

BERÄKNING AV BUBBELENERGIN VID SPRÄNGNING I
VATTEN DÄR VÄGGARNA INVERKAR PÅ RESULTATET.

Nils Lundborg

DS 1969:37

24.10.1969

STIFTELSEN
SVENSK DETONIKFORSKNING
SWEDISH DETONIC RESEARCH FOUNDATION

VINTERVIKEN – 117 48 STOCKHOLM
SWEDEN

BERÄKNING AV BUBBELENERGIN VID SPRÄNGNING I
VATTEN DÄR VÄGGARNA INVERKAR PÅ RESULTATET.

Nils Lundborg

DS 1969:37

24.10.1969

Sammanfattning:

I rapporten diskuteras "bubbelprovets" relevans och olika slags energier uppskattas, t.ex. stötvågsenergi, gasens energi samt vattnets kinetiska och potentiella energi. En approximativ formel för beräkning av bubbelenergin ur bubblans svängningstid har härletts och en del provsprängningar utförts. Resultaten visar att den till vattnet överförda bubbelenergin ligger mellan 38 och 60% av explosionsenergin medan mörsarenergin för samma sprängämnen ligger mellan 25 och 35%.

Inledning.

Sprängämnenas styrka eller arbetsförmåga har tidigare bestämts med mörsarprovet där en liten kvantitet (5-20 g) av ett sprängämne tändes i en med en projektil tillsluten kammare. Vid en del nya s.k. "tröga sprängämnen" måste man använda en kraftig primer och för att reducera dess inverkan måste en större mängd (c:a 10 kg) av sprängämnet användas. En ytterligare orsak till användning av större mängder är att dessa sprängämnen överhuvudtaget ej detonerar i mindre dimensioner.

Mörsarprovet kan här ej användas varför man försökt finna nya provmetoder. En av dessa är "bubbelprovet". Man spränger där en laddning på ett bestämt djup och mäter gasbubblans storlek eller svängningstid och försöker därur beräkna den till vattnet överförda energin.

Då sprängämnet detonerar vandrar en stötvåg ut i vattnet med vilken en del av energin försvinner för alltid. Därefter kan vattnet betraktas som inkompressibelt varvid energi tillföres detta i form av kinetisk och potentiell energi. Då gasbubblan vänder är rörelseenergin noll och vattnet innehåller endast potentiell energi. Denna är

$$E_{v2} = p_0 V_2 \quad (1)$$

där V_2 är bubblans största volym och p_0 vattnets tryck för givet djup med tillägg för atmosfärstrycket.

Gasens energi är då

$$E_{g2} = \int_{V_2}^{\infty} p dV \quad (2)$$

Sättes

$$pV^{\gamma} = p_0 V_0^{\gamma} \quad (3)$$

där V_0 är bubblans volym vid trycket p_0 och $\gamma = C_p/C_v$, ger (2)

$$E_{g2} = \frac{p_0 V_2}{\gamma - 1} \left(\frac{p_2}{p_0} \right) \quad (4)$$

Uppskattning av olika energier.

Som ovan nämnts försvinner en del av energin i stötvågen. Storleken av denna beror på en mängd faktorer och kan variera från några upp till 50% av explosionsenergin.

Enligt /2/ (fig. 4) är för Ngl. och $p_0 = 2$ bar, $R_2 = 2,55 R_0$ och $p_2 = 33,3 p_0$. Ur samma fig. fås med hjälp av (3) $\gamma = 1,25$.

Ekv. (4) ger därvid

$$E_{g2} = 0.12 E_{v2} \quad (5)$$

Om vi beräknar hur stor energi som finns i gasen vid trycket p_0 fås på liknande sätt

$$E_{g0} = 0.24 E_{v2} \quad (6)$$

Genom att mäta bubblans maximala storlek kan man enligt (1) beräkna den till vattnet överförda energin E_{v2} , medan stötvågsenergin E_s och gasens energi E_{g2} ej kan bestämmas. Detta kan tyckas vara en stor brist. En del resultat tyder emellertid på att dessa energier ej heller nämnvärt bidrar till resultatet vid bergsprängning, varför mätningen av bubbelenergin E_{v2} borde ge ett bra mått på ett sprängämnes arbetsförmåga eller sprängstyrka.

Beräkning av bubbelenergin ur svängningstiden.

Mätning av gasbubblans volym är i allmänhet ej utförbar, varför man i stället mäter svängningstiden och därur försöker beräkna dess energi.

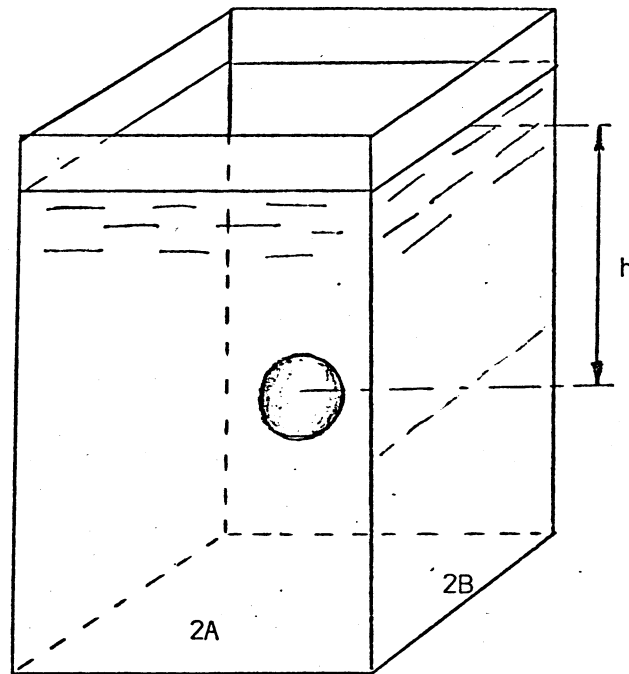


Fig. 1. Vattenbehållare med expanderande gasbubbla.

Om behållaren är mycket stor i förhållande till gasbubblan strömmar vattnet radiellt och dess kinetiska energi blir

$$E_k = 2\pi \rho R^3 \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \quad (7)$$

där R är bubbelradien. Om behållaren däremot är smal kan den betraktas som ett lodrätt rör varvid kinetiska energin blir

$$E_k = 2AB\rho h \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \quad (8)$$

där energin i närheten av bubblan försummas.

Ur volymändringen fås

$$dV = 4\pi R^2 dR = 4ABdh \quad (9)$$

som insatt i (8) ger

$$E_k = 2AB\rho h \left(\frac{\pi R^2}{AB}\right)^2 \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \quad (10)$$

En kombination av (7) och (10) ger

$$E_k = 2\pi \rho R^3 \left(1 + \frac{\pi h R}{AB}\right) \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \quad (11)$$

Formel (11) gäller därvid för båda gränfallen $AB \rightarrow \infty$ och $AB \rightarrow 0$, men kan naturligtvis avvika för värden däremellan.

Efter att bubblan vänt får vi

$$\frac{4\pi}{3} p_0 (R_2^3 - R^3) = 2\pi \rho R^3 \left(1 + \frac{\pi h R}{AB}\right) \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \int_V^{V_2} p dV \quad (12)$$

som ger tiden till bubblans hopslag

$$t = \left(\frac{3\rho}{2p_0}\right)^{1/2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{\left(\frac{R}{R_2}\right)^{3/2} \sqrt{1 + \frac{\pi h R}{AB}} dR}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R_2}\right)^3 - \frac{1}{E_{V2}} \int_V^{V_2} p dV}} \quad (13)$$

En analys av detonationsgasens inverkan på tiden visar en ökning av denna med c:a 2%. Vi kan därför försumma integralen under rottecknat i (13). Genom substitutionen

$$R^3 = R_2^3 \sin^2 \alpha \quad (14)$$

blir (13)

$$t = \left(\frac{2\rho}{3p_0}\right)^{1/2} R_2 \int_0^{\pi/2} \sin^{2/3} \alpha \sqrt{1 + \frac{\pi h R_2}{AB} \sin^{2/3} \alpha} d\alpha \quad (15)$$

Sätter vi periodtiden $T = 2 \uparrow$ får vi efter serieutveckling av (15)

$$T = 2 \left(\frac{2\rho}{3p_0} \right)^{1/2} R_2 \int_0^{\pi/2} \sin^{2/3} \alpha \left[1 + \frac{\pi h R_2}{2AB} \sin^{2/3} \alpha - \frac{1}{8} \left(\frac{\pi h R_2}{AB} \right)^2 \sin^{4/3} \alpha + \frac{1}{16} \left(\frac{\pi h R_2}{AB} \right)^3 \sin^2 \alpha \right] d\alpha \quad (16)$$

Denna serie konvergerar för $\pi h R_2 < AB$, men då serien är alternerande kan man bestämma övre och undre gränsen även för större R_2 -värden.

Grafisk integration av (16) ger

$$T = 1.633 \left(\frac{\rho}{p_0} \right)^{1/2} R_2 \left[1.12 + 1.43 \frac{h R_2}{AB} - 0.96 \left(\frac{h R_2}{AB} \right)^2 + 1.34 \left(\frac{h R_2}{AB} \right)^3 \right] \quad (17)$$

Insättes vattnets täthet, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ och enligt (1)

$$R_2 = \left(\frac{3E}{4\pi p_0} \right)^{1/3} \quad (18)$$

fås

$$T = \frac{35.9}{p_0^{5/6}} E^{1/3} \left[1 + 0.792 \frac{h}{AB} \left(\frac{E}{p_0} \right)^{1/3} - 0.330 \left(\frac{h}{AB} \right)^2 \left(\frac{E}{p_0} \right)^{2/3} + 0.286 \left(\frac{h}{AB} \right)^3 \frac{E}{p_0} \right] \quad (19)$$

Sättes $h = 10 \text{ m}$ blir $p_0 = 2.10^5 \text{ N/m}^2$ varvid (19) ger

$$T = \frac{E^{1/3}}{7.28} + \frac{E^{2/3}}{5.37} \left(\frac{h}{AB} \right) - \frac{E}{7.54} \left(\frac{h}{AB} \right)^2 + \frac{E^{4/3}}{5.09} \left(\frac{h}{AB} \right)^3 \quad (20)$$

där T anges i sek. och E i MWs.

Fig. 2 visar T som funktion av E för olika värden på $\frac{h}{AB}$. A Persson och L Å Almgren /5/ har utfört sprängningar i ett vattenfyllt gruvhål på 10 m djup och med ungefärliga måtten $A = 10 \text{ m}$ $B = 20 \text{ m}$, samt avstånd laddning-botten 10 m.

Tabell 1 anger resultatet där bubbelenergin beräknats med hjälp av diagrammet i fig. 2 för $\frac{h}{AB} = 1/20$. Värdena ligger mellan 38 och 60% av den beräknade explosionsenergin. Som jämförelse är mörsarvärdet enligt /1/ angivet. GD och Dx visar stor spridning. Man kan här förmoda att GD-provet, som givit högsta värdet samt Dx utan primer partiellt detonerat med låg hastighet, varvid mindre andel av energin förlorats i stötvågen.

T (sek)

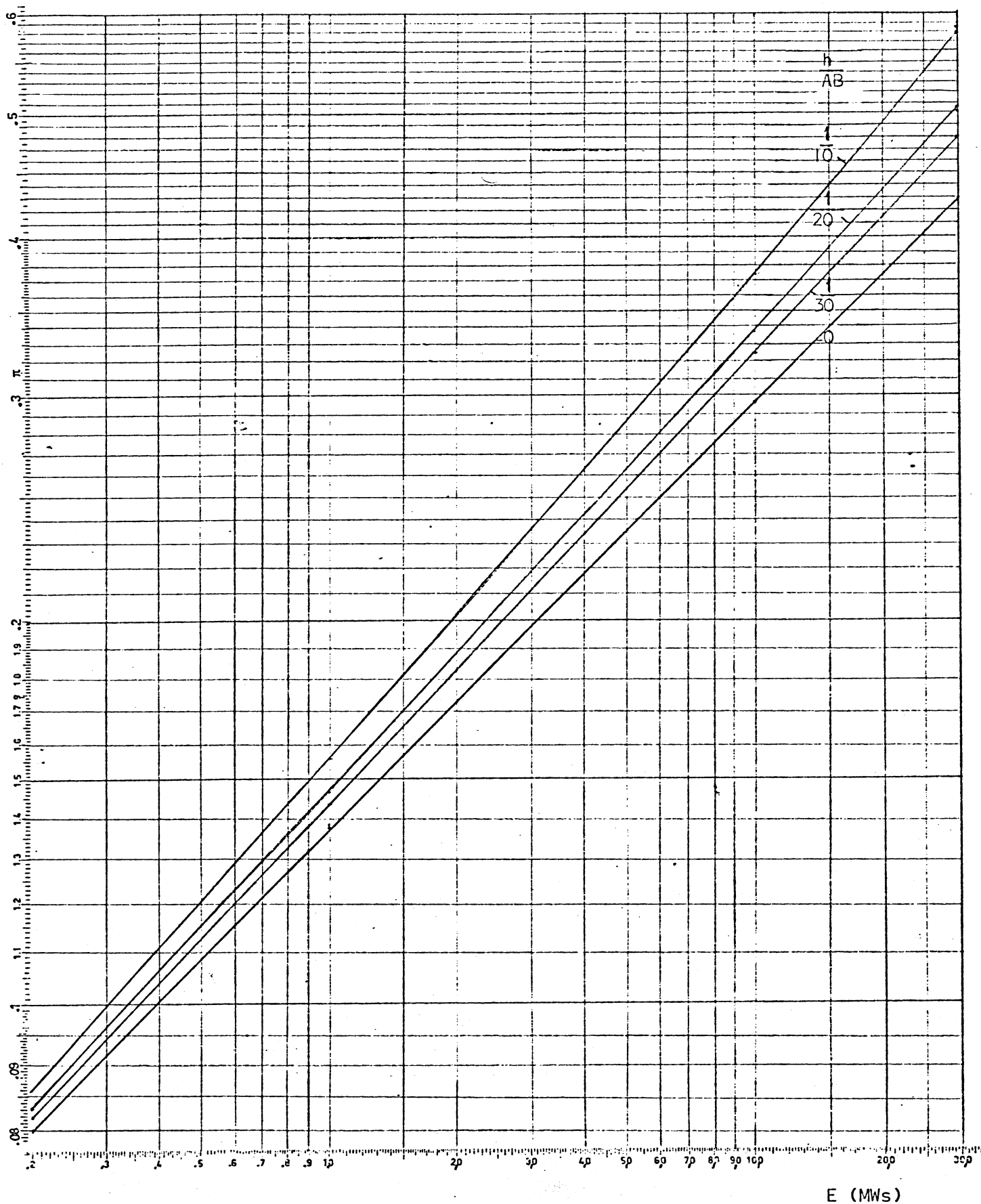


Fig. 2. Periodtiden som funktion av bubbelenergin med $\frac{h}{AB}$ som parameter.

Tabell 1. Svängningstid och energi hos gasbubbla vid sprängning i vatten.

Sprängämne	Laddn. vikt Q kg	Bubbel- period ms	Bubbel- energi (E_b) MJs/kg	Expl. energi (E_e) MJs/kg	E_b/E_e %	Mörsar- energi %
TNT press.	0.1	84.0	2.00	4.10	48.8	26.0
" "	0.1	82.5	1.90	4.10	46.3	26.0
" "	0.1	83.0	1.95	4.10	47.5	26.0
" "	0.1	83.0	1.95	4.10	47.5	26.0
TNT klot. gjutet	7.5	372.0	1.70	4.10	41.5	26.0
TNT cyl. "	7.75	372.0	1.65	4.10	40.2	26.0
Gummidynamit utan primer	7.75	435.0	2.58	6.70	38.5	25.6
" "	7.5	510.0	4.00	6.70	59.7	25.6
Dynamex m-pr.	7.2	384.0	1.97	4.44	44.3	34.8
" u pr.	7.0	410.0	2.42	4.44	55.5	34.8

Litteratur:

- Johansson, C.H. och Sjölin, T. Measurement of the "Strength" of explosives by the Ballistic Mortar - Rev. Sci. Instr. 39 1173 (1968).
- Johansson, C.H. Sprängämnets arbetsförmåga vid detonation i vatten - DL. 1968:4.
- Cole, R.H. Underwater explosions - Princeton 1948.
- Blomqvist, G. Om undervattensverkan av hexotol och hexotonal - FOA I A 1339 - F 1102 1966.
- Persson, A. och Almgren, L.Å. Stötvågstryck och bubbelperiod vid detonation av några olika sprängämnen under vatten - DL. 1969:39.
- Robinson, R.B. och Buchanan, R.H. Undamped Free Pulsations of an Ideal Bubble - Proc. Phys. Soc. B 69 893 (1956).