Vinterviken) till ca 25 $\text{m/kg}^{1/3}$ (pos 2, försöksplats Engene).

c. Impulstäthetsvärden

Impulstätheten i vattenstötstången återspeglar liksom stötstångsenergin trycktidförloppet i reaktionsprodukterna under de första ca 5-100 mikrosekunderna. Ändringar i trycktidförloppet närmast efter detonationszonen återspeglas huvudsakligen i maxtrycket och stötstångsenergin medan skillnader i trycktidförloppet något längre bakom detonationszonen mer visar sig som ändringar i impulstätheten i vattenstöt-

vågen. Vid jämförelse mellan olika sprängämnen användes lämpligen den reducerade impulstätheten i , som i praktiken kan betraktas som oberoende av den reducerade radien $\frac{R}{w^{1/3}}$ om denna ej varierar mer än ca 20%.

d. Bubbelpulsenergivärden

Bubbelpulsenergien kan ses som spränggasernas tryckvolymarbete från $V/V_0 \approx 1.5-3$ till slutvolymen när gasklotet nått sin maximala radie där $V/V_0 \approx 25000$ och trycket i spränggasernas är ca 0.04 atmosfär om laddningsdjupet h är 2.5 m.

e. Jämförelse mellan data från skjutplats Engene och Vinterviken

Bubbelpulsenergivärden från Vinterviken och Engene kan anses vara direkt jämförbara. Stötvågsenergivärden från Engene position 1 ($R = 15.1$ m) ligger ett par procent lägre än de mätta i Vinterviken beroende på den större reducerade radien. Reducerade impulstäthetsvärden och reducerade maxtrycksvärden från Engene med laddningar typ C1 (10 kg) ger några procent högre värden än mätningar i Vinterviken beroende på den stora skillnaden i reducerad radie. Laddningar av typ C2 i Engene (≈ 2 kg) ger dock en reducerad radie som är så skild från den i Vinterviken att en jämförelse blir vanskelig.

7. Bestämning av mekaniskt uträttat arbete A vid undervattensskjutning samt därur beräknad explosionsenergi Q

Den kemiska energi Q (explosionsvärmets) som frigöres i sprängämnet fördelas till vattenstötvågsenergi, energi för att expandera gasklotet till sitt maximum (bubbelpulsenergi) och termisk restenergi i gasklotet vid dess maximum.

Den energi vi kan mäta är stötvågsenergien e_S vid tryckmätaren på avståndet R från laddningen samt bubbelpulsenergien e_B . En del av stötvågens energi har emellertid överförts till termisk energi i vattnet vid stötvågens gång från laddning till tryckmätare. Om vi skriver denna termiska energi som $e_S(\mu-1)$ blir stötvågens energi vid laddningen μe_S där μ är en faktor med ett värde nära 2 på de avstånd R som används vid denna undersökning.

Om den termiska restenergien i gasen vid gasklotets första maximum betecknas med q fås då:

$$Q = \mu e_S + e_B + q \quad (7.1)$$

Den till vattnet överförda mekaniska energien A blir:

$$A = \mu e_S + e_B \quad (7.2)$$

Detta arbete är det tryckvolymarbete som spränggaserna uträttat under sin expansion från laddningsvolymen $V_0 = 1/\rho$ till slutvolymen V när gasklotet nått sitt första maximum (där trycket i spränggaserna är ca 0.04 atm). Arbetet A kan också skrivas:

$$A = \int_{V_0}^V P(v) dv \quad (7.3)$$

Ur (7.1) och (7.2) fås

$$Q = A + q \quad (7.4)$$

Om den mekaniska verkningsgraden η definieras som $\frac{A}{Q}$ fås enligt (7.4)

$$Q = \frac{A}{\eta} \quad (7.5)$$

som enligt (8.2) kan skrivas

$$Q = \frac{\mu e_S + e_B}{\eta} \quad (7.6)$$

För att explosionsvärmets Q skall kunna bestämmas ur de uppmätta storheterna e_S och e_B måste vi alltså även känna μ och η .

W. Fickett (privat kommunikation) har beräknat den mekaniska verkningsgraden η som funktion av sluttrycket p i spränggaserna vid isentrop expansion för några sprängämnen (se fig. 15) med hjälp av en tillståndsekvation av typ LJD^{*)} för spränggaserna.

Genom att ansätta

$$\eta = a V_g + b + (c \rho - d) / V_g \quad (7.7)$$

för η vid ett givet sluttryck p och anpassa konstanterna a , b , c och d till de fyra fall som Fickett beräknat (fig 15) kan man få ett analytiskt uttryck för η (vid ett givet sluttryck) som funktion av laddningsdensiteten ρ och gasvolymen V_g vid NTP.

Vid sluttrycket $p=0.04$ bar som approximativt gäller för undervattensskjutning på djupet 2.5 m fås

$$\eta = 0.237 V_g + (0.017 \cdot 10^{-3} \rho - 0.03) / V_g + 0.831 \quad (7.8)$$

där $\begin{cases} V_g = \text{gasvolymen vid NTP} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \\ \rho = \text{laddningsdensiteten (packningsgraden)} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \\ \eta = \text{den mekaniska verkningsgraden vid expansion till 0.04 bar.} \end{cases}$

^{*)} Lennard-Jones-Devonshire /17/.

För de sprängämnen som provats gäller $0.422 < V^g < 0.975 \text{ m}^3/\text{kg}$ och $800 \leq \rho < 1680 \text{ kg/m}^3$. Om vi antar att formel (7.8) gäller inom dessa intervall kan vi alltså uppskatta η för de provade sprängämnena.

För ANFO med $\rho = 910 \text{ kg/m}^3$ blir $\eta = 1.047$ och för Gurit med $\rho = 1010 \text{ kg/m}^3$ fås $\eta = 0.900$ som exempel på två ytterligheter i fråga om värden på η .

Att verkningsgraden η kan bli större än ett beror på att spränggaserna vid isentrop expansion till låga sluttryck kan få en sluttemperatur som är lägre än sprängämnetets begynnelsetemperatur (298 K).

Verkningsgraden antages enligt formel (7.8) enbart vara en funktion av gasvolymen V^g och laddningsdensiteten ρ . För de sprängämnen som innehåller större mängder inerta fasta beståndsdelar (som t.ex. kiselgur i Gurit) ger formel (7.8) troligen en överskattning av verkningsgraden beroende på att de fasta beståndsdelarna ej hinner komma i termodynamisk jämvikt med de gasformiga.

Faktorn $1 - \frac{1}{\eta}$ anger hur stor del av stötvägsenergien som överförs till termisk energi i vattnet i samband med stötvägspassagen medan faktorn $1 - \eta$ anger hur stor del av explosionsenergien som finns kvar i gasklotet som termisk energi när gasklotet är som störst och vänder första gången.

Om vi känner Q , e_s , e_B och η för ett sprängämne kan vi beräkna μ ur (7.6)

Faktorn μ kan ej betraktas som en konstant lika för alla sprängämnen utan beror svagt av trycknivå nära detonationsfronten i respektive sprängämne.

Värdet på μ bestäms enklast experimentellt genom skjutning med sådana sprängämnen som t.ex. PETN, Gummidyamit (92 NG/8NC) och EGDN som har syrebaltans nära noll och där explosionsvärmeförloppet är väl känt.

Då inget av dessa sprängämnen provats vid denna undersökning har μ bestämts genom anpassning till några enkla sprängämnen som Hexotol 60/40 och ANFO-A8 10%.

Uttrycket för μ antages vara

$$\mu = 2 + \frac{P_d \cdot 10^{-8}}{2} \quad \text{där } P_d = \text{detonationsstrycket } \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (7.9)$$

Detonationsstrycket P_d kan i sin tur uppskattas ur:

$$P_d = \frac{\rho \cdot D^2}{4} \quad (7.10)$$

De med formel (7.9) och (7.10) beräknade värdena på μ varierar mellan 2.143 (Hexotol 60/40) och 2.010 (Prillit).

Det med hjälp av formlerna (7.2), (7.6), (7.7), (7.8) och (7.9) beräknade mekaniskt uträttade arbetet A och explosionsvärmets Q som vi betecknar med Q_e blir då

$$A = (2 + \rho D^2 \cdot 10^{-11} / 8) e_S + e_B \quad (8.11)$$

$$Q_e = \frac{(2 + \rho D^2 \cdot 10^{-11} / 8) e_S + e_B}{0.237 V_g + (0.017 \cdot 10^{-3} \rho - 0.03 / V_g) \cdot 0.831} \quad (8.12)$$

där

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \text{det mekaniskt uträttade arbetet vid undervattensskjutning} \\ Q_e = \text{det ur undervattensskjutningsdata beräknade explosionsvärmets} \\ \rho = \text{laddningsdensiteten } [\text{kg/m}^3] \\ D = \text{detonationshastigheten } [\text{m/s}] \\ e_S = \text{stötvågsenergin vid tryckmätaren} \\ e_B = \text{bubbelpulsenergin} \\ V_g = \text{den uppskattade gasvolymen vid NTP } [\text{m}^3/\text{kg}] \end{array} \right.$$

8. Presentation av mätvärdena samt uppskattade fel

Data för varje enskilt skott finns presenterade i tabell 1, 2, 3, 4 och 5. Medelvärden för varje sprängämne samt uppgifter om angivna explosionsvärmen och gasvolymen och därur beräknad viktstyrka finns i tabell 6, 7, 8, 9 och 10. I dessa tabeller finns också $e_S + e_B$ och $e_S + e_B/Q$ samt mekaniskt uträttat arbete A vid undervattensskjutning samt därur beräknat explosionsvärme Q_e .

I fig 5, 6, 7 och 8 presenteras den reducerade impulstätheten i och det reducerade maxtrycket p_m i stapeldiagramform. Bubbelpulsenergin e_B , stötvågsenergin e_S , $e_S + e_B$ och explosionsenergin Q presenteras i stapeldiagramform i fig 9, 10, 11 och 12.

Fig. 13 och 14 visar $e_S + e_B$ respektive $Q_e = \frac{\mu e_S + e_B}{\eta}$ som funktion av Q . I fig. 15 visas den av W. Fickett beräknade mekaniska verkningsgraden för några sprängämnen.

Den minsta avvikelse i mätvärdena som kan uppskattas vara säkert signifikant vid enskilda skott är för

- | | |
|---------------------------|---------|
| 1. Maxtrycksvärden | ca 2.5% |
| 2. Impulstäthetsvärden | " 2.5% |
| 3. Stötvågsenergivärden | " 2.5% |
| 4. Bubbelpulsenergivärden | " 1.5% |

9. Några kommentarer till de olika sprängämnenas prestanda.

I fig. 14 kan man urskilja några sprängämnen som ligger signifikant vid sidan av linjen $Q_e/Q = 1.00$.

Prillitens låga Q_e/Q -värde (0.93) kan bero på att AN-FO förhållandet legat något vid sidan av syrebalans p.g.a oljesegregation vid lagringen eller avvikelser från det korrekta blandningsförhållandet vid tillverkningen. En laboratorieblandad produkt (94.57 AN-prills/5.43 Dieselolja) gav ett Q_e/Q -värde på 0.97 (ej redovisad i denna undersökning). Orsaken till att samtliga dynamiter utom Mitex ligger något under $Q_e/Q = 1.00$ är oklar. Att Dynamex B som initierats med sprängkapsel enbart, fått ett så lågt Q_e/Q -värde som 0.90 kan eventuellt förklaras av den höga laddningsdensiteten (1560 kg/m^3).

En så hög laddningsdensitet innebär att antalet fina luftbubblor som bidrar till känsliggöring av sprängämnet kan ha varit för litet för att sprängämnet skall reagera fullständigt när det efter initiering med sprängkapsel nr 8 detonerar med låg detonationshastighet. Detta kan också vara förklaringen till att inblandning av patronpapper i sprängkapselinierat Dynamex B gav en obetydlig höjning av Q_e (från 4.08 MJ/kg till 4.16 MJ/kg räknat per viktsenhet "naket" sprängämne) jämfört med den höjning man kan förvänta sig om papperet förbränns.

Guritens låga värde på Q_e kan tänkas bero på att den i guritens reaktionsprodukter ingående fasta kiselguren (SiO_2) ej hunnit komma i termodynamisk jämvikt med de gasformiga reaktionsprodukterna innan spränggaserna slutat uträtta arbete.

Den tid det tar för en SiO_2 partikel med diametern 0.1 mm t.ex. att avge 90% av sin termiska överskottsenergi till en omgivning som hålls vid en konstant lägre temperatur kan beräknas till ca 5 ms. De förhållanden som råder i ett sprängämne med en under expansionen fallande temperatur hos omgivningen (spränggaserna) gör att denna tid blir avsevärt längre än 5 ms. Tiden för gasklotet att expandera till atmosfärstryck kan för de aktuella försöksförhållandena uppskattas till ca 10 ms. Bubblans expansion fortsätter sedan ytterligare ca 160 ms innan bubblan vänder och implosionen börjar.

Om termisk energi från fasta reaktionsprodukter t.ex. tillföres spränggaserna under tiden 10-160 ms efter detonationen resulterar detta emellertid huvudsakligen i en förhöjd resttemperatur hos reaktionsprodukterna efter avslutad expansion och låg mekanisk verkningsgrad. Den mekaniska

verkningsgraden η som uppskattats med hjälp av formel (7.8) kan därför ha givit ett för högt värde på η vilket ger ett för lågt Q_e värde.

För ANFO-Al 10% provades atomiserat aluminium (sfäriska eller oregelbundet formade korn) av olika kornstorlekar (se fig. 4) samt T5000, en kvalité med flingformade korn (diameter - tjockleksförhållande ca 100/1). Inverkan av Al-partiklarnas kornstorlek på värdena var oväntat liten. Alla aluminiumkvalitéerna utom de två grövsta Al5f och Al5g med en medelkornstorlek på ca 0.45 respektive ca 0.60 mm synes ha förbränts så gott som fullständigt till Al_2O_3 under de ca 5 ms som står till förfogande vid undervattensskjutning för effektiv överföring av frigjord termisk energi till mekaniskt arbete.

Anmärkningsvärt är de höga stötvågsenergivärden som sprängämnen som t.ex. ANFO-Al ger trots sina låga detonationstryck. ANFO-Al 10% t.ex. med ett detonationstryck mindre än 40 kbar ger samma värde (ca 1.30 MJ/kg) som Hexotol 60/40 med detonationstrycket ca 285 kbar. Det högsta värde som noterats (1.47 MJ/kg) gav blandningen 80.1AN/1.7FO/18.2 Al.

Det något låga Q_e/Q -värdet på Hydralit S40 förklaras troligen av att det bränsle som ingått i form av kiseljärn ej förbränts fullständigt.

Att Reomit 3 och 4 givit något låga Q_e -värden kan tyda på att laddningsdensiteten ($\rho \approx 1380 \text{ kg/m}^3$) var något för hög för att ge känsliggörning tillräcklig för fullständig reaktion.

10. Slutkommentar.

Undervattensskjutning ger data som är reproducerbara inom ett par procent och som har så små absoluta fel att de kan användas för absolutbestämning av parametrar i den alstrade vattenstötvågen och gasklotet om apparaturen kalibreras ordentligt. Dessa data kan för det första användas för att bedöma verkan av sprängämnen vid deras detonation under vatten, för det andra vid sprängämnesutveckling som kontroll av nya sprängämnesblandningars funktion och prestanda och för det tredje som en metod för bestämning av prestanda vid applikationer där sprängämnet uträttar isentropiskt tryckvolymarbete till relativt låga sluttryck. Att beräkna t.ex. det vid bergsprängning maximalt mekaniskt utvinnbara arbetet A' ur det mekaniskt uträttade arbetet vid undervattensskjutning $A = \mu e_S + e_B$ innebär dock att man måste känna spränggasernas tryckvolymarbete i tryckområdet mellan sluttrycket vid bergsprängning (som är av storleksordningen

100 bar) och sluttrycket vid undervattensskjutning (≈ 0.04 bar).

Om vi kallar detta arbete ΔA kan vi skriva

$$A' = A - \Delta A \quad (10.1)$$

Storleken av ΔA (ca 10-35% av A) beror liksom den mekaniska verkningsgraden η huvudsakligen på laddningsdensiteten ρ och gasvolymen V_g .

I denna rapport har ΔA inte uppskattats varför A' ej kunnat beräknats ur A enligt formel (10.1). Genom fortsatta experimentella och teoretiska studier av sprängämnenas prestanda och speciellt reaktionsprodukternas sammansättning och tillståndssamband torde det dock vara möjligt att kunna beräkna ΔA med god noggrannhet.

Tills vidare kan verkan vid bergsprängning lämpligen uppskattas genom beräkning av den dimensionslösa viktstyrkan s /17,10/.

$$s = \frac{5}{6} \cdot \frac{Q}{Q_0} + \frac{1}{6} \frac{V_g}{V_{g0}} \quad (10.2)$$

$$\text{Om } \begin{cases} Q_0 = 5.0 \text{ MJ/kg} \\ V_{g0} = 0.850 \text{ m}^3/\text{kg} \end{cases}$$

får vi viktstyrkan s relaterad till LFB-dynamit (s rel. LFB).

För bestämning av explosionsvärmets Q kan teoretiska eller experimentella metoder användas. Bland de experimentella metoderna ger undervattensskjutning många fördelar. T.ex.

1. Sprängämnet kan provas i samma mängder som det används i praktiken och med ordentlig fördämning.
2. Spränggaserna expanderar liksom vid t.ex. bergsprängning huvudsakligen isentropiskt från laddningsvolymen.
3. Metoden ger god reproducerbarhet samtidigt som den efter kalibrering medger absolutbestämning av explosionsvärmets.

Författaren ber att få framföra sitt tack till alla inom laboratoriet som gjort denna undersökning möjlig, speciellt till ing. L.-Å Almgren och fil.kand. Monica Masuda för deras hjälp vid experimentens utförande samt till dr. P.A. Persson, dr. N. Lundborg och fil.mag. A. Persson för givande diskussioner eller råd.

Det bidrag i form av sprängämnen och data om dessa som Nitro Nobel AB och Gränges Expressdynamit AB lämnat har varit värdefullt för undersökningen.

För den del av experimenten som utfördes vid skjutstationen i Engene ber författaren att få framföra sitt tack till Dyno Industrier AB och speciellt där till Siv.ing. O. Alm.

Arbetet har utförts med ekonomiskt bidrag från Styrelsen för Teknisk Utveckling, Atlas Copco AB och Nitro Nobel AB.

11. Referenser

1. Bjarnholt, G "Evaluation of the performance of explosives by underwater explosion". Stiftelsen Svensk Detonikforskning Rapport DS 1972:16B (1972).
2. Lambæk, G.J. "Rapport over sprengningsforsøk med TNT utført høsten 1971" Dyno Industrier A/S och kontor for fjellsprengningsteknikk, Oslo (1972).
3. Price, D "Dependence of damage effects upon detonation parameters of organic high explosives". U.S. Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Silver Spring Maryland (1959).
4. Taylor, J "Detonation in Condensed Explosives" Oxford University press, Amen House London E.c. 4 (1952).
5. Persson, A "Registrering av tryckvågor från undervattensladdningar". Stiftelsen Svensk Detonikforskning Rapport DS 1969:34, (1969).
6. Persson, A., och Almgren, L-Å "Stöt-vågstryck och bubblimpuls vid detonation av några olika sprängämnen under vatten". Nitro Nobel AB Intern rapport DL 1969:39, (1969).
7. Cole, R.H. "Underwater explosions". Princeton University Press, Princeton, (1948).
8. Lundborg, N "Beräkning av bubbelenergin vid sprängning i vatten där väggarna inverkar på resultatet". Stiftelsen Svensk Detonikforskning, rapport DS 1969:37, (1969).
9. Johansson, C.H. och Persson, P.A. "Detonics of High Explosives, Academic Press, London (1970).
10. Persson, P.A., Lundborg, N., och Johansson, C.H. "The Basic Mechanisms in Rock Blasting". Proc. Congr. Int. Soc. Rock. Mech. Belgrade (1970).
11. Blomqvist, G "Om undervattensverkan av hexotol och hexotonal". FOA I, Rapport A1339-F/102 1966.
12. Johansson, C.H. "Sprängämnets arbetsförmåga vid detonation i vatten". Stiftelsen Svensk Detonikforskning, rapport DL 1968:4, (1968).

13. Sadwin, L.D. "Underwater evaluation of the performance of explosives". Intern. Symposium of Mining Research. Pergamon Press, (1962).
14. Yancik, Joseph T. "Predicting blasting strengths of explosives from underwater tests". *Dynamic Rock Mechanics*. Proceedings Twelfth symp. on Rock Mechanics (1971).
15. Mader, C.H. "Compressibel Numerical Calculations of Underwater Detonations". Los Alamos Scientific Laboratory, Rapport LA-4594 (1971).
16. Johansson, C.H.
Langefors, U "Methods of physical characterization of explosives". Proceedings, the 36th International Congress of Industrial Chemistry, Brussels, Vol III, p. 610, (1966).
17. Hirschfelder, J.O.
Curtiss, C.F. och
Bird, R.B. "Molecular Theory of Liquids and gases". Wiley, New York 1954.

Tabell 1. Data från enskilda skott. Skjutplats Vinterviken. (R = 2.00 m, h = 2.50 m)

Skott nr	Sprängämne	Laddning o. initiering (Se fig. 3)	ρ kg $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	W kg	luft-tryck mm Hg	T _B sek	P _m bar	ρ_m $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$ $\frac{1}{\sqrt[3]{}}$	i $\frac{\text{bar} \cdot \text{ms} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$ $\frac{2}{\sqrt[3]{}}$	e _S MJ/kg	e _B MJ/kg
52	Prillit	El/p	900	0.361	762	0.164	129	362	69.8	0.90	1.92
87	"	"	920	0.359	765	0.166	129	363	66.8	0.90	2.02
88	"	"	920	0.360	765	0.166	129	363	67.3	0.92	2.01
70	ANFO-A 5% (A100CS)	"	930	0.374	773	0.177	142	393	78.6	1.16	2.43
77	"	"	930	0.375	772	0.177	139	385	80.7	1.17	2.44
61	ANFO-A 10% (T5000)	"	930	0.364	762	0.182	147	412	78.8	1.30	2.68
53	ANFO-A 10% (A100CS)	"	930	0.364	762	0.187	158	443	83.5	1.27	2.93
54	"	"	930	0.364	762	0.187	153	429	84.3	1.23	2.93
56	ANFO-A 10% (A80)	"	940	0.365	762	0.186	153	428	86.1	1.25	2.87
57	"	"	940	0.367	762	0.188	155	433	86.2	1.32	2.96
65	ANFO-A 10% (A60)	"	980	0.380	773	0.187	139	383	84.2	1.22	2.89
66	"	"	980	0.380	773	0.188	143	394	84.1	1.27	2.93
68	ANFO-A 10% (A20)	"	970	0.378	773	0.188	139	385	85.1	1.23	2.96
75	ANFO-A 10% (A15f)	"	940	0.365	772	0.186	137	383	83.0	1.17	2.95
81	ANFO-A 10% (A15g)	"	910	0.356	763	0.183	136	384	82.8	1.13	2.80
82	"	"	910	0.356	763	0.185	145	408	82.4	1.17	2.85
80	80.1 AN/1.7 FO/ } 18.2 AI(A80)	"	940	0.251	763	0.178	131	415	95.5	1.47	3.62

Tabell 2. Data från enskilda skott. Skjutplats Vinterviken. (R = 2.00 m, h = 2.50 m)

Skott nr	Sprängämne	Laddning o. initiering (Se fig. 3)	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	W kg	Lufttryck mm Hg	T _B sek	P _m bar	P _m $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$	i $\frac{\text{bar} \cdot \text{ms} \cdot \text{m}}{\text{kg}^{2/3}}$	e _S MJ/kg	e _B MJ/kg
125	Reomit 1 V	El/sprk	810	0.310	759	0.161	138	408	63.8	0.92	2.14
126	"	"	780	0.277	759	0.157	135	414	62.2	0.90	2.14
109	Reomit 2 V	"	930	0.290	752	0.170	136	411	76.2	1.05	2.67
112	"	"	930	0.293	759	0.170	138	416	74.3	1.06	2.62
122	Reomit 3 V 80	"	920	0.283	759	0.176	138	420	75.2	1.03	3.05
123	"	"	920	0.281	759	0.175	139	424	75.1	1.05	3.02
121	Reomit 3 V 20	"	920	0.297	759	0.179	138	414	74.6	1.01	3.08
124	"	"	930	0.285	759	0.177	139	422	76.2	1.01	3.09
164	Reolit 887	"	1240	0.384	765	0.185	160	440	70.0	1.02	2.70
100	Hydralit	"	1190	0.373	770	0.166	138	383	68.7	1.00	1.97
101	"	"	1190	0.374	770	0.166	-	-	-	-	1.97
113	Hydralit S32	"	1330	0.435	759	0.187	152	401	74.2	0.96	2.42
114	"	"	1330	0.433	759	0.186	149	394	72.7	0.97	2.38
152	Hydralit S40	"	1340	0.411	760	0.177	148	398	66.2	0.83	2.15
153	"	"	1350	0.424	760	0.177	147	391	67.0	0.86	2.08

Tabell 3. Data från enskilda skott. Skjutplats Vinterviken. (R = 2.00 m, h = 2.50 m)

Skott nr	Sprängämne	Laddning o. initiering (Se fig. 3)	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	W kg	Lufttryck mm Hg	T_B sek	P_m bar	P_m $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\sqrt[3]{\text{kg}}}$	i $\frac{\text{bar} \cdot \text{ms} \cdot \text{m}}{\sqrt[2]{\text{kg}}}$	e_S MJ/kg	e_B MJ/kg
19	Gelamon 2 Dyn. 28%	E2/p	1490	0.388	760	0.174	156	428	76.3	1.12	2.15
25	Rikkihappo Dyn. 35%	"	1490	0.383	764	0.170	159	438	79.6	1.30	2.04
26	"	"	1490	0.389	764	0.171	157	430	78.4	1.28	2.05
29	Norsk Gummidynamit	"	1500	0.392	764	0.170	163	445	72.1	1.04	2.03
40	"	"	1500	0.392	764	0.171	167	456	69.8	1.06	2.03
27	Dyn. N-90	"	1520	0.392	764	0.171	161	440	73.6	1.20	2.03
28	"	"	1520	0.388	764	0.170	167	458	75.9	1.25	2.02
45	Mitex	"	1560	0.390	775	0.172	154	421	77.2	1.13	2.16
46	"	"	1560	0.388	775	0.172	152	417	76.3	1.13	2.16
98	Dynalitt	"	1550	0.388	770	0.172	166	455	75.9	1.32	2.13
99	"	"	1500	0.387	770	0.172	166	456	74.9	1.31	2.13
166	Dynamex B	El/p	1570	0.411	765	0.176	159	428	73.1	1.12	2.13
132	"	El/sprk	1560	0.406	765	0.183	128	346	72.2	0.81	2.46
133	"	"	1570	0.408	765	0.183	128	346	74.2	0.82	2.45
162	" 6)	"	1530	0.428	762	0.186	143	379	75.0	0.87	2.44
156	Dynamex IV	El/p	1480	0.389	762	0.178	155	425	73.5	1.09	2.32
130	"	El/sprk	1480	0.385	765	0.186	133	366	75.6	0.91	2.80
131	"	"	1460	0.390	765	0.185	131	359	76.1	0.90	2.74
134	Nabit	"	920	0.248	765	0.153	123	392	70.9	0.86	2.24
135	"	"	910	0.247	765	0.152	119	380	70.6	0.85	2.20
136	Gurit	"	1010	0.386	765	0.163	134	368	52.8	0.66	1.77
137	"	"	1010	0.385	765	0.163	133	365	53.3	0.65	1.77

6) 0.428 kg
sprängämne
+ 0.0153 kg
patronpapi
klippt i
2 cm² stor
bitar.

Tabell 4. Data från enskilda skott. Skjutplats Vinterviken. (R = 2.00 m, h = 2.50 m)

Skott nr	Sprängämne	Laddning o. initiering (Se fig. 3)	ρ kg m ³	W kg	Luft-tryck mm Hg	T _B sek	P _m bar	P _m $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{kg}^{1/3}}$	i $\frac{\text{bar} \cdot \text{ms} \cdot \text{m}}{\text{kg}^{2/3}}$	e _S MJ/kg	e _B MJ/kg
117	Startex	E1/sprk	1500	0.421	759	0.169	170	454	61.6	1.03	1.79
118	"	"	1500	0.420	759	0.169	169	451	62.4	1.04	1.80
115	95 Startex/5 AI(A80)	E1/sprk	1520	0.427	759	0.172	175	465	68.4	1.15	1.89
116	"	"	1520	0.429	759	0.172	173	459	66.8	1.13	1.88
149	Sprängdeg m/46	E1/sprk	1500	0.310	767	0.162	157	464	73.4	1.17	2.13
154	"	"	1510	0.307	760	0.161	156	463	73.0	1.18	2.10
150	Sprängdeg m/46	SF 3	1500	0.307	767	0.162	157	465	73.0	1.18	2.16
155	"	"	1510	0.306	760	0.162	156	463	72.0	1.18	2.14
92	90Sprängd./10AI(A100CS)	E2/sprk	1580	0.334	749	0.176	160	461	78.9	1.32	2.48
168	Hexotol/60/40(gjuten)	E1/p	1680	0.450	765	0.180	185	482	73.2	1.31	2.10
172	Hexotol/60/40(gjuten)	SF 1	1680	0.292	765	0.159	162	488	75.0	1.31	2.14
107	TNT (pressad)	SF 2	1580	0.102	758	0.113	98	419	68.3	0.99	2.02
173	"	"	1580	0.103	773	0.112	99	422	68.2	0.99	2.02

Tabell 5. Data från enskilda skott. Skjutplats Engene. ($R = 15.1 \text{ m}$ (pos.1) och 30.3 m (pos.2), $h = 10.0 \text{ m}$)

Skott nr	Sprängämne	Laddn.o. initier. (Se fig. 3)	ρ kg m ³	W kg	D km sek	T _B sek	P _m bar		P _m bar·m/kg ^{1/3}		i bar·msek·m/kg ^{2/3}		e _S MJ/kg		e _B MJ/kg
							pos.1	pos.2	pos.1	pos.2	pos.1	pos.2	pos.1	pos.2	
1E	Reomit 2	CI/p(0.36)	1340	10.12	4.69	0.378	64.1	29.1	448	409	76.9	79.1	1.17	1.15	2.43
2E	"	C2	1340	1.95	3.61	0.229	32.2	-	390	-	82.9	-	1.08	-	2.60
3E	"	"	1340	1.90	3.64	0.224	32.0	14.6	390	358	84.7	86.7	1.11	1.08	2.50
4E	"	"	1340	1.89	3.34	0.226	31.7	15.0	387	367	85.0	85.1	1.11	1.08	2.57
5E	Reomit 3	"	1380	1.78	3.38	0.225	31.7	14.4	396	361	84.9	86.5	1.13	1.12	2.71
6E	"	"	1380	1.82	3.34	0.230	32.0	14.8	396	367	84.9	87.6	1.14	1.13	2.83
7E	Reomit 4	CI/p(0.36)	1360	9.76	4.38	0.401	62.7	28.3	442	400	83.7	85.4	1.24	1.22	3.05
8E	"	"	1360	9.74	4.35	0.401	63.4	29.1	446	412	83.8	86.4	1.26	1.25	3.05
9E	"	C2	1360	1.95	-	0.242	32.0	15.4	387	373	90.1	93.1	1.16	1.13	3.09
10E	"	"	1360	2.10	3.59	0.248	32.7	15.7	385	373	91.9	93.0	1.20	1.18	3.10
11E	"	"	1360	2.04	-	0.244	33.1	15.2	394	364	89.4	94.2	1.18	1.18	3.03
12E	"	"	1360	1.88	3.57	0.239	32.4	14.8	397	364	89.2	94.2	1.18	1.15	3.10
13E	Reolit 10	CI/p(0.82)	1450	10.85	4.57	0.344	52.1	24.0	355	327	62.0	66.4	0.74	0.74	1.68
14E	"	"	1450	10.85	4.06	0.338	52.0	24.1	353	330	62.2	65.1	0.75	0.74	1.59
15E	Reolit A10	CI/p(0.76)	1450	10.36	4.82	0.396	53.5	24.9	370	345	84.5	83.0	1.06	1.03	2.76
16E	"	"	1450	10.49	4.69	0.399	53.6	25.3	370	351	85.0	85.4	1.10	1.09	2.79
17E	"	"	1450	10.49	4.70	0.400	54.9	24.9	379	345	85.5	84.2	1.09	1.07	2.81

Tabell 6. Medelvärden. Skjutplats Vinterviken. (R = 2.00 m, h = 2.50 m).

Sprängämne	Laddn.o. initier. (Se fig.3)	ρ kg m ³	Q MJ/kg	V_g m ³ /kg	s	Antal skott	p_m bar·m kg ^{1/3}	i bar·ms·m kg ^{2/3}	e_S MJ/kg	e_B MJ/kg	e_S+e_B MJ/kg	$\frac{e_S+e_B}{Q}$	A= $\mu_{e_S+e_B}$ MJ/kg	$\frac{Q_e = \mu_{e_S+e_B}}{\mu_{e_S+e_B}}$ MJ/kg	$\frac{Q_e}{Q}$
Prillit	EI/P	910	3.90 ¹⁾	0.975	0.84	4	362	68.0	0.91	1.98	2.89	0.74	3.81	3.64	0.93
ANFO-A 5% (A100CS)	"	930	4.69 ¹⁾	0.894	0.96	2	393	80.5	1.17	2.44	3.61	0.77	4.80	4.67	1.00
ANFO-A 10% (T5000)	"	930	5.27 ¹⁾	0.817	1.04	1	412	78.8	1.30	2.68	3.98	0.76	5.30	5.26	1.00
ANFO-A 10% (A100CS)	"	930	5.47 ¹⁾	0.817	1.07	2	436	83.9	1.25	2.93	4.18	0.76	5.45	5.41	0.99
ANFO-A 10% (A80)	"	940	5.47 ¹⁾	0.817	1.07	2	431	86.2	1.29	2.92	4.21	0.77	5.52	5.48	1.00
ANFO-A 10% (A60)	"	980	5.47 ¹⁾	0.817	1.07	2	389	86.2	1.25	2.91	4.16	0.76	5.43	5.39	0.99
ANFO-A 10% (A20)	"	970	5.47 ¹⁾	0.817	1.07	1	385	85.1	1.23	2.96	4.19	0.77	5.44	5.40	0.99
ANFO-A 10% (A15f)	"	940	5.47 ¹⁾	0.817	1.07	1	383	83.0	1.17	2.95	4.12	0.75	5.31	5.27	0.96
ANFO-A 10% (A15g)	"	910	5.47 ¹⁾	0.817	1.07	2	369	82.6	1.15	2.83	3.98	0.73	5.15	5.11	0.93
80.1 AN/1.7 Fo/ 18.2 AL(A80)	"	940	6.64 ¹⁾	0.775 ¹⁾	1.26	1	415	95.5	1.47	3.62	5.09	0.77	6.58	6.80	1.02

1) Q och V_g bestämda enligt antaganden på sid. 4

Tabell 7. Medelvärden. Skjutplats Vinterviken. (R = 2.00 m, h = 2.50 m).

Sprängämne	Laddn.o.o. initier. (Se fig.3)	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Q MJ/kg	V_g m^3/kg	s	Antal skott	p_m $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$ $\frac{1}{3}$	i $\frac{\text{bar} \cdot \text{ms} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$ $\frac{2}{3}$	e_S MJ/kg	e_B MJ/kg	$e_S + e_B$ MJ/kg	$\frac{e_S + e_B}{Q}$	A= $\mu_{e_S + e_B}$ MJ/kg	$\frac{Q_e = \mu_{e_S + e_B}}{\rho}$ MJ/kg	$\frac{Q_e}{\rho}$
Reomit 1 V	El/sprk	800	3.62 ¹⁾	0.973	0.79	2	411	63.0	0.91	2.14	3.05	0.84	3.97	3.79	1.05
Reomit 2 V	"	930	4.71 ¹⁾	0.774	0.94	2	414	75.3	1.06	2.65	3.71	0.79	4.78	4.80	1.02
Reomit 3 V80	"	920	5.26 ¹⁾	0.621	1.00	2	422	75.2	1.04	3.04	4.08	0.78	5.13	5.37	1.02
Reomit 3 V20	"	930	5.26 ¹⁾	0.621	1.00	2	418	75.4	1.01	3.09	4.10	0.78	5.12	5.36	1.02
Reolit 887	"	1240	4.91 ¹⁾	0.647	0.95	1	440	70.0	1.02	2.70	3.72	0.76	4.76	4.91	1.00
Hydralit	"	1190	3.84 ¹⁾	0.720	0.78	2	383	68.7	1.00	1.97	2.97	0.77	3.99	4.04	1.05
Hydralit S32	"	1330	4.36 ¹⁾	0.703	0.87	2	398	73.8	0.97	2.40	3.37	0.77	4.36	4.42	1.01
Hydralit S40	"	1350	4.09 ²⁾	0.702	0.82	2	395	66.6	0.85	2.12	2.97	0.73	3.84	3.89	0.95

1) Q och V_g bestämda enligt antaganden på sid. 4

2) Q och V_g angivna av fabrikanten.

Tabell 8. Medelvärden. Skjutplats Vinterviken (R = 2.00 m, h = 2.50 m).

Sprängämne	Laddn.o. initier. (Se fig.3)	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Q MJ/kg	V_g MJ/kg	s	Antal skott	p_m $\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{kg}}$ $\frac{1}{3}$	i $\frac{\text{bar} \cdot \text{ms} \cdot \text{m}}{\text{kg}^{2/3}}$	e_S MJ/kg	e_B MJ/kg	e_{S+e_B} MJ/kg	$\frac{e_{S+e_B}}{Q}$	A= $\frac{\mu_{e_{S+e_B}}}{\text{MJ/kg}}$	$Q_e = \frac{\mu_{e_{S+e_B}}}{\text{MJ/kg}}$	$\frac{Q_e}{Q}$
elamon 2 (Dyn. 28%)	E2/p	1490	4.58 ²⁾	0.731	0.91	1	428	76.3	1.12	2.15	3.27	0.71	4.47	4.48	0.98
ikkihappo(Dyn. 35%)	"	1490	4.75 ²⁾	0.810	0.95	2	434	79.0	1.29	2.05	3.34	0.70	4.72	4.64	0.98
orsk Gummodynamit	"	1500	4.63 ²⁾	0.863	0.94	2	451	71.0	1.05	2.03	3.08	0.67	4.20	4.08	0.88
yn. N-90	"	1520	4.64 ²⁾	0.860	0.94	2	449	74.8	1.23	2.03	3.26	0.70	4.57	4.44	0.96
itex	"	1560	4.35 ¹⁾	0.878	0.90	2	419	76.8	1.13	2.16	3.29	0.77	4.50	4.35	1.00
ynalit	"	1500	4.80 ¹⁾	0.868	0.97	2	456	75.4	1.32	2.13	3.45	0.73	4.87	4.72	0.98
ynamex B	E1/p	1570	4.55 ²⁾	0.765	0.91	1	428	73.1	1.12	2.13	3.25	0.71	4.45	4.41	0.97
ynamex B	E1/sprk	1570	4.55 ²⁾	0.765	0.91	2	346	73.2	0.82	2.46	3.28	0.72	4.11	4.08	0.90
ynamex B ⁶⁾	E1/sprk	1530	4.83 ²⁾	0.765	0.91	1	379	75.0	0.87	2.44	3.31	0.73	4.19	4.16	0.86
ynamex IV	E1/p	1480	4.93 ²⁾	0.657	0.95	1	425	73.5	1.09	2.32	3.41	0.69	4.57	4.67	0.95
ynamex IV	E1/sprk	1470	4.93 ²⁾	0.657	0.95	2	363	75.9	0.91	2.77	3.68	0.75	4.60	4.70	0.95
abit	E1/sprk	920	4.05 ²⁾	0.892	0.85	2	386	70.7	0.86	2.22	3.08	0.76	3.95	3.85	0.95
urit	E1/sprk	1010	3.69 ²⁾	0.422	0.70	2	367	53.1	0.66	1.77	2.43	0.66	3.10	3.44	0.93

¹⁾ Q och V_g bestämda enligt antaganden på sid. 4

²⁾ Q och V_g angivna av fabrikanter.

⁶⁾ Se fotnot i tabell 3.

Tabell 9. Medelvärden. Skjutplats Vinterviken. (R = 2.00 m, h = 2.50 m).

Sprängämne	Laddn.o. initier. (Se fig. 3)	ρ kg $\frac{kg}{m^3}$	Q MJ/kg	V _g MJ/kg	s	Antal skott	p_m bar·m kg ^{1/3}	i bar·ms·m kg ^{2/3}	e _S MJ/kg	e _B MJ/kg	e _S +e _B MJ/kg	$\frac{e_S+e_B}{Q}$	A= $\mu_{e_S+e_B}$ MJ/kg	$Q = \frac{\mu_{e_S+e_B}}{\eta}$ MJ/kg	$\frac{Q_e}{Q}$
Startex	E2/sprk	1500	(3.70 ⁴) 4.61 ¹⁾	0.959 0.818	0.80 0.93	2	453	62.0	1.04	1.80	2.84	0.77 0.61	3.99 3.99	3.79 3.91	1.02 0.85
Startex/5 Al(A80)	"	1520	-	0.830 ⁵⁾	-	2	462	67.6	1.14	1.89	3.03	-	4.28	4.19	-
Prängdeg m/46	"	1510	-	0.880 ⁵⁾	-	2	464	73.2	1.18	2.12	3.30	-	4.62	4.47	-
Prängdeg m/46	SF3	1510	-	0.880 ⁵⁾	-	2	464	72.5	1.18	2.15	3.33	-	4.65	4.50	-
Prängdeg/10Al(Al00CS)	E2/sprk	1580	-	0.750 ⁵⁾	-	1	461	78.9	1.35	2.48	3.83	-	5.32	5.30	-
Texotol 60/40 (gjuten)	E1/sprk	1680	4.85 ³⁾	0.750 ⁵⁾	0.96	1	482	73.2	1.31	2.10	3.41	0.70	4.91	4.88	1.01
Texotol 60/40 (gjuten)	SF 1	1680	4.85 ³⁾	0.750 ⁵⁾	0.96	1	488	75.0	1.31	2.14	3.45	0.71	4.95	4.92	1.01
NT (pressad)	SF 2	1580	4.24 ³⁾	0.600 ⁵⁾	0.82	2	421	68.3	0.99	2.02	3.01	0.71	4.10	4.24	1.00

¹⁾ Q och V_g bestämda enligt antaganden på sid. 4

²⁾ Q bestämd i detonationskalorimeter /3/

³⁾ Se fotnot 4) i tabell 10.

⁴⁾ uppskattad.

Tabell 10. Medelvärden. Skjutplats Engene. ($R = 15.1$ m (pos.1) och 30.3 m (pos.2.)), $h = 10.0$ m).

Prägningsämne	Laddn.o. initier. (Se fig. 3)	ρ kg/m ³	Q MJ/kg	V_g m ³ /kg	s	Antal skott	D km/s	p_m bar·m/kg ^{1/3} pos.1 pos.2	i bar·ms·m/kg ^{2/3} pos.1 pos.2	e_s MJ/kg pos.1 pos.2	e_B MJ/kg	$e_s + e_B$ MJ/kg	$\frac{e_s + e_B}{Q}$	$A = \frac{\mu_{s+e_B}}{Q}$ MJ/kg	$Q_e = \mu_{s+e_B}$ MJ/kg	$\frac{Q_e}{Q}$
Leomit 2	Cl/p(0.36)	1340	4.71 ¹⁾	0.774	0.94	1	4.69	448	76.9	1.17	2.43	3.60	0.76	4.77	4.79	1.02
Leomit 2	C2	1340	4.71 ¹⁾	0.774	0.94	3	3.53	389	84.2	1.10	2.56	3.66	0.78	4.78	4.76	1.01
Leomit 3	C2	1380	5.32 ¹⁾	0.683	1.02	2	3.36	396	84.9	1.14	2.77	3.91	0.73	5.07	5.16	0.97
Leomit 4	Cl/p(0.36)	1360	5.91 ¹⁾	0.581	1.10	2	4.37	444	83.8	1.25	3.05	4.30	0.73	5.44	5.69	0.96
Leomit 4	C2	1360	5.91 ¹⁾	0.581	1.10	4	3.58	391	90.2	1.18	3.08	4.26	0.72	5.46	5.71	0.97
Leolit 10	Cl/p(0.82)	1480	3.25 ²⁾	0.775	0.69	2	4.32	354	62.1	0.75	1.64	2.39	0.74	3.17	3.14	0.97
Leolit A10	Cl/p(0.72)	1480	{ 4.89 ⁴⁾ 5.38 ¹⁾ }	{ 0.658 0.573 }	{ 0.94 1.01 }	3	4.74	373	85.0	1.08	2.79	3.87	{ 0.79 0.72 }	5.00	5.22	{ 1.04 0.97 }

¹⁾ Q och V_g bestämda enligt antaganden på sid. 4

²⁾ Q och V_g angivna av fabrikanten.

³⁾ Q och V_g bestämda enligt metod angiven av J. Taylor /4/ (privat information från I. Olsson, Nitro Nobel AB) där vid syreunderskott antages:

$$\begin{array}{c} \text{C} \\ \text{H} \end{array} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2$$

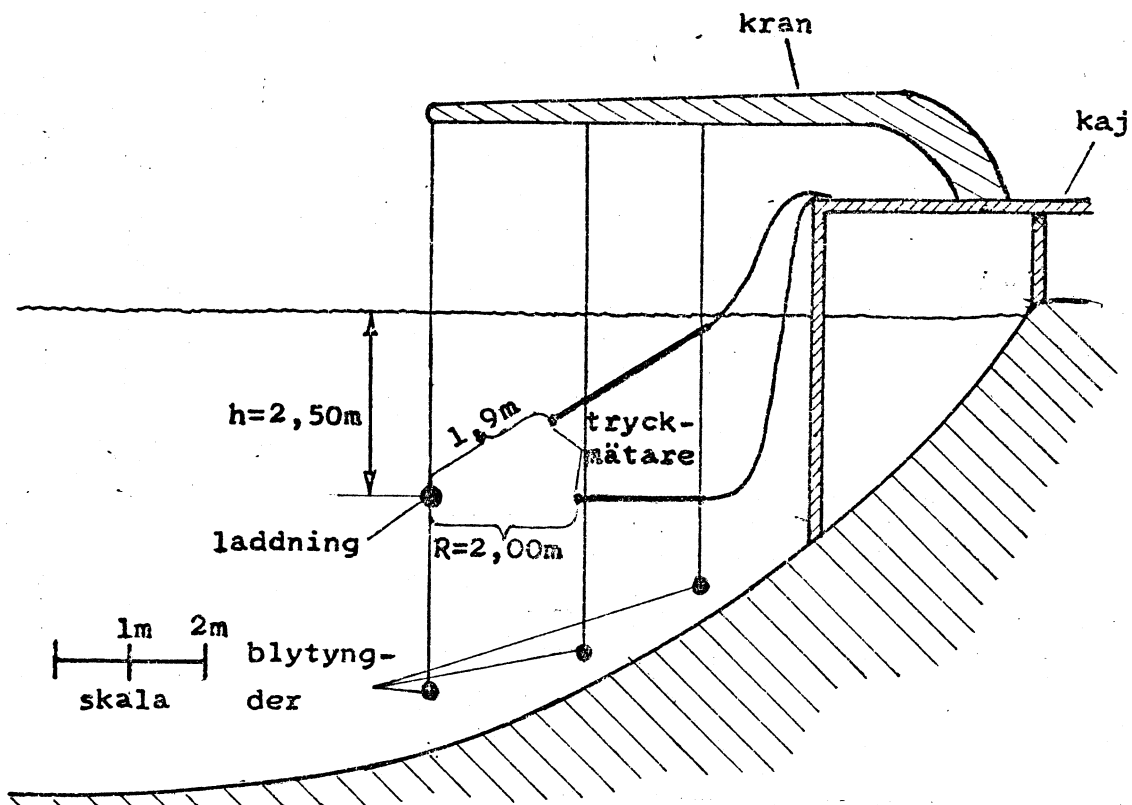


Fig.1. Försöksplatsen vid Vinterviken.

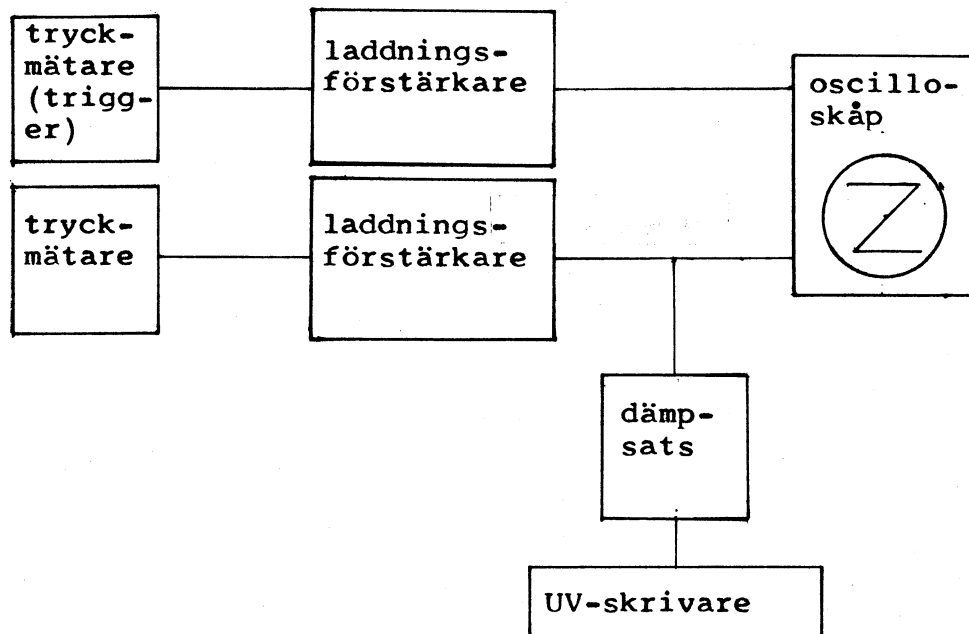


Fig.2. Blockschema över mätapparatur.

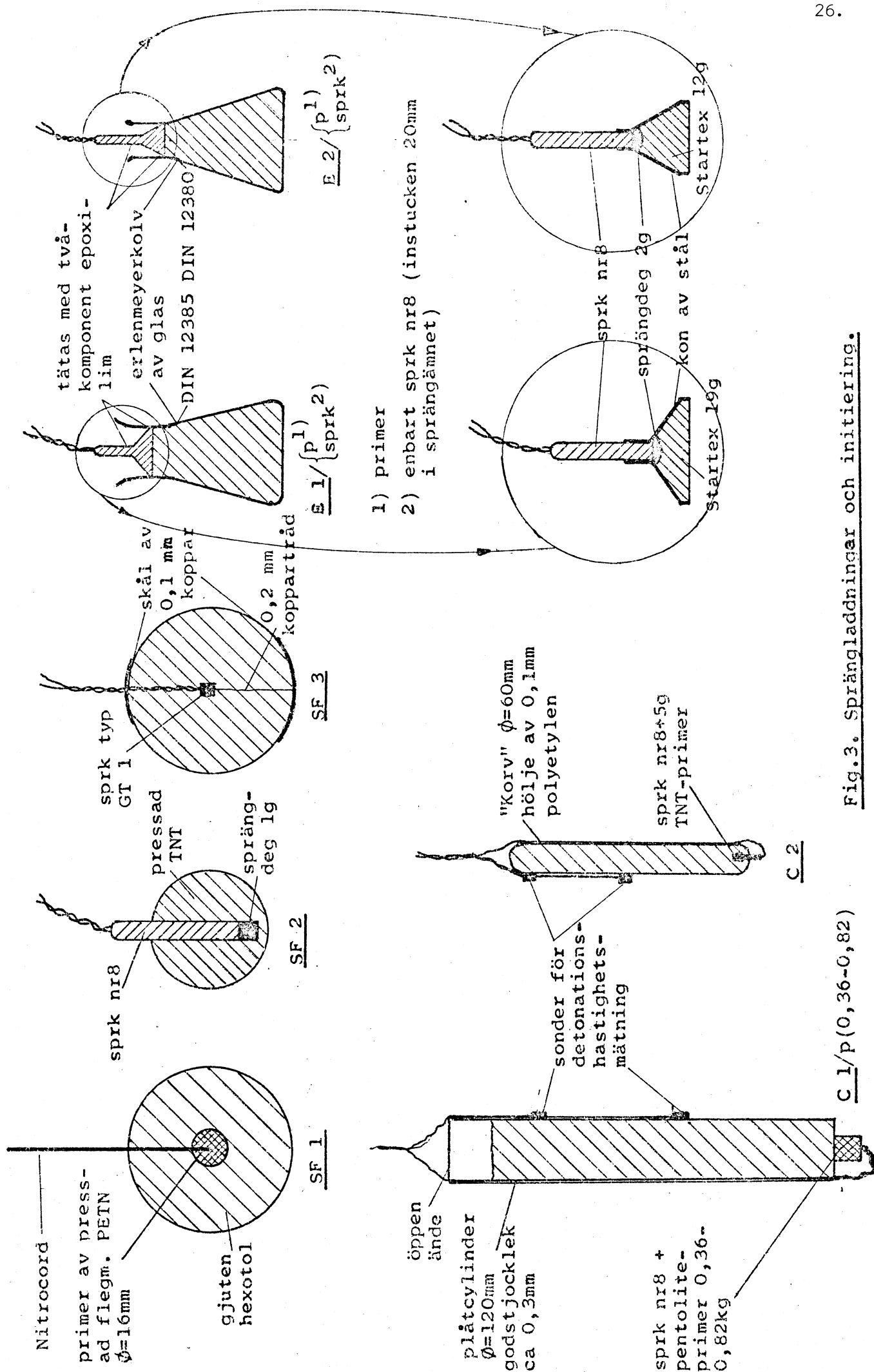
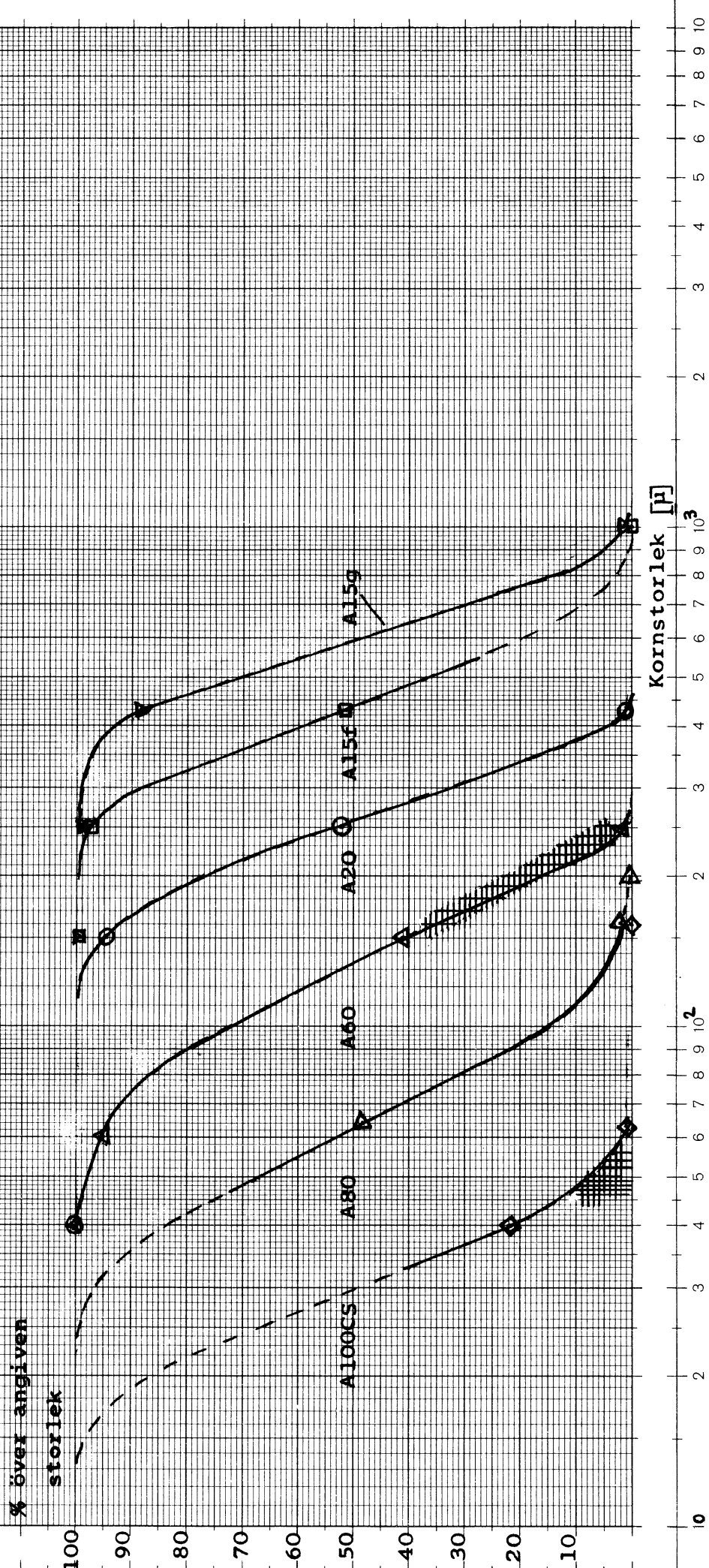


Fig.3. Sprängladdningar och initiering.

Fig.4.
Kornstorleksfördelning
i aluminiumpulvren.



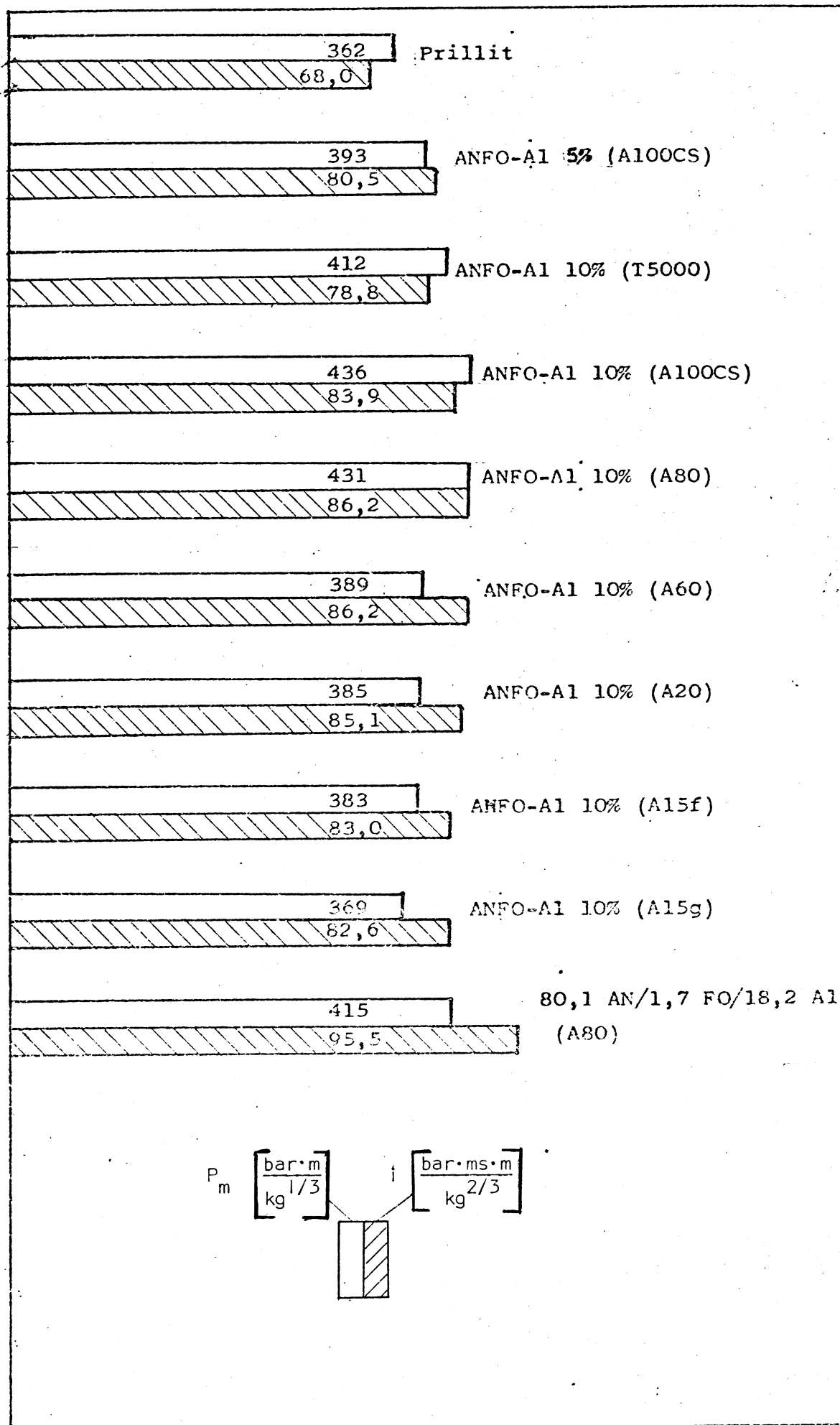


Fig. 5. Reducerat maxtryck p_m och reducerad impulstäthet i .

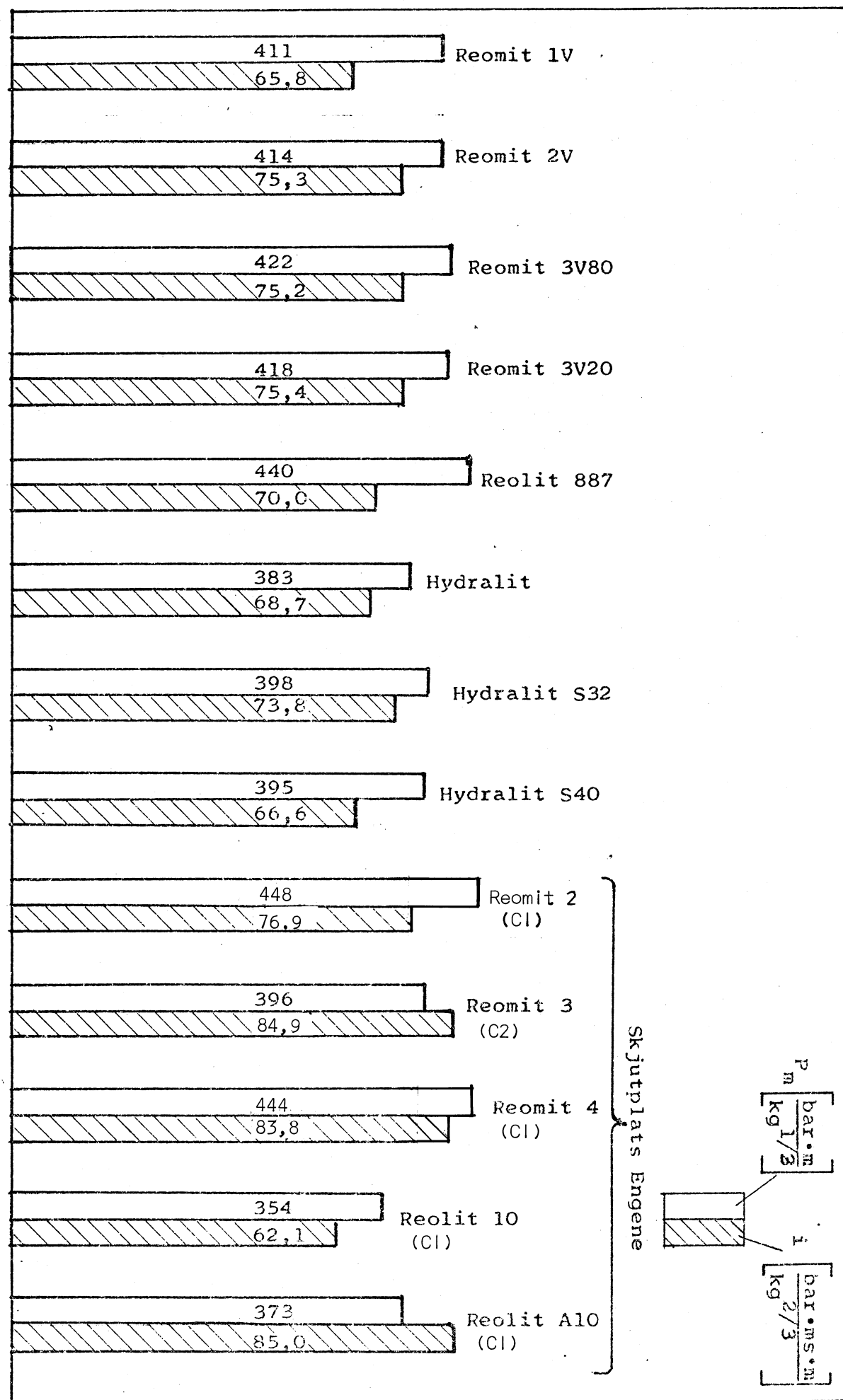


Fig. 6. Reducerat maxtryck p_m och reducerad impulstäthet i .

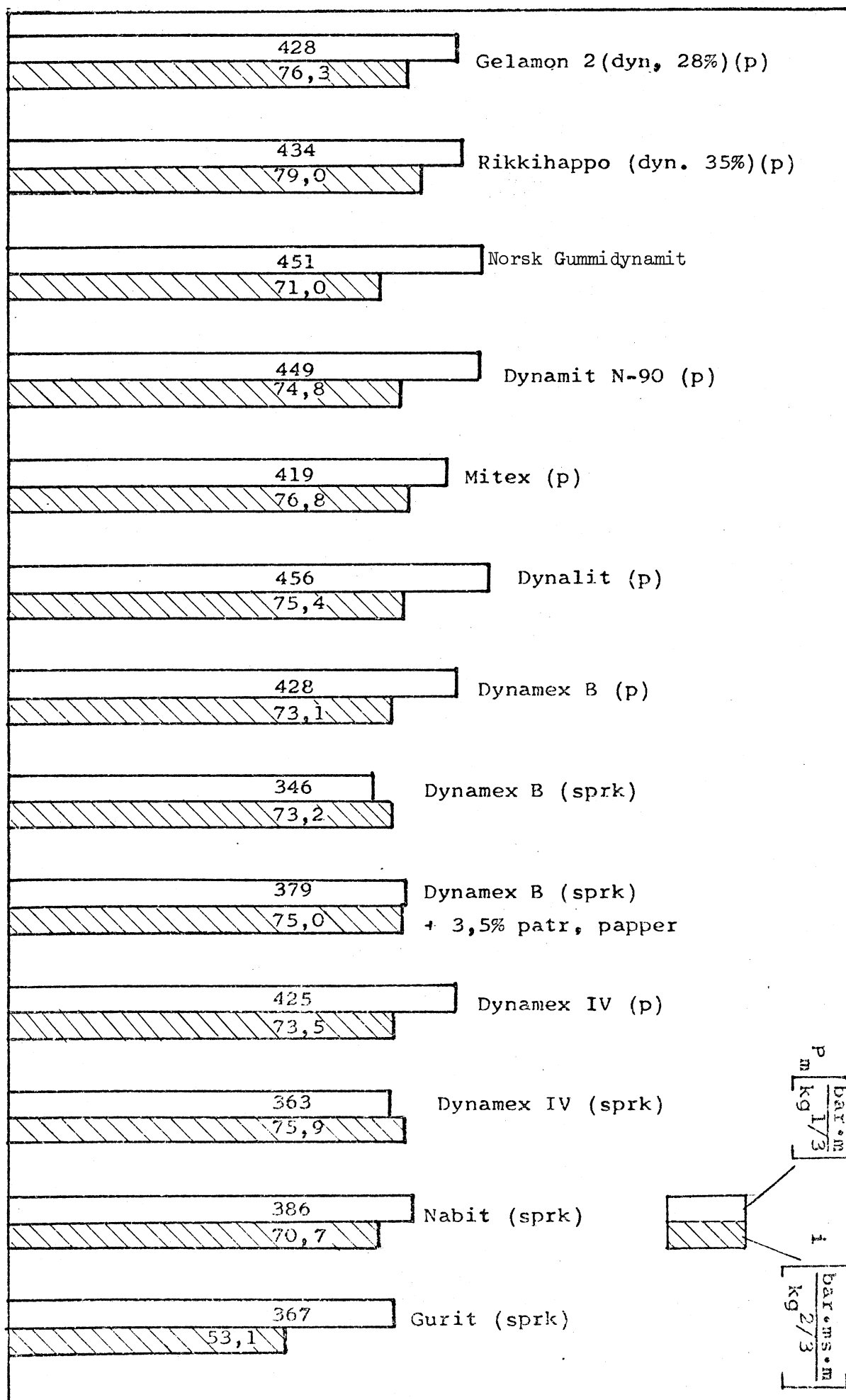
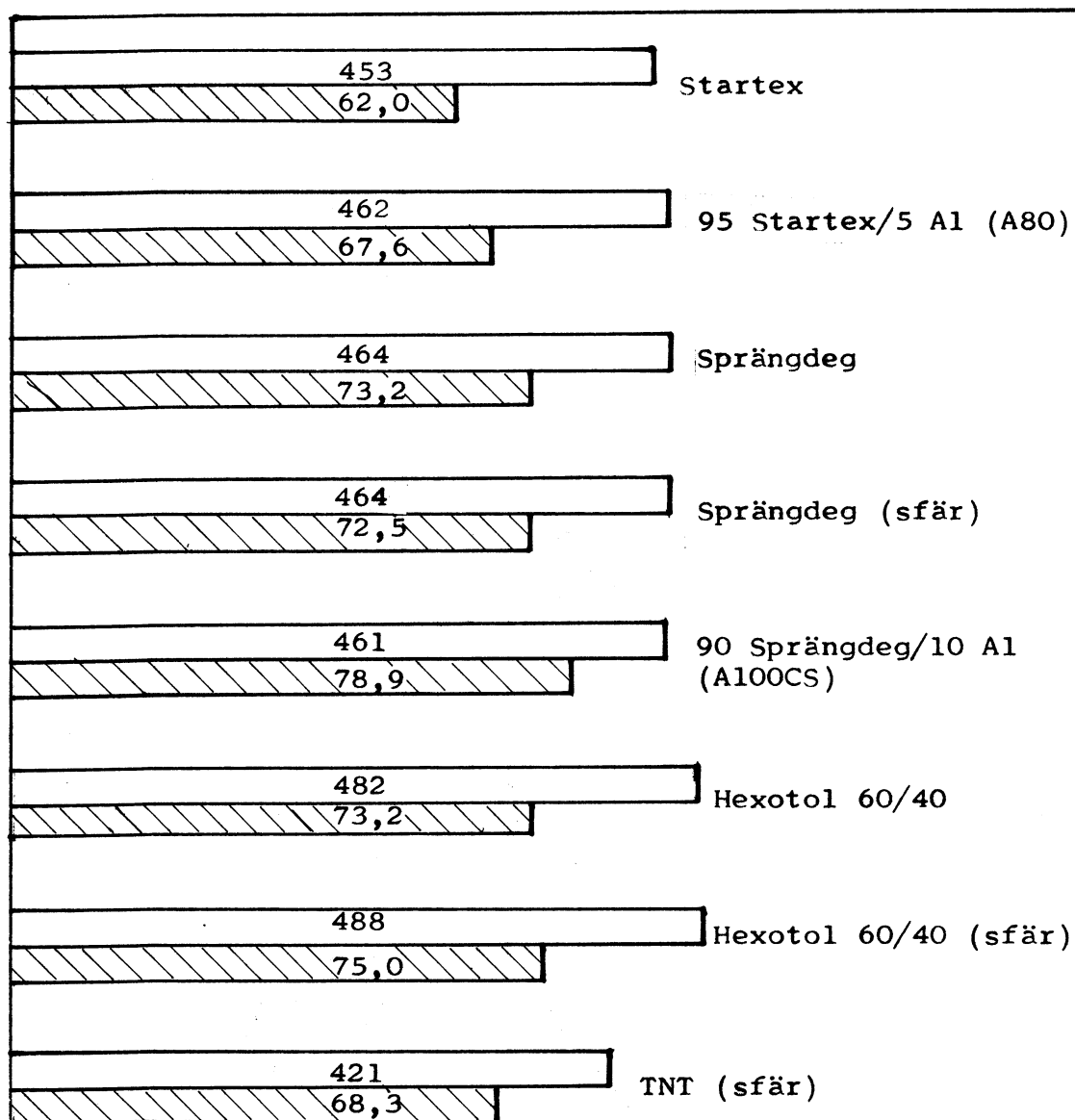


Fig. 7. Reducerat maxtryck p_m och reducerad impulstäthet i .



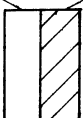
$$p_m \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{m}}{\text{kg}^{1/3}} \right] \quad i \left[\frac{\text{bar} \cdot \text{ms} \cdot \text{m}}{\text{kg}^{2/3}} \right]$$


Fig. 8. Reducerat maxtryck p_m och reducerad impulstäthet i .

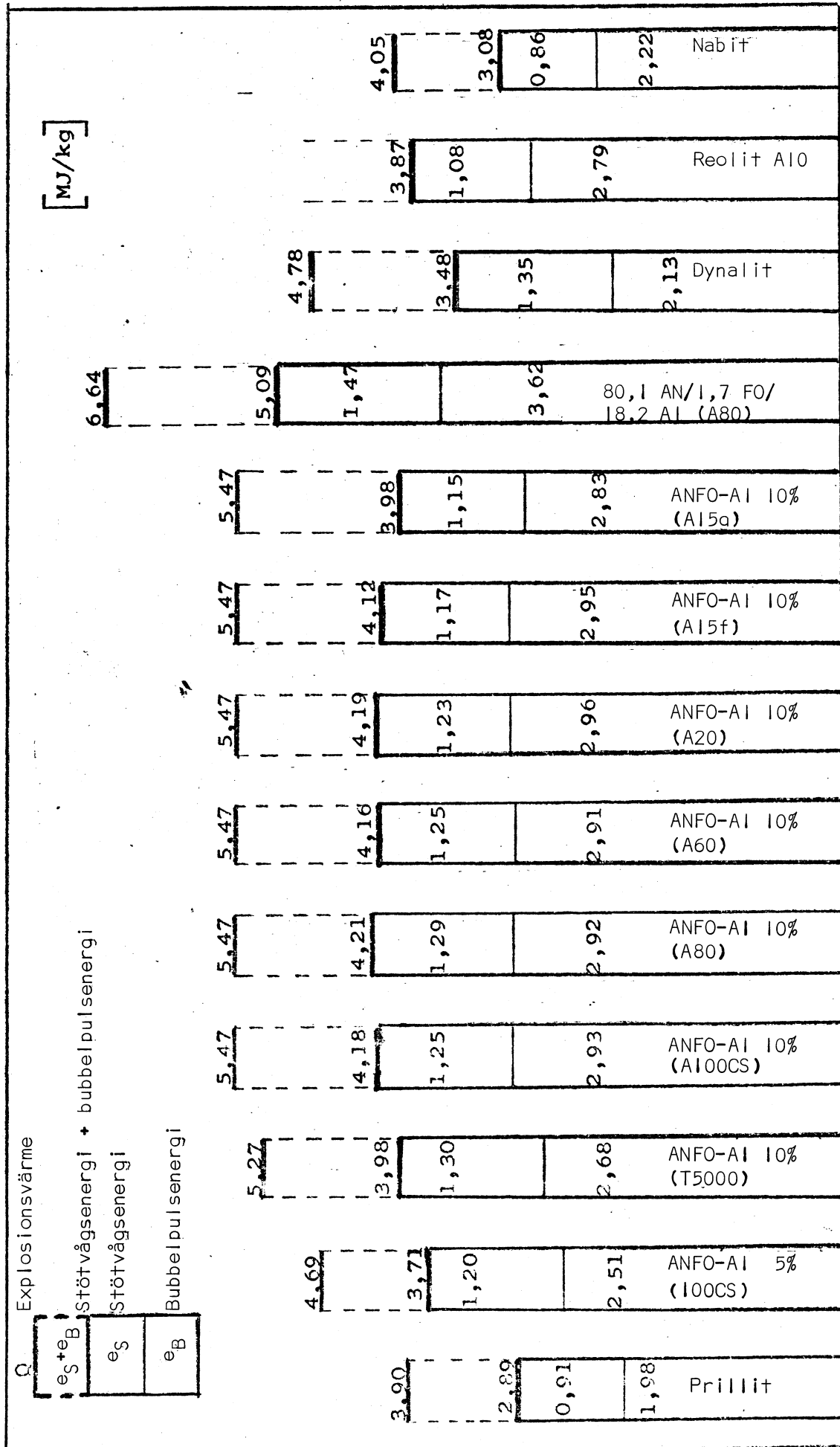


Fig.9.

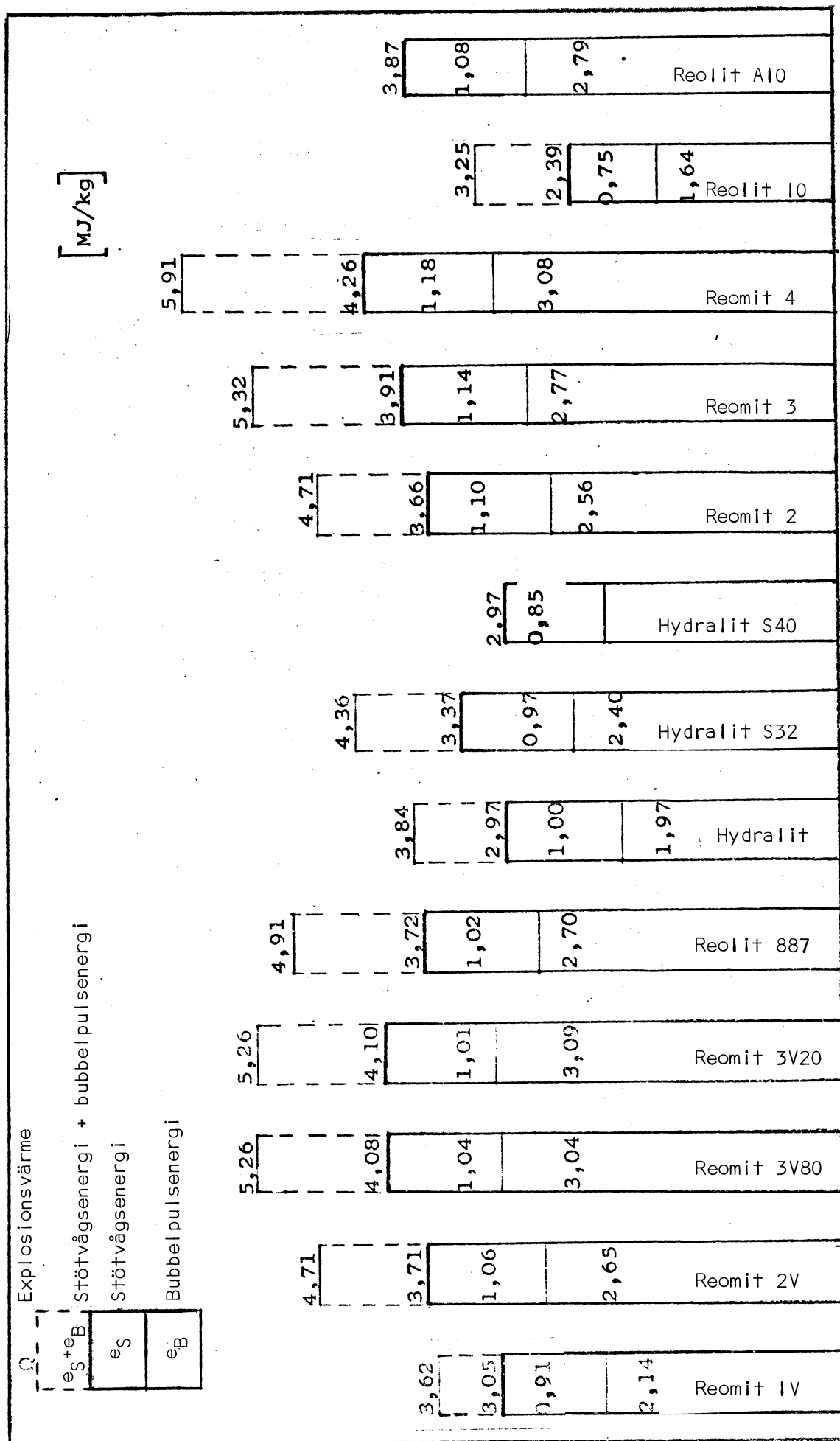


Fig.10.

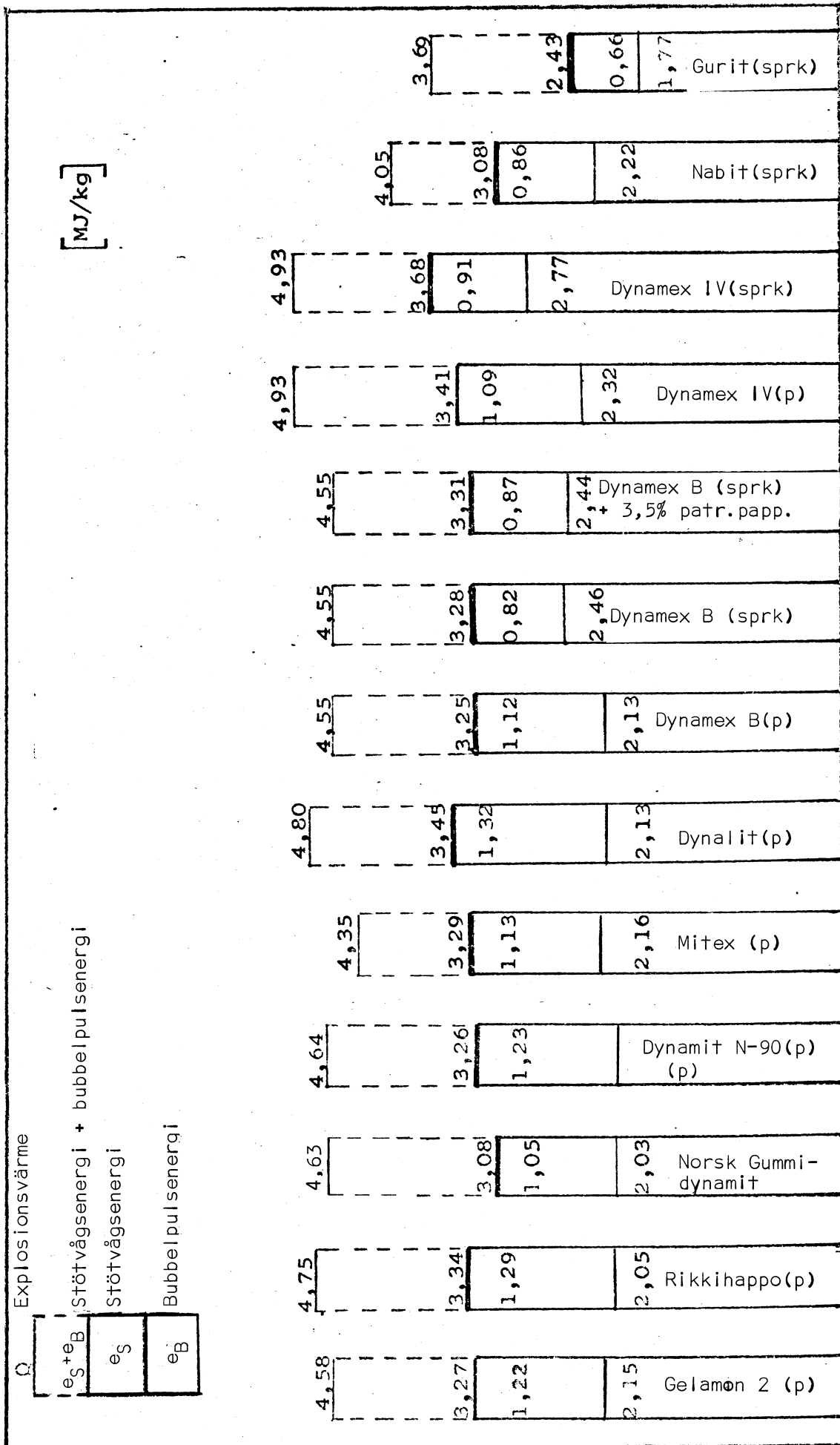


Fig. 11

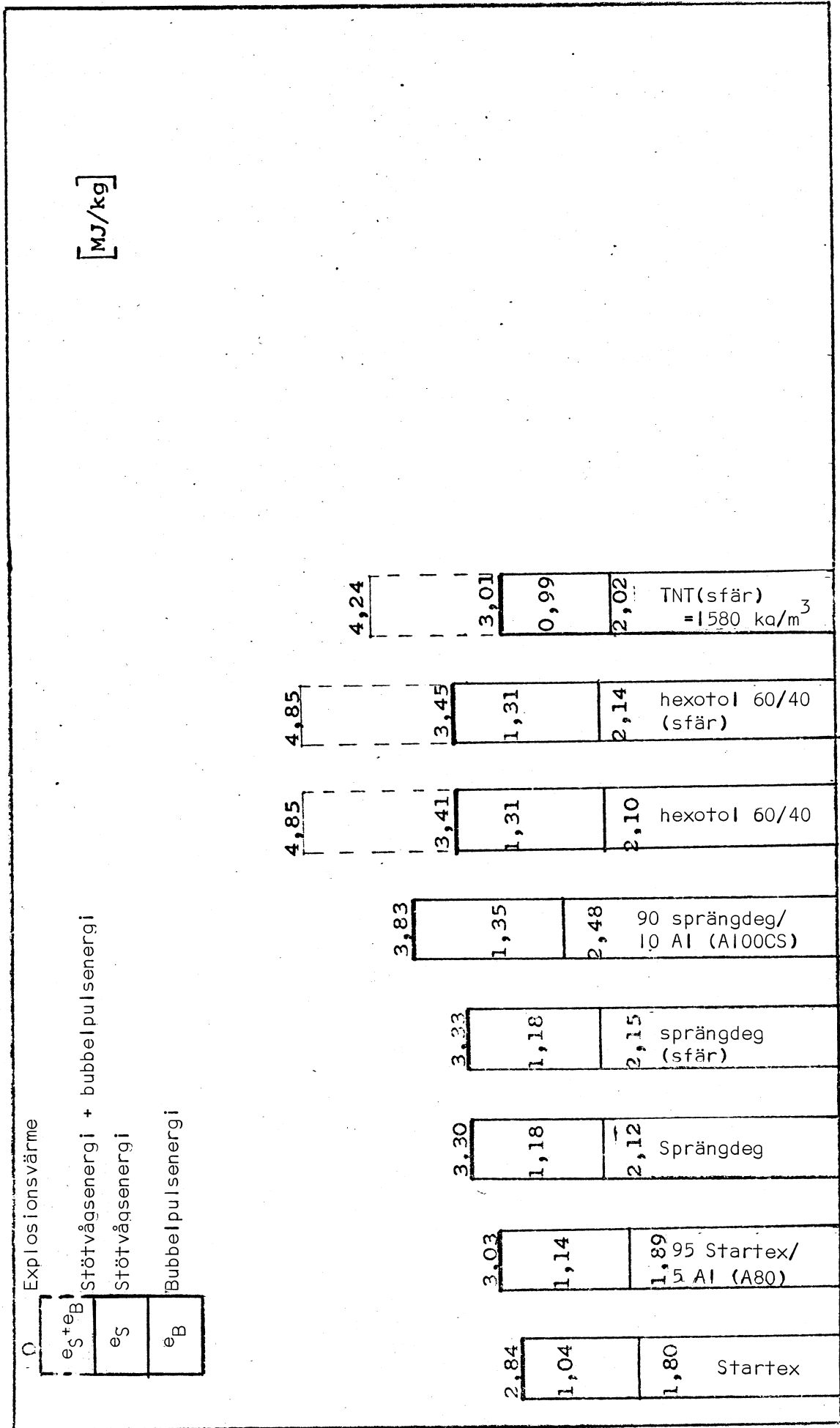


Fig.12

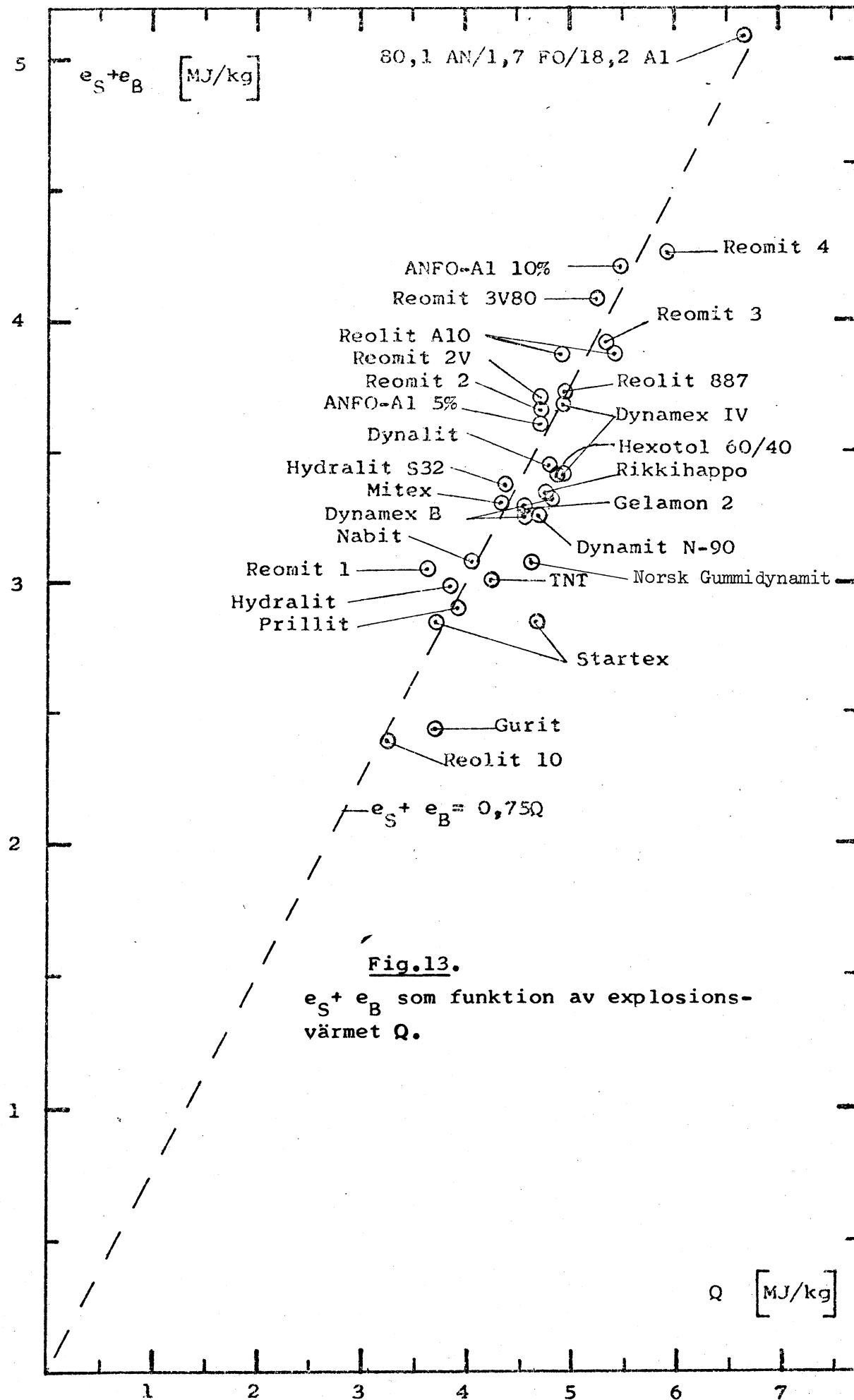
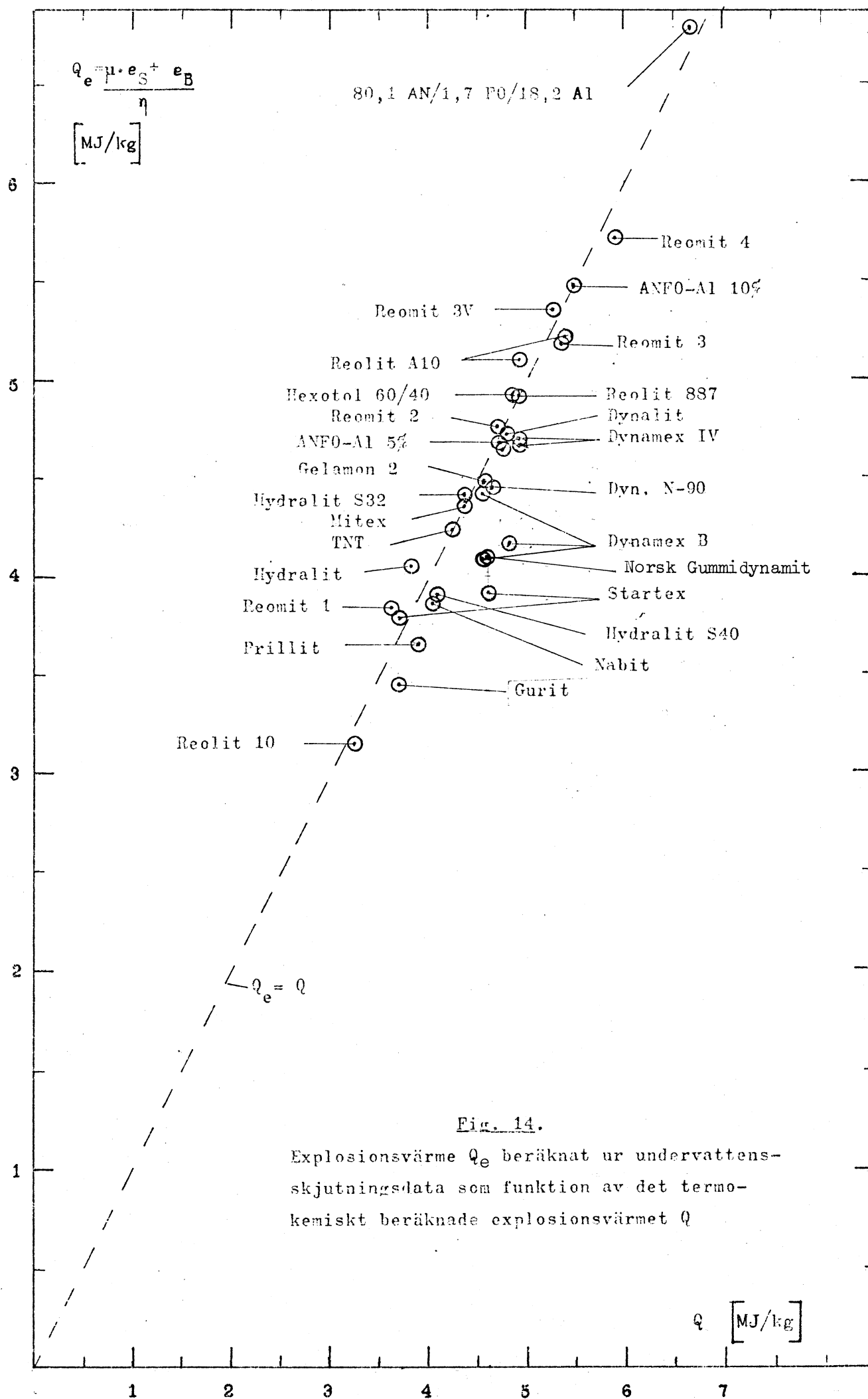


Fig.13.

$e_S + e_B$ som funktion av explosions-
värmets Q .



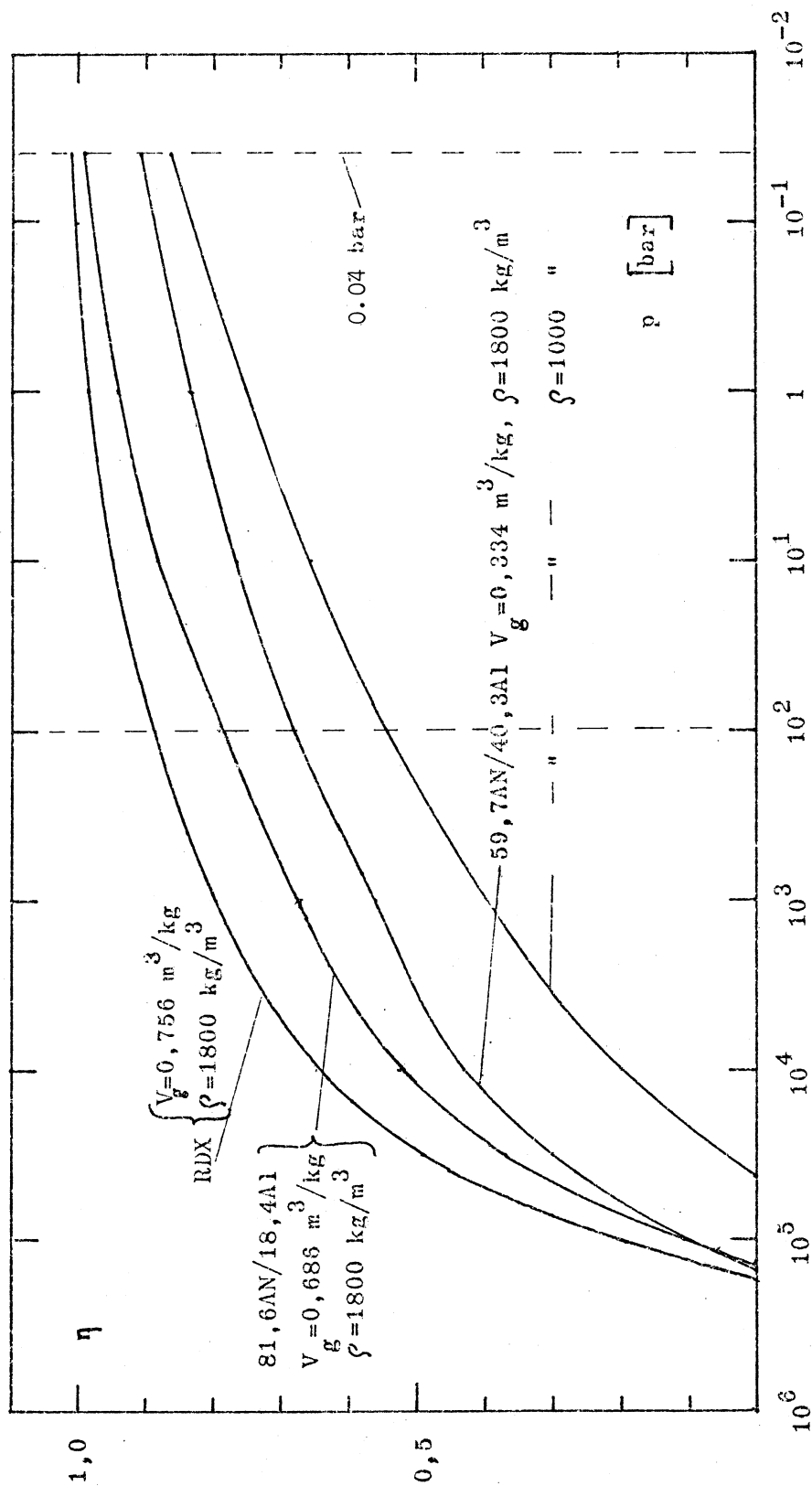


Fig.15. Den teoretiskt beräknade mekaniska verkningsgraden η som funktion av sluttrycket p i spränggaserna vid isentrop expansion. (W. Fickett, privat kommunikation.)