

KRANAATTIEN SIRPALOITUMISELLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET

Kapteeni Risto N o o p i l a

JOHDANTO

Kranaatin räjähtäessä sen kuori ensiksi laajenee jopa 1.5-kertaiseksi ja vasta sitten se pirstoutuu sirpaleiksi. Sirpaloituminen voi olla joko luonnollinen tai ohjattu.

Luonnollisen sirpaloitumisen ongelmana voidaan pitää sirpaleiden massajakautuman epämääräisyyttä, tehokkaiden sirpaleiden pienehköä lukumääräistä osuutta kranaatin sirpaloituvasta massasta ja syntyvien sirpaleiden ballistisesti epäedullista muotoa.

Ohjatulla sirpaloitumisella on pyritty optimoimaan tehokkaiden sirpaleiden määrä ja muoto. Tykistökranaattien ongelmana on lähinnä rakenteellisten lujuusominaisuuksien puute ja tavallista kranaattia korkeammat tuotantokustannukset.

Kranaatin ammuskuoren sirpaloitumiseen vaikuttavat

- ammustäytteen laatu ja määrä
- ammustäytteen sytytyksen ohjelmointi
- kranaatin lataussuhde
- kuoriaineen ominaisuudet
- ammuskuoren muotosuureet sekä
- esisirpalointi.

Lisäksi kranaatin tehokkuuteen vaikuttavat mm

- sirpaleiden määrä ja koko
- sirpaleen lähtönopeus
- maalin ominaisuudet
- maaston tarjoama suoja ja
- räjähdysten sijainti maaliin nähden.

Kranaatin kehittely- ja suunnitteluprosessissa olisi ensimmäiseksi määritettävä kranaatin vaikutustehokkuus ja sen jälkeen tätä tulee käyttää yhdessä muiden suunnitteluparametrien kanssa määritettäessä kranaatin optimimittasuhteita.

Esitettävien vaatimusten perustaksi selvitetään ensiksi sirpaloitumisen mekaniikkaa ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä sirpaleiden vaikutusmekanismeja yleisesti käytettyjen ajatusmallien ja matemaattisten yhtälöiden perusteella. Tarkastelussa keskitytään uusimpiin ja muualla maailmassa käytettäviin teorioihin ja matemaattiseen mallintamiseen. Eräissä kohdin käsittelyssä turvaudutaan vanhaan ja käyttökelpoiseen mallintamiseen uuden aineiston puuttumisen tai vaikean manuaalisen käytön vuoksi. Käsittelyssä keskitytään lähinnä luonnollisen sirpaloitumisen tarkasteluun.

Kranaattien sirpaloitumiselle asetettavat vaatimukset on mallinnettu matemaattisesti muutamilla parametreillä, jotka ovat osoittautuneet teoreettisessa tarkastelussa

merkittäviksi. Vaatimukset on konkretisoitu erilaisilla taulukoilla ja kuvaajilla. Kukin vaatimus on käsitelty itsenäisenä tarkasteluna. Näiden yksityiskohtaisten vaatimusten perusteella on määritetty tehokas sirpale ja kranaatti. Vaatimusten määrittämisen perustana olevien matemaattisten mallien ja kaavojen varsin huomattavat virherajat tulee ottaa huomioon, kun tuloksia tarkastellaan ja varsinkin, kun niitä verrataan yksittäiseen koetulokseen.

1 SIRPALOITUMINEN

1.1 Sirpalevaikutteisen kranaatin sirpaloituminen

1.1.1 Luonnollinen sirpaloituminen¹⁾

Räjähdysaineen räjähtäessä sirpalekranaatin kuorimassa saatetaan nopeasti kiihtyvään liikkeeseen kranaatin symmetria-akselista ulospäin. Sirpalemassan kiihtyvän liikkeen keskeisin vaihe tapahtuu kranaattikuoren pysyessä edelleen koossa. Kranaatin kuori turpoaa ja ohenee räjähdyskaasujen laajetessa. Räjähdysaineen epähomogeenisuus ja onkalot aiheuttavat kuoren epäsäännöllisen ja liian aikaisen rikkoutumisen.

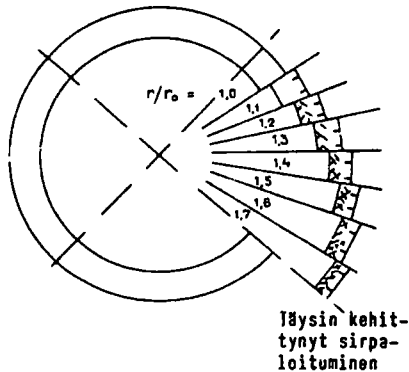
Kuoreen kohdistuu voimakas isku, kun räjähdysaalto kohtaa räjähdysaineen ja kuoren rajapinnan. Isku välittyy kuoressa ulospäin ja antaa sirpaloituvalla massalla tietyn nopeuden. Kun iskuaalto kohtaa kuoren ja ilman rajapinnan, se heijastuu takaisin kuoreen aaltoheijastumana, joka osaltaan lisää edelleen kuorimateriaalin laajenemisnopeutta. Tässä yhteydessä kuorikerrostumissa esiintyy radiaalista vetojännitystä. Kun vetojännitys ylittää kuorimateriaalin murtolujuuden, on yleensä seurauksena kuoren murtuminen.

Kun kuori laajenee, tulevat paikalliset venymät kuoren uloimmassa osassa niin suuriksi, että kuoreen syntyy tangentiaalisen vetojännityksen aiheuttamia murtumia. Murtumien laajeneminen saavuttaa hetkessä täyden leviämisenopeuden, joka on 50—70 % äänennopeudesta kuorimateriaalissa. Syntyneen halkeaman laajetessa edelleen purkautuu tangentiaalinen jännitys sen ympärillä olevasta kuoren osasta ja näin estyy uusien murtumien muodostuminen. Kun halkeama tunkeutuu kuorimateriaalissa sisäänpäin, se kohtaa hydrostaattisen paineen, joka pysäyttää pystyvästi tai tilapäisesti halkeaman etenemisen.

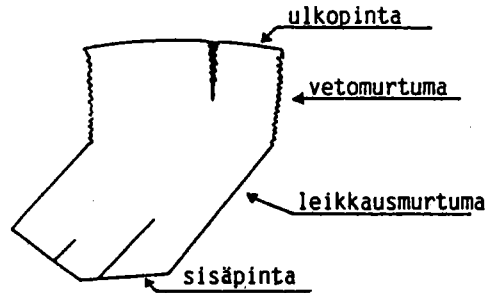
Kun laajenemistapahtuma on edennyt niin pitkälle, että radiaalisten halkeamien laajeneminen on pysähtynyt, jatkaa kuori taas laajenemistaan. Kuorimateriaali deformoituu maksimileikkauksjännityksen suuntaisia liukuviivoja pitkin, jotka ovat 45° kulmassa säteeseen.

Kranaatin sisältä tulevat leikkaushalkeamat voivat haarautua tai ne saattavat yhtyä. Luonteenomaista on kuitenkin, että ne aina noudattavat maksimileikkauksjännityksen suuntaa (kuva 1). Kuvassa 2 on luonnosteltu terässirpaleen tyypillinen ulkomuoto. Kuvasta voidaan nähdä sirpaleessa alue, jossa vetomurtuminen on tapahtunut säteen suuntaisesti.

Kun kuori on ohut, paine tasaantuu siinä nopeasti. Silloin kuoren uloin osa ei ehdi venyä riittävästi eikä vetomurtumisen aiheuttamia halkeamia esiinny, tai ne jäävät äärimmäisen pieniksi. Tällöin leikkausmurtumien liukuviivat ulottuvat lähelle ulkopintaa ja leikkausmurtuminen tapahtuu melkein koko kranaattikuoren paksuudelta.



Kuva 1. Sirpaloitumisen kehittyminen.



Kuva 2. Sirpalekranään terässirpaleen tyypillinen ulkumuoto.

Kun sisältä ja ulkoa tulevat halkeamat ovat tunkeutuneet koko kuoren läpi ja kohtaavat, on sirpaloituminen tapahtunut kokonaan. Räjähdyksaasut virtaavat nopeasti ulos kuoresta ja ohi muodostuneiden sirpaleiden.

On kuitenkin muistettava, että tapahtuman kulku on dynaaminen ja esitetty kuvaus on näin ollen voimakkaasti pelkistetty. Itse asiassa tapahtuman kulun tarkassa kuvaamisessa esiintyy huomattavia ongelmia.

1.1.2 Ohjattu sirpaloituminen²⁾

Kuorimateriaalin, räjähdysaineen ja kuoren ulkomittojen sopivalla valinnalla voidaan kranään sirpaleiden massajakautuma muodostaa mahdollisimman tehokkaaksi. Vaikka näitä luonnollisen sirpaloitumisen mahdollisuuksia hyödynnetään maksimaalisesti, muodostuu kuitenkin suuri määrä tarpeettoman suuria sirpaleita. Jos sirpaloitumista tehostetaan liikaa, lisääntyy tehottomien, liian pienten sirpaleiden määrä merkittävästi. Homogeenisen kuoren huomattava etu on sen lujuus. Se mahdollistaa sirpaleelle suuremmat lähtönopeudet kuin vastaava esisirpaloitu kuori. Siksi onkin yritetty eri keinoin vaikuttaa homogeenisen kuoren sirpaloitumiseen vahingoittamatta sen edullisia ominaisuuksia.

Ohjatulla sirpaloitumisella tarkoitetaan sirpalekranään kuoren käsittelemistä siten, että kuori saadaan sirpaloitumaan halutulla tavalla. Tähän päästään joko käyttämällä suunnattua räjähdysvaikutusta tai iskuaallon keskittämistä tai muokkaamalla kuoren sirpaloitumisominaisuuksia. Sirpaloituminen riippuu kuitenkin kuoren materiaaliominaisuuksista.

1.2 Sirpaleiden massajakautuma ja lukumäärä

1.2.1 Luonnollisen sirpaloitumisen massajakautuma

Sirpaleiden massan kumulatiivisen jakautuman oletetaan nuodattavan riippuvuutta

(1)

$$M(m_{s1}) = m_s (m_{s1} < m_s < \infty) = M_0 \times e^{-\gamma \times m_{s1}^{3/4}}$$

missä m_s on sirpaleen massa [kg], $M(m_{s1}) = m_s(m_{s1} < m_s < \infty)$ on niiden sirpaleiden massa, joiden massa on suurempi kuin m_{s1} , M_0 on kaikkien sirpaleiden massojen summa eli kokonaissirpalemassa ja γ [kg⁻¹] on sirpaloitumisluku. Sirpaloitumisluvun käänteisluku ($1/\gamma$) ilmoittaa massan, jota keveämpiä sirpaleita on 63.2 % saadusta sirpalesaaliista.

Sirpaloitumisluvun (γ) arvo riippuu kranaatin mittasuhteista, muodosta, materiaaliominaisuuksista ja räjähdysainemäärästä. Kaava (1) on määritetty lähinnä sirpaleille, joiden massa (m_s) on 0.5 g, mutta se pitää paikkansa varsin tarkasti myös sirpaleilla, joiden massa (m_s) on pienempi kuin 0.5 g. Kaava (1) kuvaa myös jokaisen kranaatin osan sirpaloitumista ja antaa tällöin tietenkin erilaisia arvoja.⁵⁾ Käyttämällä yhtälöitä 2—4 voidaan sirpaloitumisluvun (γ) avulla esittää myös niiden sirpaleiden lukumäärä, joiden massa on suurempi kuin m_{s1} .

$$(2) \quad N(m_{s1}) = \gamma \times M_0 \int_{m_{s1}}^{\infty} \frac{e^{-\gamma \times x}}{x} dx,$$

jossa integraalilauseke ei ratkea suljetussa muodossa. Yhtälö voidaan kirjoittaa edelleen muotoon

$$(3) \quad N(m_{s1}) = \frac{M_0}{m_{s1}} \times f(\gamma m_{s1}),$$

jossa $N(m_{s1}) = N(m_{s1} < m_s < \infty)$

= niiden sirpaleiden lukumäärä, joiden massa $m_s > m_{s1}$,

ja

$$(4) \quad f(\gamma m_{s1}) = \gamma \times m_{s1} \times \int_{\gamma \times m_{s1}}^{\infty} \frac{e^{-m_s}}{m_s} dm_s,$$

jolloin $f(\gamma m_{s1})$ arvot saadaan esimerkiksi erityisistä graafisista käyristä.

Sirpaloitumisluvun (γ) lisäksi käytetään sirpaloitumisvakiota (γ_0) kuvaamaan sirpaloitumista. Sirpaloitumisvakio (γ_0) riippuu vain räjähdysaineen ja kranaatin kuorimateriaalin ominaisuuksista, mutta sen arvo ei riipu kranaatin mittasuhteista (yhtälö 5).

$$(5) \quad \gamma_0 = \gamma \times e^{(26.4 \times d_u + 15.8 \times \frac{t_k}{d_u})}$$

jossa

$$d_u = \text{ammuskuoren ulkohalkaisija [m]}$$

$$t_k = \text{ammuskuoren paksuus [m]}$$

Tyypilliseksi puristetun teräskranaatin sirpaloitumisvakioksi on saatu $\gamma_0 = 15 \times 10^1$ [kg⁻¹]. Poikkeamat γ_0 -arvoissa johtuvat ensi sijassa kranaattiteräksen muokkaamisesta ja lämpökäsittelystä. Kun tunnetaan kranaattiteräksen ja räjähdysaineen määrittämä γ_0 -arvo ja käytetään kranaatin mittasuhteiden (d_u ja t_k) arvoja, voidaan määrittää kranaatin sirpaloitumisluvun (γ) oletusarvo.

Esitetyt yhtälöt 1—5 perustuvat koetuloksiin. Matemaattisesti määritetyissä arvoissa saattaa kuitenkin esiintyä melko huomattavia eroavuuksia verrattuna kokeissa saatuihin tuloksiin. Näitä eroja esiintyy erityisesti uudemmilla kuorimateriaaleilla ja pienikaliiperisilla kranaateilla.

Kranaatin kuorimateriaalin ja räjähdysainetäytteen ominaisuudet vaikuttavat ratkaisevasti sirpaloitumiseen ja massajakautumaan. Teräskranaateilla sirpaleiden keskimääräinen massa pienenee ja sirpaleiden lukumäärä kasvaa, kun kuorimateriaalin sitkeys pienenee ja myötörajasuhde suurenee. Teräskranaatin kuorimateriaalin murtovenymä vaikuttaa sirpaloitumiseen ja sirpaleiden massajakautumaan⁶⁾. Nykyisten teräskranaattien minimimurtovenymä (δ_s) on rakennepiirustuksissa ja vastaanottovaatimuksissa yli 8 %:sta yli 15 %:iin. Näin suuri minimimurtovenymä aiheuttaa sen, että sirpaloitumisen laajenemisvaiheessa kranaattikuori pirstoutuu pitkittäissuuntaisesti kapeisiin, pitkiin sirpaleisiin. Suuri murtovenymä estää pitkien sirpalesuikaleiden murtumisen poikittaissuuntaisesti ja heikentää täten sirpaloitumista sekä sirpaloitumisen massajakautumaa⁷⁾.

1.2.2 Esisirpaloitujen kranaattien sirpaleiden massajakautuma

Esisirpaloidun kranaatin sirpaleet on valamalla tai työstämällä valmistettu muodoltaan ja kooltaan edullisiksi jo ennen kranaatin räjähtämistä. Valmiiksi muotoiltujen sirpaleiden käytöllä saavutetaan melkein 100 % sirpaloitumisen hallinta, koska sirpaleiden rikkoutuminen tai hitsautuminen toisiinsa ja kuoren osiin räjähdyksessä on pientä.

Esisirpaloitujen kranaattien sirpaleina voidaan käyttää esimerkiksi kuution muotoisia teräspalasia, pyöreitä teräskuulia tai flechettejä. Sirpaleiden kiinnittäminen kranaattirunkoon vaatii yleensä lisärakenteita, jolloin käytettävän räjähdysaineen tilavuus pienentyy ja määrä vähentyy optimista. Ballistisena kuorena käytetään yleensä ohutta kylmävedettyä teräspeltikuorta. Kranaatinheitinmestön ammusrakenneratkaisuna onkin esisirpaloiduilla kranaateilla saavutettu merkittävä sirpaloitumistehokkuuden lisäys ja massajakautuman parannus.

Heikon lähtörasituskeston lisäksi esisirpaloitujen kranaattien merkittävin heikkous on kallis ja teolliseen valmistukseen liian monimutkainen rakenne. Massamaisesti valmistettunakin yksityisen kranaatin hinta on moninkertainen verrattuna muihin rakenneratkaisuihin.

1.2.3 Ohjatun sirpaloitumisen massajakautuma

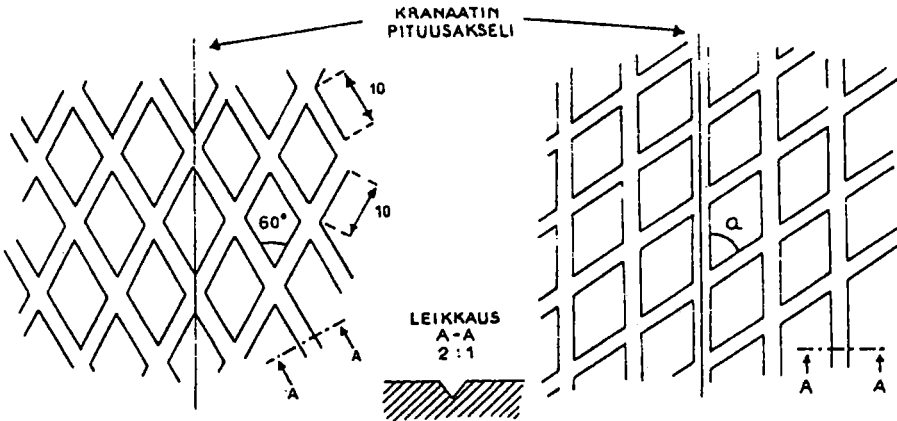
Ohjattu sirpaloituminen on yksi tapa lisätä sirpaleknaatin tehoa. Ohjatulla sirpaloitumisella saadaan sirpaleiden koko optimoitua, voidaan käyttää sirpalemuotoja, jotka ovat ilmanvastuksen kannalta edullisimpia, ja näin voidaan lisätä kranaatin tehokasta vaikutusala huomattavasti.

Lovitettu teräsrenkaat ja lovitettu teräsnauha tai -lanka ohuen teräspeltikuoren sisällä on osoittautunut varsin tehokkaaksi sirpaloitumisen tehostamiskeinoksi. Kokeiluissa on todettu tehokaidn sirpaleiden vaikutussäteen olevan kaksinkertainen verrattuna vastaavaan tavalliseen kranaattiin. Lovetus on todettu tehokkaammaksi, kun se on renkaiden ulkopinnalla.⁹⁾ Viimeaikaisissa tutkimuksissa on todettu, että myös kuoren sisäpuolinen epäsymmetrinen lovimuoto ohjaa tehokkaasti kranaatin sirpaloituvan kuoren sirpaloitumista⁹⁾.

Ammusteräksisen tai valurautaisen kranaattikuoren urittaminen sisä- tai ulkopuolelta on myös yksi tapa ohjata ja tehostaa kranaattien sirpaloitumista. Teräskranaateille uritus voidaan tehdä työstämällä ja valurautakranaateille valun yhteydessä. Sisäpuolelta koneellisesti uritetulla kranaatilla on kokeissa saatu suunnittelusta sirpale-määrästä noin 89 % tehokkaiksi sirpaleiksi⁹⁾. Tutkimukset ovat osoittaneet, että uran muoto vaikuttaa merkittävästi sirpaloitumiseen. Epäsymmetrinen, noin 1.1 mm syvä, sisäpuolinen ura on osoittautunut tehokkaaksi sirpaloitumisen ohjaajaksi⁹⁾. Sisäpuolilla valetulla urituksella kyetään ohjaamaan sirpaloitumista siten, että noin 80 % sirpaleista saadaan halutun suuruisiksi⁹⁾.

Parhaaksi uritusmuodoksi on todettu ristikkäinen ulkopuolinen uritus, jossa yksi urien suunta yhtyy ammuksen akselin suuntaan¹⁰⁾ (kuva 4).

Tehokkaiden sirpaleiden lukumäärään on saatu jopa 15 % lisäys käyttämällä esitettyä ristikkäistä uritusta kranaattikuoren ulkopinnalla.¹¹⁾



Kuva 3.
Kranaatin ulkopinnan ristikkäinen uritus 1¹²⁾.

Kuva 4.
Kranaatin ulkopinnan ristikkäinen uritus 2¹⁰⁾.

Kranaattikuoren ulkopuolisen urituksen käytön suurimpana esteenä lienee urituksen vaikutus kranaatin ballistisiin ominaisuuksiin.

Kranaattikuorien sirpaloitumista voidaan ohjata myös muotoilemalla räjähdysainetäytettä, muodostamalla kuoren ja räjähdysaineen väliin erilaisia ontelorakenteita tai puskurikerrosrakenteita. Tällaiset sirpalekranaattien rakenteet ovat kalliita ja suurimittakaavaiseen teolliseen valmistukseen heikosti sopivia. Tämän vuoksi en tässä kirjoituksessa tarkastele näiden rakenteiden sirpaloitumista.

1.3 Sirpaleiden nopeus

1.3.1 Lataussuhde

Kranaatin räjähtäessä antavat purkautuvat räjähdyskaasut sirpaleille ensimmäisen 0.1—0.3 m matkalla lähtönopeuden, joka on 1 000—1 500 m/s. Sirpaleiden lähtönopeuteen ja kiihtyvyyteen vaikuttavat mm. kranaatin muoto, räjähdysaineen laatu ja lataussuhde.

Kranaatin lataussuhde on käsiteltävänä olevan räjähdysainekaistaleen massan suhde vastaavaan kuoren kaistaleen massaun, kun kaistaleet ovat leikatut kohtisuoraan kranaatin akselia vastaan. Lataussuhteen yhtälöksi on saatu

$$(6) \quad \frac{m_r(z)}{m_k(z)} = \frac{1}{2} \times \mu = \frac{C}{M},$$

jossa

$m_r(z)$ = kranaatin räjähdysainekaistaleen massa
(etäisyydellä z) kg

$m_k(z)$ = kranaatin kuorikaistaleen massa (etäisyydellä z) kg

μ = FOA:n käyttämä lataussuhde

$$\frac{C}{M} = \text{Gurneyn lataussuhde} \left[= \frac{m_r(z)}{m_k(z)} \right]$$

1.3.2 Sirpaleen lähtönopeus

Sirpaleiden irtoamisnopeudelle on kehitetty useita kokemusperäisiä kaavoja. Nämä määritetyt kaavat (7—11) pätevät kuitenkin lähinnä vain trotyyliin.

$$(7) \quad \text{— Belousov:} \quad v_0 = \sqrt{\frac{100 \times \mu}{1.65}} \times 10^5$$

$$(8) \quad \text{josta edelleen} \quad v_0 = 2461.8 \times \sqrt{\mu}$$

$$(9) \quad \text{— Bofors: (1)} \quad v_{2.5} = 360 + 4500 \times \mu$$

$$(10) \quad \quad \quad (2) \quad v_5 = 310 + 5235 \times \mu$$

$$(11) \quad \text{FOA:} \quad v_0 = 589 + 3193 \times \mu$$

Sirpaleen lähtönopeudelle on FOA:ssa kehitetty täysin koetuloksiin perustuvat yhtälöt, jotka pitävät paikkansa myös muilla räjähdysaineilla. Yhtälöt on määritetty pyörähdyssymmetrisille, lähinnä sylinterinmuotoisille esineille ja ovat riippuvaisia lataussuhteen arvosta (yhtälöt 12 ja 13)^{14, 15)}.

$$(12) \quad v_{0L} = \frac{v_{00}}{k_1} \times \left[1 - e^{-\left(k_1 \times 2 \times \frac{C}{M}\right)} \right]$$

$$\text{kun} \quad \frac{C}{M} \gtrsim 0.25 \text{ ja}$$

$$(13) \quad v_{0L} = \frac{v_{00}}{k_1} \times \left[1 - e^{-\left(k_1 \times \frac{C}{M}\right)} \right]$$

$$\text{kun} \quad \frac{C}{M} \gtrsim 0.5.$$

Näissä

k_1	= kerroin (ns. reunaehtoparametri) ($k_{\min} = 0.5-0.8$)	
	= 1.0—1.2 (yleisesti)	
v_{00}	= räjähdysainekohtainen kokeellisesti määritetty vakio	
	— valettu trotyyli	$v_{00} = 2300 \text{ m/s}$
	— valettu heksotoli (50/50)	$v_{00} = 2300 \text{ m/s}$
v_{0L}	= sirpaleen lähtönopeus (v_0) Lundbergin (FOA) mukaan	
	[m/s]	

FOA käyttää kaavojen (12 ja 13) lisäksi täysin koetuloksiin perustuvia sirpaleiden lähtönopeusarvoja. Sirpaleiden lähtönopeudet on määritetty kranaateille lataussuhteen funktiona ja arvot on esitetty graafisena käyrästäönä kuvassa 5.

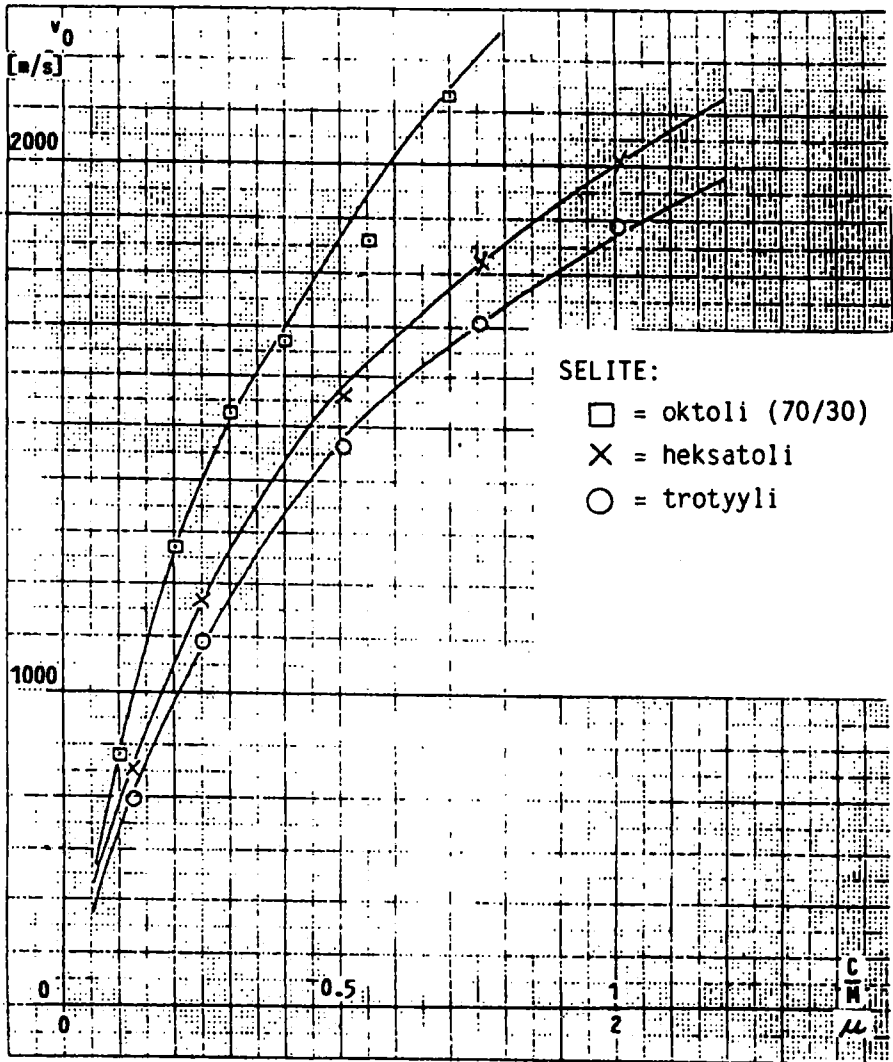
Gurney on esittänyt sirpaleen lähtönopeudelle yhtälön (14), joka on riippuvainen vain lataussuhteesta ($\frac{C}{M}$) ja kokeellisesti määritetystä räjähdysaineparametristä

$$\sqrt{2 \times E_G}$$

Gurneyn kaavassa (14) tarvitaan vain yksi kokeellisesti määritettävä parametri

$$\sqrt{2 \times E_G}$$

Kun käytössä ei ole mainitun parametrin arvoa, voidaan E_G :n sijasta käyttää räjähdysaineen ominaisenergian (E_R) arvoa sirpaleen lähtönopeuden suuruusluokan määrittämiseksi.¹⁶⁾



Kuva 5. Sirpaleiden lähtönopeudet lataussuhteen funktiona

$$(14) \quad v_{0G} = \sqrt{2 \times E_G} \times \sqrt{\frac{\frac{C}{M}}{1 + 0.5 \times \frac{C}{M}}}$$

jossa $\frac{v_{0G}}{\sqrt{2 \times E_G}}$ = sirpaleen lähtönopeus (v_0) Gurneyn mukaan [m/s]
 = kokeellisesti määritetty räjähdysainekohtainen Gurneyn parametri [m/s].

Matemaattisesti määritettyjä sirpaleiden lähtönopeusarvoja on verrattu kokeellisesti saavutettuihin tuloksiin. Tuloksista on todettu, että Gurneyn kaavalla (14) lasketut lähtönopeudet kuvaavat varsin tarkasti kokeellisesti saavutettuja lähtönopeuksia. FOA:n yhtälöillä (12 ja 13) matemaattisesti määritetyt arvot taas poikkeavat koeammunnoissa saavutetuista tuloksista kertoimen epämääräisyyden ja epälineaarisuuden vuoksi.

Sirpaleiden nopeusmittausten tulokset saattavat kuitenkin olla jonkin verran harhaanjohtavia. Lähes kaikissa mittauksissa on mitattu vain nopeimpia sirpaleita, jotka syntyvät räjähdyskaasujen ulospurkautumisen yhteydessä, ja joiden nopeudet ylittävät odotetut arvot 200—300 m/s.

Räjähdysaineen laadun vaikutus sirpaleiden lähtönopeuteen on Gurneyn (14) ja FOA:n yhtälöissä (12 ja 13) otettu huomioon erillisellä kertoimella, joka on Gurneylla $\sqrt{2} \times E_G$, ja FOA:lla v_{00} . Koetuloksien perusteella voidaan ilmoittaa sirpaleiden suhteelliset lähtönopeudet jonkin tunnetun räjähdysaineen suhteen. Yhdysvalloissa ilmoitetaan arvot yleensä heksotolin (60/40) suhteen, jolloin trotyylin suhdeluku on 0.92.¹⁸⁾ Suomessa taas ilmoitetaan räjähdysaineiden detonaationopeudet trotyylin suhteen.

FOA:n suorittamissa tutkimuksissa on todettu trotyytililla ja heksotolilla (60/40) sirpaleiden lähtönopeusarvojen erojen olevan 15—20 %, ja heksotolin (60/40) ja oktolin (70/30) välinen ero on noin 10 %.¹⁹⁾

1.3.3 Sirpaleen nopeuden hidastuminen ilmassa

Epädullisen muotonsa takia sirpale menettää lentonopeutensa varsin nopeasti. Varsin yleisesti käytetyn sirpaleennopeutta kuvaavan yhtälön perustana on ilmanvastuslaki (yhtälö 15).

$$(15) \quad m_s \ddot{x} = -D = - \frac{c_w \times \rho_{ilma} \times A \times \dot{x}^2}{2} \quad 21, 22)$$

Tämä differentiaaliyhtälö on yleisessä muodossa mahdoton ratkaista, koska ilmanvastuskerroin (c_w) on riippuvainen x :stä. Kuitenkin on kyetty riittävän tarkasti ratkaisemaan yhtälö, kun sirpaleen nopeusalue on jaettu kahteen osaan $M = 0—0.9$ ja $M = 0.9—\infty$. Tässä M on Machin luku ($M = \frac{\dot{x}}{c}$), kun c on äänen nopeus ilmassa.

Sirpaleen nopeuden hidastuminen ilmassa riippuu ilmanvastuksesta, kuten yhtälöstä 16 voidaan todeta. Ilmanvastuksen (c_w) suuruuteen vaikuttavat mm sirpaleen muoto, nopeus ja asento sekä ilman tiheys. Sirpalekranataan sirpaleen ilmanvastuskertoimen (c_w) epämääräisyys ja lähes 30 %:n virhe²²⁾, aiheuttavat yhtälöllä 16 laskettuihin arvoihin jopa yli 30 %:n kokonaisvirheen.

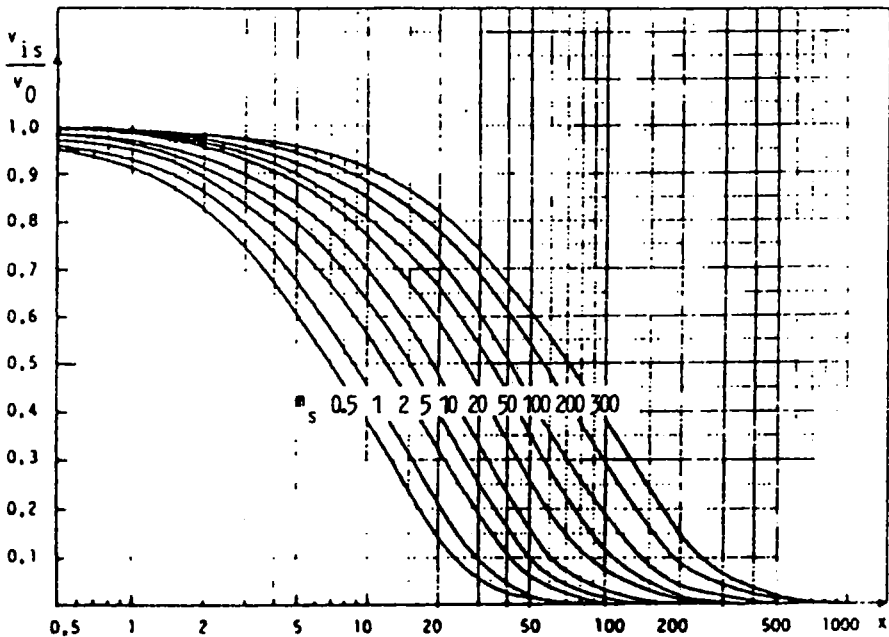
$$(16) \quad v(x) = v_0 \times e^{-\frac{k}{\sqrt[3]{m_s}} \times x}$$

Yhtälön 16 ratkaisemiseksi on kertoimelle k määritetty kokeellisesti numeraaliset arvot. Erilaisilla sirpalemuodoilla ja erilaisilla sirpalemateriaaleilla on saavutettu kertoimelle k taulukossa 1 esitettyjä arvoja.

Taulukko 1. Kertoimen k arvoja, kun sirpaleen materiaalina on teräs ($\rho_k = 7800 \text{ kg/m}^3$)²³⁾.

Sirpalemuoto	Nopeusalue	
	M=0—0.9	M=0.9—10
Pallo	0.000947	0.001798
Kuutio	0.001992	0.002736
Sylinteri (d=h)	0.001794	0.002436
Sirpalekranaatin sirpale	0.00264	0.00456

Sirpaleen nopeuden hidastuminen tiettyyn osaan sen alkuperäisestä lähtönopeudesta voidaan esittää myös graafisesti käyrästä (kuva 6).



Kuva 6. Terässirpaleen hidastuminen ilmassa lentomatkan funktiona.

2 SIRPALEKRANAATIN SIRPALEIDEN VAIKUTUSMEKANISMIT

2.1 Eräitä sirpaleen tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä

2.1.1 Jäännösnopeus ja -massa

Sirpaleen jäännösnopeus on se nopeus, joka sirpaleella on sen läpäistyä maalia suojaavan panssaroinnin. Jäännösnopeudella on siten keskeinen osa tarkasteltaessa sirpaleen iskuenergiaa ja tehokkuutta.

Kun käsitellään sirpaleen läpäisykykyä, on syytä muistaa, ettei ole tarkkaa nopeuden raja-arvoa, jota suuremmilla nopeuksilla läpäisy tapahtuu varmasti. Myöskään ei ole tarkkaa nopeuden alarajaa, jolloin läpäisyä ei tapahdu. Voidaan paremminkin puhua nopeusalueista, joilla läpäisy saattaa tapahtua tai olla tapahtumatta²⁴⁾. Kuitenkaan läpäisy sinänsä ei ole mikään tehokkuuskriteeri. Mielenkiintoa on nimenomaan sillä, että onko läpäisevällä sirpaleella riittävästi jäännösnopeutta ja jäännösmassaa vaurioittaakseen tai vahingoittaakseen varsinaista maalia. Jäännösnopeuden määrittäminen on yhteydessä jäännösmassan määrittämiseen, joten niiden matemaattinen määrittäminen muodostaa kokonaisuuden.

Sirpaleiden jäännösnopeuksia (v_j) on mitattu erilaisilla maalimateriaaleilla. Näistä tiedoista on kullekin materiaalille muodostettu kokemuseräiset eksponentit eli Thorin vakiot jäännösnopeuden (v_j) määrittämiseksi Thorin yhtälöillä. Jäännösnopeus voidaan määrittää mm. yhtälöllä 17, ja Thorin vakiot muutamalle tärkeämmälle maalimateriaalille ovat taulukossa 2. Yhtälö (17) on voimassa kuution- ja sylinterinmuotoisille sirpaleille, joiden pituus—halkaisija -suhde on pienempi kuin 3 ja kirjallisuustietojen mukaan em. eksponentit on määritetty ainakin 17 erilaiselle maalimateriaalille.²⁵⁾

$$(17) \quad v_j = v_{is} - 10^{c^*} \times t_m^\alpha \times m_s^{\beta^*} \times (\sec v)^\kappa \times v_{is}^\lambda,$$

jossa v_j = jäännösnopeus [ft/s]
 v_{is} = iskunopeus [ft/s]
 t_m = maalilevyn paksuus [in]
 m_s = sirpaleen massa [grain]
 v = maalilevyn normaalin ja lentoradan välinen kulma
 $c^*, \alpha, \beta^*, \kappa, \lambda$ = vakioita, jotka ovat määritetyt kullekin materiaalille ominaisiksi (taulukko 2).

Taulukko 2. Thorin vakiot määritettäessä sirpaleen jäännösnopeutta (v_j)

Maalimateriaali	c^*	α	β^*	κ	λ
Alumiiniseos 2024 T-3	4.872	1.029	-0.386	1.251	-0.139
Valurauta	2.638	1.042	-0.356	1.028	0.523
Karkaistu teräs	2.931	0.674	-0.341	0.989	0.434
Kova homogeneeninen teräs	4.596	0.889	-0.352	1.262	0.019
Nailon kangas	4.672	1.144	-0.968	0.743	0.392
Lexan	1.387	0.720	-0.177	0.773	0.603
Jännitetty pleksilasi	1.255	1.112	-0.161	0.715	0.686
Luodinkestävä lasi	2.254	0.705	-0.253	0.690	0.465

Thorin yhtälöillä lasketaan myös sirpaleen jäännösmassa. Jäännösmassa (m_j) on maalin läpäisseen sirpaleen suurimman palasen massa. Pienillä iskunopeuksilla sirpaleiden massan väheneminen läpäisyn aikana on pientä eikä sitä yleensä oteta huomioon. Suurilla iskunopeuksilla sirpaleen rikkoutuminen on huomattavaa ja väistämätöntä eikä sitä tällöin voi jättää ottamatta huomioon.²⁶⁾ Yhtälöllä 18, jonka kokemus-

peräiset eksponentit ovat taulukossa 3, arvioidaan sirpaleen massan vähenemistä. Thorin yhtälöt (17—18) on sovitettu sellaisiksi, että sirpaleen, joka läpäisee ehjänä maalilevyn, oletetaan menettävän massastaan kuitenkin 0.06480 g:aa.²⁷⁾

$$(18) \quad m_j = m_S - 10^{C_1^*} \times t_m^{\alpha_1} \times m_S^{\beta_1^*} \times (\sec v)^{\kappa_1} \times v_{iS}^{\lambda_1},$$

jossa m_j = läpäisyn jälkeen suurimman sirpaleen massa [grain]

$C_1^*, \alpha_1, \beta_1^*, \kappa_1, \lambda_1$ = vakioita, jotka ovat määritetyt kullekin materiaalille ominaiseksi (taulukko 3)

Taulukko 3. Thorin vakiot määrittäessä sirpaleen jäännösmassaa (m_j)

Maalimateriaali	C_1^*	α_1	β_1^*	κ_1	λ_1
Alumiiniseos 2024 T-3	-7.142	0.227	0.845	-0.361	1.901
Valurauta	-10.046	0.162	0.782	2.091	2.710
Karkaistu teräs	-1.690	0.234	0.900	0.469	0.483
Kova homogeeninen teräs	-2.994	0.346	0.859	0.327	0.880
Nailon kangas	-13.676	0.035	0.799	0.045	3.451
Lexan	-7.288	0.480	0.785	1.171	1.765
Jännitetty pleksilasi	-6.267	0.437	0.460	0.620	1.683
Luodinkestävä lasi	-6.571	0.305	0.632	0.747	1.819

2.1.2 Sirpaletiheys ja osumatodennäköisyys

Sirpaleviuhkan keskimääräinen sirpaletiheys voidaan määrittää teoreettisesti koekuiluista saatujen tulosten perusteella. Kranaatin räjähtäessä syntyneiden sirpaleiden oletetaan jakaantuvan tasaisesti ympäröivään avaruuteen kranaatin symmetria-akselin suhteen. Poikkeuksen tähän symmetriaan aiheuttavat kranaatin kuoren symmetriysvirheet ja aloiteräjähdsyainen ja räjähdysen alkupisteen epäsymmetrinen sijoittuminen.

Tehokkaiden sirpaleiden tiheyden on esitetty noudattavan "jotain polynomifunktiota" etäisyyden funktiona.²⁸⁾ Tämän kirjoituksen tausta-aineistona olevan diplomityön yhteydessä tutkittiin kahta käyräsovitusta, jotka parhaiten näyttivät korreloivan sekä vanhojen että diplomityötä varten suoritettujen koeammuntojen tulosten kanssa. Käytetyistä käyräsovituksista geometrinen käyräsovitus osoittautui hiukan eksponenttisovitus paremmaksi. Korrelaatiokerroin oli molemmilla yli 0.9.

Sirpaleiden osumatodennäköisyys riippuu maalin koosta ja sirpaletiheydestä. Poisson-jakautumaa soveltaen voidaan laskea todennäköisyys sille, että saadaan ainaakin yksi osuma maaliin (kaava 19). Edelleen kyetään ratkaisemaan tarvittava sirpaletiheys (ρ_s), kun halutaan tietty osumatodennäköisyys (P_i) (kaava 20).²⁹⁾

$$(19) \quad P(i \geq 1) = 1 - e^{-\rho_s(x) \times A_h},$$

jossa $P_i - 1$ = todennäköisyys, että saadaan ainakin yksi osuma
 $\rho_i(x)$ = sirpaleitiheys etäisyydellä x [lk/m^2]
 A_h = maalin haavoittuva pinta-ala [m^2]

$$(20) \quad \rho_i(x) = - \frac{\ln(1 - P_i)}{A_h},$$

jossa P_i = haluttu osumatodennäköisyys

Kaavoissa 19 ja 20 tarvittavan suojautumattoman elollisen maalin haavoittuvan pinta-alan arvona on yleisesti käytetty arvoa 0.4 m^2 . Tämä on kuitenkin varsin karkea yleistys, joskin oikeansuuntainen. Suojautumattoman elollisen maalin haavoittuva pinta-ala riippuu mm maaston ja ympäristön tarjoamasta suojasta, maalin etäisyydestä räjähdyspisteestä ja kranaatin räjähdyskorkeudesta. Pintaräjähdyksessä haavoittuva pinta-ala kasvaa kaikissa tarkastelutapauksissa $0-3 \text{ m}$ etäisyyksillä 0.2 m^2 :stä 0.4 m^2 :iin ja alkaa sitten maaston tarjoaman suojan vuoksi vähentyä. Ilmaräjähdyksissä maalin haavoittuva pinta-ala on lähellä räjähdyspisteen maassa olevaa projektiopistettä alle 0.1 m^2 ja vasta 15 m etäisyydellä se kasvaa yli 0.2 m^2 :iin.

2.2 Sirpaleen vaikutus elävään voimaan

2.2.1 Eräitä kudoksen vaurion syntyyn vaikuttavia tekijöitä

Kudoksen tiheys on keskimäärin 700 kertaa suurempi kuin ilman. Tunkeutuessaan ilmasta kudokseen sirpale menettää vakavuutensa ja alkaa kääntyä pituusakselinsa ympäri. Yleensä sirpale käyttäytyy epästabiilisti jo ennen osumistaan ja tällöin iskukulma saattaa olla epäedullinen. Ballistisesti epäedullisen sirpaleen nopeus hidastuu kudoksessa nopeammin kuin luodin, jolla on sama massa. Niinpä sirpale luovuttaa energiansa nopeammin kuin luoti eikä tunkeudu niin syväälle kudokseen, mutta aiheuttaa suuremman pintahaavan kuin vastaavan massainen pallomainen ammus tai luoti.³⁰⁾

Hydrodynaaminen paineaalto edeltää sirpalettä, jonka nopeus on suurempi kuin 600 m/s . Paine leviää ympäröivään väliaineeseen sirpaleen liikeradalta. Voimakkaallakin paineaallolla saattaa olla vain vähän vaikutusta lihaksissa, luissa tai muissa kudoksissa, joiden tiheys pysyy muuttumattomana. Suhteellisen nestemäistä ja kokoonpuristumatonta kudosta sisältävissä elimissä paineaalto saattaa aiheuttaa elimen repeämisen tai pirstoutumisen. Tässä on yksi syy miksi hyvin nopeiden ammusten on toisinaan sanottu aiheuttavan räjähdystyyppisiä haavoja.³¹⁾

Sirpaleen suuren iskuenergian vuoksi syntyy painevaikutus ja kudos siirtyy syrjään sirpaleen edessä keula-aallon tavoin. Seurauksena on sykkivä haavaontelo, jonka maksimilaajuus on jopa 30 kertaa suurempi kuin sirpaleen koko. Tilapäinen ontelo syntyy 5 ms aikana, jonka jälkeen haavaontelo kutistuu pysyväksi ja näkyväksi. Painevaikutuksen takia voi vaurio ulottua kauas ja aiheuttaa monivammoja. Alipaine aiheuttaa kudoksessa imuvaikutuksen, jolloin haavaonteloon imeytyy infektiota aiheuttavaa ulkopuolista ainesta molempien aukkojen kautta.³²⁾ Sirpaleissa olevat räjähdyskaasujen jäänteet lisäävät merkittävästi kohteen kuolettavuusastetta.³³⁾

Kudosten tiheydellä on myös vaikutus vamman laajuuteen. Läpäistäkseen ihon sirpale tarvitsee yli 50 m/s nopeuden.^{34,35,36)} Mitä tiheämpää kudos on, sitä laajempi on

vaurio. Suurimmat vauriot syntyvät lihakseen, maksaan ja luuhun. Keuhkokudos kestää paremmin sirpaleen iskun aiheuttaman paikallisen vaikutuksen ja rintakehän läpäisemiseen sirpale tarvitsee nopeuden 170 m/s.³⁴⁾

2.2.2 Iskuenergiakriteerejä

Sirpaleen aiheuttama vamma syntyy elolliseen kudokseen, kun suuri energiamäärä vapautuu siinä. Sirpaleen energia on tyypillistä liike-energiaa. Liike-energian kaavasta todetaan, että suuri iskunopeus on tärkein energiamäärää lisäävä tekijä, koska liike-energia on suoraan verrannollinen iskunopeuden (v_{is}) neliöön. Teräskuulilla suorituksissa kokeissa on osoitettu varsin pitävästi, että tarvitaan iskunopeus $v_{is} \geq 52$ m/s, jotta kyetään läpäisemään ihmiskudos.

Viime vuosisadan loppupuolella kehitettiin eri maissa tappiokriteerejä, jotka perustuivat iskuenergiaan. Iskuenergiakriteerin arvo oli Ranskassa 39 J, Sveitsissä 62 J, Saksassa ja Yhdysvalloissa 78 J sekä Venäjällä 235 J. Gurneyn suorittamien kokeiden perusteella todettiin, että 78 J:n iskuenergia ”piti paikkansa” sirpaleilla, joiden massa (m_s) oli 0.05—30.0 g.³⁷⁾

Varsin pitkän aikaa uskottiin, että esine, jolla oli noin 80 J kineettistä energiaa, kykeni aiheuttamaan riittävän merkittäviä vammoja osuessaan ihmisen kehoon.³⁸⁾ Ranskalaiset kehittivät kineettisen energian tappiokriteeriä siten, että siinä otetaan huomioon sirpaleen kohteeseen vaikuttava pinta-ala. Tämän kriteerin mukaan sirpale on tehokas, kun sillä on 1,5 J:n läpäisyenergia sirpaleen vaikutusalan mm²:ä kohti, silloin kun kohteena on suojaton ihmiskeho.^{38,39)} Tämä merkitsee sitä, että sirpaleella tulee olla jäljellä 1.5 J kineettistä energiaa jokaista kohteeseen vaikuttavan poikkipinta-alansa mm²:ä kohti, jotta sirpale olisi tehokas tekemään toimintakyvyttömäksi kohteena olevan suojattoman ihmisen.

2.3 Sirpaleen vaikutus kovaan, panssaroituun maaliin

2.3.1 Sirpaleen tunkeutuminen teräkseen ja teräksen läpäisykyky

Tavallisimmat sotilaalliset rakenne- ja suojamateriaalit ovat metallia, lähinnä terästä. Käytännössä esiintyvien sirpalemateriaalien, iskunopeuksien ($v_{is} < 2\ 000$ m/s) ja maalimateriaalikombinaatioiden vuoksi on tärkeitä tietää, että useimmin esiintyvien teräs-panssarointien teräksien kovuus on keskitasoa.⁴⁰⁾ Tällöin teoreettisessa vaikutusprosessitarkastelussa on käsiteltävä sekä elastis-plastisia voimia että hitausvoimia.

Yleensä normaalilla täyskaliiperipanssariammuksella, jopa sirpaleella, on keskimäärin yhden kaliiperin tunkeutumiskyky em keskitason panssarointeihin. Kun isku tapahtuu vinosti maalipintaan, on häiriöiden vaikutus sirpaleen tunkeutumiskykyyn merkittävän suuri. Sirpale läpäisee metallisen maalin yleensä leikkautumalla, koska sirpaleella on suhteellisen suuri nopeus ja sen muoto on tunkeutumiselle epäedullinen.

Yleensä läpäisyä kuvaavat yhtälöt ilmaisevat läpäisyyn tarvittavan miniminopeuden ja maalin paksuuden riippuvuuden sirpaleiden liikesuunnasta. Läpäisy tai tunkeutumisen aikana tapahtuvista maalin kokonaispysäytysvoimien muutoksista on muodostettu matemaattisia yhtälöitä, jotka integroimalla ja tietyin reunaehdoin täy-

dennettynä antavat läpäisyyn tarvittavan miniminopeuden eli läpäisyn rajanopeuden (v_R).

Teoreettisessa käsittelyssä ja mallintamisessa voidaan terässirpale riittävän tarkasti olettaa samanmassaiseksi teräspalloksi. FOA käyttää Rilben tutkimuksiin⁴¹⁾ perustuen massiivisten ammusten ja sirpaleiden läpäisykykyä kuvaavina yhtälöinä yhtälöitä 21 ja 22.

$$(21) \quad \frac{t_m}{\sin \alpha_{is}} = \theta_R \times v_{is} \times \sqrt[3]{m_S}$$

ja edelleen rajanopeudelle

$$(22) \quad v_{gR} = \frac{t_m}{\theta_R \times \sqrt[3]{m_S} \times \sin \alpha_{is}}$$

jossa

v_{gR}	= rajanopeus Rilben mukaan [m/s]
v_{is}	= iskunopeus [m/s]
t_m	= maalilevyn paksuus [m]
θ_R	= Rilben kerroin [s/kg ^{1/3}]

Näissä Rilben yhtälöissä (21 ja 22) esiintyvä kerroin θ_R on kokeellisesti määritettävä sirpaleiden ja panssarimateriaalien erilaisille kombinaatioille. Taulukossa 4 on esitetty Rilben määrittämät kertoimet θ_R -arvot ja niiden todennäköiset virherajat. Arvot ilmaisevat kuitenkin lähinnä Rilben kertoimen θ_R suuruusluokan.

Taulukko 4. Rilben kertoimen (θ_R) arvoja ja niiden tarkkuudet eri materiaaleilla^{42,43)}

Kuula	Maalilevy	$\theta_R \times 10^{-6}$ [s/kg ^{1,3}]	
		panssari (KAF 415-8)	pehmeä teräs (SIS 1311)
Kova teräskuula		52 (+ 3 %)	56 (+ 5 %)
Raskasmetallikuula (wolfram)		70 (+ 3 %)	77 (+ 5 %)
Sirpalekranaatin terässirpale		29 (+ 15 %)	39 (+ 5 %)

Sirpaleen tunkeutuminen teräslevyyn on erittäin vaikea tarkasti ja matemaattisesti mallintaa, koska siihen vaikuttavat niin monet olosuhteista riippuvat reunaehdot. On tehtävä runsaasti yleistyksiä. Koetuloksia tarkasteltaessa on muistettava, että sirpaleet, jotka samanaikaisesti osuvat maalilevyyn hyvin lähekkäin, vaikuttavat toistensa läpäisykykyyn. Sirpaleiden tunkeutuminen helpottuu ja läpäisykyky tulee suuremmaksi kuin yksittäisellä sirpaleella.⁴⁴⁾

2.3.2 Sirpaleen tunkeutuminen ja vaikutusmekanismit komposiittipanssareihin

Komposiittipanssari on ballistisesta kuitukankaasta valmistettu, useita kangaskerroksia käsittävä panssarisysteemi, jossa kangaskerrokset on laminoitu yhteen hartseja

(esimerkiksi polyesterihartseja) matriisimateriaalina käyttäen. Tässä tarkastelussa käsitellään lähinnä vain Kevlar®-aramidikuitukankaisia komposiittipanssareita. Nämä ns kovat panssarirakenteet on valmistettu joko kevlarkankaista tai kevlarkangasprepregeistä⁴⁵⁾ tavanomaisilla lasikuitulujitemuovitteille kehitetyillä valmistusmenetelmillä.

Komposiittipanssarirakenteissa pintakerroksen ensisijaisena tehtävänä on levittää iskuimpulssi mahdollisimman laajalle alueelle. Ammuksen tai sirpaleen törmätessä panssariin ja alkaessa tunkeutua siihen komposiitti delaminoituu eli kerrokset irtoavat toisistaan. Siksi kukin yksittäinen kangaskerros vetokuormittuu painuman seurauksena. Käytettävällä matriisihartsilla on näin ollen erittäin suuri vaikutus panssarin energian absorptio-ominaisuuksiin. Ensinnäkin se pienentää langoissa esiintyvän pitkitäisaallon nopeutta ja lankojen hartsilla jäykistetyt risteämäkohdat välittävät heijastumat ympäristöön. Edelleen komposiitin jäykkä rakenne rajoittaa panssarin liian suurta taipumaa ja kankaassa lankojen siirtymistä. Delaminoitumiseen vaikuttavat positiivisesti alhainen hartsipitoisuus ja joustavien hartsien käyttö. Nämä sallivat suuremmat taipumat ja parantavat panssarin ballistisia ominaisuuksia. Ballistisesti tehokkaimmat panssarit sisältävät 20—25 paino-% joustavia hartseja. Toisiinsa kiinnitetyt kerrokset mahdollistavat sen, että sirpaleen aiheuttaman ballistisen iskun kuormitus siirtyy myös risteäville langoille sidemateriaalin kautta. Tästä syystä iskuaallon leviäminen on mahdollista komposiitin paksuussuunnassa ja kuormitus leviää myös taampana olevien kangaskerroksien kannettavaksi.⁴⁶⁾

Kevlar 29 -komposiittipanssari on mekaanisilta ominaisuuksiltaan heikompi kuin Kevlar 49, mutta ballistiselta lujuudeltaan jonkin verran parempi.⁴⁷⁾ Molempien komposiittien ballistinen lujuus on kuitenkin merkittävästi suurempi kuin ballistisen alumiinipanssarin. Edelleen kevlarkomposiittikypärällä on saavutettu 40—70 % parempi suojaus sirpaleita vastaan kuin teräskypärällä, kun tarkastelun perustana on massaltaan samanlaiset rakenteet. Taulukon 5 arvoista voidaan havaita alhaisen hartsipitoisuuden positiivinen vaikutus ballistiseen V 50 -arvoon sekä ballistiseen suoja-arvoon. Taulukon 5 arvoista voidaan nähdä myös kevlarkomposiittien suurin heikkous, alhainen puristuslujuus, varsinkin parhaimmilla ballistisilla rakenteilla.

Taulukko 5.⁴⁷⁾ Hartsipitoisuuden ja materiaalin vaikutus komposiittipanssarin eri ominaisuuksiin

Materiaali	Hartsipit paino-%	Taivutus- lujuus MPa	Taivutus- moduuli GPa	Puristus- lujuus MPa	Leikkaus- lujuus MPa	Ballist lujuus V50*)
Kevlar 29	22	102	20.7	62	11	439 m/s
Kevlar 29	35	179	21.4	83	19	360 m/s
Kevlar 49	35	228	31.0	117	21	320 m/s
Alumiini (5456-H 321)	—	345	69.0	345	—	183 m/s

*) Testaus suoritettu 4.14 g sirpalesimulaattorilla
— panssarin neliöpaino on testeissä ollut 9 280 g/m²

2.4 Sirpaleen vaikutus kangaspanssariin

2.4.1 Suojaliivin kehitys

Ensimmäisessä maailmansodassa aloitettiin vartalosuojainten kehittäminen. Pääasiallisena materiaalina oli teräs, mutta kokeiluissa oli myös silkistä, pellavasta ja puuvillasta valmistettu täysin kankainen vartalosuojain.⁴⁸⁾ Korean sodassa kehitettiin jalkaväelle suojaliivi, jonka ballistisesti suojaavana kerroksena oli 12-kerroksinen nailon.⁴⁹⁾

Kehityksen uusinta vaihetta edustaa USA:ssa maavoimien PASGT-liivi (kuva 7), joka suojaaa koko ylävartalon. Liivin ballistisena suoja-aineena on 0.475 kg/m² neli-



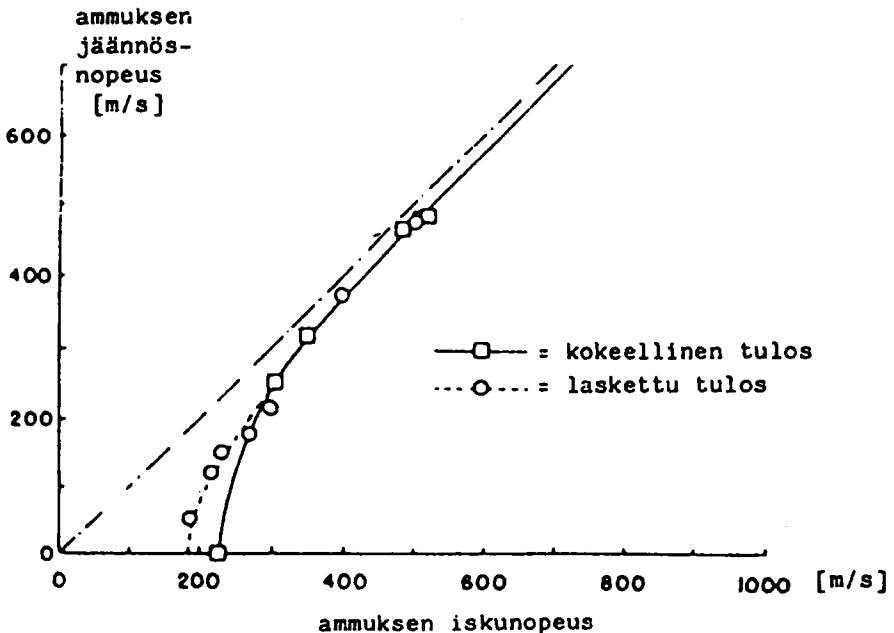
Kuva 7. PASGT-kevlarsuojaliivi

öpainoinen kevlarkangas ja sisä- sekä ulkopinta-aineena on 0.271 kg/m^2 neliöpainoinen ballistinen nailon. Liivi on suunniteltu siten, että sillä saavutetaan paras mahdollinen suojaus joka asennossa. Liivin käyttömukavuuteen ja käyttäjän liikkuvuuteen on kiinnitetty erityistä huomiota.^{50, 51)} Ainakin suurvallat tulevat panssaroimaan maavoimansa jo 1980-luvulla näin, sillä korkeasti koulutetun henkilöstön suojaamiseen tullaan uhraamaan runsaasti varoja.⁵¹⁾

2.4.2 Suojaliivin ballistiset materiaalit

Jo toisen maailmansodan aikana kyettiin valmistamaan polyamidi- eli nailonkuituja, joiden vetolujuudet olivat jopa 2—3-kertaisia verrattuna parhailla teräslangoilla saavutettuihin lujuusarvoihin.⁵²⁾ Kevlarkuiduilla on ylivoimainen vetolujuus ja kimmoisuus. Ominaisvetomurtolujuus on noin kaksi kertaa suurempi kuin E-lasikuidun ja lähes 10-kertaa suurempi kuin teräslangan.⁵²⁾ Kemiallisesti kevlar-aramidikuitu on polyparafenyleenitereftaalamidi, mikä on tereftaalihapon kloridin ja parafenyleenidiamidin polykondensaatti.⁵³⁾

Kevlar[®]-aramidikuitujen ballistinen tehokkuus perustuu lisäksi siihen, että ballistisen iskun komponentit jakaantuvat pituussuunnassa yli kymmeneen eri osaan noin $12 \mu\text{m}$ ohuessa kuitusäikeessä tapahtuvan kuidun pitkittäisen jakaantumisen vuoksi. Kuitujen pitkittäinen jakaantuminen toimii yksittäisessä kuidussa tehokkaana ballistisen iskun pysäyttäjänä.⁵²⁾



Kuva 8. Yhden Kevlar 29 kangaskerroksen vaikutus ammuksen jäännösnopeuteen iskunopeuden funktiona.

2.4.3 Ballististen kankaiden energinen absorptioteho

Kevlarkankaiden ballistisen energian absorptiokykyä on vaikea matemaattisesti mallintaa. Tarkasteluissa on turvaututtava kokeellisesti saatuihin tuloksiin, niistä tehtäviin yleistyksiin ja johtopäätöksiin. Toisaalta kokeellisten ja matemaattisesti määritettyjen teoreettisten arvojen yhtäläisyys on varsin hyvä (kuva 8).

Ballistisen kankaan absorboima energia jakaantuu kineettiseen energiaan ja potentiaalienergiaan. Kineettinen energia jakaantuu kolmeen komponenttiin ja potentiaalienergia ilmenee jännityksenä kankaassa ja kankaan kuiduissa.⁵⁴⁾

Kevlarkankaiden käyttö ballistisissa sovellutuksissa perustuu keveyteen ja ballistisen energian absorptiokykyyn. Kevlarkankaista voidaan valmistaa jopa 50 % kevyempiä suojaavia rakenteita ballististen ominaisuuksien pysyessä samana.⁵⁵⁾ Kuitukankaiden ballistinen absorptiokyky riippuu sirpaleen massan ja iskunopeuden lisäksi merkittävästi sirpaleen fyysisestä koosta ja geometriasta. Kankaan käyttäytyminen ballistisessa iskussa on huomattavasti monimutkaisempi tapahtuma kuin kuidun käyttäytyminen. Tapahtuma on liian monimutkainen, jotta siitä olisi mahdollista suorittaa yksinkertainen yleistys.⁵⁶⁾

3 KRANAATIN SIRPALOITUMISELLE ASETETTAVIA VAATIMUKSIA

3.1 Vaatimuksia sirpaleiden iskuenergialle

3.1.1 Suojatonta elävää voimaa vastaan

Käytettävän iskuenergiakriteerin mukaisen kineettisen energiamäärän vapautuminen ihmiskehossa katsotaan riittävän kohteena olevan elävän voiman toimintakyvyttömäksi saattamiseen. Teoreettisessa tarkastelussa on käytetty sirpaleen muotona palloa ja kuutiota. Kuvassa 9 on esitetty iskuenergiavaatimukset pallon ja kuution muotoisille terässirpaleille suojatonta elävää voimaa vastaan.

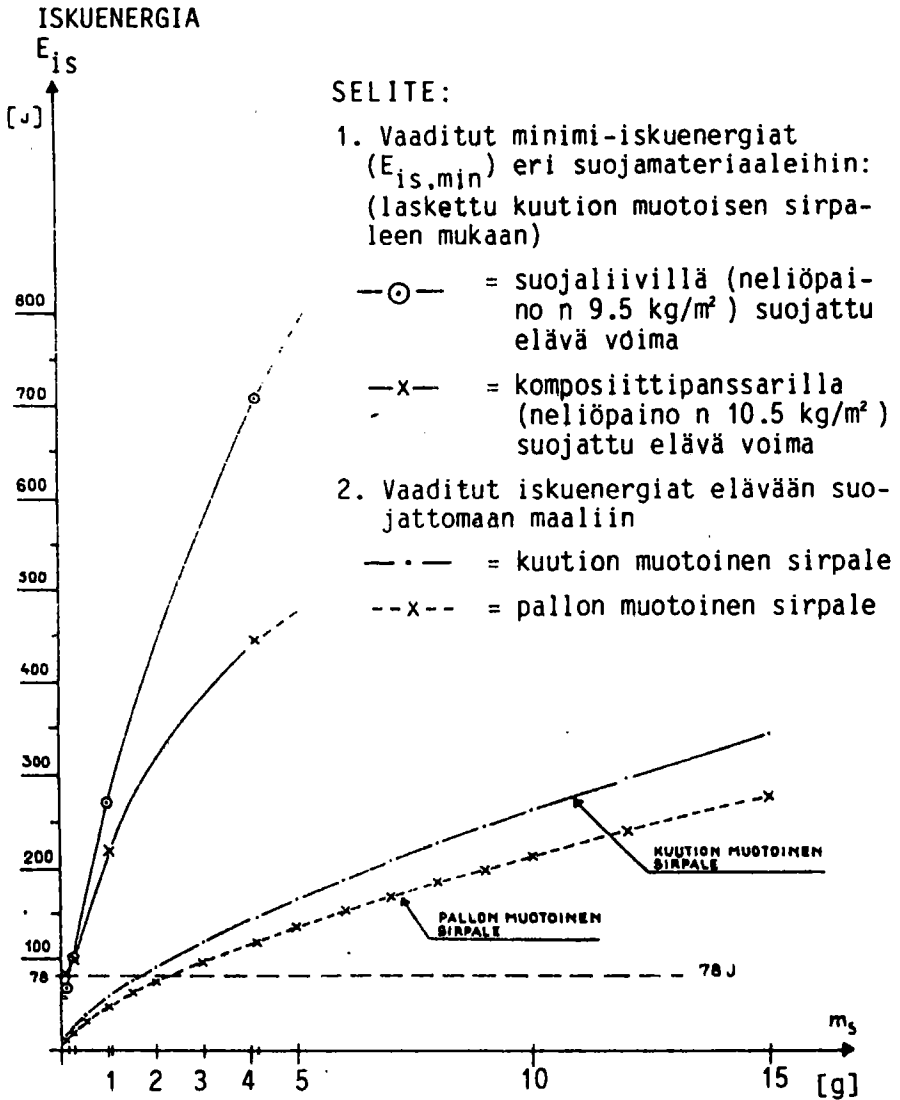
Tarkasteltaessa tuloksia todetaan, että kuution muotoisten sirpaleiden iskuenergiavaatimukset ovat noin 24 % suuremmat kuin pallon muotoisilla sirpaleilla. Tämä johtuu kuution suuremmasta poikkipinta-alasta. Vaatimuksista voidaan todeta myös, että pienillä sirpaleilla ($m \leq 1.0$ g) saavutetaan toimintakyvyttömäksi tekevä teho huomattavasti pienemmällä iskuenergiamäärällä kuin 78 J. Toisaalta raskaammilla sirpaleilla ja suuremmilla poikkipinta-aloilla tarvitaan huomattavasti suurempia iskuenergiamääriä kuin mainittu 78 J.

3.1.2 Suojaliivillä tai komposiittipanssarilla suojattua elävää voimaa vastaan

Suojaliivien ja ballististen kankaiden energian absorptiokyky riippuu sirpaleen massan ja iskunopeuden lisäksi merkittävästi sirpaleen fyysisestä koosta ja geometriasta. Lisäksi suojaliivien ballistiset ominaisuudet riippuvat merkittävästi vallitsevista olosuhteista. Koeolosuhteissa suoritettujen V 50 -nopeuksien määritykset ovat kuitenkin tärkeimpiä konkreettisia mitta-arvoja, kun tässä kirjoituksessa käsitellään suojaliivien ballistista suojauskykyä ja läpäisyyn tarvittavia energiamääriä. Matemaattisissa iskuenergian määrityksissä on käytetty iskunopeutena rakenteen V 50 -nopeutta. Tällä

nopeudella suojarakenne absorboi keskimäärin suurimman energiamäärän.⁵⁶⁾ Kuitenkin V 50 -arvoja käytettäessä on muistettava, että läpäisyjä saavutetaan vain noin 50 %:lla kaikista V 50 -nopeudella lentävistä sirpaleista.

Vaatimukset sirpaleiden minimi-iskuenergialle on määritetty siten, että suojatonta elävää voimaa vastaan vaadittavaan iskuenergiaan lisätään suojaliivi- ja komposiittii-

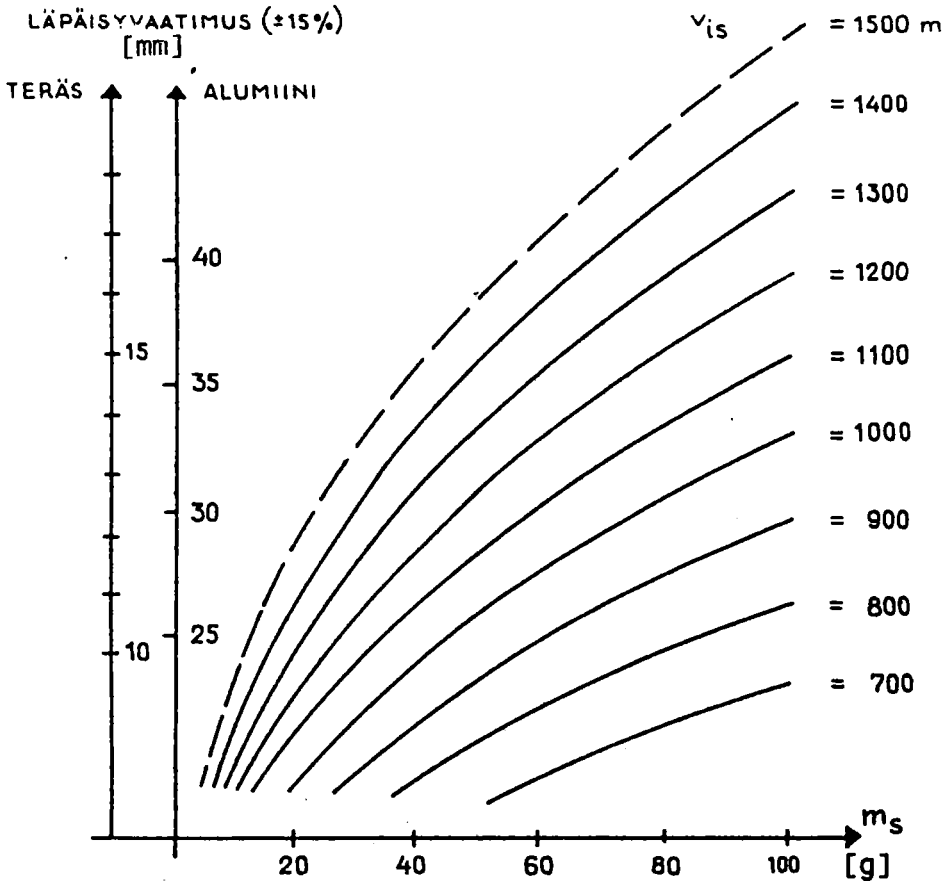


Kuva 9. Iskuenergiavaatimukset suojaliivillä ja komposiittipanssarilla suojattua elävää voimaa vastaan.

rakenteen absorboima energiamäärä. Tällöin saadaan kokonaisiskuenergian minimiarvo, jota käytetään iskuenergiavaatimuksena.

Kuvassa 9 on esitetty käyrästönä iskuenergiavaatimus suojaliivillä (neliöpaino noin 9.5 kg/m^2) ja komposiittipanssarilla (neliöpaino noin 10.5 kg/m^2) suojattua elävää voimaa vastaan sirpaleen massan funktiona. Iskuenergiavaatimuksista voidaan todeta, että suojaliivi absorboi pääosan vaadittavasta iskuenergiasta ja sirpaleen massan kasvaessa tämä osuus kasvaa yhä merkittävämmäksi. Käyrästä voidaan lukea esimerkiksi, että 1.0 g:n sirpaleelta vaaditaan yli 270 J:n iskuenergia ja 4.15 g:n sirpaleelta vaaditaan yli 710 J:n iskuenergia, jotta niillä kyetään saattamaan toimintakyvyttömäksi sirpalesuojaliivillä suojattu taistelija.

Komposiittipanssarin energian absorptiokyky on huonompi kuin kangasrakenteen, kun kyseessä ovat hidasnopeuksiset sirpaleet ja kevyet (neliöpaino $\leq 10 \text{ kg/m}^2$) rakenteet. Kun rakenteen neliöpainoa lisätään ja sirpaleen nopeus ylittää kriittisen ar-



Kuva 10. Terässirpaleen panssarinläpäisykyky sirpalekoon funktiona, parametrinä sirpaleen nopeus

von ($v_{is} \geq 915$ m/s), osoittautuu komposiittirakenne tehokkaammaksi energian absorboijaksi. Kuvan 9 tuloksista voidaan todeta, että 4.15 g:n sirpaleella tulee olla yli 450 J:n iskuenergia, jotta se olisi tehokas. Tällöin komposiittipanssarirakenteen absorboima energiamäärä on noin 2 kertaa suurempi kuin suojattomaan maaliin tarvittava energiamäärä ja kokonaisenergiavaatimus kasvaa kolminkertaiseksi. Vastaavasti absorboitu energia kangaspanssarilla on 3.8-kertainen ja tarvittava kokonaisenergia 4.8-kertainen.

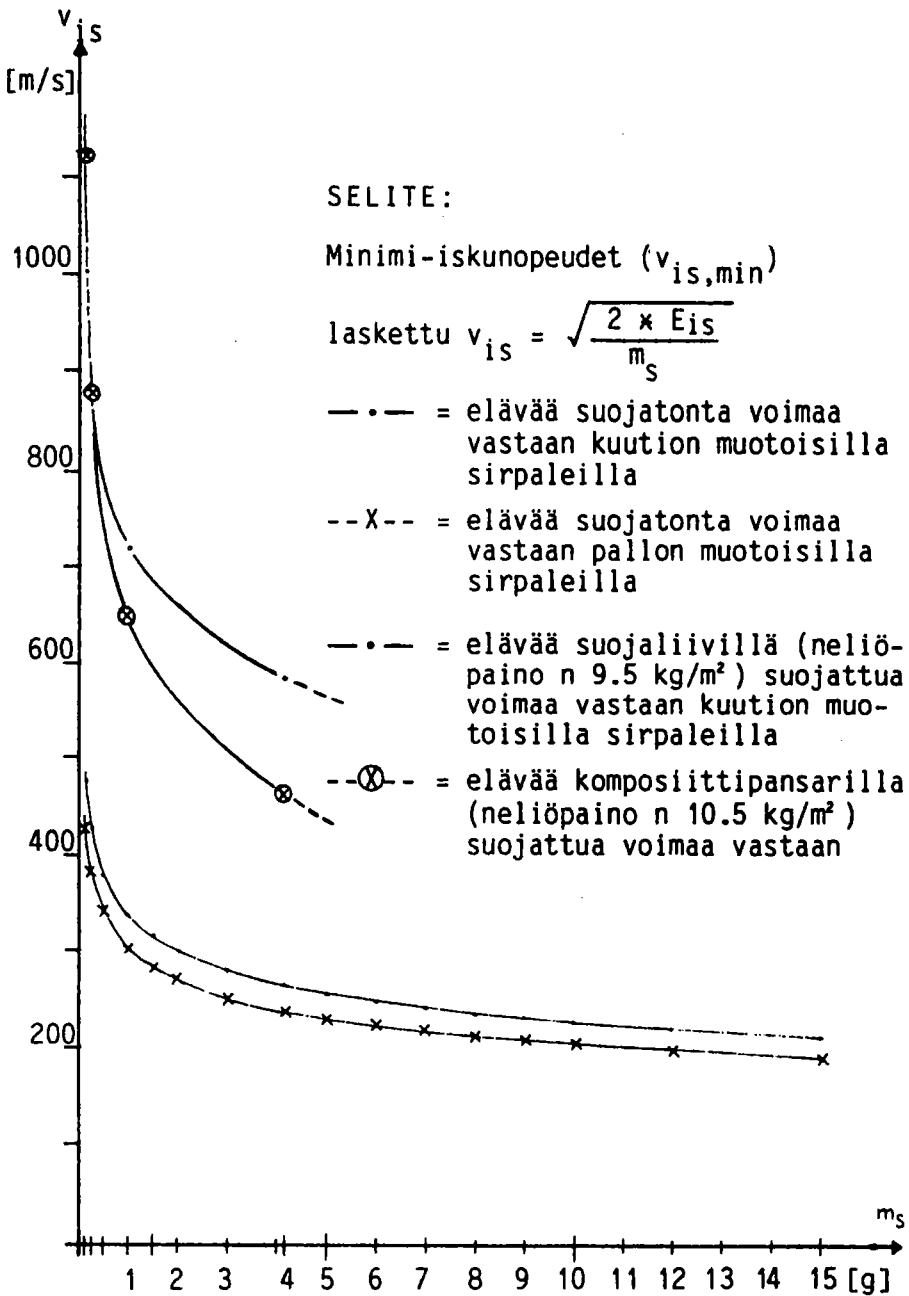
3.1.3 Panssaroitua maalia vastaan

Materiaalin läpäisy ei ole yksinomaan sirpaleen iskuenergian funktio, vaan muutujia on useita. Sirpaleesta itsestään riippumattomat seikat, kuten maalin muoto ja materiaali sekä iskukulma ovat matemaattisessa tarkastelussa erittäin ratkaisevia reunaehtoja ja käytännössä parametrejä, joihin käyttäjä ei voi vaikuttaa. Sirpaleen kokoon ja muotoon, materiaaliin ja osittain deformaatioasteeseenkin sekä sirpaleen nopeuteen taas käyttäjä voi vaikuttaa esimerkiksi ohjatulla sirpaloinnilla tai esisirpaloinnilla. Tässä esitettävät iskuenergiavaatimukset on laskettu Rilben yhtälöä (21) käyttäen. Kuvassa 10 on esitetty terässirpaleen panssariläpäisykyky erilaisilla iskunopeuksilla sirpaleen massan funktiona.

Taulukossa 6 on esitetty lasketut vaatimukset sirpaleiden iskuenergialle panssarin läpäisemiseksi. Taulukon 6 tuloksista tulee mainita, että Rilben kertoimen (θ_R) epä-määräisyydestä (± 15 %) aiheutuvat arvojen varsin merkittävät ($+38$ % — -24 %) maksimivirherajat. Tässä on kuitenkin otettu tarkastelun perustaksi Rilben kertoimen (θ_R) perusarvolla $29 \times 10^{-6} [s / \sqrt[3]{kg}]$ lasketut minimi-iskuenergia ($E_{is,min}$) ja minimi-iskunopeus ($v_{is,min}$) -arvot.

Taulukko 6. Vaatimukset sirpaleen iskuenergialle panssarin läpäisemiseksi.

Läpäisy- vaatimus (teräs)	S i r p a l e e n				
	massa	vaadittava iskunopeus	virherajat	vaadittava iskuenergia	virherajat
t_m mm	g	$v_{is,min}$ m/s	%	$E_{is,min}$ J	%
13	20	1651.4		27273.3	
	40	1310.8	—13	34362.2	—24
	60	1145.1	+18	39334.9	+38
	80	1040.4		43293.6	
16	20	2032.6		41313.4	
	40	1613.3	—13	52051.6	—24
	60	1409.3	+18	59584.2	+38
	80	1280.4		65580.9	



Kuva 11. Vaatimukset iskunopeudelle suojatonta elävää voimaa, suojaliivillä ja komposiittipanssarilla suojattua elävää voimaa vastaan.

3.2 Sirpaleen nopeus

3.2.1 Iskunopeusvaatimukset suojatonta, suojaliivillä tai komposiittipanssarilla suojattua elävää voimaa vastaan

Vaatimukset sirpaleiden minimi-iskunopeuksille ($v_{is,min}$) on laskettu iskuenergiavaatimusten ($E_{is,min}$) perusteella. Suojaliivi- ja komposiittipanssarirakenteita vastaan vaadittavat minimi-iskunopeudet samoin kuin iskuenergiavaatimukset ($E_{is,min}$) perustuvat kokeellisesti määritettyihin V 50 -nopeuksiin.

Sirpalesuojaliivin iskuenergian absorptiokyky ja -tehokkuus riippuvat merkittävästi vallitsevista olosuhteista. Kuvan 11 käyrästä on esitetty vaatimukset erimassaisten sirpaleiden iskunopeuksille suojatonta elävää voimaa vastaan, suojaliivi- (neliöpaino noin 9.5 kg/m²) ja komposiittipanssarirakenteilla (neliöpaino noin 10.5 kg/m²) suojattua elävää voimaa vastaan.

Suojatonta elävää voimaa vastaan vaadittavat iskunopeudet ovat varsin helposti saavutettavissa, joten se on merkittävän altis haavoittumisille. Suojattoman elävän voiman toimintakyvyttömäksi saattamiseen tarvittavat iskunopeudet ovat 380 m/s > v_{is} > 200 m/s sirpaleilla, joiden massat ovat vastaavasti 0.5 g < m_s < 10.0 g.

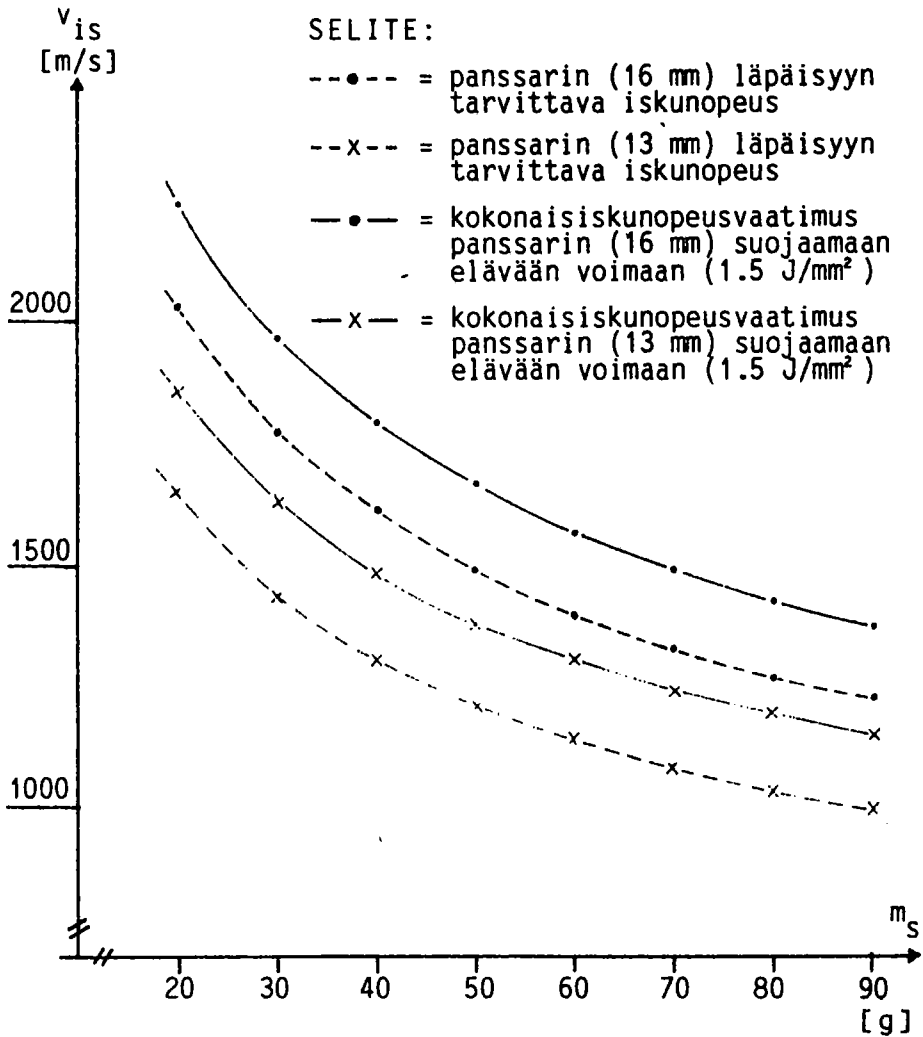
Kun tarkatellaan suojaliivi- ja komposiittirakenteilla suojattua elävää voimaa vastaan vaadittavia iskunopeusarvoja todetaan, että iskunopeusvaatimukset ovat kasvanneet yli kaksinkertaisiksi. Komposiittipanssarirakenteen tehokkuus suurinopeuksisia (v_{is} > 915 m/s) sirpaleita vastaan näkyy myös kuvan 11 käyrästä. Sirpaleilta, joiden massat ovat 0.5 g < m_s < 5.0 g vaaditaan iskunopeuksia 800 m/s > v_{is} > 550 m/s, kun halutaan vaikuttaa sirpalesuojaliivillä suojattuun elävään voimaan. Tällöin kranaatin vaikutusalue ja tuhoamistehokkuus pienenevät merkittävästi.

3.2.2 Iskunopeusvaatimukset panssaroitua maalia vastaan

Iskuenergiäkäsittelyn yhteydessä on taulukossa 6 esitetty myös rajaiskunopeudet ($v_{is} \Delta v_{gr}$), joilla esitetty panssari ($t_m = 13$ mm tai $t_m = 16$ mm) voidaan läpäistä. Iskunopeusvaatimukset vaikuttavat varsin korkeilta ja ovat saavutettavissa vain suuremman kaliiperiluokan kranaateilla aivan lyhyiltä vaikutusetäisyyksiltä. Kun tarkastellaan virherajojen ($v_{is} + 18\%$, $v_{is} - 13\%$) suuruutta nopeusarvoina, saadaan esimerkiksi sirpaleelle, jonka massa $m_s = 20.0$ g, panssarin paksuus $t_m = 13$ mm, läpäisyvaatimuksen ylärajaksi $v_{is} = 1943$ m/s ja alarajaksi $v_{is} = 1436$ m/s.

Esitettiin iskuopeusarvoihin tulee lisätä vaadittavan jälkivaikutusenergian perusteella laskettu tai muuten määritetty sirpaleen jäännösnopeus, kun halutaan tarkastella sirpaleilta vaadittavia kokonaisiskunopeuksia. Kuvan 12 käyrästä esittää vaadittuja kokonaisiskunopeuksia teräspanssaroinnilta suojattua elävää voimaa vastaan. Lisäksi läpäisyssä syntyy sekundaarisia sirpaleita panssarilevyn murtuessa ja myös niillä saattaa olla vaikutus elävään voimaan.

Kuvan 12 käyrästä tarkasteltaessa voidaan todeta, että esimerkiksi sirpaleelta, jonka massa (m_s) on 50 g vaaditaan noin 1 200 m/s iskunopeus 13 mm:n ja noin 1 500 m/s iskunopeus 16 mm:n panssarilevyä vastaan.



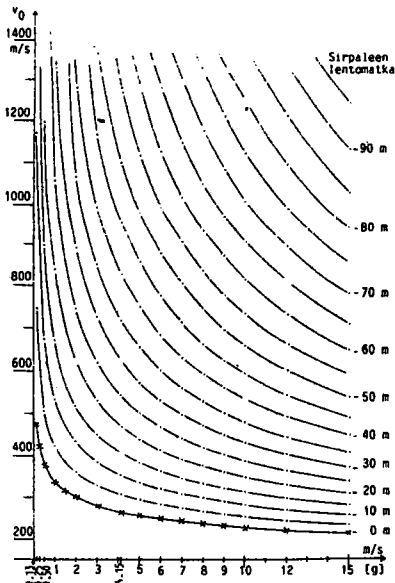
Kuva 12. Sirpaleen iskunopeusvaatimus teräspanssarin suojaamaa elävää voimaa vastaan.

3.2.3 Sirpaleiden lähtönopeusvaatimukset suojatonta ja suojaliivillä tai komposiittipanssarilla suojattua elävää voimaa vastaan

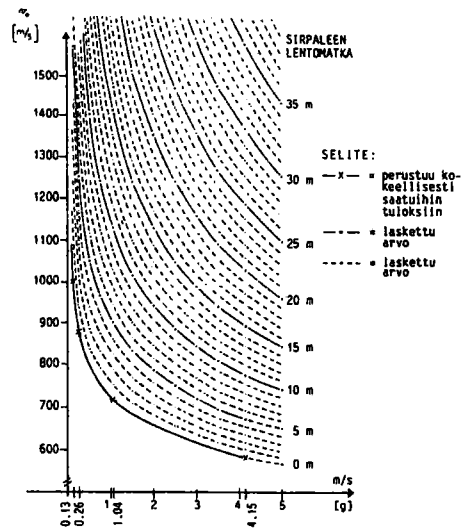
Sirpaleen nopeuden on todettu hidastuvan varsin nopeasti. Esimerkiksi noin 1.0 g:n sirpaleen nopeus puoliintuu noin 15 m matkalla.⁵⁷⁾ Sirpaleen lähtönopeudelle on

määritetty vähimmäisiskunopeusvaatimusten perusteella minimiarvo ($\pm 15\%$:n tarkkuudella) käyttämällä yhtälöä 16. Kuvissa 13 ja 14 on esitetty sirpaleiden lähtönopeuksille vähimmäisvaatimukset sirpaleen massan funktiona eri etäisyyksillä. Tuloksista voidaan yleisesti todeta, että matemaattisesti määritetyt lähtönopeudet osoittavat lähinnä nopeuksien suuruusluokan.

Kuvasta 13 voidaan todeta, että 0.5 g:n sirpaleet tarvitsevat 20 m etäisyydeltä noin 1 200 m/s lähtönopeuden, jotta niillä olisi riittävästi iskunopeutta suojattoman elävän voiman toimintakyvyttömäksi saattamiseen. Suojaliivillä suojatun elävän voiman toimintakyvyttömäksi saattamiseen vaaditaan (kuva 14) vastaavilla sirpaleilla ($m_s = 0.5$ g) lähtönopeus $v_0 \geq 1\,400$ m/s jo 10 m etäisyydellä. Sirpale jonka massa (m_s) on 2.0 g, kykenee tekemään toimintakyvyttömäksi suojattoman maalin jopa 40 m etäisyydellä, jos sirpaleen lähtönopeus $v_0 \geq 1\,280$ m/s. Toisaalta samanlaisella sirpaleella ($m_s = 2.0$ g) kyetään vaikuttamaan vain noin 20 m etäisyydellä olevaan suojaliivillä suojattuun maaliin, kun sirpaleen lähtönopeus $v_0 \geq 1\,350$ m/s.



Kuva 13. Tehokkaiden sirpaleiden lähtönopeusvaatimukset sirpaleen massan funktiona eri etäisyyksillä, kun maalina on suojaton elävä voima.



Kuva 14. Tehokkaiden sirpaleiden lähtönopeusvaatimukset sirpaleen massan funktiona eri etäisyyksillä, kun maalina on suojaliivillä suojattu elävä voima.

Tarkasteltaessa suojaliivin aiheuttamaa sirpaleen lähtönopeusvaatimusten kasvua voidaan todeta, että se on merkittävä. Esimerkiksi 1.0 g:n sirpaleella 10 metrin etäisyydellä lähtönopeusvaatimus kasvaa 530 m:stä/s 1 140 m:iin/s eli 2.15-kertaiseksi. Sirpaleen, jonka massa (m_s) on 2.0 g, lähtönopeusvaatimus 15 m etäisyydellä kasvaa 530 m:stä/s 1 130 m:iin/s eli 2.17-kertaiseksi. Yleistäen voidaan sanoa, että suojaliivin käyttö edellyttää noin kaksinkertaista lähtönopeutta verrattuna suojattoman maalin lähtönopeusvaatimuksiin.

3.2.4 Sirpaleiden lähtönopeusvaatimukset kovan, panssaroidun maalin läpäisemiseksi

Tarkastelun perustaksi otetaan panssarilevyjen paksuus (t_m) ja sirpaleen massa (m_s) ja tuloksena on lähtönopeus (v_0) -vaatimus erilaisille vaikutusetäisyyksille.

Kun panssarilevyn paksuus (t_m) on 13 mm ja pyritään läpäisyyn viiden metrin etäisyydeltä tarvittaisiin sirpaleelta, jonka massa (m_s) on 10 g, noin 2 400 m/s lähtönopeus. Yhden ja kahden metrin etäisyydelläkin tarvittava lähtönopeus (v_0) on yli 2 000 m/s ja tällaiset lähtönopeudet ovat vain teoreettisia. Sirpaleella, jonka massa (m_s) on 60 g, kyetään viiden metrin etäisyydeltä läpäisyyn, kun lähtönopeus (v_0) on yli 1 250 m/s.

Kun läpäistävän panssarilevyn paksuus (t_m) on 16 mm, kyetään "teoreettiseen" läpäisyyn kahden metrin etäisyydeltä sirpaleella, jonka massa (m_s) on 10 g ja lähtönopeus (v_0) on yli 2 700 m/s. Vastaavasti sirpaleella, jonka massa (m_s) on 60 g kyetään läpäisyyn kahden metrin etäisyydeltä, kun lähtönopeus (v_0) on yli 1 450 m/s. Tällainen lähtönopeus on mahdollinen saavuttaa sirpaleella.

Kovametallisirpaleiden lähtönopeusvaatimuksista 13 mm:n panssarilevyihin voidaan todeta, että ne ovat alhaisemmat kuin tavallisilla terässirpaleilla. Kovametallisirpale, jonka massa (m_s) on 10 g, vaatii läpäisyyn viiden metrin etäisyydeltä lähtönopeuden $v_0 \geq 1\,500$ m/s. Kun sirpaleen massa (m_s) on 50 g tulee lähtönopeuden (v_0) olla yli 900 m/s. Jos maalilevyn paksuus (t_m) on 16 mm, vaaditaan viiden metrin etäisyydeltä noin 1 850 m/s lähtönopeus, kun sirpaleen massa (m_s) on 10 g ja kun m_s on 50 g, vaaditaan lähtönopeus (v_0) yli 1 050 m/s.

Kovametallisirpaleiden lähtönopeusvaatimukset ovat noin kaksi kolmasosaa siitä mitä vaaditaan tavallisilta terässirpaleilta. Tämän vuoksi voidaan esittää, että jos sirpalekранаateilla halutaan vaikuttaa panssaroiutuun maaliin tulee käyttää valmiita, kovametallikuulia sisältäviä, esisirpaloituja erikoiskranaatteja. Kranaatin räjähdysainetäytteenä tulisi olla joko heksotoli tai oktoli. Tällöinkin kohteeksi tulisi valita pääasiassa heikosti panssaroituja kuljetusajoneuvoja eikä varsinaisia rynnäkköpanssarivaujuja.

3.2.5 Vaatimukset kranaattien lataussuhteelle

Tarkasteltaessa sirpaleiden nopeuksia todettiin, että sirpaleiden lähtönopeuksia voidaan arvioida lataussuhteen avulla (kaavat 7—14). Lataussuhde on eräs kranaatin suunnitteluparametreista, jolle esitetään vaatimukset lähinnä aikaisemmin määritettyjen sirpaleen lähtönopeusvaatimusten perusteella. Kuvassa 5 olevan käyrästä arvoja voidaan kääntäen käyttää lataussuhdevaatimusten esittämiseen sekä trotyyllillä että heksotolilla. Kuvassa 14 esitettyjen tehokkaiden sirpaleiden lähtönopeusvaatimusten perusteella voidaan esittää kranaattien suunnitteluparametriksi, että

— heksotolilla lataussuhde ($\frac{C}{M}$) on vähintään 0.38 ja

— trotyyllillä lataussuhde ($\frac{C}{M}$) on vähintään 0.44.

Tällöin ovat sirpaleiden teoreettiset lähtönopeudet (v_0) vähintään 1 400 m/s.

3.3 Sirpaleiden lukumäärä ja massajakautuma

3.3.1 Vaatimukset sirpaletihedelle elävää voimaa vastaan

Kun pyritään useampiin ja pienempiin sirpaleisiin, lisääntyy todennäköisyys, että alueella oleviin maaleihin osuu yksi tai useampia sirpaleita. Sirpaleiden osumatodennäköisyys on sirpaletihedän ja haavoittuvan pinta-alan funktio. Lisääntyneellä sirpaletihedellä parannetaan nimenomaan osumatodennäköisyyttä suojaamattomiin kehonosiin. Vammojen jakaantumisen eri vartalonosille on todettu pysyneen sodissa yllättävän vakiona.⁵⁸⁾ Suurin osa vammoista (yli 60 %) on raajoissa ja pään sekä niskan alueen vammojen osuus on 10—15 %.⁵⁸⁾ Monivammoja on ollut noin 25 %:lla haavoittuneista.⁵⁹⁾

Maalin haavoittuvaan pinta-alaan vaikuttavat sekä ympäröivä maasto että maalin suojautumisaste. Jotta päästäisiin yhdellä kranaatilla riittävään osumatodennäköisyyteen sirpaletihedelle on asetettava vaatimus. Jos sirpaletiheys (ρ_s) on 1 [tehokas sirpale/m²], niin todennäköisyys sille, että saadaan ainakin yksi osuma noin 0.32 m²:n haavoittuvalle pinta-alalle 5 metrin etäisyydellä, on noin 0.27. Kun sirpaletiheys (ρ_s) on 2 [tehokasta sirpaletta/m²], on haavoittumistodennäköisyys 0.47. Kun sirpaleiden "ainakin yksi osuma" -todennäköisyys on lähes 0.5, voidaan kranaattia pitää riittävän tehokkaana. Näin ollen sirpaletiheysvaatimukseksi voidaan esittää $\rho_s \geq 2$ [tehokasta sirpaletta/m²]. Tämä sirpaletiheysvaatimus on esitetty myös eräiden eurooppalaisten käsikranaattien tehokkuudelle.⁵⁹⁾

3.3.2 Vaatimus sirpaleiden massajakautumalle elävää voimaa vastaan

Suojatonta elävää voimaa vastaan lähes kaiken massaiset sirpaleet ovat osuessaan tehokkaita. Sirpaleiden tehokkaaseen vaikutusalaan tai kantamaan vaikuttaa merkittävästi sirpaleen nopeuden hidastuminen ilmassa. Tämä hidastuminen taas riippuu voimakkaasti sirpaleen massasta.

Aikaisemmin esitettyjen energia- ja nopeusvaatimusten ja aikaisempien tutkimustenkin perusteella voidaan esittää, että sirpale on tehokas, kun sen massa (m_s) on vähintään 0.5 g. Tämän minimimassan on todettu riittävän myös sirpalesuojaliivillä suojatun elävän voiman haavoittamiseen lähietäisyydeltä.

Sirpaloitumisluku (γ) kuvaa sirpaleiden massajakautumaa. Sekä suojatonta että sirpaleliivillä suojattua elävää voimaa vastaan voidaan sirpaloitumisluvulle (γ) esittää vaatimus, jossa $280 \text{ [kg}^{-1} \text{]} > \gamma > 200 \text{ [kg}^{-1} \text{]}$. Tällöin sirpaleiden massat, joita pienempiä sirpaleita sirpaloituvasta massasta on 63.2 % ovat vastaavasti noin $3.6 \text{ g} < m_s < \text{noin } 5.0 \text{ g}$.

Ohjatun sirpaloitumisen ja esisirpaloinnin massajakautuma muodostetaan jo suunnitteluvaiheessa. Sirpaleiden massojen (m_s) tulee olla tai muodostua 81 mm kranaateilla 1.0—1.6 g:n kokoisiksi ja 120 mm kranaateilla 1.4—2.0 g:n kokoisiksi, kun ballistinen kuori ei osallistu sirpaleiden tuottamiseen. Kun osa vaikuttavista sirpaleista muodostuu valurautaisesta kuoresta ja toinen osa teräskuulista tai muusta ennalta muotoilluista sirpaleista, niin esisirpaloitujen sirpaleiden koko (m_s) voi olla 81 mm kranaateilla 0.8—1.4 g ja 120 mm kranaateilla 1.0—1.6 g.

3.3.3 Vaatimus tehokkaiden sirpaleiden lukumäärälle elävää voimaa vastaan

Sirpaloitumisessa syntyvien tehokkaiden sirpaleiden lukumäärä on sirpaloitumisluvun (γ) ja kranaattikuoren massan funktio. Luonnollisessa sirpaloitumisessa voidaan tehokkaiden sirpaleiden lukumäärä määrittää matemaattisesti sirpaloitumisluvua (γ) käyttäen (kaavat 2—4). Massajakautumavaatimus ($280 \text{ [kg}^{-1}] > \gamma > 200 \text{ [kg}^{-1}]$), perusteella saadaan toivottujen sirpaleiden ($0.5 \text{ g} < m, < 5.0 \text{ g}$) määräksi $(395—315) \times M_0$ ja tehokkaiden sirpaleiden ($0.5 \text{ g} < m, < 10.0 \text{ g}$) määräksi $(420—450) \times M_0$.

Ohjatussa sirpaloitumisessa tai esisirpaloinnissa sirpaleiden kokonaismäärä on tärkeä suunnitteluparametri. Kullekin kranaattimallille voidaan tarvittava sirpalemäärän suuruusluokka laskea. Koeammuntatuloksien perusteella⁶⁰⁾ voidaan esittää, että 81 mm kranaatinheitin kranaatin kokonaissirpalemäärä (N) tulisi olla ainakin 1 300—1 500 käytettäessä joko esisirpaloitinta tai ohjattua sirpaloitumista. Vastaavasti kokonaissirpalemäärä (N) tulisi olla 120 mm kranaateilla 2 500—3 500. ”Kuulakraanaattien” ja muiden useampia sirpaloitumisen keinoja käyttävien kranaattien esisirpaloitujen sirpaleiden määrän tulisi olla 81 mm kranaateilla 400—600 sirpaletta ja 120 mm kranaateilla 1 000—1 200 sirpaletta.

3.3.4 Vaatimukset sirpalettiheydelle, massajakautumalle ja sirpaleiden lukumäärälle panssaroitua maalia vastaan

Aikaisempian koetulosten perusteella on esitetty, että rynnäkö- tai kuljetuspanssarivaunun lamauttaminen vaatii usean, panssaroinnin hyvin läpäisseen sirpalekranaatin sirpaleen osuman.⁶¹⁾ Kuljetuspanssareiden haavoittuva, tehollinen pinta-ala on keskimäärin 10—12 m². Kun hyvin läpäisseiden sirpaleiden minimimääräksi esitetään $N_{\text{löp,min}} = 6—10$ läpäisyä, saadaan tehokkaiden sirpaleiden tiheysvaatimukseksi ($\rho_{s,\text{min}}$) $0.5—1.0 \text{ [läpäisyä/m}^2 \text{]}$. Käytännössä sirpalettiheysvaatimus ($\rho_{s,\text{min}}$) tulee asettaa suuremmaksi, koska sirpaleiden vaikutusetäisyys ei riitä ”tasaiseen jakautumiseen” koko vaunun haavoittuvalle pinta-alalle. Vain aivan edullisimmissa olosuhteissa sirpaleella on läpäisyyn vaadittava energia 2—2.5 metrin etäisyydellä räjähdyspisteestä. Jotta sirpaleiden iskukulmat eivät muuttuisi epäedullisiksi, tulee sirpalekranaatin tehokkaiden sirpaleiden tiheyden kevyesti ($\rho_{s,\text{min}}$) panssaroitua maalia vastaan olla vähintään $1.0—1.5 \text{ [läpäisyä/m}^2 \text{]}$. Tehokkaiden sirpaleiden kokonaismäärälle voidaan esitetyn sirpalettiheysvaatimuksen ($\rho_{s,\text{min}}$) perusteella esittää taulukossa 7 olevat vaatimukset.

Sirpaleiden massajakautuman tulee muodostua normaalista sirpalekranaatin massajakautumasta täysin poikkeavaksi. Kun sirpaleiden, joiden massa (m) on ainakin 60 g, lukumäärä (N) on 100—150, niin näiden sirpaleiden kumulatiivinen massa on vastaavasti vähintään 6—9 kg. Esimerkiksi 9 kg sirpalemassa on noin 35 kg ammuksen kuoresta runsaat 25 %.

Taulukko 7. Vaatimukset tehokkaiden sirpaleiden kokonaismääräksi panssaroitua maalia vastaan

Sirpaleitiheys ρ , [läpäisyä/m ²]	Sirpaleiden kokonaismäärä (N_{\min})				
	$x = 1 \text{ m}$	$x = 2 \text{ m}$	$x = 3 \text{ m}$	$x = 4 \text{ m}$	$x = 5 \text{ m}$
1.0	5	20	45	75	120
1.5	8	30	65	115	180

Kun kranaattien sirpaloituvat massat (M_0) ovat 10—35 kg ja kun halutun kokoisia sirpaleita (N) tarvitaan 25—150, voidaan esittää, että massajakautumaa kuvaavan sirpaloitumisluvun (γ) on oltava enintään 36 [kg⁻¹]. Tällaisten sirpaloitumisluvujen saavuttaminen vaatii erityistä kranaattisuunnittelua ja -konstruktiota. Tavallisella sirpalekranaatilla saadaan vain satunnaisesti tehokkaita läpäisyjä panssaroi tuun maaliin, sillä sirpaleitiheys ja sirpaleiden vaikutusetäisyys ovat yleensä liian pienet. Voidaan sanoa, että tehokkaaseen läpäisyyn kuljetusvaunuja vastaan päästään lähes yksinomaan esisirpaloiduilla erikoiskranaateilla, jotka sisältävät kovametallisia tytäramuksia.

3.4 Vaatimukset kraanatin muodolle ja sirpaleviuhkan suuntaamiselle

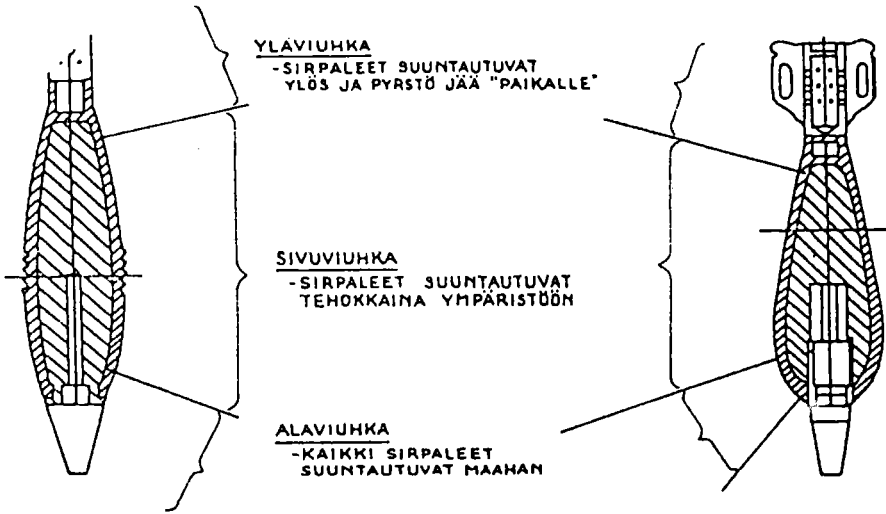
Nämä vaatimukset asetetaan lähinnä kranaatinheittimistön kranaateille, koska niiden suuri tulokulma mahdollistaa tehokkuuden lisäämisen muotoilua kehittämällä. Tykistön kranaateilla pieni tulokulma rajoittaa tätä vaikuttamismahdollisuutta. Kraanatinheittimistön kranaattien korkea lentorata aiheuttaa sen, että kranaatit räjähtäessään maan pinnalla tai aivan sen yläpuolella, räjähtävät ne yleensä aina sirpalevaikutuksen kannalta tehokkaimmassa asennossa. Täten kranaatin muotoilua kehittämällä kyetään tehostamaan sirpaloitumista.

Kranaatin muodon tulee olla sellainen, että kranaatin sirpaloituva osa muistuttaisi enemmän sylinteriä kuin palloa. Kranaatin kärkiosan sirpaloituva massa ($\geq 30\%$ kuoren massasta) suuntautuu nykyisillä "pisara"-kranaateilla maahan ollen sirpalevaikutuksen kannalta tehotonta (kuva 15, oikean puoleinen kranaatti). Kranaatin sirpaloituvan peräosan nykyistä tehokkaammalla muotoitulla sekä paksuuden ja pituuden lisäämisellä vähennetään "tehottoman" kärkiosan merkitystä alle 20 %:in sirpaloituvasta massasta (kuva 15, vasemman puoleinen kranaatti).

Kun kranaattia muotoillaan sirpaloitumisen kannalta edullisemmaksi, tulee jokaiselta kranaatin osaa tarkastella parhaimman lataussuhteen, sirpaloituvan massan määrän ja lähtörasitusten keston optimointikysymyksenä. Sirpaloituvaa massaa tulee lisätä riittävästi kranaatin sirpaloituvan runkoon siten kuitenkin, että lataussuhde ($\frac{C}{M}$) heksotolilla on vähintään 0.38 ja trotyyllillä ainakin 0.44.

3.5 Tehokas sirpale

Tehokkaalla sirpaleella on pitkä ja laaja pyyhkäisy. Tähän vaikuttavat taas suuri lähtönopeus, ballistisesti edullinen muoto ja koko sekä oikea lähtösuunta.



Kuva 15. Kranaatin muotoilun vaikutus sirpaloitumiseen.

3.5.1 Elävää voimaa vastaan

Tehokkaan sirpaleen iskuenergia on sirpaleen massan ja nopeuden funktio. Taisteilijan suojarustus absorboi sirpaleen kineettistä energiaa suojarustuksen materiaalin ja valmistustavan ominaisuuksista riippuen. Suojaliivin kangaspanssari on yleensä tehokkaampi suurikokoisia ja hidasnpeuksisia sirpaleita vastaan kuin pieniä sirpaleita vastaan, joilla on sama energia (E_{kin}). Tehokkaan sirpaleen iskuenergian on ylitettävä suojarustuksen absorboima energiamäärä niin paljon, että jäännösenergia riittää tekemään kohteen taistelukyvyttömäksi. Jäännösenergiaa on sirpaleella oltava yli 1.5 J/mm^2 ollakseen tehokas elävää voimaa vastaan.

Jotta saavutettaisiin riittävä iskuenergia niin sirpaleella tulee olla tarpeeksi suuri iskunopeus. Tehokkaaksi sirpaleeksi voidaan sanoa sirpaletta, jonka massa (m_s) on $0.5\text{--}10.0 \text{ g}$. Kevyellä sirpaleella ($m_s = \text{noin } 0.5 \text{ g}$) tulee olla riittävä, yli 800 m/s iskunopeus, jotta kyetään vaikuttamaan suojaliivillä suojattuun elävään voimaan. Raskaammalta sirpaleelta ($m_s = \text{noin } 5.0 \text{ g}$) vaaditaan vastaavasti, että iskunopeus (v_{is}) tulee olla yli 550 m/s , jotta sillä kyetään vaadittuun vaikutukseen.

Sirpaleen muodon epämääräisyyden vuoksi sen hidastuvuus ilmassa on huomattava ja siten halutut sirpaleiden lähtönopeudet saattavat ylittää kranaatin rakenteen määrittämät teoreettiset arvot. Esimerkiksi sirpale, jonka massa (m_s) on noin 0.5 g , ollakseen tehokas ($v_{is} \geq 800 \text{ m/s}$) vielä 10 metrin etäisyydellä, tarvitsee lähtönopeuden (v_o), joka on yli 1400 m/s . Sirpale, jonka massa (m_s) on noin 5.0 g , tarvitsee vastaavasti lähtönopeuden (v_{is}), joka on yli 1100 m/s , ollakseen tehokas vielä 25 metrin etäisyydellä. Suojatonta elävää voimaa vastaan tehokkaan sirpaleen vaikutusetäisyys on noin 20 metriä, kun sirpaleen massa (m_s) on noin 0.5 g , keskimäärin $50\text{--}60$ metriä, kun sirpaleen massa (m_s) on $4.0\text{--}5.0 \text{ g}$ ja noin 80 metriä, kun sirpaleen massa (m_s) on noin 10.0 g (kuva 13).

3.5.2 Panssaroitua tai panssarilla suojattua maalia vastaan

Panssarinläpäisykyky riippuu sirpaleen ja panssarilevyn materiaominaisuuksista, sirpaleen iskunopeudesta ja iskukulmasta. Sirpaleen iskukulman (α_i) tulee olla noin 90° , sillä sirpaleen epäedullinen muoto ja pienehkö iskunopeus (v_i) aiheuttavat helposti sirpaleen kimmoamisen.

Jotta tavallisen sirpalekranaatin sirpaleella kyetään vaikuttamaan teräspanssariin, tulee sirpaleen massan (m) olla vähintään 60 g, jolloin kyetään läpäisemään 13 mm:n panssarilevy noin viiden metrin etäisyydeltä. Tällöin on sirpaleella oltava lähtönopeus (v_0), joka on yli 1 250 m/s. Kyetäkseen läpäisemään noin 16 mm:n panssarilevyn kohditiisuoralla iskulla ($\alpha_{ii} = 90^\circ$) tulee lähtönopeuden (v_0) olla yli 1 450 m/s, kun vaikutukseen pyritään kahden metrin etäisyydellä.

Kovametallisirpaleilla kyetään läpäisyyn merkittävästi pienemmillä nopeuksilla. Sirpale, jonka massa (m) on 60 g, läpäisee viiden metrin etäisyydeltä 13 mm:n panssarilevyn, kun sen lähtönopeus (v_0) on yli 820 m/s ja 16 mm:n panssarilevyn, kun sen lähtönopeus (v_0) on yli 1 000 m/s.

Ollakseen tehokas ja kyetäkseen vaikuttamaan panssarilla suojattuun maaliin tulee sirpaleella olla jälkivaikutuskykyä läpäisyn jälkeen. Vaatimukset jäännösenergialle ja jälkivaikutuskyvylle tulee asettaa aina kohteen luonteen mukaan.

3.6 Tehokas kranaatti

3.6.1 Perusteita

Kranaatin tehokkuuden mittana ovat vaikutusala ja sirpaleitiheys. Toisaalta myös tehokkaan sirpaleen vaatimukset perustuvat kranaatin ominaisuuksiin. Kranaatista syntyvien sirpaleiden lukumäärä riippuu sirpaleiden massajakautumasta ja sirpaleiden massasta.

Sirpalekranaatti on suunniteltu ja tulee suunnitella pääasiallisesti elävää voimaa vastaan. Vain kaliiperiltaan yli 150 mm kranaateilla luonnollisessa sirpaloitumisessa saatetaan aikaansaada riittävä sirpaleitiheys ja riittävän raskas massajakautuma siten, että kyetään vaikuttamaan kevyesti panssaroituun maaliin tai teräspanssarilla suojattuun elävään voimaan. Sirpalekranaatti tulee suunnitella siten, että kranaatti saadaan sirpaloitumaan massaltaan pieniksi ja lukumäärältään riittävän moniksi sirpaleiksi. Massajakautumaa kuvaavan sirpaloitumisluvun (γ) tulee elävää voimaa vastaan olla $200 [kg^{-1}] - 280 [kg^{-1}]$ ja panssaroitua maalia vastaan pienempi kuin $36 [kg^{-1}]$. Vaatimukset ovat hyvin erilaiset ja näin ollen on konstruoitava mainittuja maalityyppejä vastaan erilaiset kranaatit. Samaa kranaattiin ei kyetä saamaan kahta näin erilaista massajakautumaa tarvittavien sirpaleitiheyksien rajoissa.

3.6.2 Elävää voimaa vastaan

Tehokkaan kranaatin massajakautumaa kuvaavan sirpaloitumisluvun (γ) tulee luonnollisessa sirpaloitumisessa olla $200 [kg^{-1}] - 280 [kg^{-1}]$. Tällöinkin sirpaleiden lukumäärästä saattaa olla 40—50 % sirpaleita, joiden massa (m) on pienempi kuin 0.5 g. Kranaatin sirpaloituvasta massasta saisi kuluu kuitenkin vain 10—15 % näihin liian

pieniin sirpaleisiin. Liian suuria sirpaleita ($m_s > 10.0 \text{ g}$) saisi olla 1.0—1.5 % sirpaleiden kokonaismäärästä ja sirpaloituvasta massasta korkeintaan 8—10 %.

Tehokkaiden sirpaleiden ($0.5 \text{ g} < m_s < 10.0 \text{ g}$) lukumäärän (N_s) tulisi olla vähintään $(350—420) \times M_0$ [kg] sirpaletta ja toivottua sirpalekokoa ($0.5 \text{ g} < m_s < 5.0 \text{ g}$) tulisi olla ainakin $(315—395) \times M_0$ [kg] sirpaletta. Tällöin esimerkiksi kranaatista, jonka sirpaloituvaa massa (M_0) on noin 10 kg, tulisi muodostua 3 500—4 200 tehokasta sirpaletta ja 155 mm kranaatin ($M_0 =$ noin 35 kg) tulisi sirpaloitua 12 000—15 000 tehokkaaseen sirpaleeseen, jos se on suunniteltu elävää voimaa vastaan.

Ohjatussa sirpaloituksissa ja esisirpaloituksissa sirpaleiden koon ja lukumäärän tulee määräytyä vaikutusvaatimusten mukaan. Esimerkiksi 81 mm kranaatinheittimien kranaateissa esisirpaloitujen tai sirpaloitumisen ohjaamisella muodostuvien sirpaleiden massojen (m_s) tulisi olla 1.0—1.6 g ja sirpaleiden lukumäärän tulee olla vähintään 1 300—1 500. Kun kranaatin valurautakuorta myös käytetään sirpaleita tuottavana osana, voi teräskuulien tai muiden ennalta muotoiltujen sirpaleiden lukumäärä olla 400—600.

Kranaatin vaikutusalaan vaikuttavat kranaatin sirpaloitumisominaisuuksien lisäksi ympäröivä maasto, maalin suojautuneisuus ja kranaatin tulokulma. Suunnittelu- ja vertailuparametrinä vaikutusala tulee käsittää edullisimmassa asennossa räjäytetyn kranaatin tehokkaiden sirpaleiden kantaman ja vaaditun sirpaleitiheyden määrittä-mäksi pinta-alaksi. Kranaatin sirpaleitiheyden (ρ_s) tulee olla kaksi tehokasta sirpaletta neliömetrillä ($\rho_s \geq 2$ tehokasta sirpaletta/m²). Vaikutusala tai vaikutussäde ovat hyviä vertailuparametrejä vertailtaessa kranaattien tehokkuuksia. Tehokkaan kranaatin vaikutussäteen ja -alan suuruusluokalle on esitetty kaliiperiluokittain vaatimukset taulukossa 8.

Taulukko 8. Vaatimukset tehokkaan kranaatin vaikutussäteen ja -alan suuruusluokille, kun $\rho_s \geq 2$ tehokasta sirpaletta/m².

Kaliiperiluokka	Vaikutussäde m	Vaikutusalue m ²
< 100 mm	12—15	450— 700
100—130 mm	15—20	700—1 250
> 130 mm	20—30	1 250—2 800

3.6.3 Panssaroitua maalia vastaan

Panssaroitua maalia varten käytettävän sirpalekranaatin sirpaloitumisluvun (γ) tulee olla pienempi kuin $36 \text{ [kg}^{-1}\text{]}$, jotta sirpaleet olisivat riittävän suuria ja niiden määrä olisi riittävän suuri. Sirpalekranaatin sirpaleen massan (m_s) tulee yleensä olla suurempi kuin 60 g, jotta sillä kyettäisiin läpäisemään noin 16 mm:n panssarointi. Tällaisella massajakautumalla, nykyisillä kranaateilla, saadaan noin 1.5 % kokonaismäärästä ja noin 21.5 % kokonaissirpalemassasta tehokkaita ($m_s \geq 60 \text{ g}$) sirpaleita.

Sirpaleen iskunopeuden tulee olla huomattavan suuri. Näin ollen sirpaloitumisluvun (γ) pienentäminen ei saa tapahtua räjähdysainetta flegmatisoimalla vaan sirpaloituvaa massaa lisäämällä ja sirpaleiden muodostumista ohjaamalla. Panssaroitua maalia vastaan suunnitellun sirpalekranaatin ammustäytteenä tulee käyttää joko heksotolia tai oktolia, jolloin vaadittavat lähtönopeudet kyetään saavuttamaan, kun la-taussuhde ($\frac{C}{M}$) on vähintään 0.38.

Tehokas sirpaletiheys ($\rho_{s,\min}$), jolla pystytään vaurioittamaan panssaroitua kuljetusvaunua, on 1.0—1.5 [läpäisyä/m²]. Tällaisia sirpaletiheymiä näin raskailla sirpaleilla ($m \geq 60$ g) kyetään saavuttamaan vain suurikaliiperisilla ($d > 150$ mm) kranaateilla. Taulukossa 9 on esitetty vaatimus sirpaloituvan massan määrälle, kun sirpaletiheys (ρ_s) on 1.5 [tehokasta sirpaletta/m²].

Taulukko 9. Vaatimukset kranaatin sirpaloituvalla massalla sirpaletiheydellä ($\rho_s = 1.5$) sirpaleiden kokonaismäärän perusteella

Vaikutus- etäisyys m	Sirpaletiheys (ρ_s) tehok sirp/m ²	Sirpaleiden kokonaismäärä (N_0)	Sirpaloituva massa M_0 kg	Huom
1	1.5	10	7.1	$m_s = 60$ g
2	1.5	30	21.4	
3	1.5	65	46.4	$\gamma = 36$ [kg ⁻¹]
4	1.5	110	78.6	
5	1.5	180	128.6	

Vaatimuksista todetaan, että noin 130 mm tykistökranaattien sirpaloituva massa riittää teoriassa 2—2.5 metrin etäisyydelle ja 155 mm kranaattien sirpaloituva massa noin kolmen metrin etäisyydelle riittävän sirpaletiheuden ylläpitämiseksi. On huomattava, että tulokset ovat suuntaa-antavia laskuperusteiden rajoittuneisuuden vuoksi, mutta osoittavat kuitenkin tarvittavan sirpaloituvan massan (M_0) suuruusluokan.

Esitettyihin vaatimuksiin perustuen voidaan todeta, että luonnollisesti sirpaloituvia, panssaroitua maalia vastaan tehokas kranaatti on kaliiperiltaan vähintään 150 mm ja sen sirpaloituva massa on yli 35 kg ($M_0 > 35$ kg). Tällöinkin vaikutusetäisyys on noin kolme metriä. Pienempienkin kranaattien sirpaleilla kyetään satunnaisesti kevyen panssaroinnin läpäisyyn. Kun tarkasteluun otetaan mukaan epäsuoran tulen osumatodennäköisyys panssaroituun ajoneuvoon, voidaan esittää, ettei ainakaan luonnollisesti sirpaloituvia kranaatteja kannata suunnitella panssaroitua maalia vastaan.

YHDISTELMÄ

Tehokas kranaatti on kaikilta mittasuhteiltaan kompromissien ja maksimointien tulos. Suunnittelussa on tehtävä kompromissi lähtörasitusten keston, maksimikantaman ja maaliin vaikuttavan maksimitehon kesken. Sirpalevaikutteisen kranaatin vaikutus maalissa riippuu sen sirpaloitumisen tehokkuudesta ja maalin suojautuneisuudesta.

Sirpalekranaatin tehokkuuden mittana on yleensä vaikutussäde tai -ala. Vaikutussäteeseen vaikuttavat sirpaleen massa, lähtönopeus ja iskuenergia sekä käytettävä tehokkaiden sirpaleiden tiheyskriteeri. Kranaatin suunnitteluvaiheessa tulee sirpaleiden lähtönopeuksiin vaikuttaa käyttämällä kranaatille edullisinta muotoa ja lataussuhdetta ($\frac{C}{M}$). Sirpalevaikutteisen kranaatin suunnittelussa on tärkeintä maksimoida kranaatin teho maalissa.

Työssä esitettyjen teoreettisten tarkastelujen ja koetulosten perusteella voidaan esittää, että luonnollisesti sirpaloituvat alle 150 mm kranaatit tulee suunnitella elävää

voimaa ja panssaroimattomia maaleja vastaan. Panssaroituja maaleja vastaan tulee käyttää esisirpaloituja, massiivisia tytärammuksia sisältäviä erikoiskranaatteja, jos sirpalevaikutteisilla kranaateilla on vaikutettava niihin.

Sirpalevaikutteisen kranaatin tehokkaiden sirpaleiden massat (m_s) ovat 0.5—10.0 g. Kranaatin sirpaleiden massajakautumaa ja sirpaloitumista kuvaavan sirpaloitumisluvun (γ) tulee olla $200 \text{ [kg}^{-1} \text{]} - 280 \text{ [kg}^{-1} \text{]}$. Tällöin pääosa kranaatin sirpaloituvasta massasta sirpaloituu toivottuun sirpalekokoon ($0.5 \text{ g} < m_s < 5.0 \text{ g}$). Esitettyyn sirpaloitumiseen päästään tehokkaasti myös ohjatun sirpaloitumisen keinoin. Kevyesti panssaroitun maalin läpäisemiseksi tarvitaan sirpale, jonka massa on keskimäärin noin 60 g ja sirpaloitumisluvun (γ) tulee olla korkeintaan $36 \text{ [kg}^{-1} \text{]}$.

Sirpaleen iskuenergia on sirpaleen massan ja iskunopeuden funktio. Elävää voimaa vastaan tehokkaalla sirpaleella on 1.5 J:a iskuenergiaa jokaista poikkipinta-alansa mm^2 :ä kohti. Suojattujen ja panssaroitujen maalin iskuenergiavaatimukset ovat monimutkaisempia, koska ne riippuvat maalin suojasta ja panssaroinnista. Ihon läpäisee sirpale, jonka iskunopeus (v_{ik}) on yli 50 m/s. Koska taistelukentällä esiintyvä elävä voima tullaan suojaamaan erilaisilla vartalosuojaimilla, on sirpaleen lähtönopeuden oltava keskimäärin noin 1 400 m/s. Tähän kranaatin suunnittelussa voidaan vaikuttaa muotoilemalla kranaatti siten, että trotyylikranaatin lataussuhteen ($\frac{C}{M}$) tulee olla vähintään 0.44 ja heksotolikranaatin lataussuhteen ($\frac{C}{M}$) vähintään 0.38.

Sirpaleiden osumatodennäköisyys riippuu maalin haavoittuvasta pinta-alasta ja tehokkaiden sirpaleiden tiheydestä. Tämän esityksen sirpaleitiheys-kriteerinä on $\rho_s = 2 \text{ [tehokasta sirpaletta/m}^2 \text{]}$, jolloin sirpaleiden osumatodennäköisyys ($P(i \geq 1)$) on noin 0.5. Kranaatin vaikutussäde on koeolosuhteissa saavutettu etäisyys, jossa on voimassa esitetty sirpaleitiheys. Teoreettisen tarkastelun perusteella on esitetty kaliiperiluokittain vaatimukset vaikutussäteille, jotka ovat alle 100 mm:n kranaatilla 12—15 m, 100—130 mm:n kranaatilla 15—20 m ja yli 130 mm:n kranaatilla 20—30 m. Kevyesti panssaroituun maaliin saadaan noin 150 mm:n kranaatin sirpaleilla riittävä sirpaleitiheys vasta noin 3 metrin etäisyydeltä.

L Ä H D E V I I T T E E T

- 1) Janzon, B. (1): Grundläggande stridsdelfysik, FOA rapport S 20261-D 4, 1978, ss 71—77.
- 2) Emt, ss 84—87.
- 3) Salonen, L. ja Vähäkangas, P.: Kranaattien sirpaloitumistutkimuksen tulokset, Puolustusvoimien Tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 2121/Hi/13. 11. 1980, s 6.
- 4) Janzon, B., emt (1), s 74.
- 5) Emt, s 83.
- 6) Pyyry, I., haastattelu 22. 3. 1982.
- 7) Henttinen, S., haastattelu 30. 5. 1983.
- 8) Pearson, J. ja Finnegan, S. A.: A Study of the material failure mechanisms in the shear-control process, Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals, ss 206—211.
- 9) AMC Pamphlet (1): Introduction, kill mechanisms and vulnerability (u), AMCP 706—160, Headquarters U.S. Army Materiel Command, 1962, s 4—173.
- 10) Salonen, L. ja Vähäkangas, P., emt, s 29.
- 11) Salonen, L. ja Vähäkangas, P., emt s 4.
- 12) Salonen, L. ja Vähäkangas, P., emt, s 23.
- 13) Einarsson, B., Ståhl, S-O. ja Westerling, L.: Beräkning av splittrutkast från spränggranater, del 2, FOA rapport C 20375-D 4, s 24.
- 14) Emt, ss 26—27.
- 15) Janzon, B., emt (1), ss 40—42.
- 16) Einarsson, B., Ståhl, S-O. ja Westerling, L., emt, s 26.
- 17) Janzon, B., emt (1), ss 42—43.

- 18) AMC Pamphlet, emt (1), s 4—180.
- 19) Collin, Å. ja Johnsson, Å.: Hastighetsmätning på splitter från cylindriska rörladdningar med några olika sprängämnen, FOA 2 rapport C 2611—D 4, 1973, ss 4—7.
- 20) Janzon, B., emt (1), s 108.
- 21) Janzon, B. (3): Underlag för verkansberäkningar H 5. Splitters luftmotstånd, FOA 2 rapport A 2359-44, 1971, s 25.
- 22) Emt (3), s 36.
- 23) AMC Pamphlet, emt (1), s 4—174.
- 24) AMC Pamphlet, emt (1), s 4—198.
- 25) Gyllenspetz, I.: Några fragmentariska synpunkter på amerikanska och svenska metoder inom området "verkan i luftmål", del. 1. Fysikaliskt underlag, FOA rapport C 20409-D 4, 1981, s 13.
- 26) AMC Pamphlet, emt (1), 4—199.
- 27) Emt (1), s 4—200.
- 28) Henttinen, S., haastattelu 15. 5. 1980.
- 29) Kämäri, V.: Ammusrakenneopin ja ammusvaikutuksen perusteet, Sotakorkeakoulun luentomoniste, 1981, s. 68.
- 30) Sipri: Raportti tavallisista aseista, 1979, s 77.
- 31) Sipri, emt, s 76.
- 32) Cederberg, A. ja Tikka, S. A.: Haavaballistiikan viimeaikaisesta kehityksestä, Sotilaslääkietieteellinen aikakauslehti, n:o 1/1978, s 3.
- 33) Sipri, emt, ss 87—88.
- 34) Cederberg, A. ja Tikka S. A., emt, s 4.
- 35) Murtomaa, M., Koskenvuo, K. ja Fredriksson, K.-J.: Terveysten- ja sairaanhoito poikkeusoloissa, 1981, s 51.
- 36) AMC Pamphlet, emt (1), s 4—196.
- 37) Sipri, emt, s 71.
- 38) Emt, s 154.
- 39) Le Gall, P.: The MDF. 1 Multi-mode antipersonnel grenade, International Defense Review (IDR), n:o 2/1974, s 231.
- 40) Gyllenspetz, I., emt, s 14.
- 41) Rilbe, U.: Splitters genomslagsförmåga. Sammanställning av numeriska värden grundade på försök och beräkningar, FOA 2 rapport A 2525—44, 1970.
- 42) Emt, s 8.
- 43) Janzon, B., emt (1), s 132.
- 44) Janzon, B., emt (1), s 133.
- 45) Kevra OY (1): Kevlar® -aramidikuidut henkilökohtaisessa suojauksessa, 1975, s 8, mainitaan että prepregi on hartsilla esi-impregnoitu kangas, joka sisältää kaiken kompositiin valmistukseen tarvittavan muovin.
- 46) Kevra OY (2): Kevlar® -aramidikuidut rakenteellisissa sekä ballistisissa sovellutuksissa, n:o 10/1981, s 7.
- 47) Kevra OY (2), emt, s 24.
- 48) Aarnisalo, T.: Suojaliivi — elävän voiman suojaamiseen, Sotilasaikakauslehti, n:o 4/1981, s 273.
- 49) Miller, M. J. Jr.: Bodyarmor today, National Defense, n:o 339/1976, s 218.
- 50) Infantry News: personnel armor system for ground troops (PASGT), Infantry, n:o 5/1977, ss 6—7.
- 51) Hansen, J. V. E.: Survivability of the infantry soldier, Military Technology, n:o 25/1981, ss 14—15.
- 52) Laible, R. C.: Fibrous armor, Ballistic materials and penetration mechanics, ss 73—90.
- 53) Airasmaa, I: Aramidikuidut, luonnos "Lujitemuovit" -kirjaan, s 3.
- 54) Roylance, D. ja Wang S. S.: Penetration of textile structures, Ballistic materials and penetration mechanics, ss 283—292.
- 55) Kevra OY (3): Kevyt Kevlar® -aramidikuitu panssarointisysteemit, n:o 6/1981, s. 3.
- 56) Mascianica, F. S.: Ballistic testing methodology, Ballistic materials and penetration mechanics, s 65.
- 57) Janzon, B. (4): Åtgärder vid sabotage och bombhot. Underlag för uppskattning av skydd mot splitter m.m., FOA 2 rapport A 2576-D 4, 1973, s 3.
- 58) Murtomaa, M., Koskenvuo, K. ja Fredriksson, K.-J., emt, s 54.
- 59) Sipri, emt, s 84.
- 60) Koeammunnan pöytäkirja 107/KKoeAs/1982.
- 61) Kämäri, V., emt, s 105.