

# Ontelopanoksen räjähdysvaikutus

Kirjoittanut yleisesikuntaeverstiluutnantti T. E. Kallio

## I. Yleistä

Ontelopanoksen tai kuten usein myös kuulee sanottavan "suunnatun räjähdysvaikutuksen" käyttö panssarin torjunnan välineenä saavutti valtavan merkityksen viime sodassa. Tästä syystä on näiden panosten toimintatavan yksityiskohtainen tarkastelu paikallaan, olletikin kun yleisesti ilmiö tunnetaan kovin hatarasti, jopa siitä usein on aivan vääräkin käsitys vallalla. Oheinen selostus perustuu pääasiassa amerikkalaisessa aikakauslehdessä "Journal of Applied Physics" v:n 1948 toukokuun numerossa julkaistuun kirjoitukseen "Explosives with lined cavities".

Ontelopanoksen suuri panssarinläpäisykyky perustuu olennaisesti metallisuihkuun, jonka suuri liike-energia ja siitä johtuva suuri läpäisykyky saadaan aikaan räjähdyspanoksessa olevan ontelon ja sitä peittävän ohuen metallivaipan avulla. Räjähdyksessä metallivaippa menee kokoon alkaen huipusta, samalla muuttuen tungospaikassa nestemäiseen tilaan. Huippuun patoutuneen metallinesteen paine kohoaa erittäin suureksi; sen alaisena sula metalli suihkuu ulos hyvin suurella nopeudella. Tämä suihku puolestaan iskee hyvin suurella voimalla kohteeseen, esim. panssarilevyyn, jonka aine vuorostaan sulaa tai ainakin pehmenee ja väistyy suihkun tieltä pääasiassa sivuille. Kohteeseen syntyneen reiän tai kolon halkaisija on paljon suurempi kuin läpäisevän suihkun. Esim. uudella amerikkalaisella 89 mm:n ns. "Big Bazookalla", jossa suihkun halkaisija on n. 2 mm, saadaan 280 mm:n paksuiseen panssarilevyyn reikä,

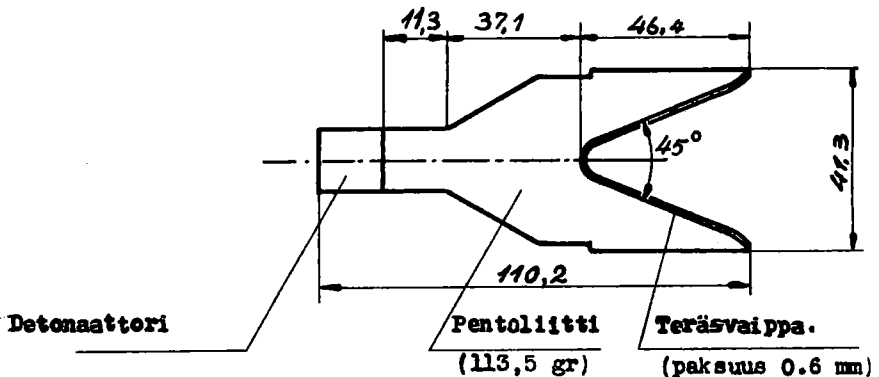
jonka halkaisija sisäänmenopuolella on 1 tuuma ja ulostulopuolella n.  $\frac{1}{2}$  tuumaa. Vaikutusta voidaan hyvin karkeasti verrata paloruiskun suihkun vaikutukseen hiekkapenkereeseen, johon suihku huuhtoo kolon. Mistään polttamisesta tai palamisesta ei tässä ole kysymys.

Kun syntyneet paineet, niin hyvin suihkun muodostuessa kuin sen iskiessä kohteeseensakin, ovat satoja tuhansia atmosfäärejä, voidaan, suurta virhettä tekemättä, jättää niin vaipan kuin panssarilevynkin lujuusominaisuudet kokonaan huomioon ottamatta. Niitä voidaan edelleen pitää täydellisinä nesteinä, jolloin niiden viskositeettiakaan ei oteta huomioon. Näillä, tosin vain likimäärin toteutuvilla edellytyksillä voidaan ilmiön tarkastelussa käyttää hyväksi Bernoullin hydrodynamiikan yhtälöä.

Tapahtuma voidaan jakaa kahteen vaiheeseen:

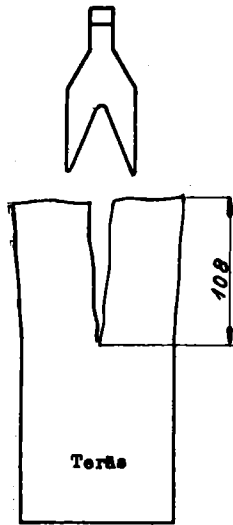
- 1) suihkun muodostuminen,
- 2) suihkun tunkeutuminen.

Kyseessä olevan lähteen mukaan on teoriaa luotaessa kokeissa käytetty kuvan 1 mukaista standardipanosta. Sen synnyttämän

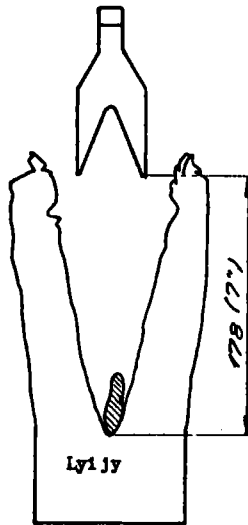


Kuva 1. Kokeissa käytetty standardipanos.

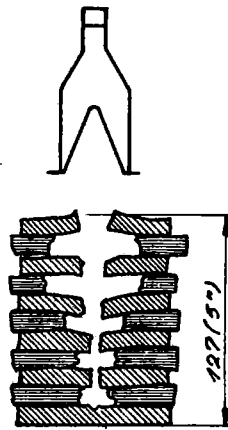
suihkun nopeudeksi on mitattu 9150 m/sek sekä syntynyt paine n. 300000 atm:ksi. Oheiset kuvat 2—6 esittävät sen vaikutuksen erilaisiin kohteisiin, samalla kun on esitetty samankokoisen vaipattoman ontelopanoksen sekä muuten samankokoisen, mutta täysinäisen panoksen vaikutus vertailun vuoksi.



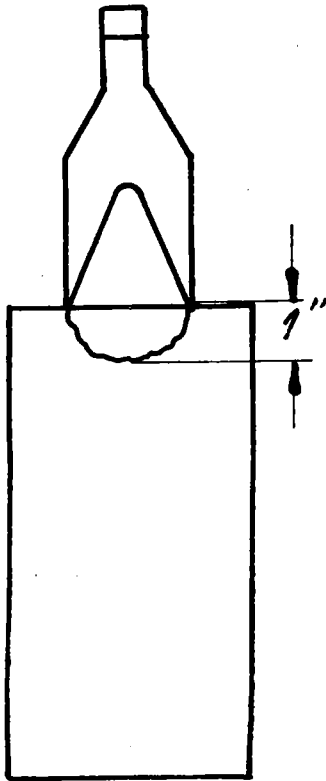
**Kuva 2.** Standardipanoksen vaikutus teräkseen.



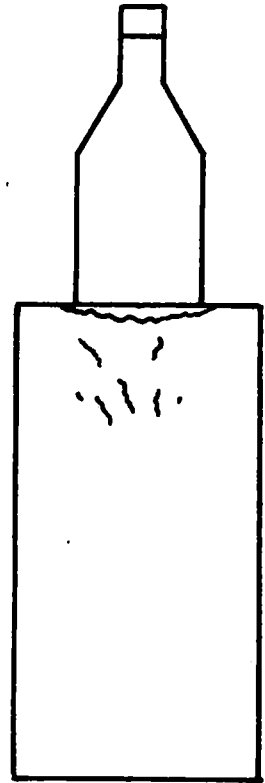
**Kuva 3.** Standardipanoksen vaikutus lyijyyn. Jätetolon pohjalle.



**Kuva 4.** Standardipanoksen vaikutus 1/2-tuuman vahvuisista teräs- ja lyijylaatoista ladottuun pinkkaan.



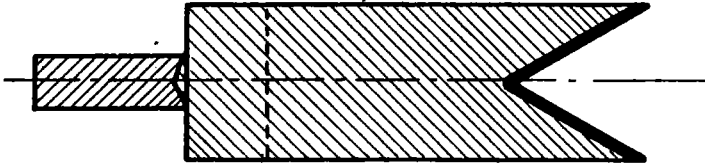
**Kuva 5.** Sama panos ilman metalli-  
vaippaa. Huom. Panos sijoitettava  
kiinni kohteen pintaan. Kohde-  
aineena teräs.



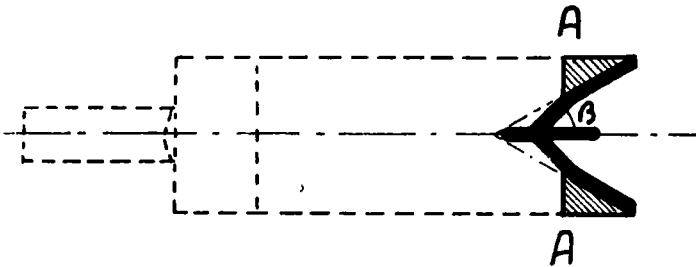
**Kuva 6.** Samanmittainen täysi-  
näinen panos, kohteena teräs.

## 2. Suihkun muodostuminen särmä- ja kartiopanoksilla

Oheiset kuvat 7 ja 8 esittävät kaavamaisesti halkileikkauksena särmäpanoksen ennen räjähdystä sekä sen parhallaan tapahtuessa, jolloin suihku on juuri muodostumassa. Kuvan voidaan katsoa esittävän myös kartiopanosta, jos siitä otetaan tarkastelun alaiseksi hyvin ohut liuska, joka on leikattu pitkin kartion akselia.

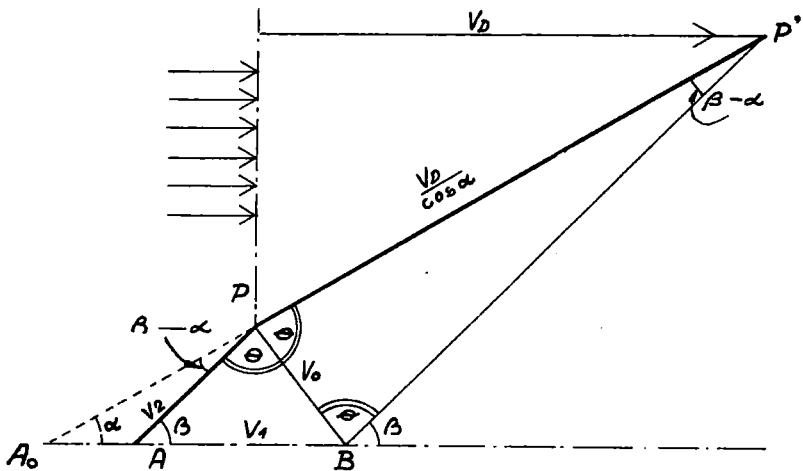


Kuva 7. Särmäpanos ennen räjäyttämistä.



Kuva 8. Sama panos räjähdysen aikana. Detonaattioaalto on edennyt kohtaan A—A, suihku muodostumassa.

Räjähdyks alkaa panoksen takapäältä, jolloin detonaattiorintama etenee likimain pituusakselin suunnassa kohdaten ensin suppilon huipun ja siirtyy edelleen suppilon suuta kohti samalla painaen metallivaippaa kokoon. Vaippa ei rutistu tai hajoa, sen seinämät vain kääntyvät sisäänpäin, muodostaen pituusakselin kanssa kulman ( $\beta$ ), joka on suurempi kuin alkuperäinen suppilon avauskulma ( $\alpha$ ) (kuva 9). Samalla seinämät lyhenevät, jolloin huippuun muodostuu ankan paineen alaisena metallinestepatoutuma, joka purkautuu sekä eteen- että taaksepäin. Uuden suppilon huippu kulkee samanaikaisesti hyvin suurella nopeudella eteenpäin pituusakselin suunnassa.



Kuva 9. Vaipan kääntäminen.

a) Kuva 9 esittää kaavamaisesti räjähdystapahtumaan liittyvän vaipan taittumisen ontelohanoksessa. Eräänä hetkenä on detonaatioaalto, aikaisemmin kohdattuun huipun  $A_0$ , edennyt akselin suuntaisena ja saavuttanut kohdan  $P$ . Detonaatioaallon ja vaipan yhtymäkohdassa vaippa on räjähdyspaineen vaikutuksesta taittunut muodostaen akselin kanssa kulman  $\beta$ , joka on aina suurempi kuin alkuperäinen huippukulma  $\alpha$ . Kun olosuhteet saman räjähdysaineen ja vaippamateriaalin kohdalla ovat koko ajan samanlaiset, voidaan edellyttää, että kulma  $\beta$ , koko räjähdystapahtuman aikana pysyy likimain vakinaisena. Tämän ovat tapahtumasta otetut röntgenvalokuvat todistaneeet.

b) Kun siis kuvassa detonaatioaalto on edennyt  $P$ :n tasalta  $P'$ :uun, vaippa on taittunut asentoon  $BP'$ , muodostaen akselin kanssa edelleen kulman  $\beta$ ,  $BP'$ :n ollessa yhtä pitkä kuin  $PP'$ .  $P$ -piste on joutunut akselille pisteeseen  $B$ .  $PB$  muodostaa  $P$ -pisteen uran sen siirtyessä alkuasennostaan suppilon akselille. Vaipan osa  $AP$  on tällä välin kokonaan siirtynyt huipun kautta nesteenä osaksi eteenpäin menevään suihkuun, osaksi jätteeseen, huippukohdasta taaksepäin.

c) Antamalla kuviossa  $PP'$ :n akselin suuntaisen projektion merkitä detonoimisnopeutta ( $V_D$ ) voidaan kuviossa näkyvien muiden janojen suuruus ratkaista trigonometrisesti, ts. ratkaista siinä esiintyvät nopeudet  $V_D$ :n ja kulmain  $\alpha$  ja  $\beta$  funktioina. Tätä varten otetaan käytäntöön seuraavat merkinnät:

d)  $PB = V_0$ ; nopeus, jolla vaipalla oleva piste siirtyy akselille.

$PA = V_2$ ; nopeus, jolla vaippa lyhenee, ts. metallin näennäinen virtausnopeus pitkin vaippaa sen huippuun.

$AB = V_1$ , nopeus, jolla huippu samanaikaisesti siirtyy oikealle.

Vektorein lausuen, geometrisesti yhteenlaskien, on

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_1 + \vec{V}_2$$

e) Koska kolmio  $PP'B$  on tasakylkinen, ovat sen kantakulmat  $P'PB$  ja  $P'BP$  yhtä suuret ( $=\Theta$ ), ja koska (ks. kohta a)  $AP$  on yhdensuuntainen  $BP'$ :n kanssa, on kulma  $APB =$  kulma  $PBP'$  ( $=\Theta$ ).  $V_0$  siis puolittaa kulman  $APP'$ .

Kolmiosta  $APB$  saadaan edelleen

$$\frac{V_1}{V_0} \Big|_{\alpha\beta} = \frac{\sin \Theta}{\sin \beta}; \text{ ja kun } \Theta = \frac{180 - (\beta - \alpha)}{2} = 90 - \frac{\beta - \alpha}{2},$$

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{\cos \frac{\beta - \alpha}{2}}{\sin \beta}; \text{ eli}$$

$$(1) V_1 = \frac{V_0 \cos \frac{\beta - \alpha}{2}}{\sin \beta}$$

Projisioimalla  $V_1$  ja  $V_0$   $V_2$ :lle saadaan

$$(2) V_2 = V_1 \cos \beta + V_0 \sin \frac{\beta - \alpha}{2}$$

Kolmiosta  $P'PB$  (ks. kohta c) saadaan

$$\frac{\frac{V_D}{\cos \alpha}}{\cos \frac{\beta - \alpha}{2}} = \frac{V_0}{\sin (\beta - \alpha)}, \text{ eli}$$

$$(3) V_0 = \frac{V_D \sin (\beta - \alpha)}{\cos \alpha \cos \frac{\beta - \alpha}{2}}$$

Kun kaava 3 sijoitetaan kaavoihin 1 ja 2, saadaan

$$(1') V_1 = V_D \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\cos \alpha \sin \beta} \quad \text{ja}$$

$$(2') V_2 = V_D \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} + \operatorname{tg} \frac{\beta - \alpha}{2} \right).$$

### b. Bernoullin laki ja suihkun syntyminen

Hydrodynamiikassa vallitsee ideaalisissa nesteissä nesteen nopeuden ja vastaavan paineen kesken ns. Bernoullin yhtälö, joka yleisessä muodossa voidaan esittää

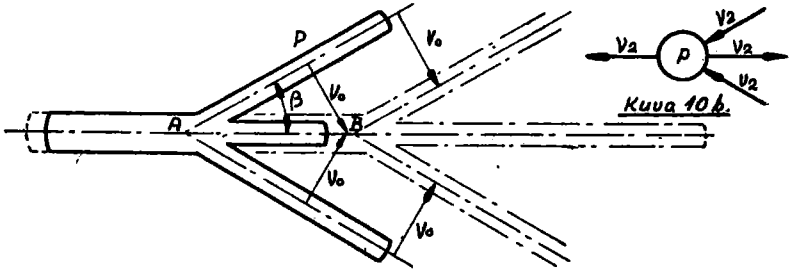
$$(4) \int \frac{dp}{\rho(p)} + \frac{1}{2} U^2 = \text{vakio, jossa}$$

$p$  = paine ( $\text{g/cm}^2$ ),  $\rho$  = nesteen tiheys ( $\text{g/cm}^3$ ) ja

$U$  = nopeus ( $\text{cm/sek.}$ )

Voimme otaksua, ettei nesteen tilavuus sanottavasti muutu paineen alaisena, joten sen tiheys  $\rho(p)$  ontelohanoksella on sama kuin vaiipan tiheys ( $\rho_0$ ). Kaava (4) voidaan silloin lausua muodossa

$$(4') p + \frac{1}{2} \rho_0 U^2 = \text{vakio.}$$



**Kuva 10.** Suihkun muodostuminen huipun mukana liikkuvassa koordinaatistossa. Ehyellä viivalla määrätynä hetkenä syntynyt tilanne, katkoviivalla tilanne hetkistä myöhemmin.

Kuten edellisestä kohdasta ilmeni, syntyy suppilon huipussa ankaran paineen alaisena nestemäisen metallin tungos (kuva 10) vaiipan taittumisen johdosta lyhetessä. Jos kuvittelemme itse liikkuvamme



tuon huipun mukana sen liikkeessa pitkin suppilon akselia oikealle, näyttäisi metalli pitkin vaippaa virtaavan päällemme ja tässä tapauksessa nimenomaan vakinaisella nopeudella  $V_2$ .

Bernoullin laki voidaan käsittää tässä tapauksessa (kuva 10 b) niin, että sivuilta, pitkin vaippaa tuleva virtaus (nopeus  $V_2$ ) synnyttää painekeskuksen, joka vuorostaan purkautuu nesteen virtauksena eteen- ja taaksepäin samalla nopeudella ( $V_2$ ). Nopeus siis muuttuu paineeksi ja se taas vuorostaan nopeudeksi. Paine syntyy riippumatta siitä, mistä suunnasta virtaus tulee, ja purkautuu siihen suuntaan, missä virtaukselle on tilaa.

Tällä edellytyksellä voidaan virtaustapahtumaa pitää vakaana, jolloin yhtälön (4') mukaan voidaan päätellä nesteen purkautuvan patoutumiskohdastaan edelleen samalla nopeudella  $V_2$  sekä eteen- että taaksepäin, kuten kaaviokuva kuvassa 10 osoittaa. Voimien symmetrinen vaikutus suuntaa purkauksen tapahtumaan pitkin symmetria-akselia, siis pitkin suppilon akselia.

Ottamalla huomioon kaavat (1') ja (2') saamme eteenpäin suuntautuvan suihkun nopeuden ( $V_s$ ) sekä "taaksepäin" suuntautuvan jätesuihkun nopeuden ( $V_j$ ).

$$V_s = V_1 + V_2 \text{ ja}$$

$$V_j = V_1 - V_2 \text{ eli}$$

$$5) \quad V_s = \frac{V_D \sin(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} \left( \frac{1}{\sin \beta} + \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} + \operatorname{tg} \frac{\beta - \alpha}{2} \right); \text{ ja}$$

$$6) \quad V_j = \frac{V_D \sin(\beta - \alpha)}{\cos \alpha} \left( \frac{1}{\sin \beta} - \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} - \operatorname{tg} \frac{\beta - \alpha}{2} \right)$$

Koska käytännössä  $V_1 > V_2$ , liikkuu jäte myöskin oikealle, samaan suuntaan kuin varsinainen suihku, mutta paljon pienemmällä nopeudella.

Kun nyt olemme saaneet määritetyksi sekä suihkun että jätteen nopeuden, voi olla mielenkiintoista todeta, miten massa jakaantuu suihkun ja jätteen osalle.

Jos palaamme em. huipun mukana liikkuvaan koordinaatistoon, saamme virtaustilanteen ollessa vakaa, että patoutumiskohtaan tulevan metallimäärän tulee olla sama kuin siitä poistuva. Jos merki-

tään:  $m =$  vaipan massa pituusyksikköä kohti,  $m_s =$  suihkun massa ja  $m_j =$  jätteen massa vastaavasti, saadaan

$$(7) \quad m = m_j + m_s$$

Kun edelleen liikepaljouksien, niin eteen- kuin taaksekinpäin, liikuvassa koordinaatistossa on oltava samat, saadaan

$$mV_2 \cos \beta = m_j V_2 - m_s V_2 \text{ eli}$$

$$(8) \quad m \cos \beta = m_j - m_s$$

Ratkaisemalla yhtälöistä 7 ja 8 saadaan

$$(9) \quad m_s = \frac{1}{2} m (1 - \cos \beta) \text{ ja}$$

$$(10) \quad m_j = \frac{1}{2} m (1 + \cos \beta).$$

Kaavoja 5 ja 6 sekä 9 ja 10 tarkastelemalla todetaan, että jos annetaan suppilokulman ( $\alpha$ ) pienetä, saadaan, kun kulma  $\beta$  samalla pienenee, että kun  $\alpha \rightarrow 0$ , niin  $V_s \rightarrow 2 V_D$ ; ts. suihkun nopeus suurenee suppilokulman pienetessä, mutta ei voi koskaan ylittää kaksinkertaista detonoimisnopeutta. Samalla kuitenkin  $\cos \beta \rightarrow 1$ , joten suihkun osalle tuleva massa pienenee.

Panssarin läpäisykyky on suoraan verrannollinen suihkun nopeuteen. Tämä seikka siis puoltaisi hyvin pienen avauskulman käyttöä. Kun kuitenkin panssariin syntyvän reiän suuruus vuorostaan riippuu suihkun paksuudesta, ts. sen massasta, ja kun suihkun perässä etenevillä räjähdyskaasuillakin on oma vaikutuksensa panssarin takana, on näiden kesken löydettävä vaikutuksen kannalta edullisin suhde. Todettakoon, että uuden amerikkalaisen ps.kauhun ammuksen kartion avauskulma on n.  $42 \frac{1}{2}^\circ$ .

Edellä esitettyjen kaavojen avulla voidaan laskea, jos kulma  $\beta$  voidaan valokuvata, suihkun nopeus ja massa särmäpanokselle. Kartiomaiselle vaipalle pätevät samat kaavat. Lisääntyvästä nestemäärästä patoutumiskohdassa kuitenkin johtuu suihkun paksuneminen. Se ei kuitenkaan vaikuta nopeuteen eikä niin muodoin tunkeutumiskykyyn; reiän halkaisija vain suurenee. Jos antaisimme vaipan oheta oikeassa suhteessa reunoihin päin, saisimme kartiovaipallakin tasapaksun suihkun.

### c. Teoria ja kokeet

Röntgensalamavalokuvat osoittavat, että

- $\beta > \alpha$  ja likimain vakio koko romahdusvaiheen ajan, sekä
- suihkun etupään ja jätteen takapään nopeudet ovat suunnilleen samat kuin laskemalla saadut. Sen sijaan suihkun jälkipään nopeus on laskettua pienempi. Lisäksi syntyy ns. jälkisuihku, joka jatkuu jonkin aikaa senkin jälkeen kun räjähdys on saavuttanut panoksen reunan.

Kaavojen 9 ja 10 pätevyys voidaan todeta, jos kulma  $\beta$  on saatu määritetyksi ja joko suihkun tai jätteen massa on saatu talteen. Kun on käytetty avauskulmaa  $2\alpha = 60^\circ$ , on jäte saatu talteen ampuamalla veteen. Jätteet punnittiin ja havaittiin, että jäte oli hiukan keveämpi kuin laskelmat edellyttivät. Ilmiön tutkimiseksi suoritettiin koe, jossa vaippa leikattiin pohjan suuntaisiin vyöhykkeisiin ja vyöhykkeet punnittiin. Ammunnan jälkeen saatiin jätepalaset talteen, asetettiin oikeaan järjestykseensä ja punnittiin. Huomattiin, että kartion huippuosan muodostaman jätteen paino oli suunnilleen laskelmien mukainen, mutta sen sijaan kartion loppuosasta muodostuneen jätteen massa oli laskettua pienempi. Ilmiö voidaan selittää eri tavoin:

1) vaippa ei loppuvaiheessa romahda kokoon säännöllisesti, vaan särkyy ja siitä lohkeaa pois osasia;

2) osa jätteen massasta menee jälkisuihkuun. Tämä on myös todettu röntgenkuvista.

Jälkisuihkun syntyminen taas voidaan selittää:

a) varsinaisen suihkun muodostumisen päätyttyä, korkeapaineiset räjähdyskaasut rutistavat edelleen jätettä kokoon, jolloin sen sula sisus pursuaa siitä ulos jokseenkin samaan tapaan kuin hammas-tahna putkestaan;

b) hirmupaineiden alaisina muuttuvat useimmat metallit neste-mäisessä muodossaan venyviksi, kuten on voitu todeta. Senkin jälkeen kun paine on lakannut, tämä ominaisuus säilyy niissä muutama mikrosekunnin ajan. Tällöin syntynyt primäärinen suihku vetää perässään sulan metallisäikeen jätteen sisältä, samaan tapaan kuin

voimme venyttää purukumia. Tämä selittäisi myös mittaamalla todetun nopeuden vähenemisen suihkun jälkipäässä.

Joskin kaikki tässä luetellut tekijät ovat mukana pelissä, lienee viimeinen, b)-kohdassa mainittu, tärkein.

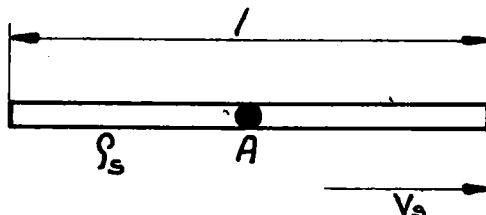
### 3. Suihkun tunkeutuminen

Kuten jo aikaisemmin mainittiin, syntyy suihkun iskiessä kohteeseen kolo tai reikä, jonka halkaisija on paljon suurempi kuin suihkun halkaisija. Reiän suuruus ei riipukaan niin paljon suihkun halkaisijasta kuin siitä energiamäärästä, joka vapautuu tunkeutuman pituusyksikköä kohti. Kovissa aineissa reiän halkaisija jää pienemmäksi kuin pehmeissä. Tämä johtuu siitä, että kolon avaamiseen koviin aineisiin tarvitaan enemmän energiaa. Pehmeissä aineissa saman energiamäärän aiheuttama kohteen aineen säteittäinen liike jatkuu kauemmin, ennen kuin se lakkaa aineen elastisuuden ja viskositeetin vuoksi.

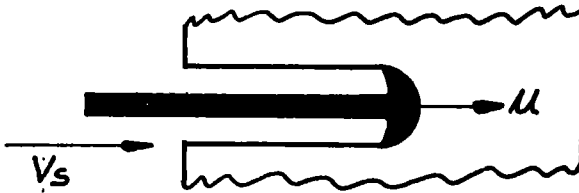
Toisaalta tunkeutumisenopeus ja -syvyys ovat melkein riippumattomat kohteen aineen lujuudesta, koska paine iskukohdassa on paljon suurempi kuin useimpain aineiden myötöraja. Aluksi voimme tarkastelussamme otaksua kohteen aineen lujuuden ja viskositeetin olevan merkityksettömät, jättää siis ne huomioon ottamatta, ja käsitellä tapahtumaa puhtaana nestedynaamisena ilmiönä.

#### a. Vakinaisen suihkun tunkeutuminen

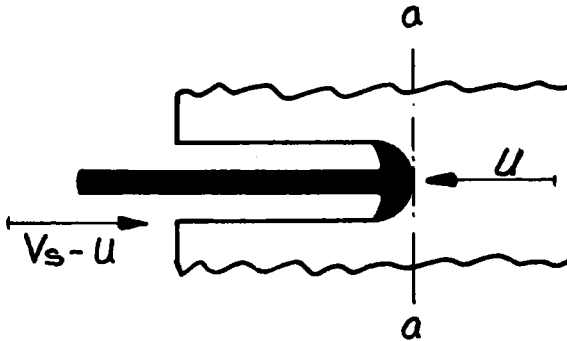
Oletamme suihkun, jolla on tietty pituus ja nopeus, olevan kauttaaltaan homogeeninen ja tasapaksu (kuva 11).



Kuva 11. Idealisoitu vakiosuihku.  $l$  = suihkun pituus,  $A$  = suihkun poikkipinnan ala,  $\rho_s$  = suihkun tiheys,  $V_s$  = suihkun nopeus.



Kuva 12. Suihku tunkeutumassa.  
 $U$  = tunkeutumisnopeus.



Kuva 13. Tunkeutumistapahtuma iskukohtaan mukana liikkuvassa koordinaatistossa.  $a$ - $a$  paikallaan pysyvä iskukohta. Kohde liikkuu nopeudella  $U$  suihkua vastaan. Suihkun nopeus on  $V_s - U$ .

Kuva 12 esittää tunkeutumistapahtuman. Iskemäkohtaan syntyy nesteen patoutuma, josta paine leviää kaikkiin suuntiin. Suihku leviää. Tunkeutumisnopeus  $U$  on pienempi kuin suihkun nopeus. Tunkeutuminen jatkuu niin kauan kuin suihkua riittää. Siis mitä pitempi suihku ja mitä suurempi sen nopeus, sen suurempi tunkeutuma saadaan. Käyttämällä suurempikaliiperista ontelohanosta saadaan pitempi suihku ja siis suurempi läpäisykyky.

Tarkastelua varten asetamme jälleen suihkun iskemäkohtaan tunkeutumisnopeudella liikkuvan koordinaatiston (kuva 13). Tässä koordinaatistossa kohde liikkuu suihkua vastaan nopeudella  $U$ , suihkun nopeus on  $V_s - U$  ja iskukohta pysyy paikoillaan.

Soveltamalla jälleen Bernouilli'n yhtälöä (4') saadaan

(11)  $\frac{1}{2} \rho_s (V_s - U)^2 = \frac{1}{2} \rho U^2$ , jossa  $\rho$  on kohteen tiheys. Että meillä on oikeus pitää sekä suihkun että kohteen aineita iskukohtassa ideaalisina nesteinä ja siten käyttää Bernouilli'n lakia, selviää, kun tiedämme, että em. standardipanoksella on teräksessä tunkeutumisenopeus  $U = 2,7 \cdot 10^5$  cm/sek. Kun tämä sijoitetaan yhtälön (11) oikeaan puoleen, tulee paineen arvoksi lähes 300000 kg/cm<sup>2</sup>.

Idealisoimalla tunkeutumistapahtuma, ts. olettaen ilmiön olevan vakaa aina siihen saakka, kun suihkun viimeinen osanen on iskenyt kohteeseen, saadaan koko tunkeutuma (P):

$$P = Ut = U \frac{l}{V_s - U}, \text{ sekä sijoittamalla tähän kaava 6}$$

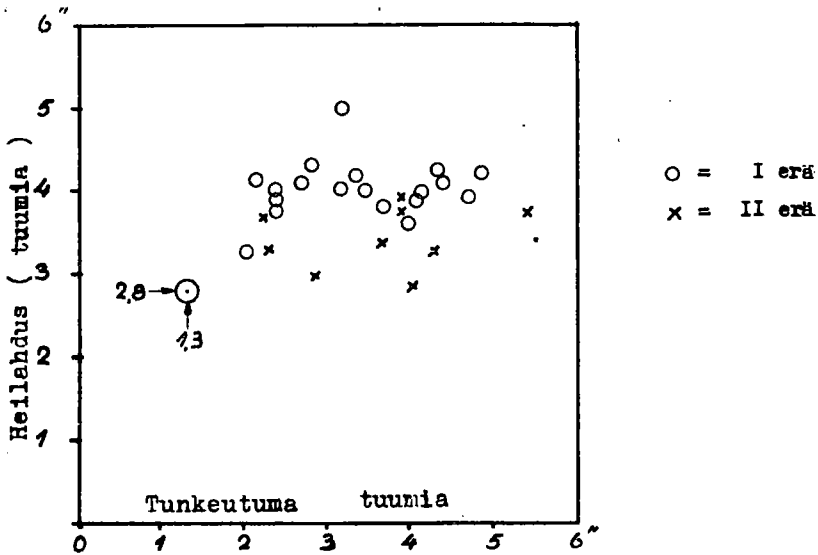
$$(12) P = l \left( \frac{\rho_s}{\rho} \right)^{1/2}$$

Tulos tuntuu ensinäkemältä yllättävältä osoittaessaan tunkeutuman olevan riippuvainen vain suihkun pituudesta (l), mutta ei sen nopeudesta. Tämä selittyy kuitenkin, kun huomataan U:n olevan suoraan verrannollinen V<sub>s</sub>:ään, kun taas tunkeutumiseen tarvittava aika on siihen kääntäen verrannollinen. Nopeampi suihku siis tunkeutuu nopeammin tunkeutuman jäädessä kuitenkin samaksi. Kuitenkin on muistettava, että tämä pitää paikkansa vain silloin kun nopeudet ovat niin suuret, että kohteen aineen lujuusominaisuudet voidaan kokonaan jättää huomioon ottamatta.

Kaavan (12) esittämän tunkeutuman suhteellisen riippumattomuuden suihkun nopeudesta tietyissä rajoissa todistaa kuvan 14 esittämä koe.

Suoritetussa kokeessa asetettiin standardipanoksella ballistiseen heiluriin. Käytettiin 12 tuuman räjähdysväliä, kohteena oli pehmeä teräs. Panoksina oli kaksi erää standardipanoksia, jotka hyvin vähän erosivat toisistaan. Kuvassa on ympyröin merkitty suuremman nopeuden antavan erän tulokset sekä ristein pienemmän. Lämpäisykyvystä ei voida havaita sanottavaa eroa.

Käytännössä kaava (12) kaipaa kuitenkin oikaisua. Senkin jälkeen kun suihkun viimeinen osanen on iskenyt kohteeseen, jatkaa kohteen pehmenyt aine iskusta saamansa liike-energian vuoksi vielä liiket-



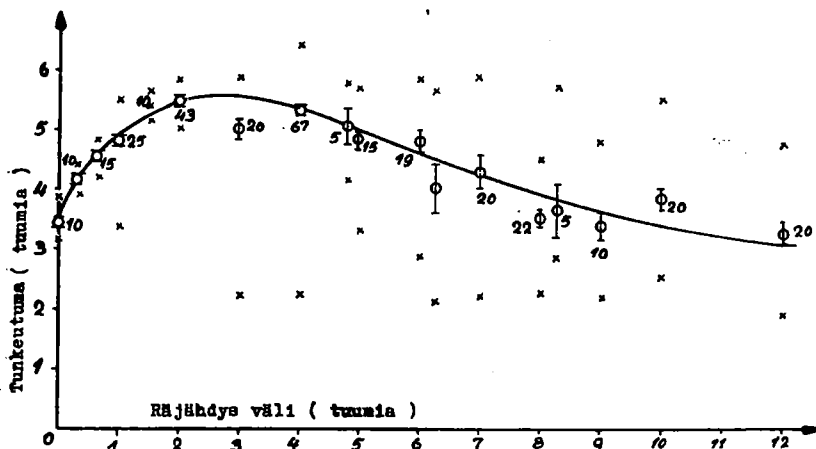
Kuva 14. Tunkeutumiskyvyn riippumattomuus suihkun nopeudesta.

tään. Kolo siis vielä jonkin aikaa laajenee ja syvenee. Ilmiö on nimeltään "sekundäärinen tunkeutuminen". Se selittää, miksi lyijyyn, joka on terästä tiheämpää, saadaan syvempi ja laajempi kolo kuin teräkseen.

Edelleen, suihkun loppupään nopeus saattaa todellisuudessa olla pienempi kuin mitä vaaditaan panssarilevyn puhkaisemiseen, mutta ylittää vielä pehmeän teräksen lujuuden, joten pehmeään teräkseen saadaan jonkin verran suurempi tunkeutuma kuin panssarilevyn, vaikkakin molempien tiheys on jokseenkin sama.

#### b. Räjähdysvälän vaikutus

Räjähdysvälän vaikutuksen selvittämiseksi suoritettiin em. standardipanoksella kokeet pehmeään teräkseen. Tulokset ilmenevät kuvasta 15.



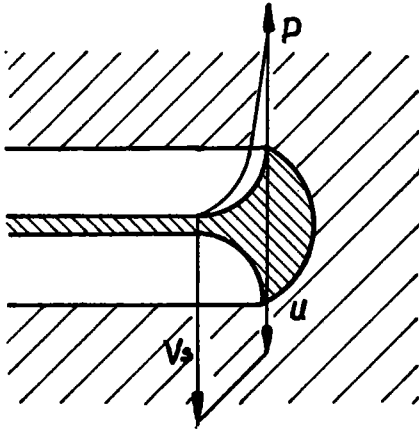
Kuva 15. Räjähdyksvälin vaikutus ontelopanoksen läpäisykykyyn. Numerot keskipisteiden kohdalla ilmoittavat koeräjätysten lukumäärän.  $\Phi$  = räjäytys-sarjan keskiarvo ja 50 % hajonta-alue;  $x$  = koko hajonta-alue. Räjähdyksväli on mitattu kartion pohja tasosta kohteeseen.

Aluksi tunkeuma kasvaa räjähdyksvälin kasvaessa aina 2 tai 3 tuumaan saakka, jonka jälkeen se loivasti laskee. Laskun loivuudesta johtuu, että suihku voi säilyttää melkoisen läpäisykyvyn hyvinkin suurilla räjähdyksväleillä. Tällä seikalla on käytännössä sikäli merkitystä, että se osoittaa olevan jokseenkin turhaa yrittää suojata panssarivaunuja millään etupanssareilla, puurakenteilla tms. järjestelyillä, jotka voisivat aiheuttaa panoksen ennenaikaisen räjähtämisen. Se tekee myös mahdolliseksi käyttää ontelopanoksia esim. pst.miinoissa. Maahan upotetun ontelomiinan suihku kykenee vielä hyvin puhkaisemaan panssarivaunun pohjan. Tiedetäänpä tällaisia miinoja käytetyn ilmapuolijonaaankin matalalentäjiä vastaan, jolloin katsotaan voitavan saavuttaa aina 200 metriin ulottuva tehokas suihku.

Läpäisykyvyn riippuvaisuus räjähdyksvälistä johtuu suihkun erilaisesta tilasta eri etäisyyksillä alkukohdastaan. Kun suihku muodostuu, se on aluksi jatkuva ja nestemäinen. Myöhemmin se kuitenkin määräkohdassa alkaa hajota ja jähmettyä pikku pisaroiksi ja osa-



siksi. Tällaisessa suihkussa osaset eivät enää iskussa vaikuta toisiinsa kuten jatkuvassa suihkussa (kuva 16), vaan kukin osanen luovuttaa koko liike-energiansa kohteeseen. Täten syntynyt iskupaine on suurempi kuin jatkuvassa suihkussa, suihku ei myöskään leviä iskukohdassa.



Kuva 16. Paineen ja nopeuden jakautuminen jatkuvassa suihkussa.

Tasapainoisessa virtauksessa täytyy toteutua ehdon  
poikkipinta  $\times$  nopeus = vakio,

ts. nopeuden aletessa poikkipinta kasvaa ja suihku leviää. Osassuihkulla voidaan suihkun iskuvoima laskea likimain

voima =  $\rho_s A (V_s - U)^2$ , josta

keskipaine =  $\rho_s (V_s - U)^2$ .

Kun kohteenkin aine iskukohdassa on nesteenä, voidaan Bernoullin mukaan merkitä

$$(13) \quad \rho_s (V_s - U)^2 = \frac{1}{2} \rho U^2$$

Kaava eroaa jatkuvan suihkun kaavasta (11) kertoimella  $\frac{1}{2}$ .

Kaavat (11) ja (13) voidaan yhdessä kirjoittaa muotoon

$$(14) \quad \lambda \rho_s (V_s - U)^2 = \rho U^2,$$

jossa  $\lambda = 1$  jatkuvalla suihkulla;  $\lambda = 2$  osassuihkulla.

Suihkun ollessa välivaiheessa muuttamassa muotoaan  $1 < \lambda < 2$ .

Kaava 9 huomioon otettuna voidaan tunkeuma esittää

$$(15) \quad P = 1 \left( \frac{\lambda \varrho_s}{\varrho} \right)^{1/2}$$

Tämäkään kaava ei vielä ole täysin oikea, se kun antaa tunkeuman vain sellaiselle suihkulle, jonka ominaisuudet iskukohdassa pysyvät samoina koko tunkeutumisen ajan.

### c. Muuttuvan suihkun tunkeutuminen

Todellisuudessa suihku muuttuu koko ajan. Sen nopeus alenee jatkuvasti pitkin suihkua edestä taaksepäin suihkun samalla venyessä. Yleensä suihku ei vielä edes ole täysin valmis sen etupään jo iskiessä kohteeseen. Tämä herättää ensinnä kysymyksen, vaikuttaako suihkun etupään iskeminen kohteeseensa suihkun muodostumiseen ja miten.

Jos äänen nopeus suihkussa on pienempi kuin suihkun nopeus, paineimpulssi ei pääse vaikuttamaan patoutumiskohtaan, jossa suihku muodostuu. Suihkun etupään nopeus onkin suurempi kuin äänen nopeus suihkussa, joten jo pienilläkin räjähdysväleillä syntyy tällainen tilanne. Jälkipään nopeus taas yleensä on hiukan pienempi kuin äänen nopeus suihkussa. Em. standardipanoksella ei ole enää odotettavissa vaikutusta suihkun muodostumiseen, jos kohteena on teräs ja räjähdysväli on yli  $1/2$  tuumaa. Ilmiön tutkimisen kannalta tällä seikalla on suuri merkitys sen salliessa erottaa ilmiöt toisistaan ja tutkia erikseen suihkun muodostumista ja sen tunkeutumista.

Tunkeutuman laskemista varten muuttuvalla suihkulla pitäisi tuntea suihkun fysikaalinen tila jokaisessa suihkun kohdassa jokaisena hetkenä. Tämä ei kuitenkaan ole mahdollista eikä välttämätöntäkään. Käytännössä riittää, jos tunnetaan suihkun keskimääräinen tiheys ( $\bar{\varrho}_s$ ) sekä  $\lambda$ :n arvo, joka ilmaisee suihkun hajoamistilanteen.  $\bar{\varrho}_s$  voidaan jatkuvassa suihkussa pitää samana kuin vaippametallin tiheys, osasuuhkussa se on pienempi.  $\lambda$  voidaan pitää  $\bar{\varrho}_s$ :n funktiona, joskin se myös riippuu osasten koosta.

Teemme jatkuvaa käsittelyä varten seuraavan oletuksen, joka likimain pitääkin paikkansa:

$\rho_s$  ja  $\lambda$  ovat sikäli ajasta riippumattomat, että määräkohdassa ne ovat koko ajan muuttumattomina. Ne voidaan siis ilmoittaa etäisyyden funktiona luettuna kartion pohjasta. Suihkun hajoamisen voidaan siis katsoa tapahtuvan koko ajan suunnilleen samassa kohdassa suihkua. Tasapaksulla kartiovaipalla suihkun massa tietenkin jatkuvasti kasvaa. Se ei kuitenkaan vaikuta suihkun tiheyteen, mutta lisää kyllä sen paksuutta. Tunkeutumissyvyys ei kasva, kolo vain tulee laajemmaksi.

Tunkeumaksi saadaan

$$P = \int U dt$$

Jos  $dl$  on pieni suihkun osanen pituussuunnassa, saadaan

$$dl = (V_s - U) dt$$

Kun sekundäärinen tunkeuma jätetään ottamatta huomioon, saadaan tunkeumaksi

$$P = \int \frac{U}{V_s - U} dl; \text{ sekä ottamalla huomioon kaava (14)}$$

$$\frac{U}{V_s - U} = \sqrt{\frac{\lambda \rho_s}{\rho}}, \text{ joten}$$

$$P = \int \left( \frac{\lambda \rho_s}{\rho} \right)^{1/2} dl, \text{ ja jos kohteen tiheys on vakio}$$

$$(16) \quad P = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \int (\lambda \rho_s)^{1/2} dl$$

Kaava (16) ilmaisee välillisesti, että tunkeuma riippuu räjähdysvälistä, jonka funktiona tuloa  $\lambda \rho_s$  voidaan pitää, kun taas vakinaisella suihkulla räjähdysvälillä ei ole merkitystä.

Merkitsemällä räjähdysväli  $x$ :llä voidaan todeta suihkun pitenevän  $x$ :n kasvaessa.  $\rho_s$  ja  $\lambda$  ovat niin ikään  $x$ :n funktioita. Tarkkaa yhteyttä on vaikea ilmoittaa, mutta sen sijaan voidaan käyttää likimääräisiä keskiarvoja. Kaava (16) kirjoitetaan muotoon

$$P = \bar{J} / \sqrt{\varrho} \int dl, \text{ jossa } \bar{J} \text{ on } (\lambda \varrho_s)^{1/2} \text{:n keskiarvo tunkeu-}$$

tumisen aikana.  $\int dl$  edustaa suihkun tehokasta pituutta, joka taas on  $x$ :n funktio. Kun  $\int dl = \bar{l}$ , jossa  $\bar{l}$  = tehokas pituus, saadaan

$$(17) P = \bar{J} \bar{l} / \sqrt{\varrho}$$

Kaava (17) ilmaisee tunkeutuman räjähdysvälin funktiona, kun  $\bar{J}$  ja  $\bar{l}$  on jollakin tavalla saatu määritetyksi  $x$ :n funktioina.

Suihkun fysikaalisen tilan mukaan voidaan erottaa seuraavat kolme tapausta, jotka kaikki voivat vaiheina esiintyä samassa suihkussa.

1. vaihe: suihku on jatkuva,

$$\varrho_s = \text{vakio}, \lambda = 1.$$

2. vaihe: suihku on juuri muuttumassa osasmaisiksi, mutta osat ovat vielä niin lähellä toisiaan, että se iskussa toimii kuten jatkuva suihku

$$1 < \lambda < 2; \lambda \rightarrow 2 \text{ suihkun pidetessä}$$

$$\varrho_s \text{ pienenee } x\text{:n kasvaessa.}$$

$\bar{J}$  (=  $(\lambda \varrho_s)^{1/2}$ :n keskiarvo) kasvaa, pysyy samana tai pieneneen mukaan, kasvaako  $\lambda$  nopeammin, samassa suhteessa vai nopeammin kuin  $\varrho_s$  pienenee. Eräät kokeet viittaavat siihen, että  $\bar{J}$  aluksi hiukan kasvaa pienetäkseen  $x$ :n kasvaessa. Tunkeuma on todennäköisesti sama kuin vaiheessa 1, jolloin  $P$  on suoraan verrannollinen  $\bar{l}$ :ään.

3. vaihe: suihku on hienojakoisista osasista koostunut.

$$\lambda = 2,$$

$\varrho_s$  pienenee suihkun pitenemisen vuoksi, mikä taas johtuu suihkun nopeuden vähenemisestä suihkussa taaksepäin mentäessä. Täten se on kääntäen verrannollinen  $\bar{l}$ :ään.  $\bar{J}$  tulee siis olemaan kääntäen verrannollinen  $\sqrt{\bar{l}}$ :ään. Tunkeuma kasvaa  $x$ :n kasvaessa, vaikkakin hitaammin kuin 1. ja 2. vaiheessa.

Suihkun venyvyysominaisuudet ja hajoaminen riippuvat käytetystä metallista. Venyvät metallit kuten alumiini ja kupari vaativat suuremman räjähdysvälin, jotta suihku ehtisi muuttua osasmaisiksi.

Tunkeutumiskyvyn uudelleen aleneminen osassuihkulla  $x$ :n edelleen kasvaessa johtuu seuraavista seikoista:

1) suihku ei ole täysin suora ja tasainen, se pyrkii leviämään, jolloin sen tiheys vähenee;

2) suihkun pitenemisestä ja leviämisestä johtuva tiheyden väheneminen aiheuttaa paineen vähenemisen iskukohtassa, kunnes kohteen aineen lujusominaisuudetkin alkavat vaikuttaa;

3) osasten välien kasvaessa ilman vastus kohdistuu jokaiseen osaan erikseen ja pienentää niiden nopeutta.

Yhteenvedona edellisestä voidaan siis todeta, että kartiovaipan suihkun tunkeutumiskyky aluksi kasvaa räjähdysvälin kasvaessa. Syynä tähän on suihkun piteneminen aluksi venyvyyden, myöhemmin osassuihkussa nopeusgradientin vuoksi. Räjähdysvälin edelleen suuretessa tunkeutumiskyky pienenee. Pieneneminen johtuu suihkun yhä lisääntyvästä hajaantumisesta ja siis tiheyden pienemisestä.

#### d. Tunkeutuminen suihkun eri vaiheissa

Kaava (17) antaa likimain tunkeutuman räjähdysvälin funktiona. Siinä on jätetty huomiotta ne nopeuden muutokset, jotka johtuvat osasiin vaikuttavista voimista siitä hetkestä lähtien, jolloin suihku muodostuu, siihen hetkeen, jolloin se lyö kohteeseen. Ne ovat kuitenkin suhteellisen pieniä, joten likimääräisyys ei aiheuta suurtakaan virhettä.

Kun merkitään  $\bar{l}_x$  :llä suihkun tehokas pituus eri räjähdysväleillä ja  $\bar{l}_0$  :lla vastaava arvo  $x$ :n ollessa 0, saadaan

$$\frac{\bar{l}_x}{\bar{l}_0} = 1 + \alpha x, \text{ jossa } \alpha \text{ on nopeusgradientista johtuva kerroin.}$$

Osassuihkussa  $\bar{\rho}_s$  riippuu tehokkaasta pituudesta  $\bar{l}$  ja tehokkaan suihkun poikkipinnan alasta. Jos merkitään  $r$ :llä poikkipinnan sädettä, saadaan vastaavasti

$$\frac{r_x}{r_0} = 1 + \beta x, \text{ jossa } \beta \text{ on leviämistä ilmaiseva kerroin.}$$

Poikkipintojen suhteeksi saadaan vastaavasti

$$\frac{A_x}{A_0} = (1 + \beta x)^2, \text{ josta taas saadaan likimain tiheyksien suhde.}$$

$$\frac{\rho_{sx}}{\rho_{s0}} \sim \frac{1}{(1 + \beta x)^2}$$

1. ja 2. vaiheessa, jolloin suihkua voidaan vielä pitää jokseenkin tasaisena ja jatkuvana, voidaan käyttää kaavaa (15)

$$P = 1 \left( \frac{\lambda \rho_s}{\rho} \right)^{1/2}, \text{ jossa } \lambda = 1.$$

Ottaen kuitenkin huomioon  $l$ :n piteneminen nopeusgradientin vuoksi sekä  $\rho_s$ :n pieneneminen suihkun levenemisen vuoksi ja muodostamalla suhde, saadaan

$$\frac{P_x}{P_0} = \frac{l(1+ax)}{l} \left( \frac{\rho_{s0}}{\rho_{s0}(1+\beta x)^2} \right)^{1/2} = \frac{1+ax}{1+\beta x} \text{ eli}$$

$$(18) P_x \text{ (I,II)} = P_0 \cdot \frac{1+ax}{1+\beta x}, \text{ jossa } P_0 \text{ merkitsee tunkeutumaa}$$

$x$ :n arvon ollessa 0.

3. vaiheessa, suihkun osas-osalla, käytetään kaavaa (17).

Muodostamalla suhde  $\frac{P_x}{P_x'}$ , jossa  $P_x$  on tunkeutuma räjähdysvälillä  $x$ , ( $\lambda = 2$ ) ja  $P_x'$  vastaava arvo sillä räjähdysvälillä  $x'$ , jolla suihku alkaa hajota, ( $\lambda = 1$ ), saadaan

$$\frac{P_x}{P_x'} = \sqrt{\frac{2 \rho_{sx'}}{(1+ax)(1+\beta x)^2 \rho_{sx'}}} \cdot \frac{lx'(1+ax)}{lx'}$$

$$= \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{1+ax}}{1+\beta x} \text{ eli}$$

$$(19) P_x \text{ III} = P_x' \frac{\sqrt{2} \sqrt{1+ax}}{1+\beta x}$$

$P_x'$  on ensin laskettava kaavan 18 avulla.

**e. Eräitä käytännöllisiä kokeita teorian selventämiseksi**

Kaava 14 oli saatu olettamalla suihkun tila vakaaksi. Suihkun muuttuessaakin sitä voidaan pitää pätevänä, kun siihen sijoitetaan  $V_s$ :n ja  $U$ :n keskiarvot, jos ne mitataan hyvin lyhyellä välillä.

Ampumalla tietyllä panoksella ohuehkoon kohteeseen, jonka aine vaihteli, voitiin nopeasti pyörivällä rumpukameralla valokuvaamalla määrittää suihkun nopeus ennen iskua kohteeseen ja heti sen jälkeen, kun se oli läpäissyt kohteen. Samalla saatiin tunkeutumiseen tarvittava aika, joten tunkeutumisnopeus saatiin lasketuksi. Suihkun nopeuden keskiarvoksi tällä välillä voidaan merkitä

$$\bar{v}_s = \frac{v_e + v_t}{2}, \text{ jossa } v_e = \text{nopeus ennen ja } v_t \text{ nopeus jälkeen}$$

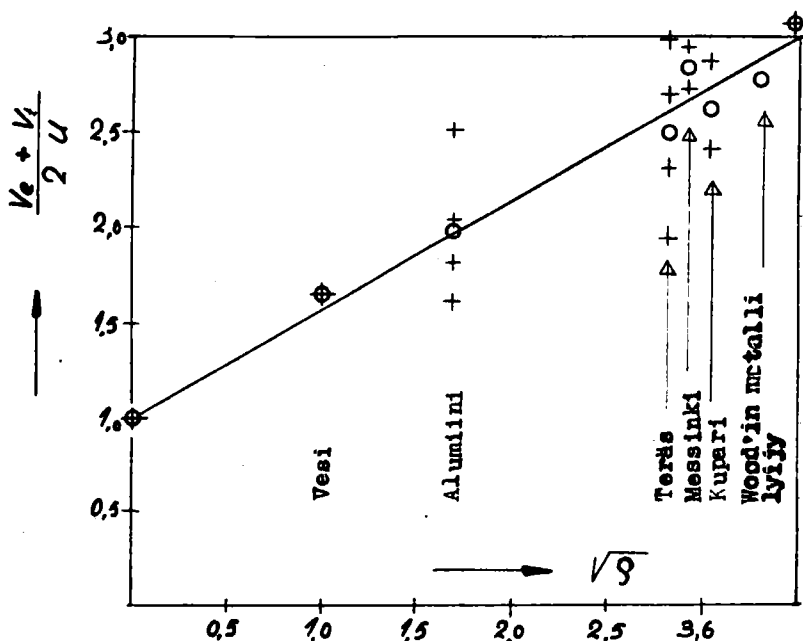
läpäisyn.

Kaavasta 9 saadaan nyt

$$\frac{v_s - U}{U} = \left( \frac{\rho}{\lambda \rho_s} \right)^{1/2} = \frac{\sqrt{\rho}}{J} \text{ tai}$$

$$(20) \quad \frac{\bar{v}_s}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{\rho}}{J} + 1, \text{ jossa } \bar{J} = \sqrt{\lambda \rho_s}$$

Kokeet (kuva 17) suoritettiin useihin kohteisiin. Kohteen paksuus oli 2 tuumaa ja räjähdysväli 6 tuumaa em. standardipanoksella, jossa kuitenkin teräsvaipan paksuus oli 0,91 mm.



Kuva 17. Suihkun nopeuden ja tunkeutumisnopeuden suhde erilaisissa aineissa.

Kaava 20 voidaan myös lausua muodossa

$$(21) \frac{V_e + V_t}{2\bar{U}} = \frac{\sqrt{\rho}}{\bar{J}} + 1, \text{ josta ilmenee, että jos ordinaataksi merki-}$$

tään  $\frac{V_e + V_t}{2\bar{U}}$  ja abskissaksi  $\sqrt{\rho}$ , pitäisi kuvaajan olla suora. Tämän

vahvistaakin kuva 17, joka ilmaisee kokeen tulokset. Hajonta on tosin melkoinen, mutta keskiarvojen suhteen yhtälö pitää melko hyvin paikkansa. Suoran kaltevuuden perusteella saadaan  $\bar{J}$ :n eli  $(\lambda \rho_s)^{1/2}$ :n keskiarvot em. suihkulle 6 tuuman räjähdysvälillä.

Esim.

Kohteen ollessa terästä saadaan keskiarvon kohdalta  $\frac{V_e + V_t}{2\bar{U}} = 2,5$



ja  $\sqrt{\rho} = 2,7$ . Ratkaisemalla kaava 16 saadaan  $\bar{J} = 1,73$  ja kun  $\lambda = 2$ , saadaan suihkun tiheys  $\bar{\rho}_s = 1,5$ . Parhaimmalla suhteella, kun  $\frac{V_e + V_t}{2\bar{U}} = 3,0$ , saadaan  $\bar{\rho}_s = 4,5$ . Kun tässä  $\rho_s$ :lle saadaan näinkin korkea arvo, voimme päätellä, että suihkun on täytynyt olla jokseenkin jatkuva, jolloin  $\lambda < 2$ . Tämä puolestaan osoittaa, että  $\bar{\rho}_s$ :n on täytynyt olla vieläkin suurempi kuin 4,5, ehkä hyvin lähellä vaipan tiheyttä, ts. suihkun on vielä tässä vaiheessa täytynyt olla jatkuva. Kun voimme lähteä siitä edellytyksestä, että suuremmilla nopeuksilla suhteen  $\frac{V_s}{U}$  täytyy kasvaa, voimme päätellä, että kyseisen raja-arvo on saatu parhaalla suihkulla, jonka nopeus on ollut niin suuri, ettei suihku vielä ole paljoakaan ehtinyt hajota.

Varhaisimmissa nopeusmittauksissa havaittiin myös erikoinen ilmiö. Ammuttaessa jokseenkin identtisillä panoksilla oli erilaisilla räjähdysväleillä läpäisseen suihkun nopeus erilainen. Arvot ilmenevät seuraavasta taulukosta. Panoksena oli em. standardipanos, mutta vaippa oli alumiinia. Kohteena oli 2 tuuman paksuinen pehmeä teräslevy.

x	6 tuumaa	18 tuumaa	30 tuumaa
$V_t$	4600 m/sek	6300 m/sek	6000 m/sek

Tulos selittyy kuitenkin edellisen perusteella. Nopeus mitataan aina suihkun etupään mukaan. Tunkeutumisen aikana suihkun etupää kuluu, tulee käytetyksi, jolloin läpäisseen suihkun etupään nopeus ( $V_t$ ) on pienempi kuin ennen iskua ( $V_e$ ). Suihkun nopeus näet vähenee jokseenkin suoraviivaisesti edestä taaksepäin. Sekä hyvin suurilla että hyvin pienillä x:n arvoilla tunkeutuminen on tehotomampaa, joten suihkun pituudesta suurempi osa menee läpäisemistyöhön. Edullisimmalla räjähdysvälillä tunkeutuminen on tehokain ja suihkusta kuluu vastaavasti pienempi osa läpäisemistyöhön.

Merkitsemällä läpäisyyn käytetty suihkun massa  $\Delta m_s$ :llä ja kun merkitään  $\Delta V = V_e - V_t$ ;  $V_1 =$  suihkun etupään nopeus,  $V_2 =$  suihkun tehokkaan osan takapäin nopeus ja  $b =$  kohdelevyn paksaus, saadaan

$$\Delta m_s = \frac{\Delta V}{V_1 - V_2} = \frac{b}{P} \text{ kyseisellä } x:n \text{ arvolla. Tästä edelleen}$$

$$(22) \quad \Delta V \sim \frac{b (V_1 - V_2)}{P}$$

Kaava 22 ilmoittaa mm., että nopeuden muutos on pienin silloin, kun  $P$  on suurin, ts. edullisimmalla räjähdysvälillä.

#### 4. Loppusanat

Edellä on tahdottu antaa mahdollisimman täsmällinen selostus niistä ilmiöistä, joita tapahtuu ontelopanosten räjähdysyhteydessä. Se voinee antaa myös riittävän pohjan käytännöllisiä kokeita varten sovellettaessa ontelopanoksia käytäntöön, mm. taisteluvälineisiin.

Teoriaa voidaan käyttää myös hyväksi tutkittaessa eri aineiden ominaisuuksia hirmupaineiden alaisina. Muutteleamalla räjähdysaineiden laatua ja muotoa sekä vaipan materiaalia on mahdollista laatia tarkka asteikko tällaisia lujuusmittauksia varten. Tässä mielessä voisivat tulla kysymykseen seuraavanlaiset kokeet:

- standardipanos, erilaiset kohteet. Mitataan eri materiaaleihin syntyneet kolot, niiden tilavuus ja profiili;
- standardipanos, standardikohdelevy (terästä) ja tutkittava materiaali välissä. Mitataan teräkseen syntyneen jäännöskolon syvyys;
- mitataan tunkeutumisnopeus erilaisissa materiaaleissa.

Tässä oleva selostus on käsitellyt särmä- ja kartiopanoksia. Muitakin ontelomuotoja, kuten puolipalloa, paraboloidia, päärynän ja trumpetin muotoa, on kokeiltu. Mikään ei näistä kuitenkaan ole osoittautunut merkittävästi toistaan paremmaksi, joskin eroja on olemassa. Vaikkakin tehokkaan suihkun syntymiseen vaaditaan mahdollisimman symmetrisiä ja homogeenisiä, jännityksettömiä vaippoja, tulee heikompiakin materiaali kysymykseen. Muistettakoon, että eräällä amerikkalaisten sotänäyttämöllä käytettiin jopa moottori-ajoneuvojen valonheittimien heijastimia menestyksellisesti tähän tarkoitukseen.