

Eemil Kemppainen

**KEVYESTI PANSSAROITUJEN TAISTE-  
LUAJONEUVOJEN PASSIIVISUOJIEN  
MATERIAALIRATKAISUT JA KEHITTY-  
MINEN**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Eemil Kemppainen: Kevyesti panssaroitujen taistelujoneuvojen passiivisuojiin materiaaliratkaisut ja kehittyminen  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma  
Huhtikuu 2023

---

Kevytpanssariajoneuvojen suunnittelussa on panostettu liikkuvuuteen, jolloin tulivoimaa sekä suojausta on jouduttu vähentämään. Samalla panssaritorjunta-aseet kehittyvät jatkuvasti tuhovoimaisemmiksi, jolloin nämä uhat ovat entistä kohtalokkaampia kevytpanssariajoneuvoille. Siksi on löydettävä mahdollisimman suorituskykyinen passiivinen suoja, joka luo pohjan koko suojajärjestelmälle. Tämä työ käsittelee nimenomaan passiivisia suojausmateriaaleja ja pyrkii selvittämään kirjallisuuden ja aiempien tutkimusten avulla, millainen suojaratkaisu on paras kevytpanssariajoneuvon käytön kannalta.

Natostandardit, erityisesti STANAG 4569 ja sen lisäosa AEP-55, asettavat yhdessä viitekehysten kevytpanssariajoneuvojen suojaustasojille. Parhaimmillaan suojausten tulisi estää 25 mm panssariammuksen läpäisy. Kuitenkin 25 mm panssariammus on hyvin tuhovoimainen, jolloin suojausmateriaalilta vaaditaan erinomaisia materiaaliparametreja kuitenkin siten, että suojausmateriaali olisi mahdollisimman kevyt.

Hyvän passiivisuojaajärjestelmän tulisi olla sekä ammuksen energiaa hajauttava että sitova, jolloin suojauskyky maksimoidaan. Aiempien tutkimusten perusteella korostui monikomponenttipanssarien ballistinen suorituskyky, jossa se vertautui massahyötysuhteeltaan yli kaksi kertaa paremmaksi verrattuna tyyppillisiin metallipanssareihin. Monikomponenttipanssarien soveltaminen kevytpanssariajoneuvoihin on tämän takia erityisen oleellista suojausten maksimoimiseksi.

Tässä työssä vertailtujen terästen suorituskyky oli heikompi verrattuna muiden lähteiden tietoihin. Kaksoiskovuuksisilla teräspanssareilla voitaisiin saada väitetyksi massahyötysuhteeltaan jopa 78 % tehokkaampia suoja vertailukohteeseen nähden eli RHA:han. Tämän työn tuloksista kävi ilmi, että vertailtu kaksoiskovuuksinen panssari oli ainoastaan 29 % tehokkaampi massahyötysuhteeltaan eli eri teräksillä massahyötysuhde voisi olla lähellä monikomponenttipanssareita. Monikomponenttipanssarit eivät tämän takia ole yksiselitteisesti parempia verrattuna kaksoiskovuuksiin teräspanssareihin.

Tulevaisuuden näkymät passiivisuojoille ovat jokseenkin valoisat. Erityisesti keraamimateriaaleilla nähdään kehitysmahdollisuuksia, vaikka ne ovat tälläkin hetkellä hyvin suorituskykyisiä etenkin monikomponenttisuojoissa. Kuitenkin terästen kehitysmahdollisuuksien nähdään olevan hiipumassa, mutta toisaalta alumiiniseoksilla saattaa olla mahdollisuus kehittyä entistä paremmiksi eri seostusmenetelmillä. Toisaalta metalliseokset luovat erinomaisen pohjan kevytpanssariajoneuvojen runkorakenteelle ja niiden liittämismenetelmät ovat hyvin tunnettuja, jolloin niiden soveltamista tuskin lopetetaan lähitulevaisuudessa.

Avainsanat: taistelujoneuvo, rynnäkköpanssarivaunu, panssaroitu miehistökuljetusajoneuvo, panssarimateriaali, ballistinen suoja, suojausmateriaali

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SUOJAUSTEN KÄYTTÖ KEVYTPANSSARIAJONEUVOISSA.....	3
3. SUOJAUSMATERIAALIEN MURTUMISKÄYTTÄYTYMINEN .....	11
4. SUOJAUSMATERIAALIT .....	15
4.1 Metalliseokset .....	17
4.1.1 Panssariteräokset .....	18
4.1.2 Kevytmetalliseokset .....	22
4.2 Keraamit .....	25
4.3 Komposiitit .....	27
4.4 Monikomponenttipanssarit (MAS) .....	27
5. PANSSARIMATERIAALIEN KEHITYSMAHDOLLISUUDET .....	32
5.1 Suojausten kehittäminen suunnittelulla .....	32
5.2 Suojausten kehittäminen materiaalien ominaisuuksia parantamalla ...	33
6. YHTEENVETO.....	35
LÄHTEET .....	36

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

AFV	Yleisnimitys taistelupanssariajoneuville (engl. Armoured Fighting Vehicle)
AP	Panssarin läpäisevä (ammus) (engl. Armour Piercing)
APC	Panssaroitu miehistökuljetusajoneuvo (engl. Armoured Personnel Carrier)
APDS	Alikaliiperinen panssariammus (engl. Armour-Piercing Discarding Sabot)
APS	Aktiivinen suojausjärjestelmä (engl. Active Protection System)
ATGM	Panssaritorjuntaohjus (engl. Anti-Tank Guided Missile)
BHN	Brinellin kovuusasteikko (engl. Brinell Hardness Number)
CE	Kemiallinen energia (engl. Chemical Energy)
CE	Hiilikvivalentti, ilmaisee miten teräksen seosaineet vaikuttavat hitsautuvuuteen. (engl. Carbon Equivalent)
DHA	Kaksoiskovuuksinen panssari (engl. Dual-Hardness Armour)
DoP	Suojausmateriaalin testausmenetelmä, jota käytetään tyypillisesti keraameilla (engl. Depth of Penetration)
ERA	Reaktiivinen panssari (engl. Explosive Reactive Armour)
FSP	Sirpaletta mallintava ammus (engl. Fragment Simulating Projectile)
HHA	Korkea kovuuksinen panssari (engl. High Hardness Armour)
IFV	Rynnäkköpanssarivaunu (engl. Infantry Fighting Vehicle)
KE	Kineettinen energia (engl. Kinetic Energy)
LAV	Kevytpanssariajoneuvo (engl. Light Armoured Vehicle)
MBT	Taistelupanssarivaunu (engl. Main Battle Tank)
OODA	Johtamisstrategia (engl. Observe, Orient, Decide, Act)
RHA	Kuumavalssattua terästä. Käytetään myös vertailukohteena tunkeutumissyvyysanalyysissä. (engl. Rolled Homogenous Armour)
SSC	Jännityskorroosio (engl. Strain Corrosion Cracking)
VHN	Vickersin kovuusasteikko (engl. Vicker's Hardness Number)
VHS	Erittäin korkea kovuuksinen teräs (engl. Very High Hardness Steel)

# 1. JOHDANTO

Ajoneuvojen suojaaminen perustuu moneen yksittäiseen komponenttiin, joilla on oma tarkoituksensa. Pelkästään paksuilla ja suorituskykyisillä panssareilla ei saavuteta erinomaista suojausta, vaan suojausta on ajateltava koko ajoneuvon suunnittelun kannalta. Yleisesti ottaen se voidaan ajatella kerrosmaisena rakenteena, jossa suojausmateriaalit ovat itseasiassa viimeinen vaihtoehto uhkaa vastaan. Panssarointi voidaan jakaa passiiviseen ja reaktiiviseen panssariin. Reaktiivinen panssarointi nimensä mukaisesti reagoi uhkaan muun muassa räjähdyksellä häiriten uhkan toimintaa. Passiivinen panssarointi pyrkii suojaamaan uhkilta pelkästään hyvillä materiaaliominaisuuksilla. [1, s. 3]

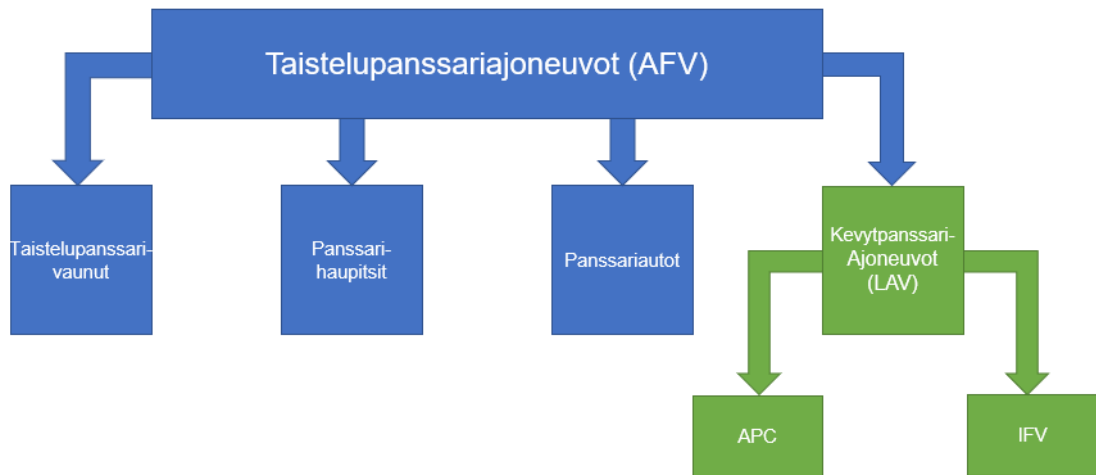
Taistelukentällä suojaväri luo ensimmäisen kerroksen puolustukseen uhkia vastaan. Onnistunut naamiointi vaikeuttaa havaituksi tulemistä ja täten mahdollisesti suojaa kokonaan uhkilta. Toisessa suojauskerroksessa korostuu ajoneuvon liikkuvuus, jolla pyritään ehkäisemään uhan osumatodennäköisyyttä. Tähän voidaan vaikuttaa myös erilaisilla vastatoimenpiteillä, esimerkiksi savuheittimillä, jotka häiritsevät uhan maalinosoitusjärjestelmiä. Lisäksi ajoneuvon tulivoimalla voidaan vaikuttaa uhan tuottajan harkintaan tulen avaamisesta. Mikäli uhka läpäisee edellä mainitut suojakerrokset, on kuitenkin varmistettava, ettei uhka läpäise ajoneuvon panssarointia ja pääse vahingoittamaan miehistöä tai ajoneuvon kriittisiä komponentteja. Tästä syystä kevyillä ja kestäväillä passiivisillä suojoilla on oleellinen rooli ajoneuvon suojauksissa. [1, s. 3]

Tässä työssä käsitellään erityisesti passiivisia suojausmateriaaleja ja pyritään selvittämään, mitkä niistä soveltuvat parhaiten kevyesti panssaroitujen taisteluajoneuvojen käytön kannalta. Toisessa luvussa selvitetään kirjallisuuden avulla, millaisessa ympäristössä kevytpanssariajoneuvot ylipäättänsä toimivat, millaisten uhkien vaikutuksen alla ne ovat ja millaisia suojoja kevytpanssariajoneuvoissa tyypillisesti käytetään. Eri suojausmateriaalit käyttäytyvät eri tavalla ballistisessa törmäyksessä, joten kolmannessa luvussa selvitetään myös teoriapohjalla kineettisten uhkien eli panssariammusten vaikutus käsiteltyihin suojausmateriaaleihin. Vaikutustyyppien perusteella voidaan pohjustaa hyvien suojausmateriaalien ominaisuuksia. Neljännessä luvussa esitetään, kuinka eri suojausmateriaaleja voidaan vertailla ja selvitetään niiden teoriaa. Lisäksi luvussa esitetään materiaalien fysikaalisia ominaisuuksia, ja miksi ne tekevät niistä erinomaisia ballistisia uhkia vastaan. Työssä kootaan myös aiempien tutkimustulosten avulla vertailu eri suojaus-

materiaaleista ja selvitetään, minkälainen suojausmateriaali tai niiden yhdistelmä on suorituskykyisin ja minkä takia. Lopuksi pohditaan, miten passiivisia suoja pystyttäisiin kehittämään jatkuvasti tuhovoimaisempia uhkia vastaan, mikä on suurena haasteena balлистisissa sovelluksissa.

## 2. SUOJAUSTEN KÄYTTÖ KEVYTPANSSARI-AJONEUVOISSA

Kevytpanssariajoneuvojen (Light Armoured Vehicle, LAV) strateginen hyöty tulee niiden nopeasta kyvystä kuljettaa miehistöä, suojata jalkaväkeä sekä turvata jalkaväen liikku- mista taisteluolosuhteissa.



**Kuva 1.** Taistelupanssariajoneuvojen (Armoured Fighting Vehicle, AFV) jaottelu. [2]

Kuvassa 1 on havainnollistettu panssariajoneuvojen luokittelua. Kuvassa 1 oikealla vihreällä merkityt lohkot ovat tämän työn käsittelemiä ajoneuvoja. LAV:eja käytetään erityisesti mekanisoitujen jalkaväkijoukkojen (engl. Mechanized Infantry) tukemisessa. LAV:ien päätarkoitus on antaa jalkaväkijoukoille suojaa pienasetulelta sekä tykistötulelta ja mahdollistaa joukkojen kuljettaminen hyökkäys- ja evakuoimistilanteissa [3].

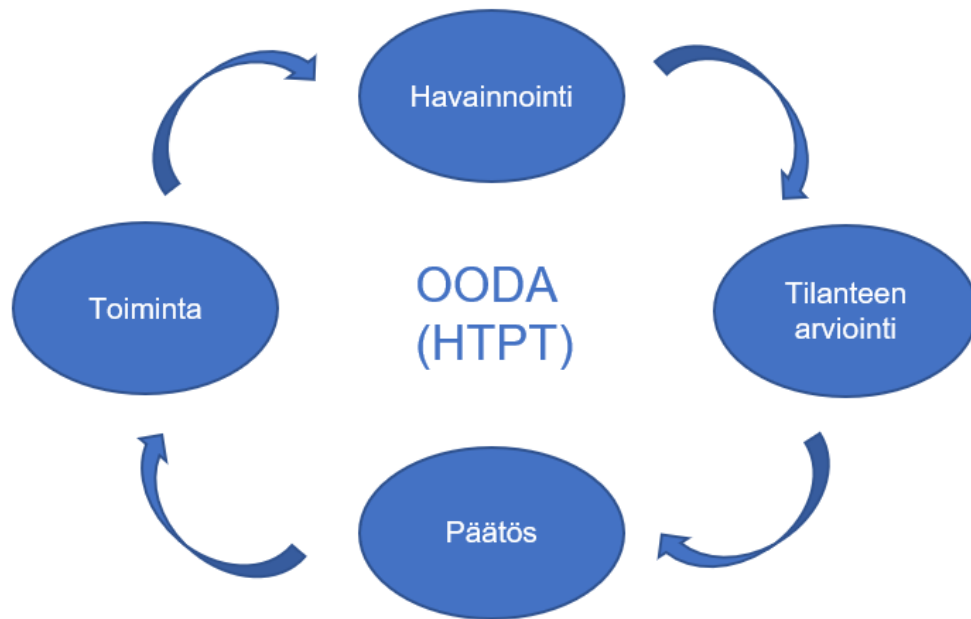
Panssaroituja miehistökuljetusajoneuvoja (Armoured Personnel Carrier, APC) käytetään joukkojen kuljettamisessa taisteluun. Kuten muutkin kevytpanssariajoneuvot, APC:t ovat varustettu myös konetykeillä tai pienempikaliiperisilla konekivääreillä, jotta ne voivat turvata omaa toimintaansa sekä ryhtyä tarvittaessa taisteluun. [4] Rynnäköpanssarivaunuja (Infantry Fighting Vehicle, IFV) käytetään erityisesti hyökkäystilanteissa, joissa tuulivoiman saavuttaminen on ensisijaisen tärkeää. Niiden tehtäviin kuuluvat Wallacen mukaan [3] esimerkiksi tunkeutuminen vaikeasti päästäviin kohteisiin, linnoitettujen kohteiden saartaminen ja eri reittien kontrollointi, jotta muiden joukkojen toiminta ja liikehdintä helpottuisi.



**Kuva 2.** Telaketjuilla kulkeva, 25 mm konetykillä varustettu IFV, M2 Bradley [5] (vas.) ja keskiraskaalla konetykillä varustettu, renkailla liikkuva Patria AMV 8x8. (oik.) [6]

Kuvassa 2 oikealla on Patrian valmistama kevytpanssariajoneuvo Patria AMV (Armoured Modular Vehicle). Nimensä mukaisesti ajoneuvo on modulaarinen, eli sen varustusta pystytään muuttamaan tarpeen mukaan. Muun muassa sen aseistusta voidaan vaihtaa konetykeistä suurikaliiperisiin (120 mm) tykkeihin, jolloin se voi täyttää sekä APC:n, IFV:n, että taistelupanssarivaunun (Main Battle Tank, MBT) rooleja taistelussa. Lisäksi Patria AMV:n on mahdollista liikkua vedessäkin [7]. Vastaavasti kuvassa 2 vasemmalla on Yhdysvaltalaisvalmisteinen IFV, M2 Bradley, joka toimii jalkaväen tukena taistelussa. Kuvasta 2 on myös huomattavissa, että Patria AMV on varustettu renkailla ja vastaavasti M2 Bradley telaketjuilla. Renkaat tuovat LAV:ille nopeutta ja huoltovarmuutta, mutta maasto-olosuhteissa telaketjuisten LAV:ien liikkumiskyky on parempaa [8]. Muuta huomioitavaa on kussakin LAV:issa käytetty suojaväri riippuen maasto-olosuhteista. Kuvan 2 M2 Bradley sopeutuu väriltään aavikko-olosuhteisiin ja puolestaan kuvan Patria AMV on naamioitu metsäympäristöön.





**Kuva 3.** OODA-johtamissilmukka.

Länsimaisessa sodankäynnissä sodan johtamisessa hyödynnetään OODA-johtamissilmukkaa (Observation, Orientation, Decision, Action), (suom. HTPT) [9], joka on havainnollistettu kuvassa 3. Sodankäynnissä kevytpanssariajoneuvoja käytetään erityisesti silmukan viimeisen kohdan, toiminnan toteuttamisessa [4]. Pääasiassa se sisältää monenlaisia tehtäviä, jolloin on mahdollista, että kevytpanssariajoneuvo ajautuu erilaisten uhkien vaikutuksen alle. Mahdollisia uhkia ovat [4] mukaan muun muassa kineettisen energian uhat (KE), jotka sisältävät jalkaväkiaseiden, raskaiden konekivääreiden sekä joissakin tapauksissa pienempien konetykkien tuomat uhat. Lisäksi panssariajoneuvo voi olla tykistötulen kohteena, minkä vuoksi sen on suojattava sisällä olevaa miehistöä mahdollisilta sirpaleilta. Tästä syystä on ensiarvoisen tärkeää, että kevytpanssariajoneuvot ovat suurimmaksi osaksi suojattuna näiltä uhkilta.

Panssaroitu ajoneuvo on määritetty STANAG 4569 [10] mukaisesti sellaiseksi, että se suojaa vähintään 30 mm ammuksia vastaan. Panssariajoneuvojen suunnitteluprosessi perustuu ajoneuvon liikkuvuuteen, tulivoimaan ja selviytymiskykyyn [4],[7]. Tavallisesti kevytpanssariajoneuvoissa on panostettu liikkuvuuteen, jonka takia niiden panssarit ovat [11] mukaan ohuempia (12 mm – 45 mm). Näin ajoneuvon massasta saadaan merkittävästi pienempi, jolloin liikkumiskyky paranee ja uhkien osuma todennäköisyyttä saadaan pienennettyä. Nykyaikaiset panssaritorjunta-aseet, kuten FGM-148 Javelin, voivat läpäistä yli 700 mm panssariterästä (engl. Rolled Homogenous Armour, RHA) [12], minkä

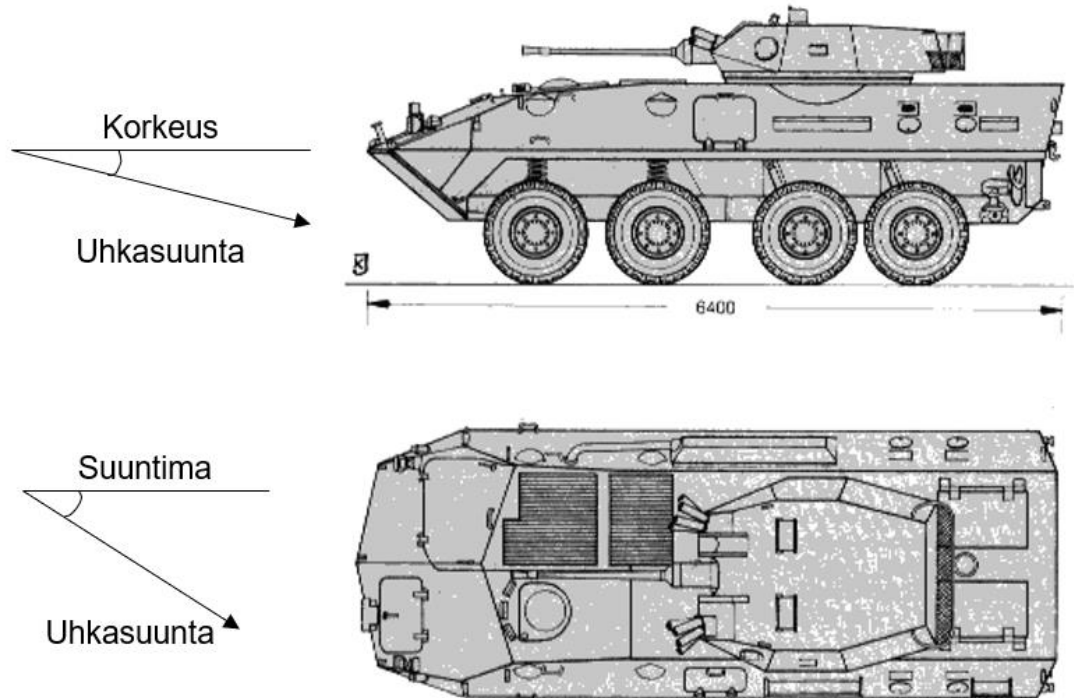
vuoksi kevytpanssariajoneuvot eivät anna suojaa raskaammilta panssaritorjunta-aseilta passiivisilla panssarointimenetelmillä.

Kevytpanssariajoneuvoille on määritetty tietyt panssarointiluokitukset riippuen siitä, millaisia ammustyyppejä niiden tulee kestää 90 % varmuudella. Ammukset ovat jaoteltu KE-uhkiin ja epäsuoran tulen uhkiin, joissa käytetään sirpaleita mallintavia ammuksia (Fragment Simulating Projectile, FSP). [10],[13]

**Taulukko 1.** Panssarointiluokitukset kevyesti panssaroiduille ajoneuvoille. Mukailtu lähteistä [10],[13].

Taso	KE-uhka	Tykistö-uhka
1	Ase: Rynnäkkökiväärit, 7,62 ja 5,56 mm Ammustyyppi: Kokovaippaluoti Etäisyys: 30 m Kulma: suuntima 360°; korkeus 0–30°	Tykistö 155 mm Arvioitu räjähdysetaisyys: 100 m Suuntima: 360° Korkeus: 0–18°
2	Ase: Rynnäkkökiväärit, 7,62 mm Ammustyyppi: Panssariammus, teräsydin Etäisyys: 30 m Kulma: suuntima 360°; korkeus 0–30°	Tykistö 155 mm Arvioitu räjähdysetaisyys: 80 m Suuntima: 360° Korkeus: 0–22°
3	Ase: Konekiväärit ja tarkkuuskiväärit, 7,62 mm Ammustyyppi: Panssariammus, wolframikarbidi- tai teräsydin Etäisyys: 30 m Kulma: suuntima 360°; korkeus 0–30°	Tykistö 155 mm Arvioitu räjähdysetaisyys: 60 m Suuntima 360° Korkeus: 0–30°
4	Ase: Raskaskonekivääri, 14,5 mm Ammustyyppi: Panssariammus Etäisyys: 200 m Kulma: suuntima 360°; korkeus 0°	Tykistö 155 mm Arvioitu räjähdysetaisyys: 25 m Suuntima 360° Korkeus: 0–90°
5	Ase: Konetykki, 25 mm Ammustyyppi: APDS Etäisyys: 500 m Kulma: Etukaaresta keskilinjaan $\pm 30^\circ$ , sivusta mukaan lukien; korkeus 0°	Tykistö 155 mm Arvioitu räjähdysetaisyys: 25 m Suuntima 360° Korkeus: 0–90°

Taulukossa 1 on esitetty panssarointiluokitukset LAV:ille. Luokitukset ovat määritetty asteikolla 1–5 ja suurempi luokitus kattaa myös alemman tason. Luokitukset ottavat huomioon ammustyyppin, ammuntaetäisyyden sekä kulmat kohteen ja uhkasuunnan välillä.



**Kuva 4.** Havainnekuva uhan suuntimasta ja korkeudesta. Mukailtu lähteestä: [14]

Kuvassa 4 on havainnollistettu uhan suunnan merkitystä käytännössä. Uhan suuntima voi kattaa koko ajoneuvon ympäristän eli 0–360°. Toisaalta korkeus rajoittuu pitkälti 0–90°:een, koska harvemmin kineettisten uhkien suunta osoittaa alhaalta päin LAV:ehin.

Luokitukset eivät ota huomioon eräitä räjähtäviä ammuksia, kuten ontelopanoksia tai suurempikaliiperisia panssaritorjunta-ammuksia. LAV:eja ei ole tarkoitettu suojaamaan näiltä uhkilta tavallisilla passiivisilla panssarointimenetelmillä, mutta nykyaikaisissa suojausmenetelmissä voidaan hyödyntää aktiivisia suojausjärjestelmiä (Active Protection System, APS) ja reaktiivista suojausta (Explosive Reactive Armour, ERA). Aktiivisessa suojauksessa ajoneuvoon on asennettu moduuleja, jotka sisältävät vastatoimenpiteitä CE-uhkia (Chemical Energy), kuten panssaritorjuntaohjuksia (Anti-Tank Guided Missile, ATGM) vastaan [15]. Eräissä taistelujoneuvoissa, kuten aiemmin esitetyssä M2 Bradley rynnäköpanssarivaunussa, aktiivinen suojaus on toteutettu ”hard-kill” -menetelmällä, jossa suojausmoduuli pyrkii tuhoamaan tulevan ohjuksen.

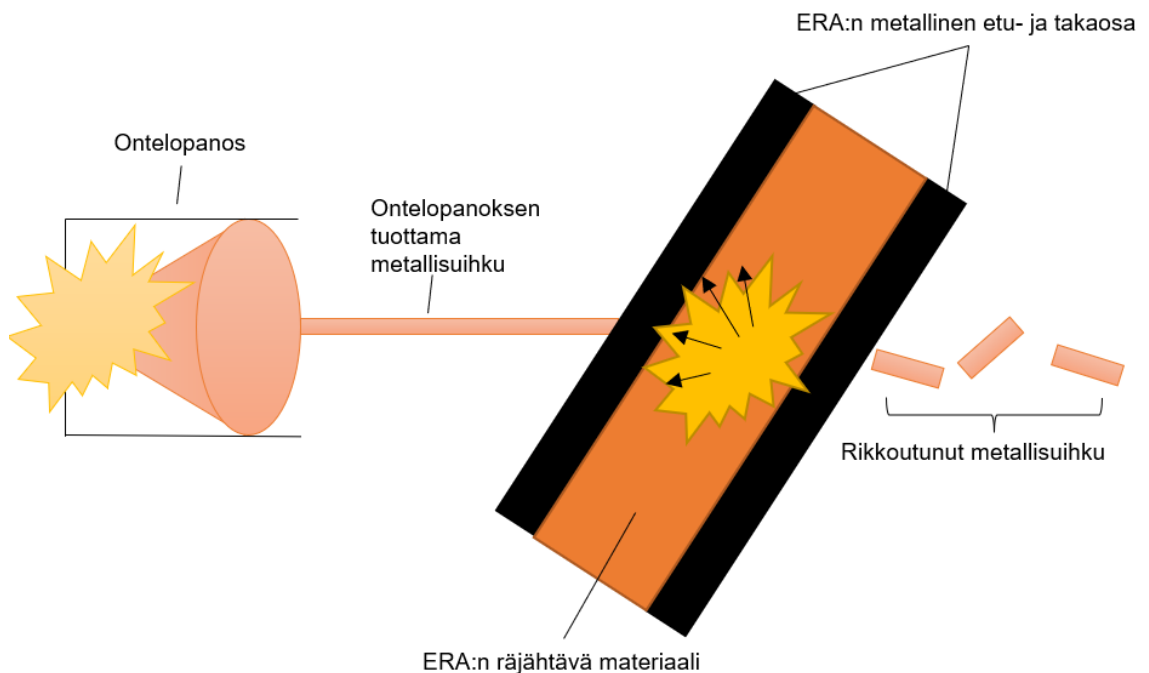


**Kuva 5.** M2 Bradley rynnäköpanssarivaunun tykkitorniin sijoitettu, Israel Military Industries:n suunnittelema aktiivinen suojausjärjestelmä, Iron Fist. Mukailtu lähteestä: [16]

Kuvassa 5 punaisella ympyrällä on merkitty APS:n pääkomponentit eli maalinosoitusjärjestelmä (tutka ja optiset sensorit) sekä vastatoimenpiteen laukaisin. Iron Fist hyödyntää sekä optista dataa, että radiosignaaleja uhan havaitsemiseen [16]. APS:n toiminta tapahtuu seuraavasti [17]:

- Tutka havaitsee mahdollisen uhan.
- Laukaisin ampuu vastatoimenpideprojektiin.
- Lataajamoduuli lataa tarvittaessa automaattisesti uuden projektiin laukaisimeen.

Räjähävä reaktiivinen panssari muistuttaa aktiivista suojausta, mutta siinä ei hyödynnetä elektroniikkaa tai maalintunnistusta toisin kuin aktiivisessa suojauksessa. ERA:t ovat modulaarisia, eli niitä pystytään paikoittamaan alueille, missä panssarointi on heikompaa tai esimerkiksi panssarin takana on kriittisiä komponentteja, kuten elektroniikkaa tai moottori. Reaktiivinen panssari aktivoituu nimensä mukaisesti herätteeseen, eli esimerkiksi ontelovaikutteisen ammuksen räjähdykseen. Räjähäessään ERA luo vastaräjähdyksen, mikä häiritsee ontelopanoksen tuottamaa uhkaa estäen sen tunkeutumisen passiiviseen panssariin. [4]



**Kuva 6.** ERA:n toimintaperiaate.

Ontelovaikutteisen panoksen toiminta perustuu räjähdyksestä syntyneeseen sulaan metallisuihkuun, joka muodostuu panoksen kartiomaisesta metallivaipasta. Metallisuihkun nopeus voi olla jopa 10 km/s [4], jonka avulla se tunkeutuu panssariin mahdollisesti läpäisten sen kokonaan. Kuvassa 6 on havainnollistettu, kuinka ERA häiritsee ontelopanosen synnyttämän metallisuihkun suuntaa ja koostumusta vastaräjähdyksellä. On tärkeää huomata, että ERA pyrkii nimenomaan räjähtämään ulospäin uhan suuntaan, jota kuvan 6 nuolet esittävät. Lisäksi ERA:t ovat kertakäyttöisiä eli räjähdysen jälkeen ne eivät enää anna suojaa, vaan on asetettava uusi moduuli suojauksen turvaamiseksi.

Kevytpanssariajoneuvojen suojaus on toteutettu pääasiassa passiivisesti, eli aluspanssarina käytetään eri metalliseoksia, kuten panssariterästä tai suuren lujuuden omaavia alumiiniseoksia. Aluspanssari antaa samalla ajoneuvolle myös rakenteellista jäykkyyttä, sekä suojaa useimpia KE-uhkia vastaan [4]. Pelkkä aluspanssarointi ei anna täydellistä suojaa edes pienikaliiperisille panssariammuksille, joten kevytpanssariajoneuvoihin on lisättävä modulaarisia suoja, vaikka ne lisäävätkin massaa [4], [18].

Lisäpanssarit ovat valmistettu muun muassa erittäin kovasta teräksestä (Very High Hardness Steel, VHS), joiden kovuus voi ylittää 700 Vickersin kovuusasteikolla (Vicker's Hardness Number, VHN). Verrattuna tyypilliseen RHA-panssariin (Rolled Homogenous Armour), VHS:n kovuus on jopa 2 kertaa suurempi [18], jolloin panssaroinnin paksuudessa voidaan säästää, ja näin ajoneuvon kokonaismassaa saadaan pienennettyä ja liikkuvuutta parannettua.

Lisäpanssaroinnissa voidaan hyödyntää keraameja, sekä komposiitteja [18]. Näitä materiaaleja käytetään tyypillisesti kerroksittain, jossa komposiitti toimii suojuksen takaosana. Keraameilla on myös erittäin suuri kovuus, joka edesauttaa KE-ammuksen hajottamista ja sen energian levittämisestä suojukseen [4]. Komposiitin tarkoituksena on estää hajonneen ammuksen tunkeutuminen esimerkiksi aluspanssariin tai estää sen täydellinen läpäisy eli perforaatio [18]. Lisäksi keraamit ovat tiheydeltään pienempiä verrattuna metalleihin, joka on merkittävä tekijä kevytpanssariajoneuvojen suunnitteluprosessissa. Toisaalta keraamien sitkeys, sekä plastiset ominaisuudet ovat olemattomia verrattuna metalleihin, minkä vuoksi ne murtuvat herkemmin heikentäen niiden suojausominaisuuksia, mikäli kevytpanssarivaunu on jatkuvan tulen kohteena [18].

### 3. SUOJAUSMATERIAALIEN MURTUMISKÄYT- TÄYTYMINEN

Ballistinen törmäys on hyvin lyhytaikainen tapahtuma, joka aikaansaa puristavia ja vetäviä jännitysaaltoja, jotka lopulta aiheuttavat suojausmateriaalin murtumisen. Jännitysaallot etenevät hyvin suurilla nopeuksilla, jolloin ne voivat luoda murtumakohtia syvälle suojausmateriaaliin ennen kuin itse projektiili on ehtinyt tunkeutua suojausmateriaaliin. Eri-tyisesti hauraiden materiaalien kannalta vetojännitykset voivat aiheuttaa ennenaikaisen murtumisen, jolloin materiaalin suojauskyky alenee. [1, s. 191]

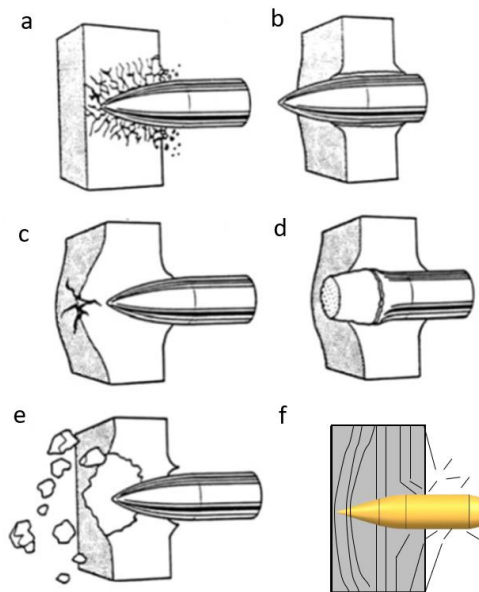
Suojausmateriaalien murtumistyytit riippuvat pitkälti niihin kohdistuvan uhan luonteesta, materiaalityypistä ja itse panssarin ominaisuuksista, kuten paksuudesta ja kovuudesta [19]. Muun muassa nopeasti liikkuvilla (>1700 m/s) panssariammuksilla ja ontelohanoksilla on erilainen vaikutus suojausmateriaaleihin, sillä törmäys saattaa olla hydrodynaaminen eli suojausmateriaali käyttäytyy nesteen tavoin, eikä tällöin materiaalin staattiset mekaaniset ominaisuudet juurikaan vaikuta ammuksen läpäisykykyyn. Kuitenkin hydrodynaaminen alue on kullekin materiaalille ominainen. Esimerkiksi keraameilla se voi olla jopa 5000 m/s ja vastaavasti kovilla metalleilla noin 3000 m/s. [1, s. 170] Muun muassa rynnäkkökivääreissä ja raskaissa konekivääreissä käytettävien ammusten nopeus harvemmin pääsee hydrodynaamiselle alueelle, sillä niiden lähtönopeus on noin 700–1000 m/s [19]. Näillä nopeuksilla murtumismekanismit ovat erilaisia ja myös panssariammuksen käyttäytyminen poikkeaa nopeasta törmäyksestä eli materiaalin staattisilla ominaisuuksilla, kuten plastisuudella ja kovuudella on suuri merkitys suojauksen murtumismekanismiin.

**Taulukko 2.** Eri materiaalien murtumiskäyttäytyminen.

Murtumistyyppi	Kovat metallit	Sitkeät metallit	Keraamit	Komposiitit
Hauras murtuma	x	-	x	x
Sitkeä murtuma	-	x	-	x
Radiaalinen murtuma ja pullistuminen	x	x	-	-
Leikkaustulpan muodostuminen	x	x	-	-
Sirpaloituminen	x	-	x	-
Delaminoituminen	-	-	-	x

Pääasiassa murtumistyyppit voidaan jakaa kuuteen eri luokkaan, kun ammuksena toimii hidas projektiili [1, s. 109–110]. Taulukkoon 2 on koottu murtumistyyppit materiaaliryhmittäin. Kovat metallit sisältävät pääasiassa terässeoksia, joita käydään enemmän läpi seuraavassa luvussa, mutta tietyt alumiiniseokset voidaan myös luokitella olemaan erittäin kovien ryhmässä murtumiskäyttäytymisen takia [20, s. 123]. Sitkeisiin metalleihin sisältyy pääasiassa eri alumiiniseoksia, joita hyödynnetään suojaussovelluksissa.

Taulukosta 2 on havaittavissa, että erityisesti kovat metallit ja keraamit murtuvat hauraasti. Tämä johtuu yksinkertaisesti heikosta murtumissitkeydestä ja kyvyttömyydestä plastiseen muodonmuutokseen. Toisaalta alumiiniseokset ja komposiitit kykenevät paremmin sitkeään muodonmuutokseen, jolloin tämä murtumiskäyttäytyminen on suuremmissa osassa näillä materiaaleilla. Komposiitin osalta havaitaan, että se kykenee kolmeen eri murtumistyyppiin. Energian absorption kannalta tällainen kyky on erityisen oleellista ja se edesauttaa ammuksen tunkeutumisen ehkäisyä merkittävästi. Sirpaloituminen, leikkaustulpan muodostuminen ja delaminoituminen ovat hieman harvinaisempia murtumistapoja ja ne vaativat joko tietyn ammustyypin, materiaalin tai niiden yhdistelmän toteutuakseen.



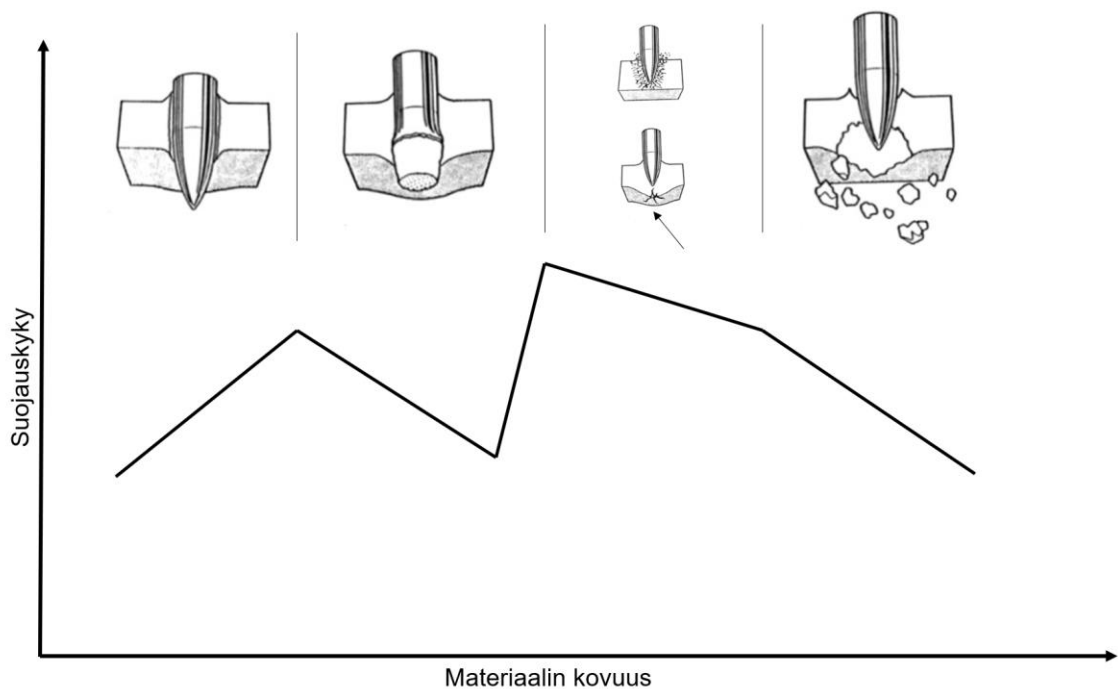
**Kuva 7.** Havainnollistava kuva murtumistyypeistä. (a) hauras murtuma, (b) sitkeä murtuma, (c) radiaalinen murtuma ja pullistuma, (d) leikkaustulpan muodostuminen, (e) sirpaloituminen, (f) komposiitin murtuminen. Mukailtu lähteistä: [19], [21]

Kuvassa 7 on visualisoitu edellä mainittuja murtumistyypppejä, jossa a, c ja e ovat hauraita murtumistyypppejä ja b, d ja f tietyllä tapaa sitkeitä murtumistyypppejä. Kuitenkin kom-



posiitin murtuminen (7f) on aluksi haurasta, jossa lujitekuidut katkeavat, mutta ammuksen nopeuden hidastuessa murtumistyyppi siirtyy sitkeään, jolloin kuidut joustavat sekä taipuvat ja kuitukerrokset mahdollisesti myös irtoavat toisistaan eli murtuma etenee matriisissa. [21]

Kuvassa 7d on havainnollistettu leikkaustulpan muodostumista, joka johtuu adiabaattisesta prosessista [1, s. 109], [20, s. 82], [22]. Ammuksen osuessa panssariin sen materiaalin plastisesta muodonmuutoksesta syntyy suuri määrä lämpöä materiaalin sisälle, joka ei ehdi johtua muualle materiaaliin. Tällöin materiaalin leikkauslujuus pienenee merkittävästi paikallisesti ammuksen vaikuttamalle alueelle, jolloin muodostuu irtonainen tulppa, joka toimii uhkaavana projektiilina. Tämä murtumistyyppi vaatii tietynlaiset ominaisuudet sekä materiaaalilta että ammukselta, ja on myös hyvin matalaenerginen murtumistyyppi, eli murtuma ei vähennä ammuksen energiaa. Erityisesti tietyn kovuuksisilla teräksillä sekä alumiiniseoksilla, ja ammuksen ollessa tylppäpäinen tai epämääräinen sirpale, tapahtuu adiabaattista leikkausta ja sen aiheuttaman tulpan muodostumista [22].



**Kuva 8.** Metallien kovuuden vaikutus suojauskykyyn. Koostettu lähteistä: [19], [22].

Metalleilla siirtymä sitkeästä hauraaseen murtumaan riippuu pitkälti materiaalin kovuudesta [22]. Kuvasta 8 huomataan, kuinka pienillä kovuuksilla tapahtuu sitkeää murtumista, mutta kovuuden kasvaessa tapahtuu haurasta murtumaa ja lopulta sirpaloitumista. Kuvassa 8 nuolella osoitettu murtumistyyppi kuvaa kovan alumiinin murtumista,

jossa se hajoaa levymäisesti pullistumalla, (engl. discing) jolloin alumiinipanssarin takaosasta irtoaa levymäinen kiekko. Teräksillä tällainen murtumistyyppi on myös mahdollista, mutta pullistuminen on alumiiniseoksilla yleisempää ja se on suojauksen kannalta epäedullinen murtumistyyppi [20, s. 123].

Käyrän maksimikohdassa on tietynlainen ihannealue, jossa materiaali hajottaa ammuksen, mutta ei itse murru, jolloin suojauskyky maksimoidaan. Etenkin teräksillä tällaisen kovuuden saavuttaminen on oleellista, koska täydellinen hauras murtuma ja sirpaloituminen eivät ole toivottuja murtumistyyppisiä, sillä yleisesti teräkset toimivat myös kantavana rakenteena.

Toisaalta keraameilla halutaan tällaista murtumiskäyttäytymistä, koska ammuksen kineettinen energia muuttuu osittain murtopinnaksi sekä murtuneiden osien kineettiseksi energiaksi. On myös havaittu, että keraamin pirstoutuminen pieniksi osiksi ja niiden vuorovaikutus toistensa kanssa (engl. comminution) vähentää merkittävästi ammusten tunkeutumissyvyyttä. Erityisesti pienien keraamisirpaleiden pakkautumistiheydellä osu-massa on suuri merkitys keraamin suorituskykyyn. Pakkautunut keraami on entistä tiiviimpää ja ehkäisee ammuksen tunkeutumista [1, s. 339].

## 4. SUOJAUSMATERIAALIT

Ballistisissa sovelluksissa eli projektiili-kohdesysteemeissä suojausmateriaaleja voidaan luokitella kineettistä energiaa sitoviin ja hajauttaviin materiaaleihin. Kovat materiaalit, kuten keraamit ja tietyt terässeokset luokitellaan energiaa hajauttaviksi. Suojausmateriaalin kovuudella halutaan edistää panssariammuksen tunkeutujan hajottamista, jolloin sen kineettinen energia leviää suojausmateriaalissa laajemmalle alueelle. Vastaavasti pehmeämmät metalliseokset, kuten alumiiniseokset, ja komposiittimateriaalit ovat ominaisuuksiltaan sitkeämpiä, jolloin ne pystyvät joustamaan ja muuttamaan muotoaan muuttaen panssariammuksen kineettisen energian esimerkiksi lämmöksi. Tällöin sitkeät ja joustavat materiaalit luokitellaan energiaa sitoviin materiaaleihin. [19]

Panssarimateriaalien suorituskykyä arvioitaessa tulee määrittää niiden pintatiheys, joka normalisoi eri panssarimateriaalien tiheydet ja paksuudet keskenään, jotta ne ovat vertailukelpoisia [20, s. 47], [23]. Kuten aiemmin mainittu, panssarimateriaalien massalla on suuri merkitys kevytpanssariajoneuvojen käytön kannalta, minkä takia pintatiheyden optimoiminen on oleellista [21]. Pintatiheys lasketaan kaavalla

$$A_d = h\rho, \quad (1)$$

jossa  $h$  on panssarimateriaalin paksuus (m) ja  $\rho$  materiaalin tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ). Panssarimateriaalien vertailussa on myös syytä asettaa vertailukohde, johon muita panssarimateriaaleja tai -systeemejä on luontevaa rinnastaa. Yleisesti vertailu tehdään RHA:han, johon on johdettu massahyötysuhteen kaava

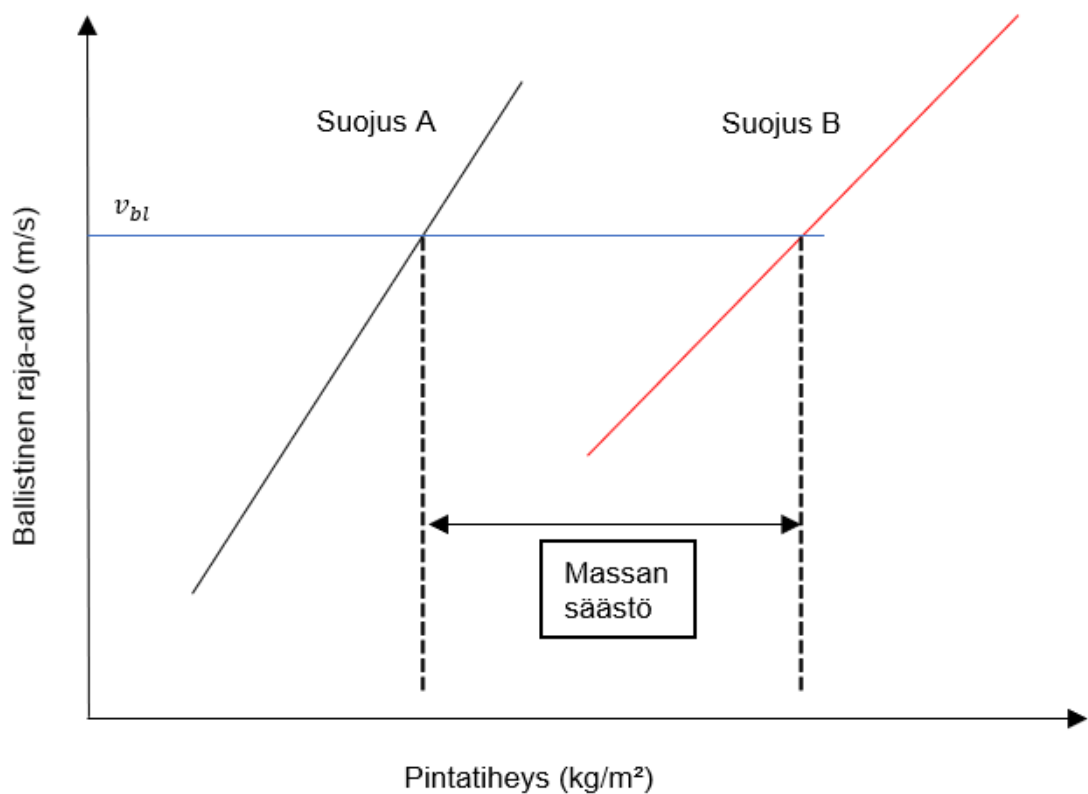
$$E_m = \frac{A_d^{RHA}}{A_d^{vert}}, \quad (2)$$

jossa  $A_d^{RHA}$  kuvaa RHA:n pintatiheyttä ja  $A_d^{vert}$  siihen vertailtavan materiaalin pintatiheyttä. [20, s. 46]

Eri panssarisuojusten suorituskykyä on hankala arvioida yksinomaan materiaaliparametreista, sillä suojusten kyky estää ammusten tunkeutumista ei liity pelkästään suojusten paksuuteen, vaan myös esimerkiksi energian absorptiotapoihin ja murtumistyyppeihin. Tästä syystä suojamateriaalien ballististen ominaisuuksien määrittämisessä ja -vertailussa käytetään yleisesti ballistista raja-arvoa  $v_{bl}$  sekä  $v_{50}$ -kriteeriä [19], [20, s. 40–41], [21]. Suojan ballistinen raja-arvo (engl. Ballistic Limit) on ammuksen nopeus, jolla se perforoi suojan jäännösnopeuden ollessa 0 [19]. Vastaavasti  $v_{50}$ -kriteeri ilmaisee, millä nopeudella 50 % ammuksista perforoi suojan [21]. Lisäksi  $v_{50}$ -kriteerillä on suuri merkitys

erityisesti suojausmateriaalien suunnittelu- ja testausvaiheessa. Tutkimukset [20, s. 40] ovat osoittaneet, että ammuttaessa tutkittavaa materiaalia tietyllä nopeudella  $v_0$  ammuksen perforaatiotodennäköisyys muistuttaa normaalijakaumaa. Tästä voidaan johtaa ammuksen nopeus, jolla se läpäisisi panssarin 50 %:n todennäköisyydellä.

Toisaalta keraameilla käytetään yleensä DoP-testausta (engl. Depth of Penetration), jossa testattavan keraamin alapuolelle on asetettu esimerkiksi hyvin paksu metallikapale. Tällöin keraamin suorituskykyä arvioidaan ammuksen tunkeutumissyvyydestä metalliin keraamitiilen kanssa ja ilman sitä. [1, s. 443]



**Kuva 9.** Havainnekuva, kuinka panssarisuojuksia voidaan vertailla hyödyntäen ballistista raja-arvoa ja pintatiheyttä. Mukailtu lähteestä: [20, s. 47]

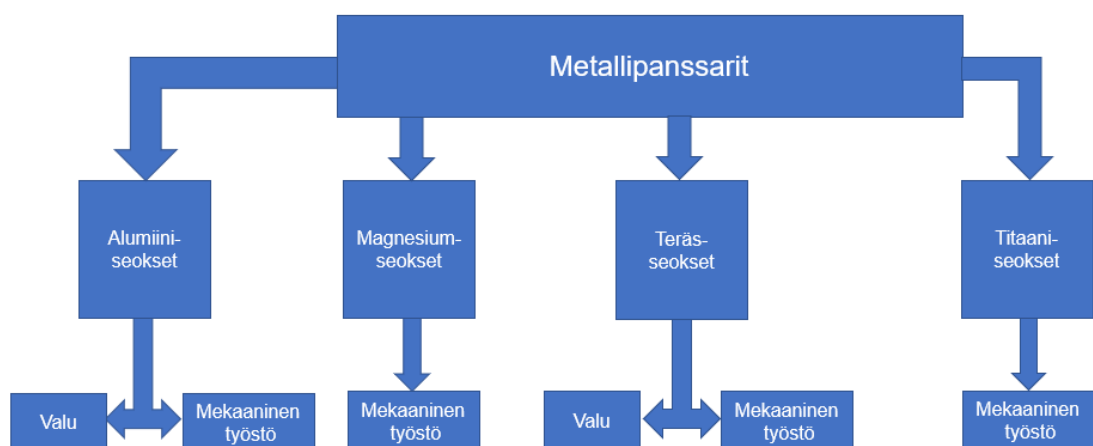
Kuvassa 9 on kahden mielivaltaisen panssarisysteemin (Suojus A ja B) ballistinen raja-arvo esitettyinä pintatiheyden funktiona. On syytä huomioida, että funktio ei ole tyypillisesti lineaarinen [20, s. 47] ja kuvaajat ovat pelkästään havainnollistavia. Kuvaajasta nähdään, että suojuksen B:n pintatiheyden on oltava huomattavasti suurempi, jotta sen  $v_{bl}$  olisi samalla tasolla suojuksen A kanssa. Tästä syystä suojuksella A saataisiin samankaltainen suojauskyky pienemmällä massalla verrattuna B:hen, eli näin ollen suojuksen A on parempi vaihtoehto näillä kriteereillä.

Ihannetilanteessa suojausmateriaali antaisi kevytpanssarivaunulle sekä rakenteellista jäykkyyttä että suojaa uhkia vastaan [21]. Toisaalta kaikki suojausmateriaalit eivät voi

täyttää näitä kriteereitä, sillä esimerkiksi keraamimateriaalien murtumismitkeys on alhainen, mikä ei ole toivottua dynaamisesti kuormitetuissa käyttökohteissa eli tässä tapauksessa ajoneuvon kantavana rakenteena. Puolestaan metallit kestävät tunnetusti hyvin dynaamista kuormaa sopivilla jännitysamplitudeilla, eivätkä ole niin herkkiä väsymiselle, joten ne toimivat hyvin sekä runko- että suojarakenteena [1, s. 284]. Kuitenkaan suojausmateriaalien hyviä ominaisuuksia ei voida poissulkea sen vuoksi, etteivät ne pystyisi kantamaan esimerkiksi rakenteellista kuormaa. Metallien tavoin komposiittimateriaalit täyttävät hyvin suojausmateriaalien kriteerit, sillä ne ovat kevyitä, lujia, tarvittaessa joustavia sekä pystyvät kantamaan kuormaa. Toisaalta komposiittien muodonantaminen on kallista ja komposiittisuojiin numeerinen analysointi on hankalampaa verrattuna metallisuojiin, jolloin komposiittisuojiin vertailu muihin suojausmateriaaleihin saattaa olla haastavaa numeerisilla menetelmillä.

#### 4.1 Metalliseokset

Taistelupanssarivaunuissa on käytetty metallipanssarointia, erityisesti teräspanssareita, vuosikymmeniä jo ensimmäisestä maailmansodasta lähtien [1, s. 285]. Erityisesti alumiini- ja terässeokset ovat olleet laajalti käytössä kevytpanssarivaunujen suojausmateriaalina sekä runkomateriaalina. Alumiini- ja terässeokset ovat tunnetusti hyvin muokkautuvia sekä kylmä- että kuumamuokkauksessa ja niitä voidaan myös pääosin hitsata. Metallipanssarien pääasiallinen valmistusmenetelmä on valssaaminen. Suurempia rakenteita, kuten LAV:iin tykkitorneja, voidaan tehdä suoraan valamalla, mutta nykyaikaisilla mekaanisilla työstömenetelmillä saavutetaan suurempia lujuuksia verrattuna perinteisiin valumenetelmiin. [1, s. 279–280]



**Kuva 10.** Metallipanssarien luokittelu ja muodonantomenetelmät. Mukailtu lähteestä: [1, s. 280]

Kuvassa 10 on esitetty eniten käytetyt metallimateriaalit ballistiikkasovelluksissa. Magnesium- ja titaaniseokset ovat harvemmin käytettyjä, eikä esimerkiksi magnesiumpanssareita ole vielä sovellettu LAV:eihin käytettäväksi, johtuen liittämismenetelmien hankaluudesta. Lisäksi magnesiumilla on taipumusta hauraaseen murtumaan ja pullistumiseen, jolloin suurenerginen törmäys saattaa sytyttää magnesiumipartikkelit palamaan [1, s. 303]. Titaaniseokset takaavat panssareille pienen massan ja suuren lujuuden, mutta alumiini- ja terässeoksillakin päästään hyvin lähelle titaaniseosten ominaisuuksia pienemmillä kustannuksilla [1, s. 284].

Panssarien pääasiallinen muodonantomenetelmä kuvan 10 mukaisesti on mekaaninen työstö eli levypanssarien tapauksessa valssaus. Valssauksella saadaan suhteellisen helposti muokattua metalliainio haluttuun leveyteen ja paksuuteen. Metallien muodonannossa sen mikrorakenteeseen syntyy aina jonkin verran anisotropiaa, joka vaikuttaa sen mekaniisiin ominaisuuksiin tietyissä kuormitus suunnissa. Esimerkiksi lujuusominaisuuksiin voidaan vaikuttaa anisotropian avulla [1, s. 279], mikä on tärkeää ballistisissa sovelluksissa.

#### 4.1.1 Panssariteräksset

Hiiliterästen ja terässeosten mekaaniset ominaisuudet määrittävät niihin diffuntoituneen hiilen määrä, muiden seosaineiden laatu ja määrä, muodonantotapa ja mikrorakenteen koostumus, johon voidaan vaikuttaa eri lämpökäsittelymenetelmillä. Rauta—hiili-seoksia kutsutaan teräksiksi, kun niiden hiilipitoisuus on 0,008—2,14 painoprosenttia [1, s. 285]. Kuitenkin LAV:ien valmistuksen kannalta teräksen hiilipitoisuuden on oltava suhteellisen pieni, jotta se pysyy hitsattavana [20, s. 57].

Yleisesti ottaen hiilen määrä raudassa, sekä lämpökäsittelyt määrittävät, millaisia faaseja siinä esiintyy. Kullakin faasilla on omat ominaisuutensa ja metallipanssarien kannalta tietyt faasit, kuten perliitti, martensiitti ja bainiitti ovat ominaisuutensa vuoksi haluttuja. Esimerkiksi hitaasti jäädytettäessä tavallista hiiliterästä austeniittialueelta syntyy lamellinen rakenne  $\alpha$ -ferriitin ja sementiitin (hiilikarbidi,  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) kanssa, jota kutsutaan perliitiksi. Verrattuna tavalliseen  $\alpha$ -ferriittiin (kovuus n. 90 VHN), perliitti on paljon kovempaa (250 VHN). Vastaavasti jos lämpökäsittely tehdään hyvin nopeasti, eli sammuttamalla teräs veteen tai öljyyn, hiiliatomit eivät ehdi diffuntoitua muualle rakenteeseen, vaan jumittuvat teräksen metallihilan välisijoihin, jolloin rakenne muuttuu tetragonaaliseksi kiteeksi. Tällaisella rakenteella ei juurikaan ole liukusysteemejä, jolloin plastinen muodon-

muutos dislokaatioiden avulla vaikeutuu ja teräs lujittuu. Tällaista faasia kutsutaan martensiitiksi, jonka kovuus voi olla jopa 900 VHN. [1, s. 286] Pelkkä martensiittinen rakenne ei ole sen haurauden vuoksi optimaalinen panssarilevyissä, vaan se vaatii myös päästön, joka lievittää sisäisiä jännityksiä sitkeyden saavuttamiseksi [1, s. 286], [20, s. 58]. Bainiittinen rakenne voidaan saavuttaa tietyillä seosaineilla ja lämpökäsittelyillä. Bainiittiset teräkset ovat erinomaisia panssarimateriaaleja, sillä niissä on nanometriluokan raekoko ja ne ovat erittäin lujia [1, s. 286].

Kuten aiemmin mainittu, teräspanssarilevyä valmistetaan pääasiassa valssaamalla. Muodonantomenetelmänä valssaus vaikuttaa erityisesti teräksen mikrorakenteeseen ja tekee sen mekaanisista ominaisuuksista anisotrooppisia. Valssauksessa mikrorakenteen rakeet litistyvät ja venyvät valssaussuuntaan, minkä takia metallin veto-ominaisuudet ovat paremmat tässä suunnassa. On kuitenkin havaittu, että metalleissa murtumisitkeys alenee merkittävästi poikittaiseen suuntaan tarkastellessa johtuen rakeiden muodonmuutoksesta. Mikrorakenteen tulisi siis olla mahdollisimman tasalaatuinen, jotta teräksellä olisi hyvät ominaisuudet panssarimateriaalina. Erityisesti rakeiden tulisi olla mahdollisimman yhdenmuotoisia ja pieniä, sillä Hall—Petch-yhtälön (kaava 3) mukaisesti pienempi raekoko lujittaa terästä ja muita metalleja. [20, s. 65]

Raekoon vaikutus myötölujuuteen lasketaan kaavalla

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + \frac{k}{\sqrt{d}}, \quad (3)$$

jossa  $\sigma_{y0}$  ja  $k$  metallin materiaalikohtaisia vakioita sekä  $d$  keskimääräinen rakeen halkaisija. Raekokoon vaikuttaa muodonanto ja myös tietyt seosaineet, kuten vanadiini, joka estää rakeiden kasvua [24], muodostamalla erkaumia raerajoille.

Yleisin teräksestä valmistettu panssarisuojus on RHA:ta, jonka kovuus on yhdysvaltalaisen sotilasstandardien mukaan 241—388 BHN (Brinell Hardness Number) [25]. Sitä valmistetaan kuumavalssaamalla teräsbillettejä. Tyypillisesti RHA:han halutaan päästömartensiittinen rakenne erilaisilla sammutus- ja päästömenetelmillä. Tällöin metallin mikrorakenne koostuu ferriittimatriisista, jossa on pieniä sementtiitipartikkeleita [26, s. 347]. Kuitenkin RHA:n mikrorakenteeseen sekä kemialliseen koostumukseen voidaan vaikuttaa lisäaineilla ja RHA:n suunniteltu käyttökohde määrittää sen lopullisen koostumuksen ja mikrorakenteen. [1, s. 287]

**Taulukko 3.** Panssariteräksissä (HHA ja RHA) käytetyt seosaineet. [1, s. 288], [20, s. 93]

Seosaine	C	Mn	Ni	Cr	Mo	S	P	Cu	V
Pitoisuus	0,18—	0,60—	0,05—	0,00—	0,30—	<0,015	<0,015	<0,025	<0,10
(p-%)	0,32	1,50	0,95	0,90	0,60				

Taulukossa 3 on esitetty yleisimmät seosaineet RHA:ssa, joiden määrää voidaan muokata sovelluksen mukaan. Esimerkiksi joissakin tapauksissa RHA:n on oltava helposti hitsautuva, jonka vuoksi niiden hiiliekvivalentin on oltava alle 0,8 [20, s. 57]. Hiiliekvivalentti (Carbon Equivalent, CE) ilmaisee, miten teräksen seosaineet vaikuttavat sen hitsautuvuuteen. CE lasketaan kaavalla

$$CE = p\% \left( C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \right), \quad (4)$$

jossa  $p\%$  tarkoittaa eri alkuaineiden painoprosentteja teräksessä. Erityisesti hiilen määrä kasvattaa CE-lukua merkittävästi. Myös lisäaineet, kuten kromi, molybdeeni ja vanadiini, kasvattavat CE-lukua enemmän toisin kuin magnaani, nikkeli tai kupari. Panssariteräksissä seosaineiden pitoisuutta rajoittaa siis vaadittu hitsautuvuus. Tyypillisesti teräs hitsautuu parhaimmillaan, kun CE-luku on alle 0,5 [27].

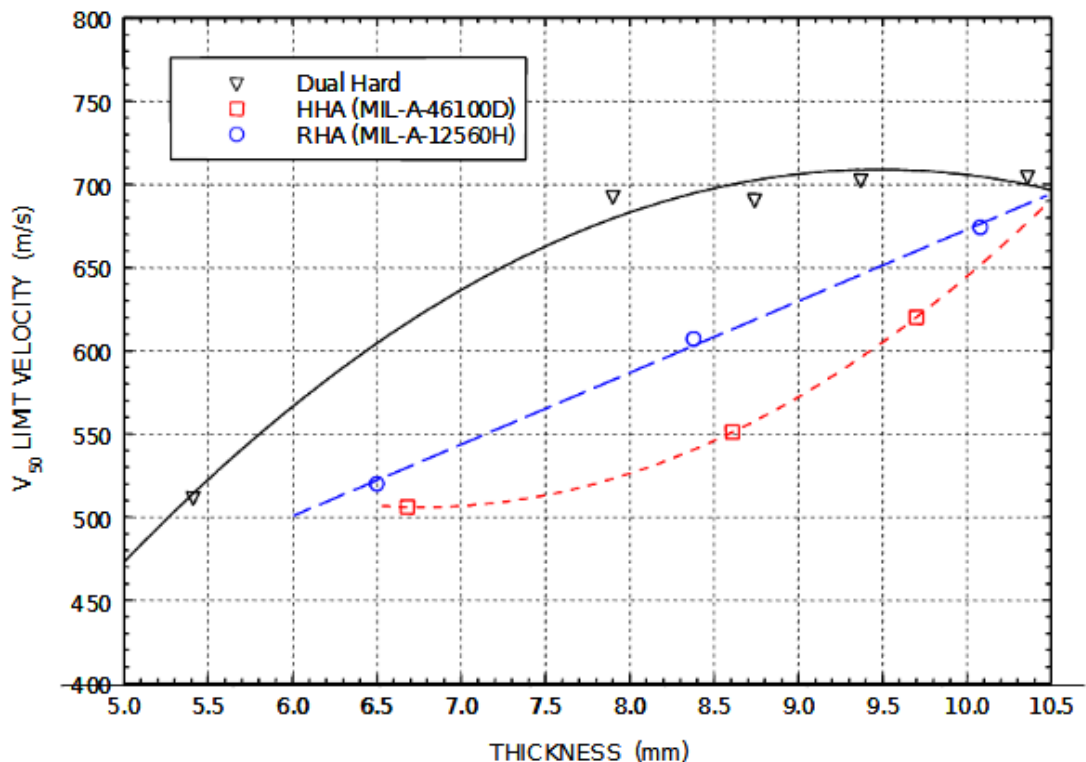
Toinen yleisesti käytetty panssarisuojus on korkea kovuuksista terästä (High Hardness Armour, HHA), jonka kovuus on tyypillisesti yli 430 BHN [1, s. 288]. Sen valmistusmenetelmä on samankaltainen RHA:n kanssa, mutta erona on matalampi päästölämpötila, jonka avulla saavutetaan suurempi kovuus [1, s. 288]. Tällainen panssariteräs on suosittu erityisesti LAV:eissa, sillä HHA:n suuremman kovuuden ansiosta voidaan saada 20% massan säästö verrattuna saman suojaustason RHA:han [18].

On osoitettu [28, s. 232], että pelkästään erittäin kovalla teräspanssarilla ei voida saavuttaa tarpeeksi suojaa mahdollisia KE-uhkia vastaan. Panssarin kovuuden ylittäessä 700 VHN sen antama suoja alenee merkittävästi johtuen teräksen sirpaloitumisesta. Panssari ei pysty absorboimaan KE-uhan energiaa murtumatta, mutta tälle on kehitetty kaksoiskovuuspanssari (engl. Dual-Hardness Armour, DHA), joka pyrkii soveltamaan molempia energia-absorptiotapoja.



Nimensä mukaisesti DHA:ssa on yhdistetty kaksi eri kovuuksista panssariterästä. Päälimmäisen teräslaadun kovuus voi olla yli 700 BHN ja sen alla olevan teräslaadun kovuus on 300–500 BHN. DHA:n teräkset ovat seostettu nikkelillä, kromilla ja molybdeenillä ja päälimmäisen kerroksen hiilipitoisuus on suurempi korkeamman kovuuden saavuttamiseksi [1, s. 289], [20, s. 96]. Päälimmäisen teräskerroksen tarkoituksena on hajottaa panssariammuksen tunkeutuja ja jälkimmäinen kerros estää hajonneen ammuksen sirpaleiden tunkeutuminen syvemmälle panssariin, eli kerrokset pyrkivät hyödyntämään energiaa sitovia ja hajauttavia teräksiä. Verrattuna tavalliseen RHA:han, DHA:lla voidaan saada merkittävästi parempi suojuus massahyötysuhteeseen (kaava 2) verrattuna [19].

Kerrostojen yhdistämisessä on kuitenkin haasteensa, sillä niiden sidoksen tulisi olla metallurgisesti vahva, jotta ballistinen suorituskyky voidaan taata. Tästä syystä teräslaadut kuumavalssataan toisiinsa kiinni, mutta liittäminen voidaan myös tehdä räjähdysten avulla. Tällöin teräslaatuojen liitos on entistä vahvempi, koska sitä haittaavat metallioksidit palavat pois ja kerrokset kiinnittyvät toisiinsa myös mekaanisesti kasvattaen niiden leikkauslujuutta [20, s. 96–97].



**Kuva 11.** DHA-panssarin suorituskyky verrattuna RHA- ja HHA-panssariin. [29, Kuv. 6]

Kuvassa 11 on esitetty Gooch et al. [29] tekemä vertailu DHA-, RHA- ja HHA-panssareiden välillä. Tutkimuksen ballistisessa systeemissä projektiilina toimi 7,62 mm APM2 -

ammus (Armour Piercing, AP). Kuvaajasta nähdään selvästi, että DHA-panssarin suorituskky ( $v_{50}$ -kriteeri) oli parempi verrattuna RHA:han ja HHA:han. Kuitenkin on huomattava, että DHA:n paksuus ei juurikaan kasvattanut  $v_{50}$ -kriteeriä paksuuden ylittäessä 8 mm, jolloin DHA:t voisi soveltua hyvin ohuiksi panssareiksi. Toisaalta RHA:n  $v_{50}$ -kriteeri näyttäisi kasvavan lineaarisesti panssarilevyn paksuuden kasvaessa. Vastaavasti HHA:lla on näyttäisi olevan neliöllinen trendi mittasarjojen välillä, vaikka niitä onkin vain 3, joten paksummalla HHA-panssarilla saattaisi olla erinomainen ballistinen suorituskky suuremman massan kustannuksella.

#### 4.1.2 Kevytmetalliseokset

Kevyesti panssaroitujen taisteluajoneuvojen kannalta kevytmetalliseokset tarjoavat niille paljon haluttuja ominaisuuksia, kuten nopeaa liikkumiskykyä, jäykät runkorakenteet ja mahdollisuuden monipuoliseen rahtikuljetukseen. Muun muassa alumiiniseokset ovat tunnetusti jopa 65 % kevyempiä verrattuna teräsiin [1, s. 291], [20, s. 128]. Alumiiniseosten matalampi tiheys mahdollistaa LAV:eihin sekä paksumpia panssareita että jäykemmät runkorakenteet. Alumiiniseokset, kuten 5xxx-sarjan seokset ovat hyvin hitsautuvia [30], mutta esimerkiksi suuren lujuuden omaavat 7xxx-sarjan seokset ovat vaikeammin hitsattavissa. Erityisesti seosaineena magnesium ja pii voi aiheuttaa hitsausauman halkeilua [31].

Alumiiniseoksilla saadaan samantasoista suojauskkyä teräspanssareihin jopa pienemmällä pintatiheydellä [1, s. 284] ja alumiiniseoksilla runkorakenteista saadaan myös jäykempiä. Suorakaiteen muotoiselle kappaleelle on johdettu tunnettu neliömomentin kaava

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (5)$$

jossa  $b$  on kappaleen leveys ja  $h$  paksuus kuormitusuuntaan nähden. Neliömomentti esiintyy erityisesti taivutusjäykkyyden  $EI$  terminä, jossa  $E$  on materiaalikohtainen kimmomoduli. Siispä paksummilla rakenteilla saavutetaan parempaa rakenteellista jäykkyyttä, koska paksuus kasvattaa neliömomenttia kuubisesti, vaikka alumiiniseosten kimmomoduli onkin huomattavasti terästen kimmomoduleja pienempi.

Nykyisin alumiiniseoksia käytetään laajalti LAV:eissa. Esimerkiksi kuvassa 5 esillä ollut Bradley IFV on valmistettu pääasiassa lämpökäsiteltävästä 7039-sarjan alumiiniseoksesta, johon on seostettu sinkkiä ja magnesiumia [20, s. 119]. Alumiiniseosten keveys helpottaa LAV:ien liikkumiskykyä itsessään sekä myös niiden kuljettamista muun muassa ilma-aluksella, mikä on nykyään tärkeä suunnitteluparametri LAV:eissa [1, s. 293].

Tyypillisesti alumiiniseokset ovat korroosionkestäviä, mutta joissakin seoksissa esiintyy tunnetusti jännityskorroosiota (Stress Corrosion Cracking, SCC) [20, s. 121], mikä on haitallista erityisesti LAV:n runkorakenteen kannalta. Muun muassa aiemmin mainittu 7039-sarjan alumiiniseos on altis jännityskorroosiolle, jossa korrodoiva ympäristö ja jännitys yhdessä aiheuttavat alumiiniseokseen murtumia. Jännityskorroosioon voidaan vaikuttaa erityisesti seosaineilla, koska ne määrittävät alumiinin pinnalle muodostuvan oksidikerroksen laadun, joka puolestaan estää korrodoivien aineiden, kuten klooripohjaisten liuosten, tunkeutumisen syvemmälle rakenteeseen [32]. Toisaalta ilmiönä jännityskorroosio on hyvin tunnettu, ja sen ehkäisemistä on tutkittu pitkään. Lisäksi sotilasstandardit vaativat tietyn seostuksen käyttökohteesta riippuen [20, s. 121].

**Taulukko 4.** Yleisimmät alumiinin seostusaineet. [26, s. 392]

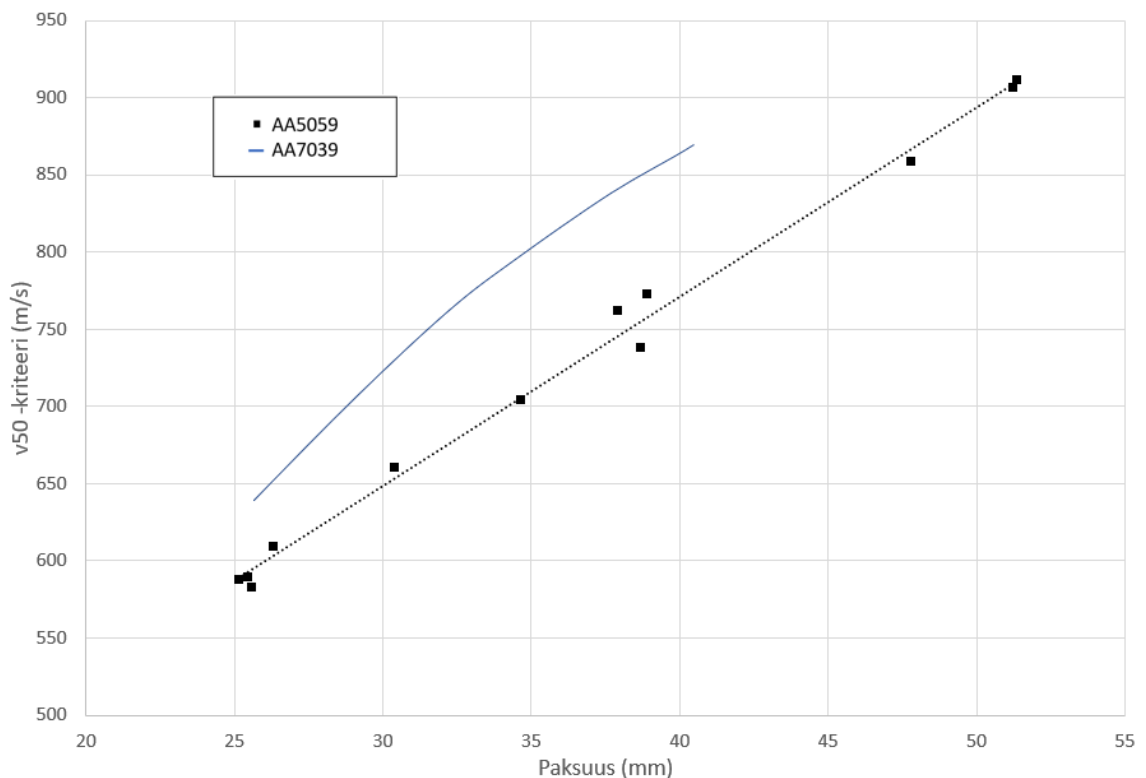
Seosaine ja luokitus	Cu	Si	Mg	Zn	Lämpökäsittelykyky
1xxx	-	-	-	-	-
2xxx	x	-	(x)	-	x
3xxx	-	-	x	-	-
4xxx	-	x	-	-	-
5xxx	-	-	x	x	-
6xxx	-	x	x	-	x
7xxx	-	-	(x)	x	x

Taulukossa 4 on esitetty alumiiniseosten pääasialliset seosaineet sarjoittain sekä niiden kyky lämpökäsittelyyn eli erkaumakarkaisuun ja liuoslujittukseen. Erkaumakarkaisussa seosaineet muodostavat lujittavia yhdisteitä, kuten  $MgZn_2$  mikrorakenteeseen [26, s. 392]. Puolestaan liuoslujituksessa alumiiniin diffundoituu lujittavia atomeita, jotka muodostavat yksifaasisen kiinteän liuoksen [26, s. 425].

Seosaineet määrittävät pitkälti, miten alumiiniseosta voidaan muokata sekä millaisia lujittamismenetelmiä siihen voidaan soveltaa. Alumiiniseosten muodonanto toteutetaan pääasiassa kylmämuokkauksena, joka myös samalla lujittaa seoksia johtuen mikroraka-

kenteen muutoksista, jossa raekoko ja -muoto määräävät myös sen mekaanisista ominaisuuksista kaavan (3) mukaisesti. Erityisesti 5xxx-sarjan alumiiniseoksia lujitetaan kylmämuokkauksella, koska ne eivät ole lämpökäsiteltäviä [20, s. 127].

Ballistiikkasovelluksissa käytetään erityisesti taulukossa 4 esiintyviä 5xxx ja 7xxx -sarjan alumiiniseoksia. 7xxx-sarjan alumiinit ovat lämpökäsiteltäviä ja niitä lujitetaan erkaumakarkaisulla [20, s. 126]. Puolestaan 5xxx-luokan alumiiniseoksilla on havaittu, että erityisesti magnesiumin seostus kasvattaa niiden myötölujuutta merkittävästi [20, s. 129]. Yleisesti ottaen alumiiniseokset ovat energiaa absorboivia materiaaleja ja niiden kyky plastiseen muodonmuutokseen on erinomainen. Siispä ballistisessa törmäyksessä alumiini muokkautuu sitkeästi vähentäen projektiiliin kineettistä energiaa [20, s. 122]. Kuitenkin on havaittu, että tietyillä 7xxx-sarjan alumiineilla FSP:t aiheuttivat levymäisen pulistuman, mikä ei ole toivottu murtumistyyppi. Tästä syystä alumiineilla tulee tasapainottaa murtumissitkeys ja lujuus, jotta suojauskyky maksimoidaan [20, s. 134].



**Kuva 12.** 5059- ja 7039-sarjan alumiiniseosten ballistinen vertailu. AA7039 käyrä kuvaa MIL-DTL-46063H-standardin mukaista vaadittua ballistista rajaa. Muokattu lähteestä: [33].

Kuvassa 12 on esitetty kokeellinen tulos [33] kahden ballistiikkasovelluksissa käytettävän alumiiniseoksen  $v_{50}$ -kriteeri suojauskyky paksuuden funktiona. Tutkimuksen ballisti-

sessä systeemissä projektiilina toimi 7,62 mm APM2 -ammus. Kuvaajasta on huomattavissa selvä lineaarinen trendi AA5059-suojuksen paksuuden ja  $v_{50}$ -kriteerin kanssa. Alumiiniseoksilla saadaan siis sekä jäykempiä rakenteita, että enemmän suojaa levyn paksuuden kasvaessa.

Teoreettisessa mielessä titaaniseokset ovat erinomaisia suojamateriaaleja. Ne ovat kevyitä, jätkeä, lujia sekä muokkautuvat sitkeästi. Titaaniseosten tiheys on  $4450 \text{ kg/m}^3$  ja niiden murtolujuus voi olla jopa  $1300 \text{ MPa}$ , erityisesti seoksen Ti-6Al-4V, jota käytetään pääasiassa suojamateriaalina. Toisaalta suojausominaisuuksiltaan samanlainen titaanilevy on 10–20 kertaa kalliimpi verrattuna tavalliseen RHA-panssariteräslevyyn. Tästä syystä titaaneja ei tyypillisesti käytetä suuressa mittakaavassa LAV:eissa, mutta jotkin pienemmät komponentit, kuten huolto- tai tarkasteluluukut on valmistettu titaanista. Esimerkiksi M2 Bradleyssä komentajan luukussa ja tykkitornin suojamateriaalina on hyödynnetty titaania. [1, s. 304], [20, s. 144]

Muiden edellä mainittujen metalliseosten tavoin Ti-6Al-4V on hyvin muovattava sekä hirtattava. Lisäksi edellä mainittua seosta voidaan myös lämpökäsitellä. Erityisesti Ti-6Al-4V-seosta hehkutetaan, kun vaaditaan suurta kovuutta ja lujuutta [34]. Nykyisin titaaniseoksia hyödynnetään AFV:eissä pääsääntöisesti alentamaan niiden massaa, sillä titaaniseoksilla voidaan saada jopa 40 % massanvähennys verrattuna tavalliseen RHA-panssariin. Kuitenkaan titaaniseosten suuren hinnan vuoksi, niitä ei sovelleta LAV:eihin tai muihin AFV:ehin pelkästään hyvien ballististen ominaisuuksien vuoksi. [20, s. 144]

## 4.2 Keraamit

Ballistisissa sovelluksissa keraamit ovat niiden kovuutensa ansiosta energiaa hajauttavia materiaaleja. Keraameilla on tunnetusti hyvä lujuus puristuksessa, mikä tekee niistä erinomaisia ballistisen törmäyksen alkuhetkillä, jossa syntyy puristavia jännityksiä [1, s. 324]. Toisaalta keraameilla on heikko murtumissitkeys, jolloin ne ovat erityisen herkkiä murtumille ja tyypillisesti murtuvat heti ammuksen osuessa niihin. Tästä syystä keraami-panssarilevyt valmistetaan pienemmistä keraamitiilistä [20, s. 331], [21], jolloin yhden ammuksen vaikutus ei heikennä koko suojajärjestelmää. Verrattuna esimerkiksi panssarimetalleihin, keraamien suojauskyky useampaa osumaa vastaan on merkittävästi heikompi [35].

**Taulukko 5.** Käytetyimmät panssarikeraamit ja niiden ominaisuuksia. [1, s. 346], [18]

Ominaisuus	AlN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>4</sub> C	SiC	TiB <sub>2</sub>
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	3250	3800	2500	3150	4500
Kovuus (Knoop)	1300	1600	3000	2700	3300
Murtumissitkeys (MPa√m)	3,7	3,5	2,5	4,3	6,2
Suhteellinen hinta	-	1,0	16,0	2,5—4,5	-

Taulukossa 5 on esitetty suojausmateriaaleiksi soveltuvien keraamien yleisiä- ja mekaanisia ominaisuuksia sekä suhteellinen hinta soveltuvien osin. Tiheydensä ja kovuutensa puolesta erityisesti boorikarbidi B<sub>4</sub>C ja piikarbidi SiC vaikuttavat erinomaisilta suojausmateriaaleilta, koska yleisesti keraameilta halutaan suuri kovuus—tiheyssuhde [20, s. 332]. Esitetyistä keraameista huomataan myös, että niiden tiheys on kevytmetalliseosten ja terästen välillä, mutta toisaalta niiden murtumissitkeys on erittäin alhainen verrattuna metalleihin. Kovillakin teräksillä murtumissitkeys voi olla kymmeniä kertoja suurempi keraameihin verrattuna [36].

Alhaisen tiheyden vuoksi keraameita on jo hyödynnetty LAV:eissa, koska ne ovat kevyitä suhteessa niiden antamaan suojauskykyyn [18]. Kuitenkaan keraameja ei sovelleta yksinään käytettäväksi, vaan niitä käytetään kerrospanssareissa, missä esimerkiksi panssarin päällysosa on kovaa keraamia ja alakerros pehmeämpää, energiaa absorboivaa metallia tai komposiittia [20, s. 331].

Panssarikeraameiden valmistuksessa on oleellista maksimoida keraamijauheen tiivistymistä samalla minimoiden keraamin raerajoille jäävät huokokset. Huokosilla on negatiivinen vaikutus keraamin suorituskykyyn, sillä ne alentavat lujuusominaisuuksia merkittävästi erityisesti vetojännityksessä. Kuitenkaan valmiin keraamipanssarin mikrorakenteen virheet eivät vaikuta puristusjännityksessä niin merkittävästi, koska keraamin lujuus voi olla kymmenkertainen puristuksessa. Parhaat ominaisuudet panssarikeraameille saadaan kuumapuristuksella, jolloin lisätty paine ja lämpötilat estävät rakeiden kasvua, jolloin keraamijauhe pakkautuu hyvin tiiviisti minimoiden huokosten koon ja määrän. [1, s. 322, 324]

Keraamimateriaalin valinta panssarisovellukseen päättyy lopulta sen hintaan, massaan ja valmistusmahdollisuuksiin [20, s. 333], [35]. Esimerkiksi taulukossa 4 esitetty boorikarbidi on ominaisuuksiltaan erinomainen keraami, mutta sen valmistus on teknisistä

syistä haasteellista [35], eikä se siten sovellu massatuotantoon, jota LAV:t tyypillisesti vaativat. Boorikarbidin valmistus vaatii kuumapuristusta, joka on kallis menetelmä. Verrattuna esimerkiksi alumiinioksiidiin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), boorikarbidin on suhteellisesti 16 kertaa kalliimpaa [1, s. 346] johtuen valmistusprosessin haasteellisuudesta. Kuitenkin yleisesti käytetyllä keraamilla, alumiinioksidilla on verrattain hyvät ballistiset ominaisuudet. Tiettyissä tapauksissa sen ballistinen suorituskyky voi vastata boorikarbidia. Lisäksi se on edullista ja soveltuu myös massatuotantoon [35].

### 4.3 Komposiitit

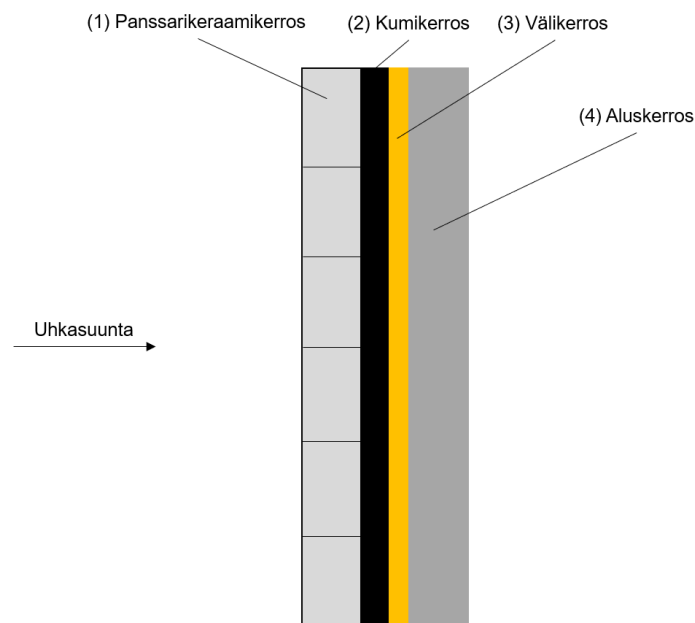
Komposiittimateriaalit koostuvat lujikkeesta ja matriisimateriaalista, joka sitoo lujikkeen tehden komposiitista kiinteän ja lujan rakenteen. Tyypillisesti lujikkeet ovat yksittäisiä kuituja, kuten lasi-, aramidi- tai hiilikuituja, jotka orientoidaan tiettyihin suuntiin haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Matriisi koostuu esimerkiksi epoksista tai muista muovilaaduista, kuten polypropeenista. Erityisesti lasikuitu- ja aramidikuitukomposiitteja hyödynnetään panssariajoneuvoissa, sillä niillä on hyvä suojauskyky sirpaleita ja paineaaltoja vastaan. Toisaalta hiilikuidut ovat liian hauraita kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa tarkasteltuna, joten ne eivät anna samantasoista suojaa verrattuna muihin kuitulaatuihin [1, s. 361].

Nykyisin komposiittirakenteita, kuten lasikuitukomposiitteja hyödynnetään LAV:eissa pääasiassa sen sisäosissa sirpalesuojina, sillä komposiitit eivät ole tyypillisesti hyviä päällyssuojia nopeita panssariammuksia vastaan toisin kuin kovat keraamit tai panssariteräkset. Sirpalesuojaominaisuuksien lisäksi lasikuitukomposiitit suojaavat myös ontelopanoksen metallisuihkulta, jota ulompi panssarointi ei mahdollisesti kyennyt suojaamaan [1, s. 384]. Kuitenkaan tällä hetkellä ei ole sarjavalmisteista LAV:ia, jonka runkorakenteessa olisi hyödynnetty pelkästään komposiittia. On kuitenkin valmistettu prototyyppi, QinetiQ:n Advanced Composite Armoured Vehicle Programme, ACAVP, jonka runko on kokonaan lasikuitukomposiittia massansäästönsä vuoksi. Kuitenkaan komposiittirakenteilla ei saada merkittävää massanvähennystä verrattuna esimerkiksi kevytmetalliseoksiin, joiden valmistus- ja liittämismenetelmät ovat muutenkin hyvin tunnettuja [21].

### 4.4 Monikomponenttipanssarit (MAS)

Panssaroinnissa paras suojauskyky saadaan hyödyntämällä laminoituja tai kerrostettuja rakenteita, jotka koostuvat eri materiaaliryhmistä—pääasiassa edellä käsitellyistä materiaaleista. Tällöin niitä kutsutaan MAS:ksi (Multilayer Armour System) [37]. Niiden tarkoituksena on muuttaa panssariammuksen muotoa, kulkusuuntaa ja eri tavoin ab-

sorboida sen kineettistä energiaa. Kerrostetut suojat luovat myös uuden tavan absorboida energiaa verrattuna esimerkiksi yhtenäisiin metalli- tai keraamisuojiin. Kerroksissa tapahtuu aina jonkin verran delaminaatiota, eli kerrokset taipuvat, irtoavat toisistaan ja muuttavat merkittävästi muotoaan samalla absorboiden suuren määrän energiaa. [20, s. 168, 171]

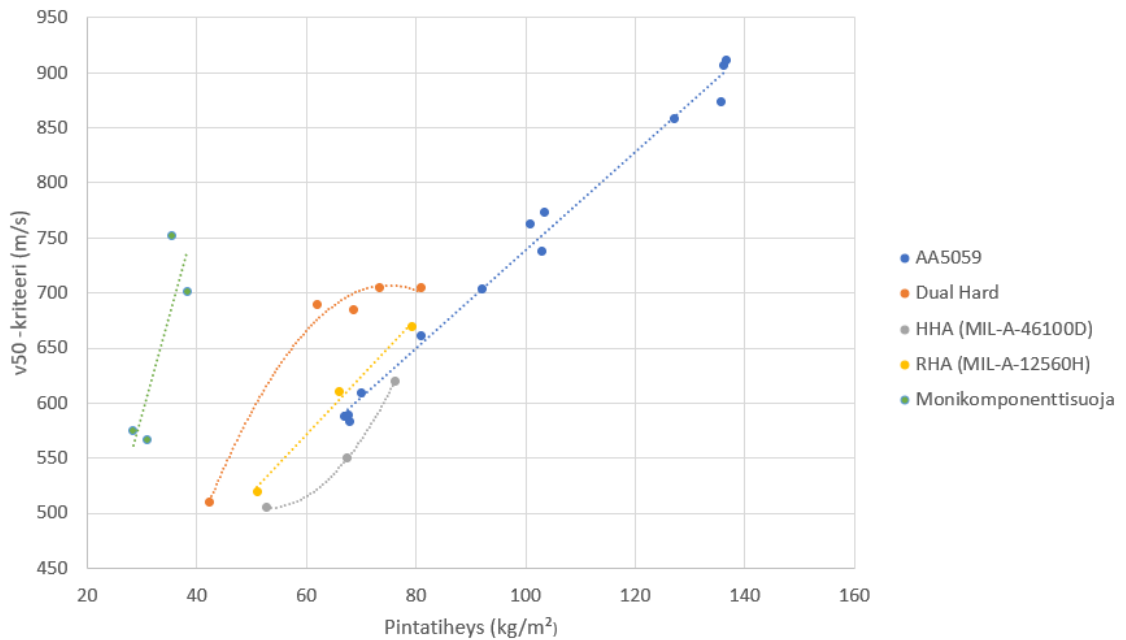


**Kuva 13.** Havainnollinen poikkileikkaus monikomponenttisuojasta. [21]

Kuvassa 13 on esitetty monikomponenttisuojan rakenne. Kerrokset ovat liitettynä toisiinsa liima-aineella, kuten epoksilla tai kumiseoksilla [38]. Uloin kerros tehdään tyypillisesti kovasta, energiaa hajauttavasta materiaalista, kuten alumiinioksidista tai HHA:sta. Toinen kerros eli kumikerros mahdollisesti lisää keraamikerroksen kykyä suojata useammalta ammukselta [21], mutta toisaalta kuvan mukaisesti keraamikerros on eritelty tiilirakenteeksi, jolloin sekin mahdollistaa useamman ammuksen suojaamisen. Välikerros on tyypillisesti kudottua kuitua, kuten aramidia tai vastaavasti kuitulujitettua komposiittimateriaalia. Tämän kerroksen tarkoituksena on suojata ammuksen hajoamisesta ja keraamikerroksen tuhoutumisesta syntyneiltä sirpaleilta. Aluskerros tuo rakenteelle jäykkyyttä ja estää myös välikerroksen pettäessä sirpaleiden tunkeutumisen syvemmälle esimerkiksi aluspanssariin. Aluskerroksena hyödynnetään tyypillisesti kevytmetalliseoksia niiden sitkeän energia-absorptiokyvyn vuoksi [37].



On huomattava, että kerrosten lukumäärää tai paksuutta ei juurikaan rajoita mikään. Esimerkiksi kevytmetalleja ja komposiitteja voidaan kerrostaa vapaasti, jolloin voidaan valmistaa erittäin monipuolisia MAS:eja. Kerrostetut panssarit vaimentavat erityisesti ballistisessa törmäyksessä syntyviä ja heijastuvia jännitysaaltoja, joka ehkäisee paremmin ammuksen vaikutusta [1, s. 346]. Monikomponenttipanssareita käytetään pääasiassa lisäpanssarointina ja tällöin niitä voidaan vapaasti muuttaa sekä mahdollisesti korjata, mikä on myös etu, jos suojausta tarvitaan lisää [21].



**Kuva 14.** Kooste eri materiaalien kokeellisesta suorituskyyvystä 7,62 mm AP-amusta vastaan. Koottu lähteistä: [29], [33], [39]

Kuvaan 14 on koottu edellä käsiteltyjen materiaalien suorituskyyky pintatiheyden funktiona. Kuvassa esitetty monikomponenttisuoja koostui keraamisesta iskupuolesta ja aluspanssarina oli aramidikuitulujitettu komposiitti. Keraami oli valmistettu ZTA-tiilistä, eli painosuhteessa 20 % zirkoniumoksidia ( $ZrO_2$ ) ja 80 % alumiinioksidia. Kokeen eri komposiittilevyjen matriisimateriaali oli epoksia tai polypropeenaa [39]. Muiden materiaalien ominaisuudet käsiteltiin tarkemmin omista luvuistaan.

Kuvaajasta on heti havaittavissa, että monikomponenttisuojalla on selvästi suurin kulmakerroin, mikä tarkoittaa, että sillä on paras suojauskyyky—massasuhde. Oletettavasti siis paksummalla ja monesti laminoidulla MAS:illa voidaan saavuttaa erinomainen suojauskyyky ja pienempi massa verrattuna yhtenäisiin suojiin. Erityisesti LAV:iin sovellettaessa MAS sopisi uloimmaksi panssariksi erinomaisesti. MAS:t tuovat erinomaista suojauskyykyä verraten niiden massaan ja lisäksi niitä voitaisiin helpommin soveltaa käyttö-

kohteen mukaan. Myös kuvaajassa esitetyllä alumiiniseoksella on hyvät ballistiset ominaisuudet sen suhteellisen alhaiseen tiheyteen verrattuna. Toisaalta tämä alumiiniseos on jokseenkin altis jännityskorroosiolle, mikä osittain voi rajoittaa sen soveltamista aluspanssariksi ja kantavaksi rakenteeksi. Esimerkiksi kuvassa 12 oleva RHA voisi soveltaa paremmin edellä mainittuun käyttökohteeseen. RHA:t ovat hyvin hitsattavia, antavat erinomaista suojaa KE-uhkia vastaan sekä RHA:t eivät ole alttiita korrodoiville yhdisteille, jotka voisivat tuoda ongelmia rakenteellisissa sovelluksissa. Kuitenkin kuvan alumiiniseoksilla saadaan parannettua LAV:n rakenteellista jäykkyyttä verrattuna RHA:han, sillä samalla massalla se on paljon ohuempi verrattuna alumiiniseokseen.

**Taulukko 6.** Massahyötysuhteen vertailu 7,62 mm APM2 -ammusta vastaan alumiinin, terästen ja MAS:n välille v50-kriteerin ollessa 600 m/s.

Materiaali	AA5059	DHA	HHA	RHA	MAS
Massahyötysuhde [ $E_m$ ]	0,95	1,29	0,88	1,00	2,15

Taulukkoon 6 on koottu aiemmin esillä olleiden materiaalien massahyötysuhteet kaavan (2) mukaisesti. RHA:lla, HHA:lla ja 5059-sarjan alumiinilla on verrattain sama massahyötysuhde, joten niiden paksuuden tulee olla samaa luokkaa, jotta ne antavat saman tasoista suojaa panssariammusta vastaan. Kuitenkin kuvan 14 mukaisesti HHA:n mittapisteet noudattivat parabolista sovitetta, eli mahdollisesti HHA:n massahyötysuhde on parempaa suuremmilla  $v_{50}$ -arvoilla verrattuna RHA:han ja 5059-sarjan alumiiniin. Eli ainakin AA5059-seoksella ja HHA:lla panssareista tulee jonkin verran raskaampia verrattuna RHA:han tällä  $v_{50}$ -arvolla, mutta esimerkiksi tietyillä 7xxx-sarjan alumiiniseoksilla voitaisiin saada parempaa suojaustasoa pienemmällä pintatiheydellä. Taulukosta on vielä huomattavissa, että monikomponenttisuojia on yli 2 kertaa parempi massahyötysuhteen kannalta verrattuna muihin materiaaleihin. Lisäksi DHA:lla on myös erinomainen massahyötysuhde verrattuna muihin teräslaatuihin ja 5059-sarjan alumiiniin. Mikäli LAV:iin halutaan kestäviä ja kevyitä lisäsuojuksia, monikomponenttisuojia tai DHA:ta olisi oleellista soveltaa päällyspanssariksi. On kuitenkin huomattava, että kuvan 14 mukaisesti DHA:n suojauskyky näyttäneen tasoittuvan 700 m/s, koska sitä ollut ilmeisimmin täysin optimoitu suojauskyvyn maksimoimiseksi [29].

Erään lähteen [1, s. 291] mukaan DHA:lla voitaisiin saavuttaa jopa 78 % parempi suojauskyky RHA:han massahyötysuhteeseen verrattuna, mutta ainakaan näillä kokeellisilla tuloksilla näin ei käynyt. Samoin HHA:n tyypillinen massahyötysuhde on noin 20 % suurempi verrattuna RHA:han, mutta tarkastellulla  $v_{50}$ -kriteerillä massahyötysuhde jäi huomattavasti pienemmäksi verrattuna RHA:han. Toisaalta kokeessa käytetystä 5059-

sarjan alumiinista saatiin laskettua melko tarkka massahyötysuhde, joka vertautui hyvin muihin lähteisiin. Oletettavasti siis kokeen teräslaadut olivat suorituskyvyltään heikompia kuin pitäisi.

## 5. PANSSARIMATERIAALIEN KEHITYSMÄHDOLLISUUDET

Panssarimateriaaleja voidaan kehittää materiaali- ja valmistusteknisillä menetelmillä tiettyyn pisteeseen asti, mutta suojiin suunnittelulla ja geometrialla itse käyttökohteessa on myös merkittävä vaikutus suojauskykyyn. Koska ballistiikka koostuu kahdesta osasta, sitä voidaan kehittää myös vaikuttamalla systeemin toisen osan eli projektiin kulkemiseen. On havaittu, että pienikin muutos ammuksen suuntaan vaikuttaa positiivisesti suojauskykyyn. [1, s. 291] Tämän vuoksi ammuksen suuntaan pyritään vaikuttamaan erilaisilla suunnittelumenetelmillä.

### 5.1 Suojausten kehittäminen suunnittelulla

Yksi tällainen suunnittelumenetelmä on asettaa uloimmat panssarit erilleen, jolloin niiden väliin jää tyhjää tilaa (engl. spaced armour). Tällöin ammuksen läpäistäessä uloimman kerroksen, sen suunta muuttuu ja se osuu seuraavaan kerrokseen eri kulmassa, jolloin sen läpäisykyky heikkenee ja siihen aiheutuu uudelleen osuessaan taivutusjännityksiä, jotka edesauttavat ammuksen hajottamista.

Toinen menetelmä, millä ammuksen suuntaa saadaan muutettua merkittävästi enemmän, on perforoitu teräspanssari. Eli yhtenäiseen HHA:han on porattu reikiä, jotka intuitionvastaisesti vaikeuttavat ammuksen kulkua ja muuttavat sen suuntaa. Perforoitujen suojiin ja panssaroinnin toisen osan väliin voidaan myös jättää rako, jolloin ammuksen suuntaman muutos maksimoidaan. Näitä menetelmiä käytetään erityisesti LAV:ien lisäpanssaroinnissa. [1, s. 290–291]

Lisäksi geometriaa hyödyntämällä saadaan lisättyä panssareiden efektiivistä paksuutta, ja siten suojauskykyä saadaan parannettua ilman massan lisäystä. Käytännössä tämä tarkoittaa panssarien asettamista uhkasuuntaan nähden kulmaan, jolloin panssari on geometrisesti paksumpi, ja kulma edesauttaa myös ammuksen kimpoamista ja suunnan muuttamista, joka vähentää ammuksen kineettistä energiaa [1, s. 163]. Esimerkiksi kuvassa 2 esillä olleessa Patria AMV:ssä on huomattavissa selvää geometrian hyödyntämistä ajoneuvon keulassa ja tykkitornissa.

Kehikkopanssarit ovat yksi passiivinen suojausmenetelmä ontelovaihteisia kranaatteja vastaan. Kehikon tarkoituksena on häiritä ontelokranaatin kärjessä olevan pietsosähköisen elementin ja itse räjähteen sytyttimen toimintaa muodostamalla oikosulku kehikon ja

pietsoelementin välille. Tyypillisesti ontelokranaatin sytytin aktivoituisi, kun pietsosähköinen elementti muodostaa potentiaalin sytyttimen välille. Lisäksi kehikko voi mahdollisesti vahingoittaa ontelokranaatin metallivaippa heikentäen sen suorituskykyä. [40]



**Kuva 15.** Kehikkopanssarointi Belgialaisen Piranha AIV:n ympärillä. Kuva: [40]

Kuvassa 15 näkyy kehikkopanssarin rakenne. Se koostuu vaakasuorista ja pystysuorista palkeista, joista muodostuu kehikkomainen suoja, joka on kiinnitetty pienen etäisyyden päähän itse runkorakenteesta. Kehikkopanssari siis lisää ajoneuvon dimensioita jonkin verran, mutta antaa kuitenkin suojaa ontelokranaatteja vastaan pienillä kustannuksilla. Tämän tyyppinen lisäsuojaratkaisu häiritsee ontelokranaatin sytytintä kokeellisella tuloksella 54%:n todennäköisyydellä [40].

## 5.2 Suojausten kehittäminen materiaalien ominaisuuksia parantamalla

Suojaussovelluksissa käytettyjen metallien ominaisuudet ovat jo pitkälti optimoituja, eikä Crouch:n [20, s. 677] mukaan lisäkehitystä ole ainakaan teräksillä nähtävissä. Kuitenkin Crouch esittää, että nanopartikkelien seostuksella alumiiniin voisi olla merkittäviä lujittavia vaikutuksia, joten kevytmetallien seostuksella voidaan nähdä vielä kehitystä. Myöskään titaaniseoksia ei olla vielä käytetty laajemmassa mittakaavassa LAV:eissa, vaikka niillä on erinomaisia ballistisia ominaisuuksia. Mikäli titaaniseosten valmistuskustannukset tulisivat edullisimmaksi, niin oletettavasti niitäkin sovellettaisiin enemmän LAV:eihin.

Koska teräksillä ja keraameilla kovuus on ehkä yksi tärkein materiaaliominaisuus suojaussovelluksena, Crouch esittää, että keraameilla on vielä potentiaalia kehittyä suojausmateriaalina. Haasteena on kuitenkin valmistustekniset ongelmat, jotka korostuvat erityisesti boorikarbidilla, eli suorituskykyisillä keraameilla hinta voi olla mittava tai niitä ei pystytä vielä valmistamaan suuressa mittakaavassa ollenkaan [20, s. 680].

Voisi myös ajatella, että eri pinnoitusmenetelmien hyödyntäminen ballististen suojien ominaisuuksien parantamisessa olisi varteenotettava vaihtoehto. Esimerkiksi CVD- ja

PVD-pinnoituksella voidaan luoda erittäin kovia pintoja, mutta pinnoituksen paksuus on kuitenkin erittäin ohut. Tästä syystä pelkästään kova pinnoite ei anna suojaa suurempikaliiperisia ammuksia vastaan, sillä niiden luomat jännitysaallot kulkevat törmäyksessä läpi materiaalin ja aikaansaavat materiaalin murtumisen. On havaittu, että pienempikaliiperisia, kuten pistooliammuksia vastaan, pinnoitteella on suojauskykyä nostavaa vaikutusta [20, s. 179]. Toisaalta suurempikaliiperisia ammuksia vastaan pinnoitteen tulisi olla merkittävästi paksumpi, jotta se parantaisi suojauskykyä sellaisenaan.

Panssarimateriaalina keraameilla on haluttuina ominaisuuksina alhainen tiheys ja suuri kovuus, jotka edelleen perustelevat niiden kehittämistä. Kuitenkin ihanteelliselta panssarimateriaalilta haluttaisiin myös tietynlaisia murtumistyyppisiä, jotka absorboisivat tai hajauttaisivat mahdollisimman paljon ammuksen energiaa. Siispä esimerkiksi tulppautuminen, pullistuminen ja täydellinen sirpaloituminen eivät ole toivottuja murtumistapoja. [20, s. 675] Tästä syystä monesti kerrostettujen monikomponenttipanssarien kehittäminen on oleellista, jolloin näitä suojausta heikentäviä murtumistyyppisiä voidaan vähentää tai jopa ehkäistä. Monikomponenttipanssarien potentiaali havaittiin myös kuvan 14 materiaalivertailussa.

## 6. YHTEENVETO

Panssaroitujen taistelujoneuvojen suunnittelu perustuu tulivoiman, liikkuvuuden ja suojaavuuden optimoimiseen. LAV:ien tapauksessa on panostettu liikkuvuuteen, mikä tarkoittaa, että tulivoimasta ja suojaavuudesta on jouduttu karsimaan. Tämä puolestaan lisää uhkien vaikutusmahdollisuuksia LAV:eihin. Siksi suojista on tehtävä mahdollisimman suorituskykyisiä, mutta samalla mahdollisimman kevyitä, jotta voidaan taata tietty suojaustaso LAV:eihin.

Kirjallisuudesta ja aiemmin tehdyistä tutkimuksista selvisi, että etenkin keraamimateriaalia hyödyntävillä suojilla on erinomainen ballistinen suorituskyky. Keraameiden äärimäinen kovuus puoltaa niiden käyttöä erityisesti iskupuolena panssareissa. Lisäksi huomattiin, että eri materiaalien kombinaatiot lisäävät huomattavasti suojauskykyä, eli pelkästään yhdellä yhtenäisellä suojalla ei saavuteta läheskään niin hyvää suojauskykyä, kuin monikomponenttisuojuilla. Havaittiin, että hyvä suojausratkaisu hyödyntää sekä energiaa hajauttavia että sitovia materiaaleja eli keraameja ja komposiitteja. Kuitenkin aluspanssarointi on oleellinen komponentti ajoneuvossa, sillä se luo rakenteellisen jäykkyyden ja alustan muille lisäsuojille. Suorituskykyisissä LAV:eissa tulee siis käyttää lisäpanssarointia, jotta suojaavuus voidaan maksimoida.

Tulevaisuudessa tullaan todennäköisesti näkemään entistä enemmän kevytmetalliseokista valmistettuja LAV:eja, sillä esimerkiksi alumiinin seostuksen nähdään vielä kehittyvän. Myös komposiittien muodonantotekniikka on jatkuvasti kehittyvää, joten niiden sovellukset voisi myös laajentua kevytpanssariajoneuvojen runkorakenteiksi. Kuitenkin tällä hetkellä metalliseoksiin luotetaan eniten, sillä niiden muodonantotekniikka ja liittämismenetelmät on hyvin tunnettuja.

Toisaalta suurempi uhkien vaikutus LAV:eihin painostaa kehittämään entistä kehittyneempiä suojausjärjestelmiä—varsinkin aktiivista suojausta, jonka nykyteknologia ja sensortechniikka on mahdollistanut. Etenkin tällä hetkellä käynnissä olevassa sodassa Ukrainassa tuhoutuu väitetyksi tuhansia taistelujoneuvoja vuositasolla erilaisten CE- ja KE-uhkien vuoksi, mikä puoltaa aktiivisuojujen kehittämistä [41]. Kuitenkin aktiivisuojuukset voivat olla alttiita sääolosuhteille ja häirinnälle, mikä tekee niiden toimivuudesta epävarmempaa. Toisaalta passiivisuojujen, erityisesti keraamisten, kehittäminen on edelleen perusteltua, sillä ne luovat pohjan koko ajoneuvon suojuukselle ja antavat myös erinomaista suojausta etenkin KE-uhkia vastaan.

# LÄHTEET

- [1] P. J. Hazell, *Armour: Materials, Theory, and Design*, 2. p. Boca Raton: CRC Press, 2022. doi: 10.1201/9781003322719.
- [2] "Armoured vehicle | Britannica". <https://www.britannica.com/technology/armoured-vehicle> (viitattu 10. helmikuuta 2023).
- [3] S. K. D. Wallace, "United States Sergeants Major Academy".
- [4] Vince, Y, Shao Hong, M, Chuan-Yean, T, "Fighting Vehicle Technology". Defence Science & Technology Agency.
- [5] Department of Defense. Department of the Navy. Naval Imaging Command. 1988-ca. 1993, Department of Defense. Defense Audiovisual Agency, ja Department of Defense. American Forces Information Service. Defense Visual Information Center. (1994 - 10/26/2007), *An M-2 Bradley infantry fighting vehicle of the 24th Infantry Division (Mechanized) arrives at an encampment during Operation Desert Shield*. teoksessa: Records of the Office of the Secretary of Defense.
- [6] "Images", *Patria*, 6. elokuuta 2019. <https://www.patriagroup.com/newsroom/images> (viitattu 10. helmikuuta 2023).
- [7] "Patria AMVXP", *Patria*, 8. lokakuuta 2019. <https://www.patriagroup.com/products/armoured-wheeled-vehicles/patria-amvxp> (viitattu 10. helmikuuta 2023).
- [8] H. Lye, "Armoured fighting vehicles: which is better, tracks or wheels?", *Army Technology*, 8. lokakuuta 2019. <https://www.army-technology.com/features/tracks-or-wheels/> (viitattu 10. helmikuuta 2023).
- [9] M. Révay ja M. Líška, "OODA loop in command & control systems", teoksessa *2017 Communication and Information Technologies (KIT)*, loka 2017, s. 1–4. doi: 10.23919/KIT.2017.8109463.
- [10] "Protection Levels for Occupants of Armoured Vehicles, (EDITION 2), STANAG 4569". NATO Standardization Agency, 2012.
- [11] "Armored Personnel Carriers / Infantry Fighting Vehicles". Fas.org, 2023. Viitattu: 24. tammikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: [https://man.fas.org/dod-101/sys/land/row/apc-ifv\\_frame.htm](https://man.fas.org/dod-101/sys/land/row/apc-ifv_frame.htm)
- [12] "FGM-148 Javelin", *Missile Threat*. <https://missilethreat.csis.org/missile/fgm-148-javelin/> (viitattu 8. helmikuuta 2023).
- [13] "Procedures for Evaluating the Protection Level of Logistic and Light Armoured Vehicles, AEP-55". Allied Engineering Publication, 2005.
- [14] "LAV-25 blueprints free - Outlines". <https://getoutlines.com/blueprints/18250/lav-25-blueprints> (viitattu 11. helmikuuta 2023).
- [15] "Angular disturbance prediction for countermeasure launcher in active protection system of moving armored vehicle based on an ensemble learning method | Elsevier Enhanced Reader". <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S221491472200232X?to-ken=A87B8DA4FDFC61ADC66720276174BAD12567AE448CFA2734AA9AC2B8EAC4>



12C13FD9FCCCAD919D84D72201724A5BCC76&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230211100251 (viitattu 11. helmikuuta 2023).

- [16] S. J. F. Jr, "M2 Bradley Gets An Iron Fist; Rival Trophy APS Wins \$67M For Army, Marine M1 Tanks", *Breaking Defense*, 7. tammikuuta 2019. <https://breakingdefense.sites.breakingmedia.com/2019/01/m2-bradley-gets-an-iron-fist-first-photo-of-israeli-anti-missile-defense/> (viitattu 16. helmikuuta 2023).
- [17] B. Rosenberg ja B. D. Staff, "How Active Protection Systems Knock Down Anti-Armor Threats for Both Legacy and Future Combat Vehicles", *Breaking Defense*, 17. tammikuuta 2020. <https://breakingdefense.sites.breakingmedia.com/2020/01/how-active-protection-systems-knock-down-anti-armor-threats-for-both-legacy-and-future-combat-vehicles/> (viitattu 16. helmikuuta 2023).
- [18] M. Vemuri ja T. Bhat, "Armour Protection and Affordable Protection for Futuristic Combat Vehicles", *Def. Sci. J.*, vsk. 61, heinä 2011, doi: 10.14429/dsj.61.365.
- [19] D. Lenihan, W. Ronan, P. E. O'Donoghue, ja S. B. Leen, "A review of the integrity of metallic vehicle armour to projectile attack", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Mater. Des. Appl.*, vsk. 233, nro 1, s. 73–94, tammi 2019, doi: 10.1177/1464420718759704.
- [20] I. G. Crouch, *Science of Armour Materials*. Elsevier. [Verkossa]. Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSAM00001/science-armour-materials/science-armour-materials>
- [21] P. Hogg, "Composites for Ballistic Applications", tammi 2003.
- [22] S. Ryan, H. Li, M. Edgerton, D. Gallardy, ja S. J. Cimpoeu, "The ballistic performance of an ultra-high hardness armour steel: An experimental investigation", *Int. J. Impact Eng.*, vsk. 94, s. 60–73, elo 2016, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2016.03.011.
- [23] T. Demir, M. Übeyli, ja R. O. Yıldırım, "Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62mm armor piercing projectile", *Mater. Des.*, vsk. 29, nro 10, 2009–2016, joulu 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2008.04.010.
- [24] "Hall-Petch Equation – Hall-Petch method | nuclear-power.com", *Nuclear Power*. <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/metals-what-are-metals/metalworking/hall-petch-equation-hall-petch-method/> (viitattu 19. helmikuuta 2023).
- [25] L. Kuzmikova, "An Investigation of the weldability of high hardness armour steels", *Univ. Wollongong Thesis Collect. 1954-2016*, tammi 2013, [Verkossa]. Saatavissa: <https://ro.uow.edu.au/theses/3853>
- [26] Jr. William D. Callister, *Callister's Materials Science and Engineering*. Wiley-Blackwell, 2020.
- [27] B. Wilson, "Carbon Equivalency in Welded Steel Components with LIBS", *Analyzing Metals*, 19. marraskuuta 2019. <https://www.thermofisher.com/blog/metals/carbon-equivalency-in-welded-steel-components-with-libs/> (viitattu 20. helmikuuta 2023).
- [28] S. J. Manganello ja K. H. Abbott, "Metallurgical Factors Affecting the Ballistic Behavior of Steel Targets.", Army Materials and Mechanics Research Center Watertown Mass, AD750056, 1972. Viitattu: 19. helmikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/AD750056.xhtml>
- [29] W. Gooch, M. Burkins, D. Mackenzie, ja S. Vodenicharov, *Ballistic Analysis of Bulgarian Electroslag Remelted Dual Hard Steel Armor Plate*. 2005.

- [30] "Weldability of Materials - Aluminium Alloys". <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/weldability-of-materials-aluminium-alloys-021.aspx> (viitattu 20. maaliskuuta 2023).
- [31] D. Löveborn, J. K. Larsson, ja K.-A. Persson, "Weldability of Aluminium Alloys for Automotive Applications", *Phys. Procedia*, vsk. 89, s. 89–99, tammi 2017, doi: 10.1016/j.phpro.2017.08.011.
- [32] A. C. U. Rao, V. Vasu, M. Govindaraju, ja K. V. S. Srinadh, "Stress corrosion cracking behaviour of 7xxx aluminum alloys: A literature review", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vsk. 26, nro 6, s. 1447–1471, kesä 2016, doi: 10.1016/S1003-6326(16)64220-6.
- [33] D. D. Showalter, B. E. Placzankis, ja M. S. Burkins, "Ballistic Performance Testing of Aluminum Alloy 5059-H131 and 5059-H136 for Armor Applications"; Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, touko 2008. doi: 10.21236/ADA481176.
- [34] "ati\_6-4\_tds\_en\_v1.pdf". Viitattu: 16. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.atimaterials.com/Products/Documents/datasheets/titanium/alloyed/ati\\_6-4\\_tds\\_en\\_v1.pdf](https://www.atimaterials.com/Products/Documents/datasheets/titanium/alloyed/ati_6-4_tds_en_v1.pdf)
- [35] A. B. Dresch, J. Venturini, S. Arcaro, O. R. K. Montedo, ja C. P. Bergmann, "Ballistic ceramics and analysis of their mechanical properties for armour applications: A review", *Ceram. Int.*, vsk. 47, nro 7, Part A, s. 8743–8761, huhti 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.12.095.
- [36] "Fracture Toughness - an overview | ScienceDirect Topics". <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/fracture-toughness> (viitattu 4. huhtikuuta 2023).
- [37] A. Bhat, J. Naveen, M. Jawaid, M. N. F. Norrrahim, A. Rashedi, ja A. Khan, "Advancement in fiber reinforced polymer, metal alloys and multi-layered armour systems for ballistic applications – A review", *J. Mater. Res. Technol.*, vsk. 15, s. 1300–1317, marras 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.08.150.
- [38] "et\_armor\_systems.pdf". Viitattu: 16. maaliskuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.ceramtec.com/files/et\\_armor\\_systems.pdf](https://www.ceramtec.com/files/et_armor_systems.pdf)
- [39] N. Nayak, A. Banerjee, ja P. Sivaraman, "Ballistic Impact Response of Ceramic-Faced Aramid Laminated Composites Against 7.62 mm Armour Piercing Projectiles", *Def. Sci. J.*, vsk. 63, nro 4, s. 369–375, heinä 2013, doi: 10.14429/dsj.63.2616.
- [40] F. Coghe, "Efficiency of Different Cage Armour Systems", *Appl. Sci.*, vsk. 12, nro 10, Art. nro 10, tammi 2022, doi: 10.3390/app12105064.
- [41] "General Staff: Russia has lost 177,680 troops in Ukraine since Feb. 24, 2022", *Kyiv Independent*, 8. huhtikuuta 2023. <https://kyivindependent.com/general-staff-russia-has-lost-177-680-troops-in-ukraine-since-feb-24-2022/> (viitattu 8. huhtikuuta 2023).