

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

MIEHISTÖNKULJETUSAJONEUVON POHJAN JA KORIN MATERIAALISELVITYS
JA KONSEPTOINTI

MATERIAL INVESTIGATION AND CONCEPTUALIZATION OF AN INFANTRY
TRANSPORT VEHICLE'S FRAME AND BOTTOM

Lappeenrannassa 16.2.2018

Christoph von Rentzell

Tarkastaja: Dos. Tapio Saarelainen

Ohjaaja: Prof. Harri Eskelinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Christoph von Rentzell

Miehistönkuljetusajoneuvon pohjan ja korin materiaaliselvitys ja konseptointi

Kandidaatintyö

2018

55 sivua, 21 kuvaa, 8 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja: Dos. Tapio Saarelainen

Ohjaaja: Prof. Harri Eskelinen

Hakusanat: miehistönkuljetusajoneuvo, miinasuojaus, materiaaliselvitys, konseptointi

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, mitkä materiaalit ovat sopivia tulevaisuuden miehistönkuljetusajoneuvon pohjaa ja koria varten. Materiaalien tulisi mahdollistaa tietyn suojastandardin saavuttaminen mahdollisimman pienellä massalla ja alhaisilla kustannuksilla. Lisäksi tutkittiin kannattaako ajoneuvon kori ja pohja tehdä eri materiaaleista.

Tutkimus suoritettiin kirjallisuuden, tieteellisten artikkeleiden ja asiantuntijahaastatteluiden avulla. Tutkimuksessa määriteltiin materiaaliarvot, joiden avulla materiaalivertailua voitiin suorittaa. Kerättyjä materiaaliarvoja vertailtiin keskenään ominaisuuskohtaisesti. Lopuksi tulosten pohjalta ajoneuvosta luotiin alustakonsepteja, jotta materiaalinvalinta voitiin toteuttaa.

Sopivat materiaalit valittiin määritetyillä kriteereillä eri konsepteja varten. Tutkimuksessa myös selvisi, että sirpaleilta suojautuminen poikkeaa huomattavasti luodeilta suojautumisesta. Tutkitussa tapauksessa suojauksessa kannattaa käyttää laminoitua ei-kudottua polyeteenikuitukomposiittia ja alustarakenteen konstruktiomateriaalina konseptista riippuen alumiinia tai terästä. Tutkimuksessa todettiin, että kori- ja pohjarakenne kannattaa tehdä erimateriaaleista.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Christoph von Rentzell

Material investigation and conceptualization of an infantry transport vehicle's frame and bottom

Bachelor's thesis

2018

55 pages, 21 figures, 8 tables and 1 appendices

Examiner: Doc. Tapio Saarelainen

Supervisor: Prof. Harri Eskelinen

Keywords: vehicle, mine protection, material investigation, conceptualization

The goal of this Bachelor's thesis was to find what materials are suitable for future's infantry transport vehicle's frame and bottom. Materials should allow the vehicle to fill the requirements of certain protection standard with minimal mass and low expenses. Additionally, it was investigated whether the vehicle's frame and bottom should be fabricated out of different materials.

Research was executed with literature, scientific articles and expert interviews. In the research material values were specified, allowing the comparison of materials. The gathered material values were compared property wise. Conceptualization was done for vehicle chassis' in the basis of results so material comparison could be done.

Suitable materials were chosen with specified criteria for different concepts. During the research it also was discovered that shrapnel protection differs heavily from bullet protection. In the investigated scenario for protection one should use polyethylene fiber composite and depending on the chassis its material can be either aluminium or steel. In the research it was found that making the vehicles frame and bottom from different materials is espoused.

ALKUSANAT

Haluan kiittää kohdeyritystä ja sen henkilöstöä, sillä he antoivat minulle mahdollisuuden tehdä kandidaatintyöni todella mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta toimia näin mielenkiintoisella alalla. Haluan kiittää myös saamastani tuesta ja informaatiosta, mitä ilman työni olisi ollut huomattavasti haastavampaa. Työ oli laaja kandidaatintyöksi, mutta en silti missään vaiheessa kokenut sen vähentävän mielenkiintoani aihetta kohtaan ja toivon voivani jatkaa töitä vastaavanlaisen aiheen parissa jatkossakin.

Haluan kiittää myös työni ohjaajaa Harri Eskelistä hänen neuvoistaan ja ajastaan. Harri oli valmis näkemään minut useaan otteeseen kasvokkain ja keskustelemaan työstäni tuntien ajan. Tämä helpotti työni aikataulutusta ja tehosti työtahtiani positiivisesti.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia haastateltuja asiantuntijoita. Olin iloisesti yllättynyt saadessani mahdollisuuden hyödyntää kokeneiden asiantuntijoiden osaamista. Olisin halunnut tavata kasvotusten enemmänkin alan osaajia, mutta työni piti saada päätökseen.

Jos nyt lähtisin tekemään kandidaatintyötäni uudestaan, niin tekisin monta asiaa eri tavalla. Tämä on minusta merkki siitä, että olen oppinut paljon kandidaatintyötä tehdessäni ja minulla on nyt hyvä pohja lähestyä vastaavanlaisia ongelmia jatkossa.

Christoph von Rentzell

Christoph von Rentzell

Lappeenrannassa 16.2.2018

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|-----------|
| TIIVISTELMÄ | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| ALKUSANAT | 3 |
| SISÄLLYSLUETTELO | 5 |
| SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO | 7 |
| 1 JOHDANTO | 8 |
| 1.1 Tutkimusongelma, tavoite ja tutkimuskysymykset | 9 |
| 1.2 Tutkimusmenetelmät..... | 9 |
| 1.3 Rajaukset | 10 |
| 2 TUTKIMUSMENETELMÄT | 11 |
| 2.1 Kirjallisuuden avulla suoritettava tiedonhaku | 12 |
| 2.2 Asiantuntijahaastattelut | 13 |
| 2.3 Tulosten esittämis- ja analysoimistapa | 14 |
| 3 MATERIAALIOMINAISUUKSIEN MÄÄRITYS | 16 |
| 3.1 Materiaalin miinasuojausominaisuudet ja torjuttavat uhat..... | 16 |
| 3.2 Materiaalin konstruktiiiviset ominaisuudet | 20 |
| 3.3 Materiaalin aiheuttamat kustannukset..... | 21 |
| 3.4 Materiaaliominaisuuksien loppuasettelu | 22 |
| 4 MATERIAALIEN VERTAILU JA TUTKIMUKSEN TULOKSET | 24 |
| 4.1 Suojausominaisuudet | 24 |
| 4.1.1 Kuidut ja kuitukomposiitit | 24 |
| 4.1.2 Metallit..... | 27 |
| 4.1.3 Keraamit | 33 |
| 4.2 Konstruktiiiviset ominaisuudet..... | 34 |
| 4.3 Kustannusominaisuudet | 36 |
| 4.4 Asiantuntijahaastattelujen tulokset ja reflektointi | 38 |
| 4.5 Tulosten loppuasettelu | 38 |
| 5 POHDINTA | 39 |
| 5.1 Konseptointi ja lopullinen valinta..... | 39 |
| 5.1.1 Korin materiaali | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.1.2 | Alustaratkaisu 1: Runkopalkki konsepti | 42 |
| 5.1.3 | Alustaratkaisu 2: Putkirunkokonsepti..... | 45 |
| 5.1.4 | Alustaratkaisu 3: Yhdistetty pohja ja runko konsepti | 47 |
| 5.2 | Tutkimuksen objektiivisuus | 48 |
| 5.3 | Keskeiset johtopäätökset. | 49 |
| 5.4 | Jatkotoimenpiteet | 49 |
| 6 | YHTEENVETO | 50 |
| | LÄHTEET | 51 |
| | LIITTEET | |

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|----------|--|
| c^* | Cunniff nopeus [m/s] |
| E_m | Massatehokkuus |
| HB | Brinellin kovuus |
| | |
| $AHSS$ | Advanced high strength steel |
| FRP | Fiber reinforced polymer |
| FSP | Fragment simulating projectile |
| $HMMWV$ | High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle |
| IED | Improvised Explosive Device |
| IF | Impact factor |
| $JTLV$ | Joint tactical light vehicle |
| $MIL-$ | Military- |
| $NATO$ | North Atlantic Treaty Organization |
| PBO | Piperonyl butoxide |
| $PIPD$ | Polyhydroquinone-diimidazopyridine |
| RHA | Rolled homogenous armor |
| $SNIP$ | Source normalized impact per paper |
| TNT | 2,4,6-trinitrometyylibentseeni |
| UHH | Ultra high hardness |
| $UHMWPE$ | Ultra-high-molecular-weight polyethylene |
| $UHSS$ | Ultra high strenght steel |

1 JOHDANTO

Tämä työ käsittelee 2020-luvun ajoneuvon pohjan ja korin materiaalivalintaa. Kyseessä oleva ajoneuvo on pääasialliselta tarkoitukseltaan sotilaskäyttöön suunniteltu miehistönkuljetusajoneuvo, jolta vaaditaan MIL(military)-standardin mukainen miinasuojaustaso, kykyä liikkua ja kestää liikkumista Suomen maasto-olosuhteissa sekä riittävän korkeaa kantokykyä. Riittävää kantokykyä vaaditaan erityisesti modulaarisia parannuksia varten. Ajoneuvon rakenne tulee valmistaa materiaaleista, jotka edesauttavat edellä mainittujen ominaisuuksien saavuttamista ja mahdollistavat kustannustehokkaamman sarjatuotannon. 2020-luvun ajoneuvon halutaan edistävän puolustusvoimien kykyä liikkua Suomen maastossa nopeasti entistä suojatummin, ja näin edistävän Suomen puolustuskykyä ulkopuolista vihollista vastaan. Ajoneuvo voisi lisäksi mahdollistaa vaikeamaastoisessa kriisinhallintaoperaatiossa toimimisen entistä turvallisemmin. Pääosin Suomessa tuotettu ja suunniteltu ajoneuvo täten myös edesauttaisi suomalaisen korkean teknologian teollisuuden kehitystä. Kuvassa 1 on nähtävissä esimerkki eräästä puolustusvoimien käytössä olevasta miinasuojatusta maastoajoneuvosta.



Kuva 1 Miinasuojattu raskas partioajoneuvo BAE SYSTEMS RG32M (Maavoimat. 2017)

1.1 Tutkimusongelma, tavoite ja tutkimuskysymykset

Puolustusteollisuuden suojausmateriaaleja kehitetään jatkuvasti, samalla vanhojen materiaalien hinta laskee ja valmistustekniikat kehittyvät. Tämän seurauksena potentiaalisten suojausmateriaalien määrä lisääntyy ja kustannukset muuttuvat, joten käyttökohteeseen sopivimman materiaalin löytäminen monimutkaistuu. Aikaisemmin hyödynnetty tieto vanhenee nopeasti uuden tiedon lisääntyessä, mikä luo tarpeen uudelle materiaaliselvitykselle ajoneuvon kehitystyötä varten. Ongelmana on löytää 2020-luvulla kehitettävälle ajoneuvolle suoja- ja rakennemateriaali tai materiaalien yhdistelmä, joka täyttää MIL-standardin mukaisen miinasuojaustason ja optimoi muut tavoiteltavien vaatimusten määrittämät ominaisuudet paremmin kuin mikään muu materiaali. Käytännön ongelmana on myös, että optimointi on tehtävä kirjallisuutta ja asiantuntijahaastatteluita hyödyntämällä eikä käytössä ole laboratoriota, missä voisi suorittaa materiaalikokeita.

Tutkimuksella halutaan vastata, mitkä ovat kriittisimmät materiaaliominaisuudet suojauduttaessa MIL-standardin määrittämältä surrogaattiräjähteeltä, mikä materiaali tai materiaalityyppi on sopivin kustannus - suojaus - massa -suhteeltaan ja kannattaako edellisiin kysymyksiin perustuen korjata ja pohjata tehdä eri materiaaleista? Vaikka edellisiin kysymyksiin ei saataisi eksakteja vastauksia, tutkimus tarjoaa kuitenkin perustan materiaalivalinnalle ja materiaaliselvityksen ajoneuvon konstruktion suunnittelijalle. Tutkimus luo myös perustan konstruktiosuunnittelijalle simulaatiomallien kehittämistä varten.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Työn pääasiallisina tutkimusmetodeina hyödynnetään asiayhteyden ja ilmiöön liittyviä kirjallisuuslähteitä, vuonna 2003 julkaistuja tai uudempia tieteellisiä artikkeleita sekä Delfoi-menetelmään pohjautuvia tekijän itse suorittamia asiantuntijahaastatteluita. Kirjallisuudella luodaan taustakuva ja pohja tutkielmaa varten, asiantuntijahaastatteluilta tavoitellaan uusinta tietoa ja ymmärrystä ja artikkeleilla täydennetään kokonaiskuvaa. Aineistoa etsitään käyttämällä Elsevier Scopus- ja Google Scholar-hakukoneita. Lisäksi hyödynnetään puolustusvoimilta julkisesti saatavaa materiaalia ja asiantuntijoiden suosittamaa kirjallisuutta. Tarvittaessa tiedonhaku laajennetaan myös analogisia piirteitä sisältäviin aiheisiin.

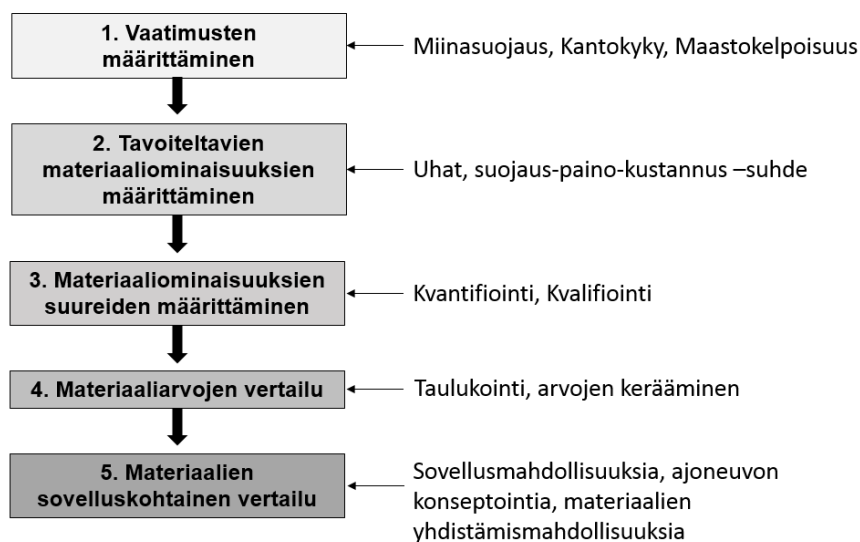
Lähteiden pohjalta löydetyn tiedon avulla määritetään ajoneuvon ja MIL-standardin kannalta tärkeimmät materiaaliominaisuudet, minkä pohjalta luodaan tulokset. Vertailu perustuu ensisijaisesti löydettyihin materiaaliominaisuuksien lukuarvoihin, mutta tarvittaessa materiaaliominaisuuksia kuvaavia arvoja myös kvalifioidaan. Lopullinen vertailu suoritetaan arvoanalyysellä hyödyntämällä ja kullekin materiaalille ominaista suojausgeometriaa käyttämällä. Lisäksi lähdemateriaalin avulla ideoidaan mahdollisia materiaaliratkaisuja ja -yhdistelmiä.

1.3 Rajaukset

Tutkimuksen tarkoituksena on löytää ja kartoittaa erilaisia materiaaliratkaisuja MIL-standardin täyttämiseksi ajoneuvossa, eli rakenteeseen ei tutkielmassa oteta kantaa, ellei se ole materiaaliominaisuuksien kannalta olennaista ja sellaisessakin tapauksessa vain kontekstissa. MIL-standardin ja ajoneuvon lisävaatimuksen kannalta tärkeimpien materiaaliominaisuuksien määrittämisen jälkeen työssä keskitytään näiden materiaaliominaisuuksien vertailuun. Tässä tutkimuksessa suojaus käsittää kyvyn suojautua standardin mukaiselta räjähteeltä ja paino materiaalin massan saavutettaessa haluttu suojaustaso ja konstruktio. Kustannus sisältää materiaalikustannukset ja valmistuskustannuksia kuvaavan valmistuksen haasteellisuuden tunnusluvun. 3D-tulostusta ei oteta valmistettavuudessa huomioon sen heikon massatuotannossa vaadittavan valmistusnopeuden vuoksi. Myös koneistus rajataan vertailusta, sillä valmistus käsittää kokonaisen ajoneuvorakenteen valmistuksen, mikä ei ole koneistamalla kannattavaa. Tutkimuksessa ei oteta huomioon muita taistelukentällä materiaalilta vaadittavia tai olennaisesti merkittäviä ominaisuuksia kuin edellä mainitut. Ajoneuvon lopullista rakennetta ei tiedetä tutkimuksen teon aikana.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tarkoituksena on selvittää merkittävimmät materiaaliominaisuudet MIL -standardin määrittämältä miinauskulta suojautumisessa, jonka jälkeen halutaan löytää materiaaleja, mitkä omaavat riittävät miinauskulta suojautumisessa vaadittavat materiaaliominaisuudet ja lisäksi sopivat käytettäväksi konstruktiomateriaaleina. Tämän jälkeen materiaaleja vertaillaan mm. valmistettavuuden ja hankintakustannusten näkökulmasta. Haettavan materiaalin tärkein ominaisuus on täten kyetä suojaamaan MIL -standardin määrittämältä räjähteeltä. Toiseksi merkittävin kyky materiaalilla on kyetä toimimaan konstruktiomateriaalina, eli materiaalin tulee kyetä tarjoamaan ajoneuville mahdollisimman suuri kantokyky painamalla mahdollisimman vähän ja tukemalla koko ajoneuvon painoa. Viimeisenä otetaan huomioon materiaalin kvalifioitut kokonaiskustannukset, mitkä koostuvat hankintakustannuksista ja materiaalin vaikutuksesta valmistettavuuden helppouteen. Kuvassa 2 esitellään tämän tutkimuksen materiaalinvalintaprosessin kulku.



Kuva 2 Sovellettu materiaalinvalintaprosessi

Tutkimuksessa ei ole hyödynnettävissä laboratoriokokeita tai laskentaohjelmistoa, joten tulokset haetaan suoraan tai analogisesti asiayhteyteen liittyvästä kirjallisuudesta, minkä pohjalta luodaan tarkempia kysymyksiä asiantuntijahaastatteluita ja sitä kautta tarkempia tuloksia varten. Lisäksi käytetään hyväksi lehtiartikkeleita ja konferenssijulkaisuja uusimman tiedon tukemiseksi ja kokonaiskuvan täydentämiseksi.

2.1 Kirjallisuuden avulla suoritettava tiedonhaku

Tietolähteitä haetaan pääasiassa Elsevier Scopus ja Google Scholar hakukoneilla niiden tarjoaman laajuuden vuoksi. Lähteiden arviointi tehdään SNIP (Source Normalized Impact per Paper) ja IF (Impact Factor) bibliometrisiä tunnuslukuja hyödyntäen, jotta lähteiden luotettavuus voidaan varmistaa. Tietolähteen IF -arvon tulee olla vähintään 2,00 ja artikkeleita rajaavan SNIP -arvon tulee olla vähintään 1,50. Lähteiden bibliometrinen tunnuslukujen pohjalta tehtävään rajaukseen voidaan kuitenkin tarvittaessa tehdä poikkeuksia, mikäli asiantuntija suosittelee lähdetä tai muiden korkeaksi arvostetuiden lähteiden pohjalta bibliometrisen tunnusluvun pois rajaama lähde, voidaan todeta luotettavaksi. Puolustusvoimien tarjoama julkinen lähdemateriaali luokitellaan tutkimuksessa myös luotettavaksi lähteeksi ja niitä käytetään eritoten tulevaisuus arviointien vuoksi. Tutkimuksessa käytetään myös kaupallisia kuvia, sillä tutkimuksen tekijä haluaa esittää tutkittavaan aiheeseen suoraan tai analogisesti liittyviä visuaalisia esimerkkejä suojausmateriaalien käytöstä, miinasuojauksen toteutustavoista ja ajoneuvokehityksestä rajaamatta lähdemateriaalia. Kustannusominaisuuksiin liittyvän datan hankintaa suoritetaan verkkokauppojen ja muiden internetlähteiden avulla, joiden ei tarvitse täyttää lähdearvosteluperusteiden määrittämiä vaatimuksia.

Tutkimuksessa käytettyjen artikkelien tulee olla aikaisintaan julkaistu vuonna 2003. Alla nähtävissä Elsevier Scopus hakukoneen avulla saatua статистиikkaa tukemaan päätöstä rajata artikkelit vuoden 2003 ja uudempiin julkaisuihin, kun kyseessä on räjähteiltä suojauminen.



Kuva 3 Dokumenttia per vuosi, hakusanat: blast, protection (Muokattu Elsevier Scopus, 2017)

Tutkimusten ja julkaisuiden lisääntyminen vuonna 2003 johtunee siitä, kun NATO-joukot Yhdysvaltojen johtamana hyökkäsivät ja miehittivät 2000 –luvun alussa Afganistanin ja Irakin. Miehityksen aikana paikalliset puolisotilaalliset joukot käyttivät epäsymmetristä sodankäyntiä NATO-joukkoja vastaan. Epäsymmetriseen sodankäyntiin kuuluu olennaisena osana miinojen tai IED:n (improvised explosive device) eli tienvarsipommien käyttö, lisäksi se on erittäin tehokas keino heikommalta ja vähemmän teknologisesti kehittyneeltä joukolta taistella teknologisesti vahvaa ja tehokasta doktriinia vastaan (STAE 2025, 2008, s. 42). Näin voi olettaa, että merkittävän miinasuojaukseen liittyvän tutkimuksen ja siihen liittyvien artikkeleiden kasvun johtuvan Afganistanin ja Irakin miehityksen aikaisten NATO-joukkojen kokemista uhista. Ajoneuvojen käyttö on ollut avainasemassa NATO johtoisen Irakin ja Afganistanin operaatioissa, joten on oletettavaa, että artikkelit vuodesta 2003 sisältää tutkimustyötä tukevaa informaatiota.

Materiaalidataa ominaisuuksien vertailua varten hankittiin Elsevier Scopus ja Google Scholar hakukoneiden avulla löydettyjen tutkimustulosten lisäksi Google -hakukoneella ja MatWeb tietokannalla. MatWeb tietokantaa käytettiin materiaalidatan keräämiseen ja Google hakukonetta valmistajien kotisivuilta haettavan MatWeb hakua tukevan ja tarkentavan datan hankkimiseen.

Hakukoneissa käytetyt hakusanat ja tarkentavat kysymykset muodostetaan tiedonhakua ohjaavien kysymysten pohjalta. Ohjaavia kysymyksiä ovat: Millainen on detonaation aiheuttama kuormitus? Mitkä ominaisuudet tekevät materiaalista hyvän suojaamaan ballistisilta uhilta? Mitä materiaaleja käytetään ajoneuvojen suojauksessa? Mitä materiaaleja käytetään ajoneuvojen konstruktio materiaaleina? Ja kuinka kuituvahvisteiset komposiitit käyttäytyvät teräkseen verrattuna? Tutkimuksen edetessä odotettavasti tiedonhakua ohjaavat kysymykset lisääntyvät mm. haastattelutulosten pohjalta.

2.2 Asiantuntijahaastattelut

Tutkimuksessa hyödynnetään kirjallisuustutkimuksen lisäksi asiantuntijahaastatteluita. Asiantuntijoilta tavoitellaan uusinta tietoa liittyen tämänhetkisiin sovelluksiin ajoneuvosuojauksessa ja standardin vastaisten uhkien aiheuttamista vaurioista ajoneuvoille. Lisäksi asiantuntijoilta tiedustellaan materiaaliominaisuuksia tukevien materiaaliarvojen tarkempia määrittämiä ja tulevaisuuden näkymiä materiaalin valintaan liittyen

vastaavanlaisten ajoneuvojen valinnassa. Tutkimuksessa haastatellaan 3 asiantuntijaa ja heiltä vaaditaan vähintään 10 vuoden kokemusta materiaali- tai puolustusteknisellä alalla.

Haastattelun toteutustapa ja toimenpiteet pohjautuvat delfoi –menetelmään. Haastattelun jälkeen kysymykset ja vastaukset yhdistetään ja esitetään asiantuntijalle, tämän jälkeen asiantuntijalla on mahdollisuus kommentoida kirjattuja vastauksia ja ilmoittaa ovatko vastaukset oikein. Mikäli asiantuntija ei ole samaa mieltä haastattelijan kirjaamista vastauksista, haastattelu pidetään uudestaan tarkennetuin kysymyksin. Asiantuntijan ollessa samaa mieltä vastauksista ne määritellään lopullisiksi ja ne kirjataan tuloksiin vertailua ja johtopäätöksiä varten. Haastattelussa käytettävät kysymykset ovat liitteessä 1.

2.3 Tulosten esittämis- ja analysoimistapa

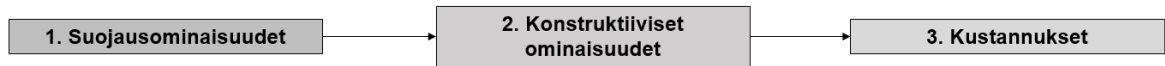
Tuloksia ja niiden vertailua varten materiaaleille määritetään ominaisuudet, mitkä vaikuttavat materiaalista valmistettavan rakenteen suojausominaisuuksiin, painoon ja kokonaiskustannuksiin. Osa ominaisuuksista määritetään kvalitatiivisesti ja osa kvantitatiivisesti. Ominaisuudet mitkä ovat epälineaarisia tai muuten erittäin vaikea arvioida materiaaliakohtaisesti, kvalifioidaan arvojen perusteella kvalitatiivisiksi suureiksi ja ominaisuudet mitkä ovat lineaarisia tai määräytyvät ainoastaan materiaalista, ilmoitetaan kvantitatiivisesti. Taulukossa 1 on nähtävissä kvalitatiivisesti ja kvantitatiivisesti vertailtavat ominaisuudet.

Taulukko 1. Ominaisuuksien suureiden jaottelu.

| Ominaisuus | | Kvalitatiivinen | Kvantitatiivinen |
|------------|--------------|-----------------|------------------|
| Suojaus | Sirpale | | x |
| | Paine | x | |
| | Konstruktio | | x |
| | Kustannukset | x | |

Materiaaleja valittaessa kaikki ominaisuudet eivät ole saman arvoisia. Alkuun tutkitaan materiaalin kykyä suojata. Tämän jälkeen, mikäli todetaan materiaalia voitavan käyttää suojamateriaalina, vertaillaan materiaalin konstruktivisia ominaisuuksia muiden

materiaalien kanssa. Lopuksi vertaillaan materiaalin kustannuksia yleisellä tasolla. Kuvassa 4 esitellään materiaaliominaisuuksien arvosteluprosessin kulku.



Kuva 4 Arvostusjärjestys

Tuloksiin kirjataan useita materiaaliarvoja, mitkä ovat arvioitu kappaleen kolme mukaisesti määritetyillä ominaisuuksilla sopivimmiksi. Materiaaliarvot esitetään taulukoin, kuvaajin ja luetteloin. Johtopäätöksissä vertaillaan materiaaliominaisuuksia ja -arvoja ja niiden käyttökohteeseen sopivuutta, lisäksi vertaillaan käyttökohteita ja tapoja. Haastattelun tulokset ilmoitetaan sanallisesti suorina lainauksina haastattelussa kirjatusta vastauksista. Haastattelutuloksia hyödynnetään johtopäätöksissä kirjallisuuden avulla selvitettyjen tulosten vertailun ja ajoneuvokonseptoinnin tukena. Mikäli materiaalista ei ole saatavilla kaikkia materiaaliarvoja vertailua varten, ominaisuus merkataan merkillä ”-” ja, mikäli mahdollista, sitä verrataan vastaavanlaisen materiaalin arvoilla, mitkä ilmoitetaan sulussa.

3 MATERIAALIOMINAISUUKSIEN MÄÄRITYS

Materiaalin suojausominaisuuksia määritettäessä otetaan huomion ainoastaan MIL-standardin määrittämältä uhalta suojautumiseen vaikuttavat materiaaliominaisuudet. Konstruktiivisia ominaisuuksia määritettäessä tutkitaan materiaalin kykyä tukea ja kantaa kuormaa ja lisäksi kykyä jäykistää rakennetta. Kustannukset määritetään pääosin materiaalin vaikutuksesta valmistuksen vaikeuteen ja hankintakustannuksista, mutta myös materiaalin suunnitteluun tuomista lisähaasteista.

3.1 Materiaalin miinasuojausominaisuudet ja torjuttavat uhat

MIL-standardissa on määritetty miinaa simuloivan surrogaattiräjähteen tuottama uhka, miltä ajoneuvon tulee kyetä suojaamaan miehistöä ja matkustajia. Surrogaattiräjähteen detonaatiosta seuraa paine- ja sirpalevaikutusta, mikä voi haavoittaa ajoneuvon matkustajia ja miehistöä. Muita suojaavia ominaisuuksia, kuten materiaalin tarjoama suoja havaitsemista vastaan, ei oteta huomioon suojausominaisuuksia määritettäessä.

Painevaikutus koostuu hypersoonisesta iskuaallosta (shock wave) ja akustisesta paineaallosta. Detonaation seurauksena räjähdysaine tuottaa ylipaineen 30 000 MPa asti ja 3000-4000 C° lämpöä. Kuuma paineistunut kaasu leviää pallomaisesti työntämällä ympäröivää tilaa yli äänen nopeudella rakentaen kerroksen paineistettua ilmaa laajenevan, kaasun täyttämän, tilavuuden pinnalle. Tätä kompressoitunutta ilmakerrosta kutsutaan iskuaalloksi ja se on todella tuhoisa. Iskuaallon kantama on kuitenkin lyhyt, sillä väliaineen molekyylit iskeytyvät toisiinsa kimmottomasti ja tämä kuluttaa iskuaallon energiaa tehokkaasti sen edetessä väliaineessa. Lopulta aallon nopeus laskee äänen nopeuteen ja se jatkaa etenemistään normaalina akustisena aaltona. Akustisessa paineaallossa molekyyliden väliset iskemät ovat täysin kimmoisia, joten paineaalto etenee paljon pidemmälle kuin iskuaalto. MIL-standardin mukaisessa tapauksessa räjähdde on maata vasten, eli ylöspäin suuntautuva painevaikutus on kaksinkertainen täysin avoimeen tilaan nähden. (NASA, 2017; Wildfred, E. et al. 1981, s. 3-1 – 3-4; Ngo, T. et Al. 2007, s. 76-77).

Painevaikutukselta suojaavan materiaalin tulee kyetä absorboimaan kaikki siihen isku- ja paineaallon kohdistamasta energiasta, niin että ajoneuvon muut suojarakenteet, miehistö ja

matkustajat selviävät impulssista. Näin ollen vastaanottaessa impulssikuormituksen ja absorboidakseen aallon iskuenergiaa, materiaalin tulee deformaation ja murtumisen aikana kyetä suuriin geometrisiin muodonmuutoksiin, omata hyvät muokkauslujittumis ominaisuudet ja pystyä samanaikaisesti erilaisiin muodonmuutoksen muotoihin kuten venyminen ja taipuminen. Materiaalin tulee siis plastisoitumisen avulla kuluttaa detonaatiosta syntyvän aallon iskuenergiaa. Tämän vuoksi usein energiaa absorboivat rakenteet tehdään sitkeistä materiaaleista, kuten alumiinista tai alhaisen hiilipitoisuuden omaavista teräksistä. (Ngo, T. et Al. 2007, s. 76-77, Lu, G. Yu, T. 2003, s. 19-20)

Sirpalevaikutus muodostuu kuoreen suljetun räjähteen detonoidessa. Kuori muodostaa lähteen vaurioitaville ja kauas kantaville sirpaleille. Taipuisasta materiaalista tehty sirpaloituva kuori laajenee halkaisijaltaan noin puolitoista kertaiseksi detonaation seurauksena ja sirpaloituu. Räjähdyksestä aiheutunut iskuaalto kulkee alkuun sirpaleita nopeampaa, mutta aallon nopeus hiipuu nopeammin ja sirpaleet ohittavat paineaallon ja säilyttävät nopeutensa ja vaikutuksensa pidempään. Täten sirpaleet voivat olla paineeseen verrattuna tavanomaisilla räjähteillä huomattavasti suurempi vaurion aiheuttaja pehmeitä tai kevyesti panssaroituja kohteita vastaan. Räjähde voidaan myös esisirpaloida sijoittamalla esimerkiksi raskaampia, useampia tai kovempia sirpaleita kuoren ja räjähteen väliin, jolloin sirpalevaikutus tehostuu. Kevyt kuori myös tehostaa räjähteen painevaikutusta kuorettomaan räjähteeseen nähden, vaikka raskaampi kuori vaimentaakin painevaikutusta (Wildfred, E. et al. 1981, s. 3-1 – 3-4).

Ballistiselta uhalta, tutkimuksen tapauksessa sirpaleelta, voidaan suojautua neljällä tavalla, näihin lukeutuu: Sirpaleen deformaatio sen osuessa kohteen suojapintaan, sirpaleen pirstoutuminen sen osuessa kohteen suojapintaan, sirpaleen hidastaminen kontrolloidulla liikemäärän muutoksella kohteeseen nähden. Ja osittain torjutun sirpaleen iskusta seuranneiden, sekundäärisirpaleiden pysäyttäminen sirpalesuojavuorauksella tai -kilvellä (spall liner). Lisäksi on olemassa muita suojautumistapoja joita ei huomioida tutkimuksessa. Eri suojaustapoihin vaaditaan erilaisia materiaaliominaisuuksia ja materiaaleja ja suojaustapoja voidaan myös yhdistää paremman suojauksen saavuttamiseksi. Kovia materiaaleja käytetään sirpaleen pirstaloimiseen tai deformatiiviseen, lujia ja sitkeitä materiaaleja käytetään sirpaleen hidastamiseen suojamateriaalin plastisoituessa, ja vahvoja kuitukomposiitteja ja -tekstiilejä käytetään pirstaleiden keräämiseen ja deformatiiviseen.

Jotta kuitukomposiittia tai –tekstiiliä voidaan käyttää ballistiikkasuojauksessa, kuidulta vaaditaan korkeaa vetolujuutta, korkeaa venymää ennen murtumaa ja korkeaa elastista kerrointa (O’Masta, M. R. Deshpande, V. S. Wadley, H. N. G. 2014, s.16-17, S.J. Cimpoeru 2016 s. 1-32).

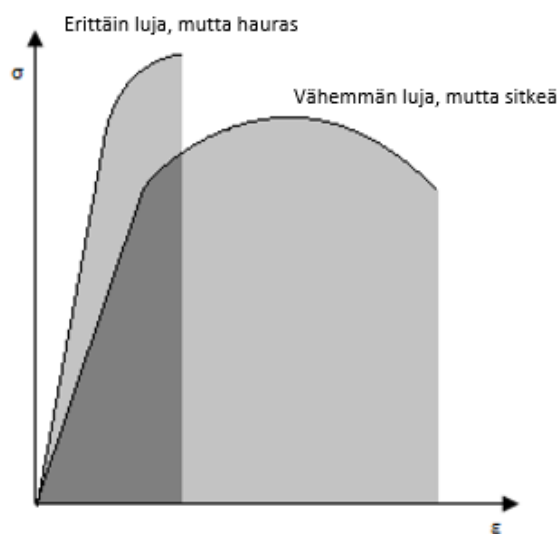
Kuvassa 5 nähtävissä miinasuojauksen huomioiminen partioajoneuvon suunnittelussa, kuvassa on vanhempi HMMWV (High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle) partioajoneuvo ja uudempi miinauhkaa varten suojattu JLTV (Joint Light Tactical Vehicle) partioajoneuvo, joka on myös HMMWV korvaaja.



Kuva 5 Miinasuojauksen kehitystä, AM General M1151 HMMWV ja Oshkosh JLTV (Motor Trend. 2017)

Huomaa JLTV:n korotettu alusta, vino pohja ja erillinen panssaroitu miehistökapseli paine- ja sirpalevaikutuksen minimoimiseksi. Tämä ajoneuvorakenteen kehitys johtuu Irakin ja Afganistanin miehitystä seuranneista, oletettavasti epäsymmetrisen sodankäynnin tuomista uusista uhista. Useissa vuonna 2010 ja sen jälkeen kehitetyissä ajoneuvoissa on nähtävissä miinasuojauksen huomioiminen rakenteessa ja materiaalivalinnassa.

Materiaalilla tulee olla riittävän hyvät suojausominaisuudet, jotta sillä voidaan torjua sirpale- ja painevaikutuksesta aiheutuvat uhat. Rakenteella, etenkin yhdistämällä materiaaleja kennorakenteina, voidaan vaikuttaa erittäin paljon painevaikutukselta suojautumiseen, mitä ei oteta huomioon tutkimuksessa (Zenkert 1997, s. 4). Tutkimuksessa oletetaan, että materiaalin ei tarvitse absorboida kaikkea standardin mukaisen räjähteen materiaaliin kohdistamaa energiaa plastisoitumalla, sillä räjähteen määrä on suhteessa hyvin pieni, vain 550g TNT:tä (2,4,6-trinitrometyyli-bentseeni). Materiaalista tehdyn konstruktion täytyy siis vain selvitä painevaikutuksesta eikä materiaali saa murtua. Materiaalin ollessa hauras se ei kestä muodonmuutoksia eikä voi plastisoitua ja voi murtua helpommin räjähteen aiheuttaman impulssin seurauksesta, tällaisia materiaaleja ovat mm. keraamit. Sitkeä materiaali puolestaan kestää muodonmuutoksia ja plastisoituu ennen murtumista standardin mukaisen räjähteen detonoidessa ja samalla absorboi tarpeeksi energiaa muiden rakenteiden suojaamiseksi. Plastisoitumisen ja muokkauslujittumisen tarjoaman energian absorboimiskyvyn vuoksi sitkeä materiaali murtuu pienemmällä todennäköisyydellä ja on täten sopivampi materiaali painevaikutukselta suojauduttaessa (O. Bouaziz, S. Allain, C. Scott. 2007, s. 484). Kuvassa 6 on esimerkki erittäin lujan, mutta hauraan materiaalin energian absorboimiskyvystä verrattuna vähemmän lujan, mutta sitkeän materiaalin absorboimiskykyyn.



Kuva 6 Materiaalin energian absorboimiskyky, käyrän alle jäävä pinta-ala esittää materiaalin energian absorboimiskykyä. Suurempi pinta-ala korreloi parempien absorboimisominaisuuksien kanssa.

Näin ollen ja tutkimuksen yksinkertaistamisen vuoksi materiaalin kykyä selvittää ja suojata painevaikutukselta mitataan vain kvalifioituilla sitkeyden arvoilla **hauras** ja **sitkeä**, mitkä määräytyvät pääasiassa materiaalin plastisoitumiskyvyn, muokkauslujittumisen ja lujuuden perusteella.

Sirpalevaikutukselta suojautuminen rajataan rakenteen puuttumisen vuoksi metalleilla Brinell-kovuuteen (HB), suhteelliseen venymään (%) ja suojateräksillä myös Charpy -iskulujuuteen (J). Kuitukomposiiteilla ballistisen suojauskyvyn määrittämisessä on olennaista kuitujen ominaisuudet ja niiden tiheys materiaalissa (O'Masta, M. R. et. al. 2014, s. 17), joten samaa määritelmää ei voi käyttää ballististen suojausominaisuuksien arvioinnissa. Entinen Yhdysvaltain armeijan ballistiikan tutkija Philip Cunniff on tehnyt tutkimusta kuitukomposiittien poikittaisiskunkestävyydestä ja määrittänyt Cunniffin nopeuden $\Omega^{1/3}$, mikä on suoraan verrannollinen kuitukomposiitin ballistiseen raja-arvoon, eli arvoon milloin projektiililla on vähintään 50% mahdollisuus läpäistä kyseinen rakenne. (D. E. Carlucci, S. S. Jacobson. 2008, s. 310, Cunniff. P.M. 1999 s.1303-1310). Näin ollen kuitukomposiittien sirpalesuojaominaisuudet määritetään yleisesti tunnetun Cunniffin nopeuden $\Omega^{1/3}$ mukaan. Tuloksissa Cunniffin nopeus $\Omega^{1/3}$ ilmoitetaan symbolilla c^* lähde yhtenevyyden vuoksi. Kaavasta 1 on nähtävissä Cunniffin nopeuden määritelmä (S. L. Phoenix, P. K. Porwal 2003. s. 6756).

$$\Omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma \varepsilon}{\rho} \right) \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Kaavassa σ ja ε ovat kuitujen vetolujuus ja murtovenymä, ρ kuidun tiheys ja E kuitujen kimmokerroin.

3.2 Materiaalin konstruktiiviset ominaisuudet

Konstruktiomateriaalista tehdyn rakenteen tulee kuormantankokyvyn ja jäykkyyden lisäksi olla erittäin kevyt, jotta ajoneuvon maastoajokyky ei heikentyisi. Materiaalin lujuus vaikuttaa kaikkiin edellä mainittuihin ominaisuuksiin, sillä korkeamman lujuusluokan omaavasta materiaalista voidaan rakentaa vahvempia, jäykempiä ja kevyempiä rakenteita. Lujuus tarkoittaa tässä tapauksessa materiaalin myötörajaa tai materiaalin murtolujuutta (MPa) materiaalista riippuen. Tässä tutkimuksessa komposiittimateriaalien lujuus

ilmoitetaan murtolujuutta käyttäen. Tutkimuksessa määrittelemme materiaalin konstruktiivisen ominaisuuden lujuuden (MPa) ja tiheyden (kg/m^3) suhteeksi eli ominaislujuudeksi (MNm/kg). Tuloksiin materiaaleista kerätään konkreettisia ominaislujuuden lukuarvoja vertailua varten.

Kaikki materiaalit käsitellään isotrooppisina materiaaleina niiden konstruktio ominaisuuksia vertaillessa. Anisotrooppisten materiaalien ominaisuudet, kuten kimmokerroin, vaihtelevat kuormituksen suunnasta riippuen (J. J. Skrzypek, A.W. Ganczarski 2015, s.87-91). Tämä ominaisuus otetaan tyypillisesti rakennesuunnittelussa huomioon materiaalin maksimihyödyn saavuttamiseksi. Koska tutkimuksessa ei tutkita rakennetta vaan materiaalin tarjoamia ominaisuuksia vaatimusten täyttämiseksi, niin anisotrooppisten materiaalien konstruktiiviset ominaisuudet määritetään parhaan mahdollisen kuormitussuunnan mukaan. Kuitukomposiittien tapauksessa ominaislujuuden määrittäminen on siis erittäin monimutkaista, sillä anisotrooppisen rakenteen lisäksi myös komposiitin kuitu- ja matriisitiheys ja matriisin ominaisuudet suhteessa kuituun voi vaihdella, näin ollen itse kuidun ominaisuuksia ei voida käyttää ominaislujuuden määrittämiseen (J. J. Skrzypek, A.W. Ganczarski 2015, s.87-91). Kuitukomposiitin ominaislujuus voidaan täten siis vain määrittää testeillä, mihin tutkimuksella ei ole resursseja. Täten vain kuitukomposiitteja mistä on saatavilla testituloksia, voidaan käyttää konstruktiivisten ominaisuuksien vertailuun.

3.3 Materiaalin aiheuttamat kustannukset

Materiaalikustannukset kvalifioidaan tutkimuksessa, jatkuvan materiaalikehityksen ja useiden muuttujien vuoksi. Kvalifioitu kustannusarvo koostuu materiaalin vaikutuksesta valmistuksen vaikeuteen, hankintakustannuksista ja materiaalin suunnitteluun tuomista lisähaasteista. Valmistuksen vaikeuteen vaikuttavat materiaalin valmistustekniset erityispiirteet, mitkä koostuvat materiaalin hitsattavuudesta ja kylmämuovattavuudesta. Suunnitteluun materiaalin tuomat lisähaasteet aiheutuvat materiaalin ominaisuuksien monimutkaisuuksista, esimerkiksi anisotrooppisista materiaaleista on vaikeampaa suunnitella rakenteita niiden heterogeenisen rakenteen ja kuormituksen suunnasta riippuvaisten materiaaliarvojen vuoksi.

Kvalifioitu kustannusarvo voi olla kolmenlainen: Se voi olla **yleinen** eli materiaalia käytetään suurissa määrin ajoneuvo- ja sotilasteollisuudessa sen hankintakustannusten,

valmistusteknisten erityispiirteiden ja isotrooppisen rakenteen vuoksi, tähän lukeutuu mm rakenneteräs. Se voi olla **harvinainen** eli materiaalia käytetään huomattavia määriä ajoneuvo ja sotilasteollisuudessa, mutta ei yhtä paljon kuin yleisiä materiaaleja sen hankintakustannusten vuoksi, esimerkiksi lentokonealumiini AA7075. Kolmantena se voi olla **poikkeuksellinen** eli materiaalia käytetään aikaisempia vähemmän sen valmistusteknisten erityispiirteiden ja anisotrooppisen rakenteen vuoksi, tällaisiin materiaaleihin lukeutuu mm. kaikki kuitukomposiittimateriaalit niiden hinnan vaihtelevuuden, valmistusteknisten poikkeuksien ja sovellettavien patenttien vuoksi.

Metallien kustannusarvo määritellään erillisellä pisteytysjärjestelmällä. Jokaisesta kustannuksen osa-alueesta voi saada pisteitä. Lopuksi osa-alueiden pisteet lasketaan yhteen mistä seuraa lopullinen kustannusarvo. Yleinen on yli 3 pistettä, harvinainen 2,5-3 pistettä ja poikkeuksellinen alle 2,5 pistettä. Hankintakustannuksissa kaikilla materiaaleilla on yhden pisteen lähtöarvo, jonka lisäksi materiaali voi saada lisäpisteitä. Materiaali saa puolitoista pistettä, mikäli materiaali maksaa karkeasti alle 2 euroa/kg, yhden pisteen hinnan ollessa keskimäärin 2-5 euroa/kg, puolipistettä hinnan ollessa 5-10 euroa/kg ja ei yhtään pistettä, jos materiaali maksaa enemmän. Hinnat määräytyvät vuonna 2017 verkkokauppojen asettamien hintojen ja pääasiallisten seosaineiden pörssihinnan mukaan, kuljetuskustannuksia tai maantieteellistä sijaintia ei huomioida. Metallien hinnat määräytyvät valujen ja ohutlevyjen mukaan. Eli hinnat ovat vain suuntaa antavia ja materiaalin hinta määräytyy vastaavien materiaalin hintojen keskiarvon mukaan. Valmistuksesta saa yhden pisteen, jos materiaali on kaarihitsattava ja kylmämuovattava, puoli pistettä materiaalin ollessa kylmämuovattava tai kaarihitsattava ja ei yhtään pistettä, jos materiaali ei ole kumpaakaan. Materiaalin kaarihitsautuvuus- tai kylmämuovauskykyä mitataan binäärisesti, se on lähteiden perusteella mahdollista tai ei mahdollista. Suunnittelun vaikeus määräytyy suunnittelijan tietotaidon mukaan, tässä tapauksessa suunnittelijan oletetaan ymmärtävän isotrooppisten materiaalien käyttäytymisestä parhaiten. Suunnittelu osuudesta saa puoli pistettä, mikäli materiaali käyttäytyy isotrooppisen materiaalin tavoin.

3.4 Materiaaliominaisuuksien loppuasettelu

Ilman tarkkoja 50 % todennäköisyydellä suojarakenteen ballistisen raja-arvon ylittäviä testiprojektiilin nopeuksia eli V_{50} -arvoja, eri suojamateriaaliryhmien ballistisia suojausominaisuuksia ei voida suoraan verrata toisiinsa materiaalien erilaisten

vauriomekanismien ja suojausmekanismien, ja näiden toisistaan poikkeavien ja kyseisiä vaurio- ja suojausominaisuuksia edistävien ominaisuuksien eriävyyden vuoksi. Täten materiaali- ja testidatan puutteellisuuden vuoksi suojausominaisuuksia kaikkien materiaaliryhmien välillä ei voida suoraan perustellusti vertailla.

Materiaaliryhmiä ovat isotrooppiset metallit, anisotrooppiset kuitukomposiitit ja keraamit. Osa materiaaleista myös käyttäytyy eri tavalla eri sovelluskohteissa, kuten kuitukomposiitit joissa käytettävä hartsi ja punonta suunnat vaikuttavat materiaalin ominaisuuksiin. Kuitukomposiitteja käytetään eri muodossa eri tarkoituksessa, eli kuitukomposiitti millä on erinomaiset konstruktiiviset ominaisuudet ei hyödynnä kuidun ballistisia ominaisuuksia täydellä kapasiteetilla, joten samaa kuitukomposiittia ei kannata käyttää suojamateriaalina ja konstruktiomateriaalina, vaan kannattaa yhdistää kahta eri kuitukomposiittia maksimihyödyn saavuttamiseksi. Toisin kuin suojateräs, mikä toimii samalla suojamateriaalina ja hyvänä konstruktiomateriaalina. Tämän vuoksi kaikkia materiaaliryhmiä ei voida verrata suoraan keskenään vaan ainoastaan sovelluskohtaisesti.

Tutkimuksessa materiaalivertailu suoritetaan materiaalin ominaisuutta parhaiten kuvaavan suureen mukaan. Painesuojaominaisuuteen vaikuttavat materiaalin sitkeys ja energian absorboimiskyky, jonka arvoina toimivat hauras ja sitkeä, mitkä määräytyvät lujuuden, muokkauslujittumisen ja plastisoitumiskyvyn perusteella. Sirpalesuojaominaisuudet määräytyvät materiaalin Brinell -kovuuden (HB), materiaalin iskulujuuden (Charpy V) ja suhteellisen venymän (ϵ) perusteella materiaalista riippuen ja kuitukomposiiteilla sirpalesuojaominaisuuden määrittämiseen käytetään Cunniffin nopeutta (c^*). Konstruktiiviset ominaisuudet määräytyvät materiaalin ominaislujuuden (σ/m) perusteella, missä materiaalin lujuus on määritetty vetolujuuden mukaan. Lopuksi materiaalin kustannukset määräytyvät kvalifioituilla arvoilla yleinen, harvinainen ja poikkeuksellinen.

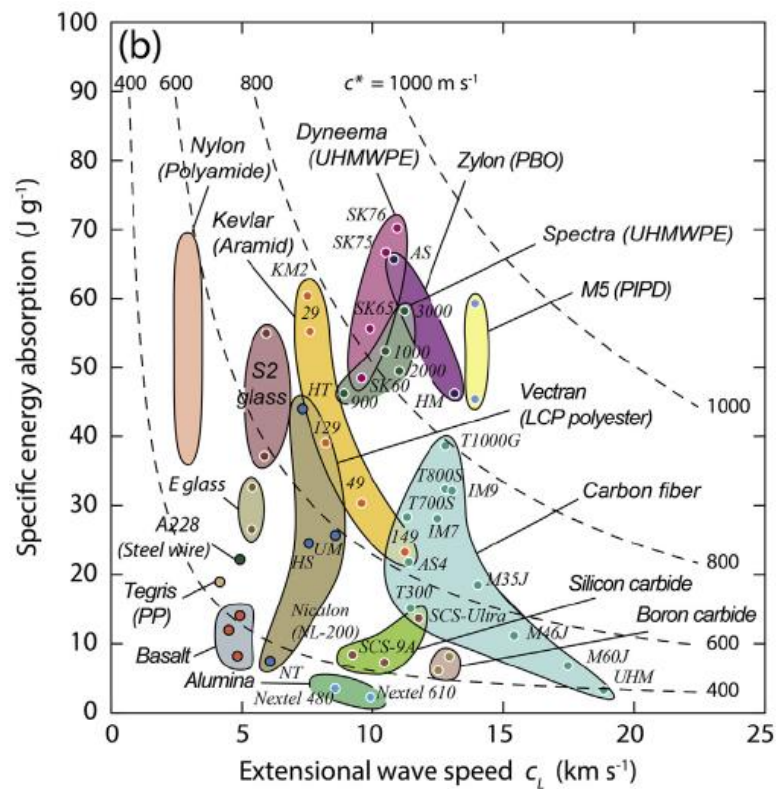
4 MATERIAALIEN VERTAILU JA TUTKIMUKSEN TULOKSET

Tuloksissa ensimmäisessä kappaleessa vertaillaan materiaalien suojausominaisuuksia materiaaliryhmien kesken. Toisessa kappaleessa vertaillaan materiaalien konstruktiivisia ominaisuuksia toisiinsa nähden, kolmannessa kappaleessa vertaillaan materiaalien kustannusominaisuuksia. Lopuksi käsitellään asiantuntijahaastatteluiden tulokset.

4.1 Suojausominaisuudet

4.1.1 Kuidut ja kuitukomposiitit

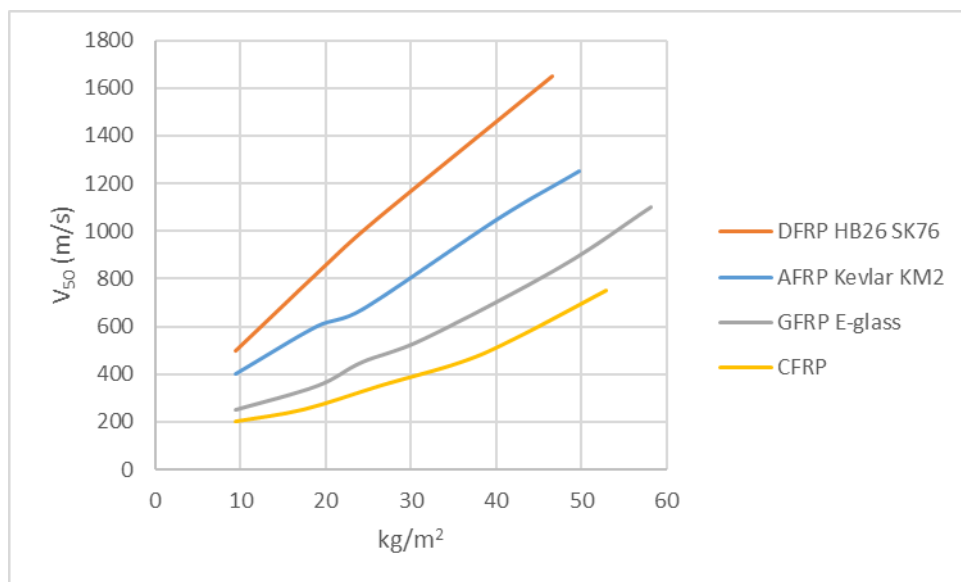
Kuvassa 7 on Cunniffin nopeuksia eri kuiduille. Kuituvahvisteista materiaalia valittaessa sirpalesuojausta varten Cunniffin nopeuden kannattaa olla mahdollisimman suuri.



Kuva 7 Cunniffin (c^*) nopeuksia eri kuiduille. Parempi mitä lähempänä oikeaa yläkulmaa. (O'Masta, M. R. et. al. 2014, s. 17)

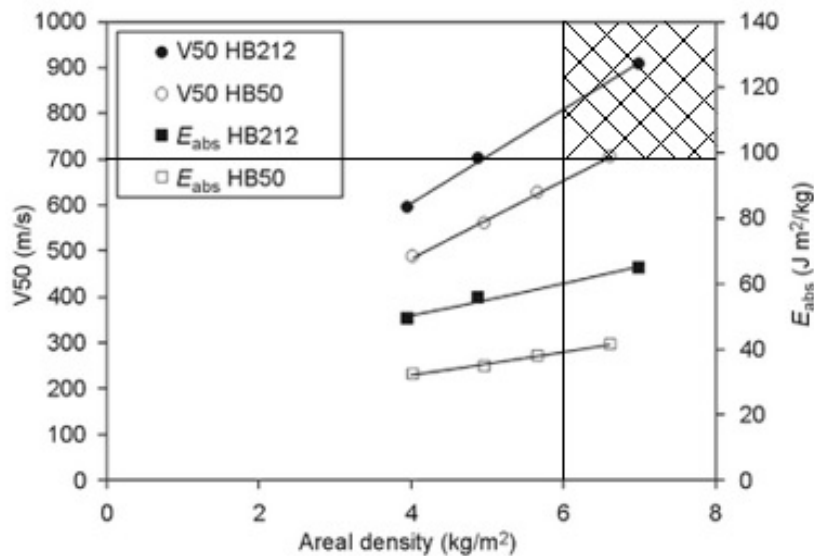
Sirpalesuojauksen kannalta kiinnostavimmat kuidut kuvaajan mukaan ovat Dyneema (UHMWPE), Zylon (PBO) ja M5 (PIPD). Zylon kuitu on kuitenkin herkkä ympäristön vaikutukselle kuten ultraviolettisäteilylle ja kosteudelle, mitkä ajan mittaan heikentävät kuidun ominaisuuksia (P. J. Walsh 2006, s. 3519) ja M5 kuitua ei ole vielä kaupallisesti saatavilla. Matriisien ja punontatiheyden tai -tavan vaikutusta tutkimuksessa ei oteta huomioon kuitukomposiittien ballististen ominaisuuksien määrittämisessä, eli arvot kuvaavat vain kuitujen teoreettista potentiaalia käytettäessä ballistisessa suojauksessa.

Kuvassa 8 on vertailtu kuituvahvisteisten komposiitti levyjen eli FRP:n (fiber reinforced polymer) tehokkuutta 13.14 g sirpaletta simuloivaa projektiilia vastaan (12.7 FSP). Komposiitteja ovat Dyneema SK76 - kuituvahvisteinen polyuretaanikomposiitti (DFRP), kaupalliselta nimeltään Dyneema UD HB26, Aramidi KM2 - kuituvahvisteinen polyvinyylibutyaalikomposiitti (AFRP), E-glass lasikuituvahvisteinen polyesterikomposiitti (GRFP) ja hiilikuituvahvisteinen epoksikomposiitti (L.G. Nguyen et al. 2016, s. 601-602).



Kuva 8 Kuitujen V_{50} arvoja neliöpainon suhteen.

Dyneemakuitukomposiitin kuidut on aseteltu yksisuuntaisina laminoituna rakenteina, muiden komposiittien kuiturakenne on tuntematon. Kuvassa 9 on Dyneema -kuidusta valmistettujen suojapaneelien V_{50} nopeuksia ja energian absorboimiskykyjä neliöpainon suhteen, kun uhkana on 1.1g:n sirpaletta simuloiva ammus.



Kuva 9 Dyneema SK76 -kuidusta kuumamuovauksella valmistettujen suoja-paneelien suoja-arvoja. Huomaa korkeat V_{50} nopeudet alhaisilla neliömassan arvoilla (Muokattu Chen, X. 2016, s. 102).

Paras paino/suoja -suhde saadaan, kun kuituja ei kudota yhteen kuten tyypilliset kevlar suoja-paneelit ja liivit, vaan kuituja sen sijaan käytetään yksisuuntaisena ei-kudottuna rakenteena, missä kuidut ovat rinnakkain sidottuna yhteen termoplastisella matriisilla. Tämä ratkaisu on patentoitu ja toistaiseksi tällaisia kuitukomposiittisuojarakenteita edustavat vain *Spectra Shield* ja *Dyneema UD* tuotemerkit. (Hearle, J. 2001, S.84, Wilusz, E. 2008, s. 39-41, Pat. WO 2004039565 A1 2004).

Painevaikutus vaikuttaa koko ajoneuvon rakenteeseen ja täten konstruktiomateriaali vastaanottaa shokkiaallon. Mikäli kuitukomposiitti on optimoitu konstruktiomateriaaliksi, se ei ole yhtä sitkeä käytetyn matriisin vuoksi kuin esimerkiksi ballistiseksi suojamateriaaliksi optimoitu kuitukomposiitti. Anisotrooppisen rakenteen vuoksi kuitukomposiittilevyn murtolujuus on stabiiliuden menetyksessä, kuten lommahduksessa, shokkiaallon vaikutuksesta heikompi mitä se olisi vetokuormituksessa suhteessa homogeeniseen materiaaliin (Hu, H. 1995, s.41). Näin materiaalista tehty levy pinta ei mene lommolle kuten esimerkiksi teräs vaan murtuu shokkiaallon iskusta. Täten kuitukomposiittien painesuojaominaisuudet sijoittuvat kvalifioituun painesuojaominaisuussuureeseen **hauras**.

4.1.2 Metallit

Taulukossa 2 on esillä eri metallien kovuusarvoja (HB), myötölujuuksia (MPa) ja suhteellisia venymiä (%). Suojateräksille on myös Charpy iskulujuusarvoja (J). Nämä ominaisuudet yhdessä edistävät materiaalin ballistisia suojausominaisuuksia.

Taulukko 2. Metallien suojauskykyä edistäviä ominaisuuksia (Charpy testi pala 10x10)

| Materiaali | | Nimi | σ_y | σ_u | Charpy V | ϵ | HB |
|------------|----------------|---------------|--------------|------------|----------|------------|-----|
| | | | MPa | Mpa | J | % | |
| Teräkset | Suoja | Ramor 600 | 1650 | 2000 | 12,0 | 7 | 600 |
| | | Armox 600t | 1500 | 2000 | 25,0 | - | 605 |
| | | BIS UHH 600 | 1500 | 2050 | 8,0 | 8 | 600 |
| | | Ramor 500 | 1450 | 1700 | 20,0 | 7 | 520 |
| | | BIS RHA 360 | 1040 | 1140 | 22,0 | 16 | 350 |
| | | Ramor 400 | 1100 | 1300 | 20,0 | 8 | 410 |
| | Rakenne | Docol 1500 | 1220 | 1500 | - | 3 | - |
| | | Docol 550 | 550 | 610 | - | 12 | - |
| Alumiinit | Sinkki | AA7022-T6 | 475 | 530 | - | - | 145 |
| | | AA7020-T4 | 200 | 310 | - | 10 | 95 |
| | | AA7075-T6 | 505 | 570 | - | 11 | 150 |
| | | AA7039-T64 | 380 | 480 | 7,5 | 13 | 133 |
| | | AA7039-T61 | 330 | 400 | - | 14 | 123 |
| | Magnesium | AA5083-0 | 145 | 290 | - | 22 | 77 |
| | | AA5083-H22 | 250 | 337 | - | 8 | 95 |
| | | AA5083-H24 | 285 | 375 | - | 6 | 110 |
| | | AA5059-H131 | 303 | 393 | - | 8 | 120 |
| | | AA5059-H136 | - (alle 303) | - | - | 10 | 108 |
| | Kupari | AA2014A-T6 | 420 | 470 | - | 7 | 145 |
| | | AA2024-T5 | 345 | 480 | - | 18 | 120 |
| | Litium | AA2090-T86 | 520 | 550 | - | 6 | 150 |
| | | AA8090-T81 | 340 | 440 | - | 12 | 116 |
| | Magnesium-Pii | AA6061-T6 | 265 | 305 | - | 9 | 100 |
| | Titaaniseokset | Ti6Al4V (STA) | 1100 | 1170 | 23,0 | 10 | 379 |

Taulukossa 2 ei ole huomioitu materiaalin massaa. Alumiini on yhdisteestä riippuen noin 3 kertaa kevyempää kuin teräs ja titaani noin 2 kertaa kevyempää. Kiinnostavimmat materiaalit ovat suojateräkset, lujat alumiinit, mitkä omaavat teräksiä heikommat lujuus- ja kovuusominaisuudet, mutta ovat erittäin kevyitä, ja titaaniseokset.

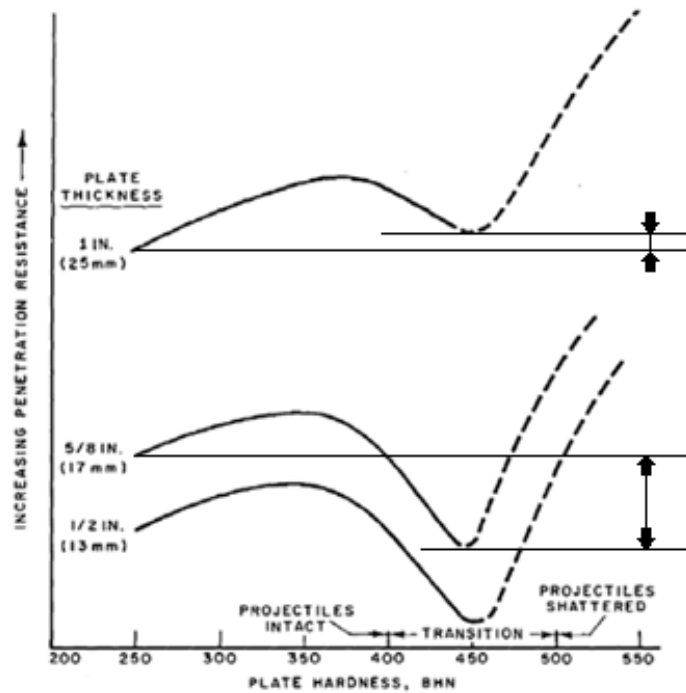
Taulukossa 3 on materiaalien ja materiaaliyhdistelmien massatehokkuuslukuja 7.62x51 mm panssariluotia vastaan. 7.62 mm panssariluoti ei täysin vastaa sirpaletta, eikä suoraa

vertausta voi tehdä materiaalin sirpalesuojaominaisuuksien ja luotisuojaominaisuuksien välillä. Tulokset ovat suuntaa antavia ja ne voidaan suhteuttaa materiaalien suojauskykyä edistäviin ominaisuuksiin.

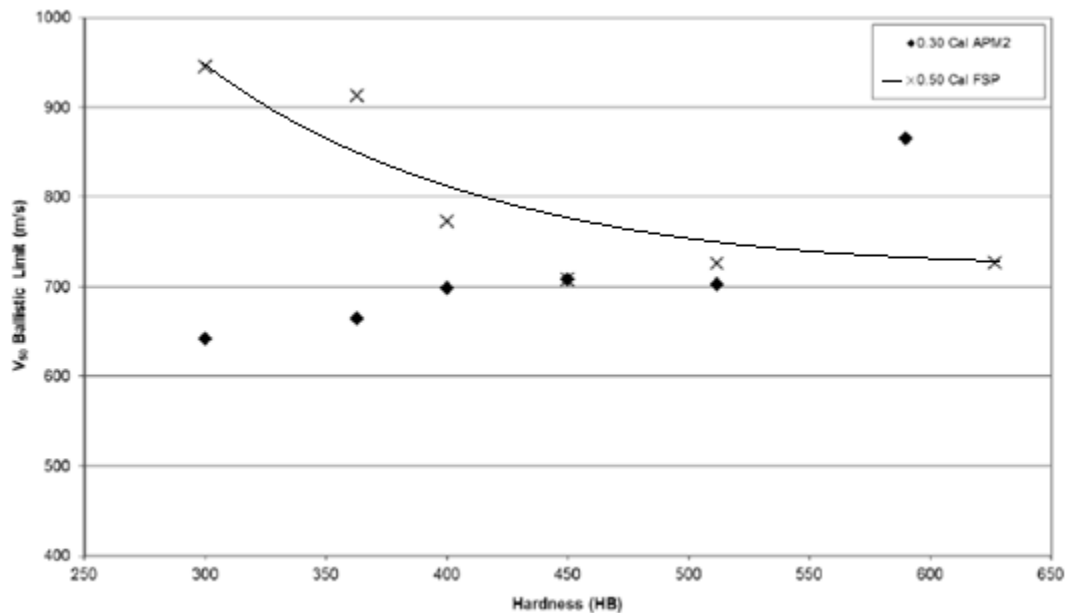
Taulukko 3. Metallien massatehokkuuslukuja. RHA suojateräksen massatehokkuus (E_m) on 1. (Asiantuntija 2, 2017).

| Materiaali | E_m |
|---------------------|-------|
| Rakenneteräs | 0,58 |
| Suojateräs (HB 380) | 1,00 |
| Suojateräs (HB 550) | 1,16 |
| Alumiini 7020 | 0,91 |
| Alumiini 7039 | 1,08 |
| Alumiini 5083 | 0,89 |
| Titaani Ti6Al4V | 1,50 |

Massatehokkuuslukuja vertaillessa tulee kuitenkin huomioida, että sirpaleilta suojautuminen poikkeaa luotisuojauksesta tylpän projektiilin aiheuttaman erilaisen vauriomekanismin vuoksi, jolloin muun muassa materiaalin kovuuden merkitys vähenee suhteessa muodonmuutoslujuuteen eli materiaalin myötölujuuteen venymän funktiona. Kuvat 10 ja 11 esittävät suojalevyn materiaalin kovuuden vaikutusta levyn suojauskykyyn, kuvaajista nähdään materiaalin kovuuden voivan jopa heikentää materiaalin kykyä suojata ballistiselta uhalta. Tämä heikentynyt suojauskyky sirpaleen perforaatiota vastaan johtuu tylpän sirpaleen aiheuttaman kuormituksen tuottamasta matalaenergisestä vauriomekanismista, missä sirpale murtaa kovan levyn adiabaattisella tapitusleikkauksella (shear plugging). (Cimpoeru, S. J. 2016, s. 3-5).

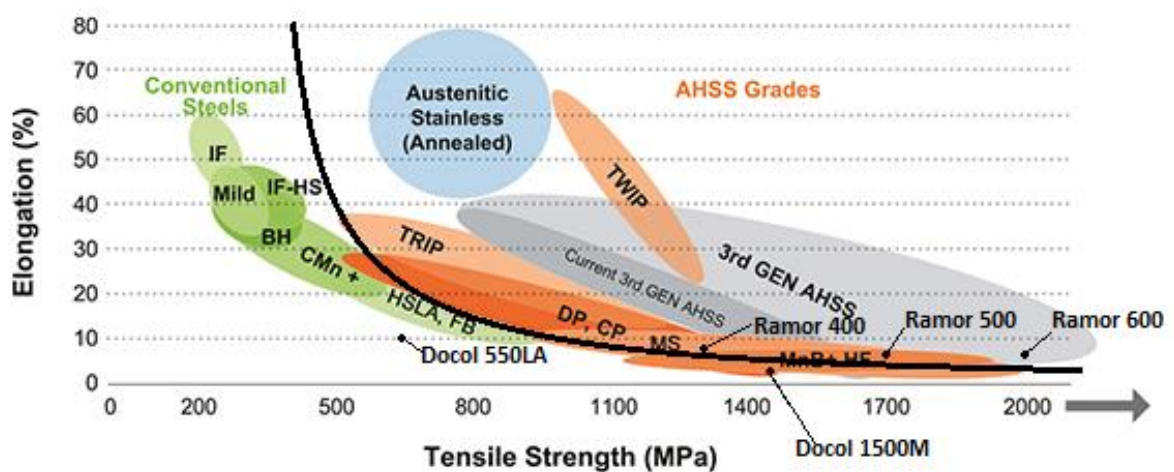


Kuva 10 Metallisen suojalevyn materiaalin kovuuden vaikutus levyn ballistiseen raja-arvoon. Huomaa kovuuden korostunut vaikutus ohuilla levyillä matalaenergisien vauriomekanismin syntyyn (Muokattu Cimpoeru, S. J. 2016, s. 4).



Kuva 11 Teräslevyn kovuuden vaikutus sirpaletta ja panssariluotia vastaan, huomaa heikentynyt suojauskyky ja kovuuden lisääntymisen merkityksettömyys suojauduttaessa sirpaleilta (Muokattu Cimpoeru, S. J. 2016, s. 5).

Adiabaattisen leikkausmurtuman seurauksena tapahtunut perforaatio kuluttaa projektiiliin energiaa huomattavasti vähemmän kuin sitkeä leikkausmurtuma, mikä tuottaa mahdolliselle käytettävälle spall linerille tai taustasuojalevyille enemmän suojattavaa iskuenergiaa. Materiaalit joilla on korkea lujuus, mutta alhaiset muokkauslujittumisominaisuudet ovat alttiita adiabaattiselle leikkausmurtumalle, lisäksi murtumaan vaikuttavat materiaalin lämmönjohtavuus, tiheys, ominaislämpö ja projektiilin osumakulma (Roessig, M. Mason, J. 1998, s. 260, Cimpoeru, S. J. 2016, s. 18-20, Pérez-Bergquist, S. et. al. 2011, s. 8738-8741).



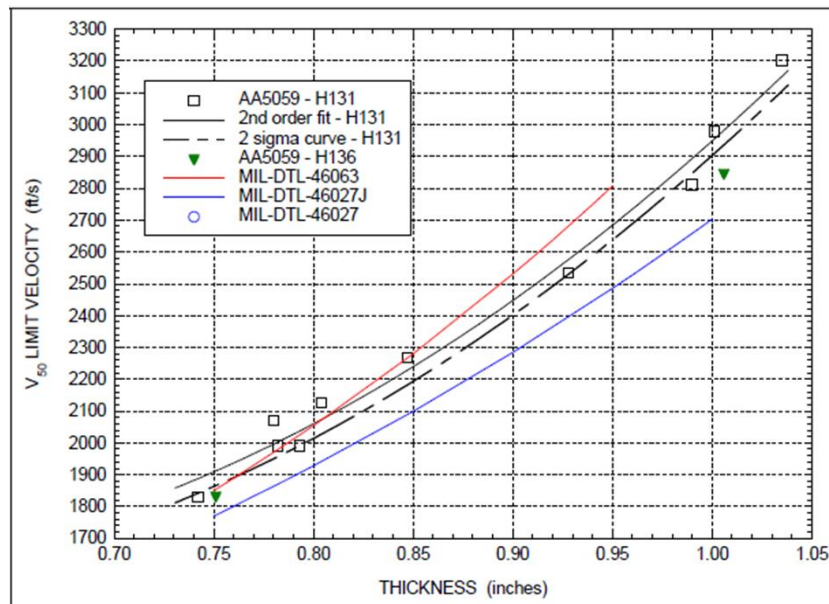
Kuva 12 Eri teräslaatuja, materiaali on parempi mitä lähempänä oikeaa yläkulmaa. Suojaukseen ja energian absorboimiseen soveltuvimmat korkealujuusteräkset (AHSS) ovat käyrän yläpuolella. (Muokattu Steel Market Development Institute, 2016)

Korkea murtolujuus yhdistettynä korkeaan suhteelliseen venymään edistää teräksen energian absorboimisominaisuuksia. Suojateräksistä kiinnostavimmat ovat Ramor teräkset, sillä saatavat aihiot ovat sopivia rakenteiden valmistusta varten, etenkin Ramor 500, mikä on ohuimpana aihiona (2 mm) saatavilla oleva suojateräs, mikä mahdollistaa vapaamuotoisemman painon optimoinnin muihin suojateräksiin verrattuna. Muita suojateräksiä saa vain paksumpina aihioina, mikä nostaa lopullista painoa. Lisäksi energiaa absorboivat ja hyvät muokkauslujittumis ominaisuudet omaavat TWIP teräkset ovat mielenkiintoisia (murtolujuus 900-1300 MPa ja suhteellinen venymä vähintään 20 %). Lujat rakenneteräkset kuten Docol 1500M eivät sovi suojamateriaaliksi korkeasta lujuudesta huolimatta niiden haurauden vuoksi.

Alumiineista huomioita herättävimmät materiaalit ovat sotilasajoneuvoissa yleisesti käytetyt 5083 ja 7039 alumiinit, ja niiden kanssa 5000- ja 7000-sarjan alumiineihin kuuluvat

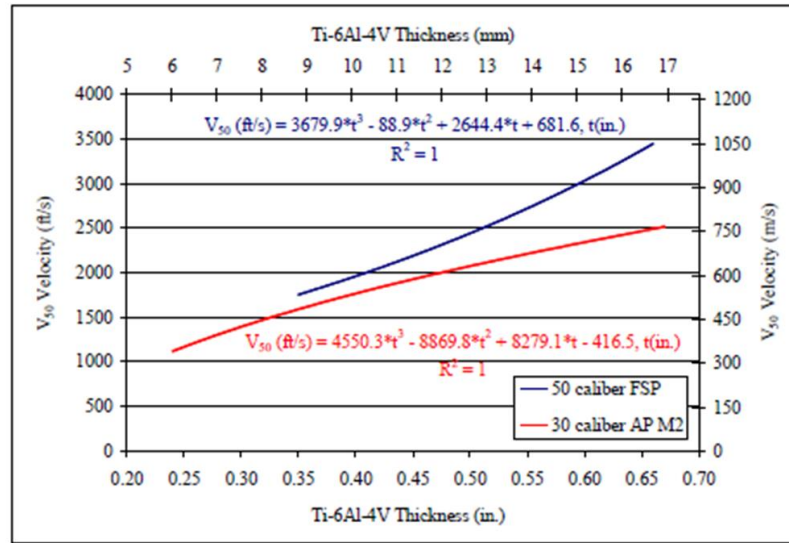
metalliseokset, 6061 alumiini ja uudet 2090 ja 8090 alumiini-litium seokset. 2000-sarjan alumiinit omaavat heikon korroosionkestävyyden, minkä vuoksi ne eivät ole yhtä sopivia kuluttavaan ympäristöön kuin 5000-, 6000- ja 7000-sarjan alumiinit. 6061 on suojauskyvyltään yhtä vahva kuin monet 5000-sarjan alumiinit, mutta on myös heikompi ympäristön vaikutuksille 2000-sarjan alumiinien tavoin. 5059 alumiini on todettu paremmaksi kuin 5083 alumiini, kun tarkoituksena on suojata ballistiselta uhalta. 5059 alumiinilla on myös korkeampi suhteellinen venymä 5083 alumiiniin nähden mikä edistää sen painesuojaominaisuuksia. Lisäksi 5059 alumiini omaa myös paremmat korroosionkestominaisuudet kuin, 5083 alumiinia vahvempi, 7039 alumiini ja yhtä vahva 6061 alumiini (Showalter, D. Placzankis, B. Burkins, M. 2008, s. 15, Gooch, W. Burkins, M. Squillaciotti, R. 2007, s.988).

Kuvasta 13 on nähtävissä 5059-H131 ja 5059-H136 alumiinien suojauskyky 13.14 g sirpaletta simuloivaa projektiilia vastaan (12.7 FSP) verrattuna ballistisessa suojauksessa käytettyihin 7039 ja 5083 alumiiniyhdisteisiin.



Kuva 13 Punainen käyrä kuvaa 7039 seosta, sininen käyrä 5083 seosta ja musta käyrä 5059-H131 seosta. Huomaa 5059:n parempi suojauskyky alhaisilla ainepaksuuksilla 7039 seokseen nähden. (Showalter, D. Placzankis, B. Burkins, M. 2008, s. 8)

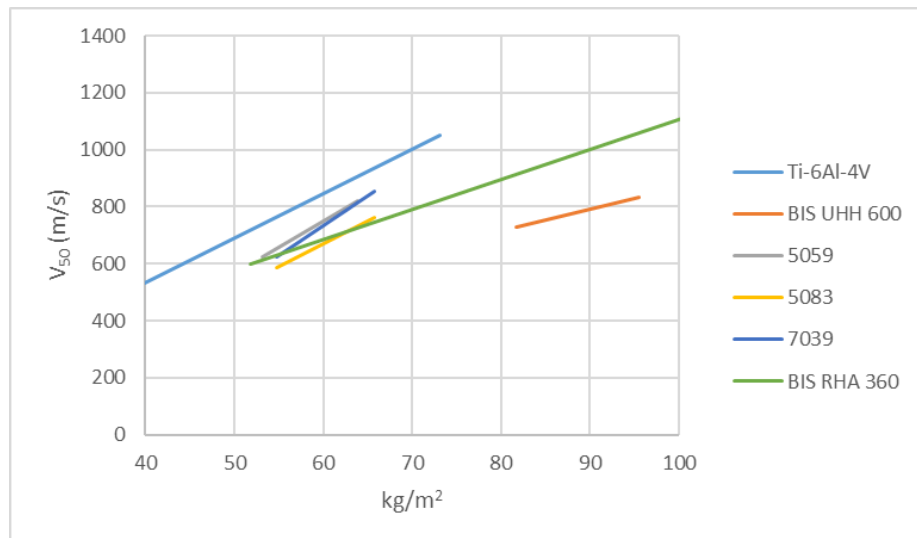
Titaaniseokset ovat alumiineja tehokkaampia ballistisessa suojauksessa. Kuvassa 14 näkyy Ti-6Al-4V yhdisteen tehokkuus 13.14 g testi sirpaletta vastaan (12.7 FSP).



Kuva 14 Sininen käyrä kuvaa suojausta FSP:tä vastaan. (Bartus, S. 2009, s. 5)

Ti-6Al-4V titaaniyhdisteen lisäksi on kehitetty vähemmän tunnettuja titaaniyhdisteitä kuten Ti-5553 (STA Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr), mikä on todettu Ti-6Al-4V:ia tehokkaammaksi sirpale- ja luotisuojauksessa ja omaavan myös paremmat mekaaniset ominaisuudet (Bartus, S. 2009, s. 5-15)

Kuvassa 15 on vertailtu 5083, 5059 ja 7039 alumiiniseosten, Ti-6Al-4V:n, RHA:n (rolled homogenous armor) ja UHH (ultra high hardness) teräksen suojauskykyä sirpaleita simuloivaa ammusta (12.7 mm FSP) vastaan neliömassan suhteen.



Kuva 15 Materiaalin suojauskyky neliömassan suhteen, mitä lähempänä vasenta yläkulmaa sen parempi. Testilevyjen paksuus 6 – 25 mm.

UHH teräs on selvästi alumiinia heikompi massan suhteen tylppää sirpaletta vastaan. Kyseisen UHH teräksen iskulujuus on kuitenkin vain 8 J, verrattuna Suomalaiseen Ramor 600 suojateräkseen, millä on samoilla kovuusarvoilla 12 J:n iskulujuus. Ramor teräksen voidaan siis olettaa olevan BIS UHH 600 terästä parempi suojamateriaali ja kilpailukykyisempi alumiinin kanssa, mutta ilman testituloksia tarkkaa vertailua ei voida suorittaa. Sirpalevaikutukselta suojautumista ei voi kokonaisuudessaan määrittää kovuuden perusteella, se voi nimittäin olla jopa haitaksi, sen sijaan materiaalin venymä suhteutettuna sen murtolujuuteen on parempi määritelmä. Suojauskyvyn lisääntyminen neliömassan suhteen on taulukossa lineaarinen tulosten vähyden vuoksi, todellisuudessa se ei ole lineaarinen, eli taulukko on suuntaa antava.

Kaikki metallit joiden suhteellinen venymä on yli 5% sijoittuvat kvalifioituun painesuojaominaisuussuureeseen **sitkeä**. Materiaalin suhteellinen venymä ei ole suoraan verrannollinen materiaalin kykyyn suojata painevaikutukselta. Tähän vaikuttaa olennaisena osana myös materiaalin lujuus, muokkauslujittuminen ja rakenne.

4.1.3 Keraamit

Kuituvahvisteisten materiaalien ja metallien lisäksi suojamateriaalina käytetään erilaisia keraameja. Keraameilla saavutetaan erittäin korkeita kovuusarvoja ja ne kestävät hyvin väsymistä, korroosiota ja korkeita lämpötiloja, mutta ne ovat hauraita. Tämän vuoksi ne eivät sovi suojaukseen yksinään vaan vaativat taustalevyn, kuten esimerkiksi alumiini-, teräs- tai kuitukomposiittilevy, mikä ottaa lopullisen iskuenergian ja sekundäärisirpaleet vastaan keraamin pirstoutuessa. Tällöin keraameiden avulla voidaan saavuttaa erittäin suuria massatehokkuuslukuja ballistisista uhkaa vastaan. Keraameilla on kuitenkin tapana pirstoutua luodin tai sirpaleen iskusta, minkä vuoksi niillä on yleisesti metalleja heikompi moni-iskukestävyys. Keraamit eivät voi toimia konstruktiomateriaalina tai painesuojamateriaalina, eivätkä sovi sellaisenaan suojaukseen korostuneen sekundäärisirpaleuhan vuoksi (Wadley H. N. G. et al. 2013, s. 114-115; Kari et al. 2008a, s. 433; Kari et al. 2008b, s. 194; Dowling, N. E. 2013, s. 41).

Taulukossa 4 on keraamisten suojalevyjen vaikutus käytettynä yhdessä alumiinin, kovan suojateräksen ja kuitukomposiitin kanssa, kun uhkana on 7.62 x 51 mm panssariluoti.

Taulukko 4. Lisätyn alumiinioksidi- ja boorikarbidilevyn vaikutus materiaalin massatehokkuuslukuun E_m (Asiantuntija 2, 2017).

| Materiaali | E_m | $E_m(\text{Al}_2\text{O}_3)$ | $E_m(\text{B}_4\text{C})$ |
|---------------------|-------|------------------------------|---------------------------|
| Suojateräs (HB 380) | 1,00 | - | - |
| Suojateräs (HB 550) | 1,16 | 1,68 | - |
| Alumiini 7039 | 1,08 | - | - |
| Alumiini 5083 | 0,89 | 2,19 | - |
| Titaani Ti6Al4V | 1,50 | - | - |
| Dyneema paneeli | - | 3,17 | 4,38 |

Taulukosta havaitaan mielenkiintoinen poikkeama; vaikka alumiini on suojaterästä heikompi suojamateriaali itsessään, se on keraamilevyn kanssa yhdistettynä suojaterästä tehokkaampi. Keraamilevy käyttäytyy kertoimen lailla, se ei toimi suojamateriaalina itsenään, mutta voi kasvattaa materiaalin massatehokkuuslukua huomattavasti. Tulee kuitenkin huomioida, vertailu on suoritettu panssariluodilla sirpaleen sijaan datan puutteellisuuden vuoksi. Panssariluoti on erittäin kova ja omaa heikot sitkeysominaisuudet, minkä vuoksi kova luoti voi pirstoutua osuessaan tarpeeksi kovaan pintaan (kuva 10) todennäköisemmin kuin sirpale, mikä nostaa keraamin tehokkuutta kovia luoteja vastaan. Verrattavan datan puutteellisuuden ja potentiaalisen virhemarginaalin vuoksi keraameja ei oteta huomioon materiaalien vertailussa.

Huonojen sitkeysominaisuuksien vuoksi keraamit luokitellaan kvalifioituun painesuojaominaisuussuureeseen **hauras**. Keraami ei myöskään sovi konstruktiomateriaaliksi, joten sitä ei voi suoraan verrata painesuojaominaisuuksissaan muihin materiaaleihin.

4.2 Konstruktiiviset ominaisuudet

Taulukossa 5 on komposiittien ja metalliyhdisteiden ominaislujuusarvoja, keraameja ei ole huomioitu niiden heikkojen sitkeysominaisuuksien vuoksi. Kuituvahvisteisten polymeerien (FRP) matriisina on käytetty 158BQTN tyydyttämätöntä polyesteri hartsia. Lujuusarvot on määritetty vetokokein, FRP:n lujuus määrittyy murtolujuuden ja metallien lujuus myötölujuuden mukaan. Nanohiiliputkivahvisteisen polymeerin (NtFRP) lujuusarvot ovat teoreettisia (Qian, D et al. 2010, s. 639; Harris, C. E. et al, 2002, s. 27).

Taulukko 5. Materiaalien ominaislujuuksia. Kuitukomposiittien lujuusarvot määritetty kuitujen suunnassa.

| Materiaali | | Nimi | σ_y/m | σ_u/m |
|---------------|----------------|---------------|------------------------|--------------|
| | | | MNm/kg | MNm/kg |
| Komposiitit | Kuitu | ZFRP AS | - | 0,81 |
| | | CFRP T-300 | - | 0,67 |
| | | GFRP E-Glass | - | 0,24 |
| | | DFRP SK60 | - | 0,49 |
| | Kuitukide | NtFRP | - | 2,50 |
| Alumiinit | Sinkki | AA7022-T6 | 0,17 | 0,19 |
| | | AA7020-T4 | 0,07 | 0,11 |
| | | AA7075-T6 | 0,18 | 0,20 |
| | | AA7039-T64 | 0,14 | 0,18 |
| | | AA7039-T61 | 0,12 | 0,15 |
| | Magnesium | AA5083-0 | 0,05 | 0,11 |
| | | AA5083-H22 | 0,09 | 0,13 |
| | | AA5083-H24 | 0,11 | 0,14 |
| | | AA5059-H131 | 0,11 | 0,15 |
| | | AA5059-H136 | - (alle 0,11) | - |
| | Kupari | AA2014A-T6 | 0,15 | 0,17 |
| | | AA2024-T5 | 0,12 | 0,17 |
| | Litium | AA2090-T86 | 0,20 | 0,21 |
| | | AA2195-T6 | 0,26 | 0,28 |
| | | AA8090-T81 | 0,13 | 0,17 |
| Magnesium-Pii | AA6061-T6 | 0,10 | 0,11 | |
| Teräkset | Suoja | Ramor 600 | 0,21 | 0,25 |
| | | Armox 600t | 0,19 | 0,25 |
| | | BIS UHH 600 | 0,19 | 0,26 |
| | | Ramor 500 | 0,19 | 0,22 |
| | | BIS RHA 360 | 0,13 | 0,15 |
| | | Ramor 400 | 0,14 | 0,17 |
| | Rakenne | Docol 1500 | 0,16 | 0,19 |
| | | Docol 550 | 0,07 | 0,08 |
| | Titaaniseokset | Ti6Al4V (STA) | 0,25 | 0,26 |

Materiaalien konstruktiivisia ominaisuuksia verratessa tulee kuitenkin muistaa, että lujuusominaisuudet on määritetty vetokokein. Ilman tuntemusta geometriasta ja kuormitustiloista, kuten onko kuormitus veto- vai taivutuskuormitusta, tarkkaa konstruktiomateriaalin valintaa ei voida tehdä. Esimerkiksi taivutuksessa alumiini tulee suhteellisesti edullisemmaksi kuin vetokuormituksessa (Björk 2017). Jos keraameja voisi käyttää, ne olisivat parhaimmillaan puristuskuormituksen alaisina. Samoin

kuitukomposiittien ominaisuudet muuttuvat huomattavasti kuitujen suunnasta riippuen. Täten määritetyt konstruktiivisten tulosten arvot ovat vain suuntaa antavia.

Lisäksi materiaalin ahiokoot tulee ottaa huomioon konstruktiomateriaali valittaessa. Kaikkia materiaaleja ei saa samoissa aihioissa, esimerkiksi eri teräksien levyaihiokoot vaihtelevat. Armox 600t teräs myydään lisäsuojalevyinä, minkä alhaisin levyaihionpaksuus on 4 mm, tämä aihio rajoittaa huomattavasti materiaalista tehtävän rakenteen painon optimointia ja suunnittelua. Docol 1500M martensiittista ajoneuvoihin suunniteltua terästä puolestaan saa jopa 0.5 mm ohuina aihioina. Lujien alumiinien ahiot ovat yleensä paksumpia kuin teräksien, mutta alhaisen ominaispainon vuoksi 3 mm alumiinia on noin yhtä painava kuin 1 mm terästä. Kuitukomposiittirakenteet koostuvat laminoiduista kuitulevyistä tai punoksista, joten kuitukomposiittirakenteella ei ole vastaavalla tavalla rajoittavaa ahiokokoa kuin metalleilla. Joitain materiaaleja, kuten Docol-ajoneuvoteräs, myydään myös putkiaihioina tai pyynnöstä muunlaisen halutun profiilin muotoisena.

4.3 Kustannusominaisuudet

Taulukossa 6 on materiaalikohtaisen kvalifioidun kustannusarvon määrittely. Y. = yleinen, H. = harvinainen, P. = poikkeuksellinen. Lisäksi nanohiiliputkivahvisteisen komposiitin (NtFRP) kvalifioitu kustannusarvo on määriteltä erityisen poikkeukselliseksi (EP), mikä kuvaa materiaalin erityistä harvinaisuutta (Harris, C. E. et al, 2002, s. 27).

Useat 2000 ja 7000 -sarjan alumiinit, lukuun ottamatta 7039 seosta, eivät ole hitsattavia mikä rajoittaa niiden käyttöä huomattavasti. Alumiini-litium seokset ovat lujuus- ja hitsausominaisuuksiltaan erinomaiset, mutta ovat hankintahinnaltaan kalliimpia, mitkä rajoittavat niiden käyttöä. 5000 -sarjan alumiinit sopivat hitsaukseen hyvin, korkeista lujuusarvoista huolimatta (vrt. 2000 ja 7000 -sarjat). Kaikkia valmistuksessa hyödynnettäviä materiaaliominaisuuksia ei ole otettu huomioon kustannusarvoa määriteltäessä, esimerkiksi 6000 -sarjan alumiinit ovat pursotettavia. Pursotuksella voidaan saavuttaa rakenteelta mielenkiintoisia lujuus ja väsymisominaisuuksia. Myöskään mekaanista liittämistä, kuten puristusliitosta, ei ole otettu huomioon valmistuksessa. (Practical Welding Today 2011).

Taulukko 6. Materiaalien kustannuspisteitä ja lopullinen kvalifioitu kustannusarvo.

| Materiaali | | Nimi | Kustannuspisteet | | | | | |
|----------------|---------------|--------------|---|-----------|-------------|----------|----|--|
| | | | Hankinta | Valmistus | Suunnittelu | Yhteensä | | |
| Komposiitit | Kuitu | PBO -FRP | Ei määritettävissä tutkimuksen rajauksen puitteissa | | | | P. | |
| | | Hiili -FRP | | | | | | |
| | | Aramidi -FRP | | | | | | |
| | | Lasi -FRP | | | | | | |
| | | UHMWPE -FRP | | | | | | |
| Kuitukide | NtFRP | EP. | | | | | | |
| Alumiinit | Sinkki | AA7022-T6 | 2 | 0,5 | 0,5 | 3 | H. | |
| | | AA7020-T4 | | 0,5 | 0,5 | 3 | | |
| | | AA7075-T6 | | 0,5 | 0,5 | 3 | | |
| | | AA7039-T64 | | 1 | 0,5 | 3,5 | | |
| | | AA7039-T61 | | 1 | 0,5 | 3,5 | | |
| | Magnesium | AA5083-0 | 2 | 1 | 0,5 | 3,5 | Y. | |
| | | AA5083-H22 | | 1 | 0,5 | 3,5 | | |
| | | AA5083-H24 | | 1 | 0,5 | 3,5 | | |
| | | AA5059-H131 | | 1 | 0,5 | 3,5 | | |
| | | AA5059-H136 | | 1 | 0,5 | 3,5 | | |
| | Kupari | AA2014A-T6 | 2 | 0,5 | 0,5 | 3 | H. | |
| | | AA2024-T5 | | 0,5 | 0,5 | 3 | | |
| | Litium | AA2090-T86 | 1,5 | 1 | 0,5 | 3 | H. | |
| AA2195-T6 | | 1 | 1 | 0,5 | 2,5 | | | |
| AA8090-T81 | | 1,5 | 1 | 0,5 | 3 | | | |
| Magnesium-Pii | AA6061-T6 | 2 | 1 | 0,5 | 3,5 | | | |
| Teräkset | Suoja | Ramor 600 | 2,5 | 1 | 0,5 | 4 | Y. | |
| | | Armox 600t | | 1 | 0,5 | 4 | | |
| | | BIS UHH 600 | | 1 | 0,5 | 4 | | |
| | | Ramor 500 | | 1 | 0,5 | 4 | | |
| | | BIS RHA 360 | | 1 | 0,5 | 4 | | |
| | | Ramor 400 | | 1 | 0,5 | 4 | | |
| | Rakenne | Docol 1500 | 2,5 | 1 | 0,5 | 4 | | |
| | | Docol 550 | | 1 | 0,5 | 4 | | |
| Titaaniseokset | Ti6Al4V (STA) | 1 | 1 | 0,5 | 2,5 | P. | | |

Kiinnostavimmat materiaalit hinnan perusteella ovat teräkset ja alumiinit. Alumiineista erityisesti 5000 ja 6000 -sarjan alumiinit, niiden hyvien valmistusominaisuuksien vuoksi. Teräkset ovat myös hinnan ja valmistettavuuden puolesta erinomaisia materiaaleja. Titaaniseokset ovat muista erinomaisista ominaisuuksistaan huolimatta heikkoja kustannusominaisuuksiltaan. Kuitukomposiittien kustannusominaisuudet ovat määritelty poikkeukselliseksi, mutta todellisuudessa määrittäminen ei ole näin yksiselitteinen, kuitukomposiitti voidaan optimoida eri tarkoituksiin, mikä vaikuttaa kustannusominaisuuksiin merkittävästi.

4.4 Asiantuntijahaastattelujen tulokset ja reflektointi

Haastattelukysymykset käsittelivät yleisesti sotilasajoneuvoissa käytettävien materiaalien lisäksi, myös kyseisten ajoneuvojen vauriomekanismeja MIL-standardin määrittämältä uhalta. Haastatteluiden tuloksena todettiin asiantuntijoiden antamien vastauksien olevan samassa linjassa kirjallisuuskatsauksen kanssa.

Suurimpina huomioina haastatteluista ilmeni ajoneuvojen vauriomuodot. Kevyesti suojatuilla ajoneuvoilla, eritoten kevyillä tela-ajoneuvoilla voimansiirron vaurioituminen on tyypillistä myös pienillä räjähteillä. Tyypillinen kuminen tela ja kevyt telakoneisto tai kevyen maastoajoneuvon rengas ei kestä MIL-standardin mukaisen räjähteen iskua, vaikka ajoneuvon runko ja pohja muuten kestäisi räjähteen. Näin ollen ajoneuvon voimansiirrossa tulisi myös huomioida MIL-standardin mukaiset räjähteet, mikäli sen tulisi kyetä toimimaan vaaditulla tasolla myös miinaskun jälkeen. MIL-standardi ei kuitenkaan vaadi ajoneuvoa säilyttämään toimintakykyänsä iskun seurauksena. Painevaikutuksen merkitys todettiin myös olevan merkityksetön MIL-standardin määrittämän suojaustason saavuttamisen kannalta. Painevaikutus voi kuitenkin vaurioittaa ajoneuvon pohjaa, mikä saattaa heikentää ajoneuvon rakenteellista eheyttä. Hauraan komposiittipohjaisen ajoneuvon lattiarakenne tai tukirakenne voi esimerkiksi murtua painevaikutuksesta, mikä voi tehdä rakenteen kokonaisuudessaan toimimattomaksi. Sirpaleet ovat olennaisin huomioitava uhka MIL-standardin täyttämiseksi.

4.5 Tulosten loppuasettelu

Tuloksista huomattiin UHMW-PE vahvisteisten kuitukomposiittien olevan mielenkiintoisimpia materiaaleja sirpalesuojauksessa. Metallit ovat soveliaita, kun materiaalilta vaaditaan suoja- ja konstruktio-ominaisuuksia, näistä mielenkiintoisimpia ovat tietyt alumiinit ja suojateräkset. Suojateräksillä tulee kuitenkin muistaa adiabaattisen leikkausmurtuman vaara, kun kova levy optimoidaan ohueksi, jolloin suojaustaso laskee oletettua alhaisemmaksi. Keraamit toimivat hyvänä suojakertoimena perusmateriaalille, mutta sirpalesuojauksesta ei saatu tuloksia. Konstruktiomateriaaleista sopivimpia ovat ultralujat rakenneteräkset, alumiini ja kuitukomposiitit yleisesti, rakennemateriaalin valinta on riippuvainen lopullisesta konstruktioista. Kustannusten lopullinen määrittäminen tulisi tehdä vertaamalla kokonaiskustannusta tiettyyn ominaisuuteen, tämä kuitenkin vaatii lisätutkimusta.

5 POHDINTA

Absoluuttista lopullista valintaa ei ole mahdollista tehdä ilman lopullisen ajoneuvon dimensioita ja oletettuja kuormitustiloja. Ajoneuvon kuitenkin tiedetään olevan massakriittinen ja vaadittava suojaustaso tunnetaan, täten materiaalit tulee valita massakriittisin perustein ja mahdollistamalla vaaditun MIL-standardin mukaisen suojaustason saavuttaminen. Tulosten pohjalta voidaan todeta eri materiaalien voitavan optimoida eri tarkoituksiin, tämän vuoksi ajoneuvossa on kannattavaa hyödyntää useita eri materiaaleja. Näin materiaalien eri ominaisuuksia voidaan hyödyntää siellä, mihin niillä on tarvetta.

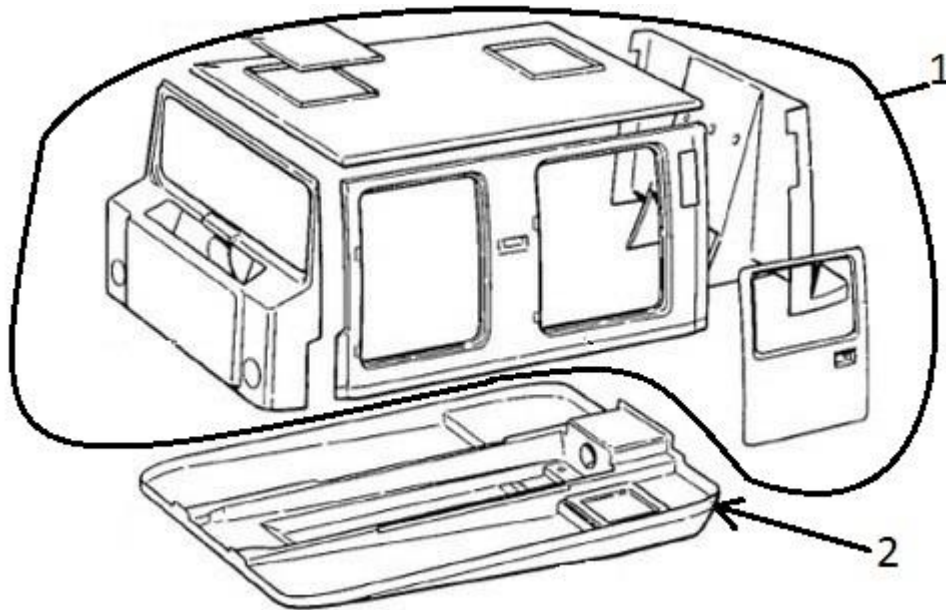
5.1 Konseptointi ja lopullinen valinta

Materiaalivalinnat tehdään konseptikohtaisesti, jossa materiaalia käytetään sen ominaisuuksien tarjoaman hyödyn maksimoivalla tavalla. Kaikissa konsepteissa ajoneuvo koostuu erillisestä alustasta ja päälle sijoitettavasta koriosasta. Kyseinen osajako valittiin, sillä se edistää ajoneuvon modulaarisuutta ja mahdollistaa sen optimoinnin eri tehtäviin. Alkuun käsitellään korin materiaalivalintaa ja tämän jälkeen alustakonsepteja. Kustannusominaisuuksien merkitys ja vaikutus materiaalin valintaan on subjektiivinen, eli valitsija itse päättää kustannusten merkityksen suhteessa materiaalin muihin ominaisuuksiin. Tässä tutkimuksessa kustannusominaisuuksien merkitystä suhteessa muihin ominaisuuksiin arvioidaan perustuen tutkimuksen aikaiseen globaaliin taloudelliseen tilanteeseen ja teknologisen kehityksen asteeseen sekä yrityksen johdon mieltymyksiin.

5.1.1 Korin materiaali

Ajoneuvossa kori on osa modulaarista kokonaisuutta, mikä voitaisiin vaihtaa tarpeen mukaan. Kori voi koostua pohjapaneelistä ja päälle sijoitettavasta kopista tai koripaneeleista, pohjapaneeli voi olla myös alustarakaisuun integroitu rakenne. Miinan räjähtäessä vaikutus kohdistuu ajoneuvon pohjaan, eli ajoneuvon pohjapaneelin tai alustarakenteen tulee kyetä suojaamaan miinan vaikutuksilta. Pääasiallinen suojaus tulee siis sijoittaa ajoneuvon alaosiin. Mikäli ajoneuvon haluttaisiin suojata miehistöä myös sivussa tapahtavalta räjähteeltä, tulisi myös kyljet suojata, jolloin materiaalien sijoitus ja jakauma muuttuvat.

Kuvassa 16 on esitelty yleisen korirakenteen materiaalien jaottelu sijainnin mukaan.



Kuva 16 Osiin nro. 1 kannattaa käyttää materiaaleja tai materiaalien yhdistelmiä, joiden massaosuus optimoidaan konstruktiivisiin ominaisuuksiin. Pohjapaneelin materiaali (nro. 2) vaatii lisäksi myös hyvät suojaominaisuudet. (Muokattu MILMAC. 2018)

Isotrooppiset monikäyttöiset materiaalit, eli materiaalit joita voidaan käyttää samalla suoja ja konstruktiomateriaalina, kannattaa sijoittaa korin pohjapaneeliin tai vastaavaan rakenteeseen. Tällaisia materiaaleja ovat mm. metallit. Pohjapaneeliin sijoitettuna monikäyttöisten materiaalin etu maksimoituu, sillä pohjan tulee suojata ja samalla kantaa kuormaa. Monikäyttöiset materiaalit ovat pääasiallisesti tiheämpiä kuin tiettyyn tarkoitukseen optimoidut materiaalit, kuten kuitukomposiitit, joten niiden sijoittaminen ajoneuvon alaosiin madaltaa myös ajoneuvon painopistettä. Jos ajoneuvon pohjapaneeli voi olla lopullisessa konstruktiossa läheisessä kontaktissa maan ja miinojen aiheuttaman shokkiaallon kanssa, kannattaa pohjamateriaalina käyttää sitkeää materiaalia, jotta pohja ei murru räjähteen tai maan aiheuttamien kolhujen seurauksena.

Vaikka ajoneuvon osalla olisikin kaksi tehtävää ja joiden täyttäminen vaatii kahta eri ominaisuutta, ei monikäyttöinen materiaali silti välttämättä tuota parasta tulosta. Erillisten materiaalien hyödyntäminen mahdollistaa niiden käytön soveltuvimmissa paikoissa, jolloin eri materiaaleja yhdistelemällä voidaan helpommin saavuttaa haluttu ominaisuuksien suhde. Esimerkiksi kuitukomposiitit optimoidaan tiettyyn käyttötarkoitukseen ja niiden tarjoamat

suojaus- ja ominaislujuusarvot ovat erinomaisia, mutta yksinään yhtä kuitukomposiittia käyttämällä ei voida saavuttaa optimitulosta. Taulukossa 7 on vertailtu alumiinin, suojateräksen ja kahdesta eri tarkoitukseen optimoiduista kuitukomposiitista koostuvan materiaaliyhdisteen tuottamia teoreettisia keskimääräisiä suoja- ja konstruktio-ominaisuuksia per kilo.

Taulukko 7. Komposiittiyhdistelmässä DFRP:n osuus 33% ja GFRP:n 66%, jotta suojaustaso olisi verrattavissa alumiiniin ja suojateräkseen. Suojaustasot on määritetty tulosten pohjalta.

| Materiaali | Ominaisuus per massayksikkö | |
|--|---|--------------------------------|
| | V_{50} (m/s) per läpäisty neliömassa (kg/m^2) | Vetolujuus per tiheys (MNm/kg) |
| Komposiittiyhdistelmä (DFRP SK76/GFRP) | 11,75 | 0,16 |
| Alumiiniyhdiste (AA 5059-H131) | 11,75 | 0,11 |
| Suojateräs (BIS RHA 360) | 11,58 | 0,13 |

Taulukon 7 mukaan täysin metallinen kori ei ole hyvä ratkaisu. Kuitukomposiitit voidaan optimoida niin tehokkaasti, että materiaaleja yhdistettäessä ne voivat yhdessä saavuttaa parempia konstruktio ja suojausominaisuuksien ominaisarvoja kuin monikäyttöinen materiaali yksinään. Kuitukomposiitteja yhdistämällä voidaan lisäksi manipuloida tarpeen mukaan materiaaliyhdisteen lujuutta ja suojauskykyä. Tämän vuoksi metallien tuoma monikäyttöisyys etu, ei tuota kokonaisuuden kannalta mitään etuja, sillä materiaalin neliöpainon kasvaessa suojauksen näkökulmasta riittävän suureksi, niin samalla sen massa kasvaa liian suureksi konstruktion optimoinnin kannalta. Metallit ovat kuitenkin sitkeitä materiaaleja ja kestävät paremmin kulutusta, mikä on alustasta riippuen huomattava etu. Lisäksi pohjaan kohdistuu monen suuntaisia kuormituksia, mikä on isotrooppisille materiaaleille eduksi suunnittelussa ja esimerkiksi metalleja voidaan valmistaa perinteisin menetelmin hitsaamalla ja kylmämuovaamalla. Pohjaan kohdistuu myös oletettavasti paljon taivutusta, koska pohja on saman suuntainen maan pinnan kanssa, eli miehistön ja varusteiden aiheuttama resultanttivoima on maan pinnan suhteen normaali. Tämä on suhteellisesti taivutusta kestäville materiaaleille edullista, kuten esimerkiksi alumiini, sillä se kestää alhaisen tiheyden vuoksi vetolujuuteen nähden terästä enemmän taivutuskuormitusta.

Kori voidaan tehdä esimerkiksi kokonaan lasikuidusta, minkä pohjalle voidaan asettaa UHMWPE-kuituvahvisteisia suojapaneeleita kuten Dyneema UD tai Spectra Shield paneeleita. Pohja voidaan tehdä myös alumiinista, minkä päälle sijoitetaan lasikuituinen koppi. Alumiinisen pohjan sisäpuolelle tulisi myös kuitukomposiittisuojapaneeleita. Kummassakin tapauksessa pääasiallisena suojamateriaalina toimisi Dyneema tai Spectra vahvisteinen kuitukomposiittisuoja-paneeli, mitkä ovat ylivertaisia muihin materiaaleihin verrattuna neliöpainon suhteen suojauduttaessa sirpaleita vastaan. Tyypillisestä teräksisestä panssarilevystä poiketen kuitukomposiittipaneelit pysäyttäisivät sirpaleet ajoneuvon kuoren sisäpuolella, mikä aiheuttaisi reikiä koriin. Mikäli ajoneuvon halutaan myös kykenevät ylittämään vesistöjä, nämä reiät todennäköisesti estäisivät vesistöjen ylittämisen. Tosin ajoneuvon kevyt telakoneisto tai renkaat hajoaisivat miinan räjähtäessä, mikä estäisi vesistön ylityksen joka tapauksessa. Suojapaneelit vievät myös huomattavasti enemmän tilaa kuin mm. teräslevyt, eli joissain paikoissa kuitukomposiittipaneelien käyttö ei ole mahdollista. Tällaiset paikat voitaisiin suojata esimerkiksi suojateräs- tai titaanilevyillä.

Vastaavasti kori voitaisiin myös tehdä korkealujuusteräsputkista, minkä päälle tukeutuisi ohut lasikuitu koppi, jolloin ohut koppi itsessään ei kantaisi kuormaa. Putkirunkorakenne voi myös koostuen useasta moduulista, esimerkiksi korimoduuli ja pohjapaneelimoduuli, mitkä yhdistetään mekaanisella liitoksella. Putkirunkoinen korirakenne olisi myös helppo tarvittaessa lisäsuojata keraamisilla levyillä, sillä korkealujuusteräksiset putket kykenevät kantamaan huomattavia määriä lasikuituiseen koriin nähden kuormaa.

Korin pohjan pääasiallisena suojamateriaalina kannattaa käyttää kuitukomposiittisuoja-paneeleita ja kori itsessään kannattaa tehdä kuitukomposiittista massan minimoimiseksi. Alustaratakisusta riippuen pohjan voi myös tehdä alumiinista, mikäli siltä vaaditaan myös hyviä konstruktiivisia ominaisuuksia, suojauksena tässäkin tapauksessa käytettäisiin kuitukomposiittipaneeleita.

5.1.2 Alustaratkaisu 1: Runkopalkki konsepti

Tyypillinen pohjaratkaisu on yksi tai useampi runkopalkki, joihin yhdistetään erilliset akselit tai telakoneisto ja kori. Tällaisessa ratkaisussa palkki kannattaa tehdä erittäin lujasta ultra lujasta teräksestä (UHSS) kuten vertailussa käytetty Docol 1500M teräs. Palkilta ei vaadita hyviä suojaominaisuuksia, sen tärkeimmät ominaisuudet ovat ominaislujuus ja

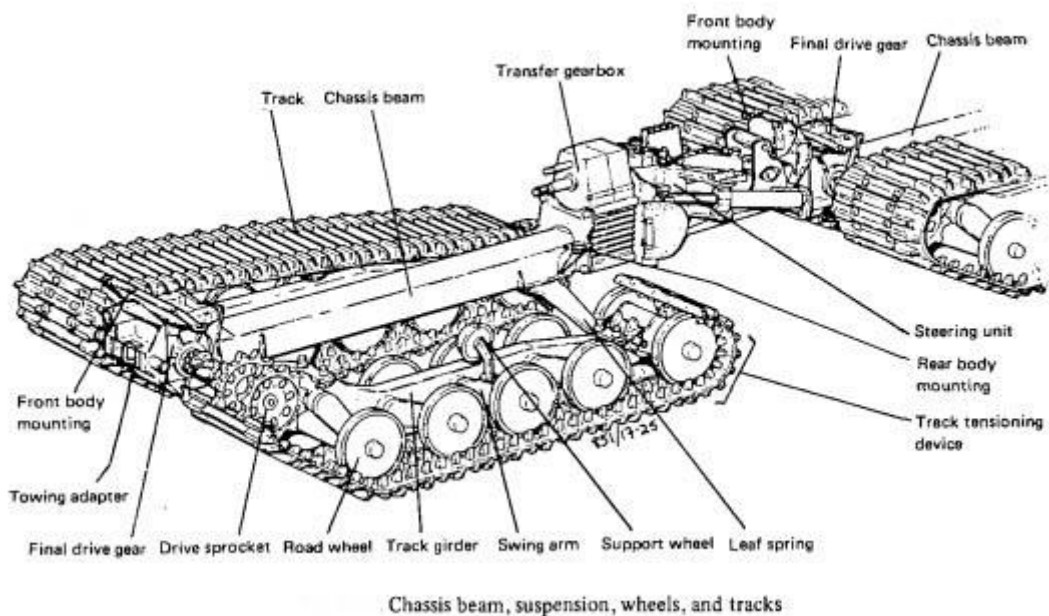
kustannukset. Uuden sukupolven UHSS:t ovat alumiinin veroisia ominaislujuusarvoiltaan, lukuun ottamatta alumiini-litium seoksia, ja kustannusominaisuuksiltaan parempia materiaaleja. UHSS:ää myös valmistetaan Suomessa, mikä mahdollistaa lopullisen tuotteen korkeamman kotimaisuusasteen. Samasta syystä mahdolliset telarungot kannattaa myös tehdä uusista UHSS:stä. Kuvassa 17 on teloilla varustellun maastoajoneuvon yhdestä rakennekopalkista koostuva runkorakenne, missä telarungot koostuvat muotoilluista teräspalkeista.



Kuva 17 Runkopalkki ratkaisu tela-ajoneuvossa (MILMAC. 2018)

Keskimmäisen runkopalkin voisi mahdollisesti tehdä myös terästä vahvemmassa kuitukomposiitista. Kuitukomposiitin teräkseen nähden heikommät sitkeysominaisuudet voivat kuitenkin aiheuttaa ongelmia, esimerkiksi maastossa kivenlohkareiden aiheuttamat kolhut voivat murtaa palkin seinämän helpommin. Kuitukomposiitit ovat lisäksi kustannusominaisuuksiltaan terästä heikompia. Alumiini on myös varteenotettava vaihtoehto runkopalkin konstruktiomateriaaliksi, se kestää korroosiota ja vetolujuuteen nähden taiputusta terästä paremmin. Alumiini on kuitenkin kustannusominaisuuksiltaan heikompi materiaali, eli se ei ole samoilla valmistusmenetelmillä kannattava vaihtoehto

runkopalkin materiaaliksi UHSS:ään verrattuna. 6061 alumiinista tehtävän runkopalkin voi kuitenkin pursottaa, mikä vähentäisi valmistusprosessissa tarvittavia vaiheita ja voi mahdollisesti parantaa alumiinin kustannusominaisuuksia. Pursotuksen kustannuksista ei kuitenkaan ole tuloksia, joten tarkempi tarkastelu on tarpeen. Mikäli UHSS ei tarjoa tarvittavaa keveyttä, voidaan myös käyttää alumiini-litium seoksia kuten 2195 seosta. Useat alumiini-litium seokset ovat erinomaisen ominaislujuutensa lisäksi hyvin hitsattavia metalleita. Alumiini-litium seokset kuitenkin omaavat huomattavasti terästä heikommät kustannusominaisuudet. Kuvassa 18 tarkempi esimerkki runkorakennerratkaisuun perustuvasta ajoneuvosta. Huomaa telapyörien olevan kiinnitetty telarunkoon, runkopalkki on siis telarungosta erillinen ja jousitettu rakenne.



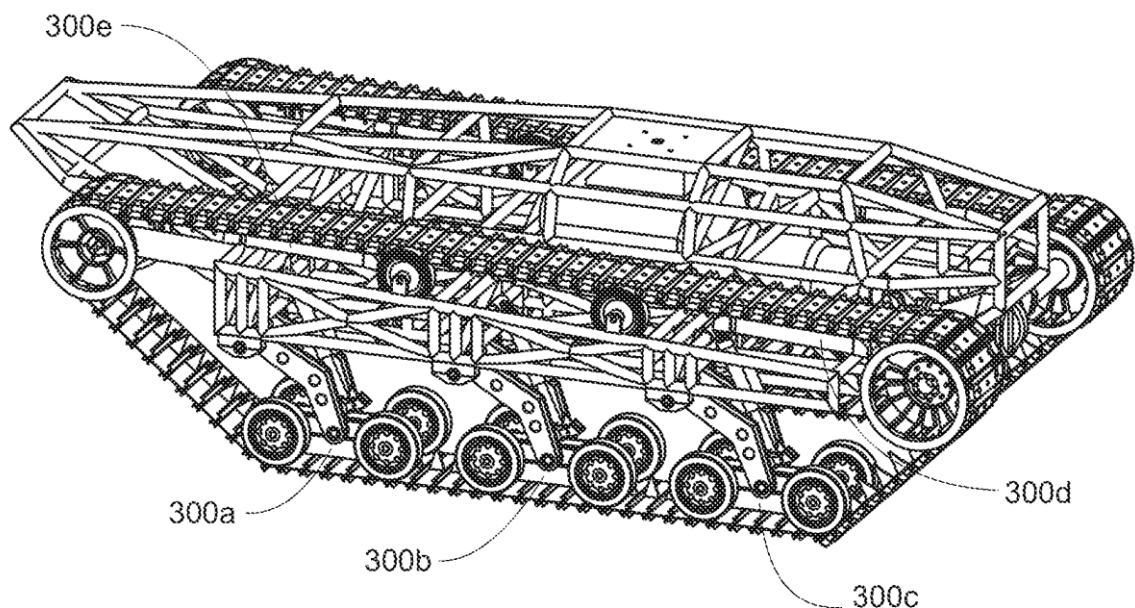
Kuva 18 Telarunko palkkiratkaisussa olisi erillinen palkki, mikä kiinnitettäisiin runkopalkkiin. (MILMAC. 2018)

Runkopalkki ratkaisussa kori tulisi erillisenä rakenteena ajoneuvon päälle. Pohjarakennerratkaisu itsessään ei suojaa räjähteiltä MIL-standardin vaatimalla tavalla, eli erillinen korirakenne tulisi olla suojattu. Tähän ratkaisuun sopisi täysin kuitukomposiiteista sopivan muotoiseksi valmistettu kori, mikä tukeutuisi runkopalkin päälle.

Runkopalkki konsepti on kustannustehokas ratkaisu, yksi tai useampi runkopalkki on yksinkertainen ja alustan materiaalina voidaan käyttää terästä. Kori olisi kevyt ja modulaarinen. Kori voitaisiin tarvittaessa vaihtaa alumiiniseen tai teräsvahvistettuun koriin, olettaen runkorakenteen olevan tarpeeksi vahva, mikä heikentäisi liikkumiskykyä, mutta parantaisi suojaustasoa. Tällöin ajoneuvoa voitaisiin käyttää mm. riskialttiimmissa kriisinhallintaoperaatioissa, missä korkeaa liikkumiskykyä ei vaadita. Kori voitaisiin myös vaihtaa esimerkiksi kranaatinheitin lavetiksi.

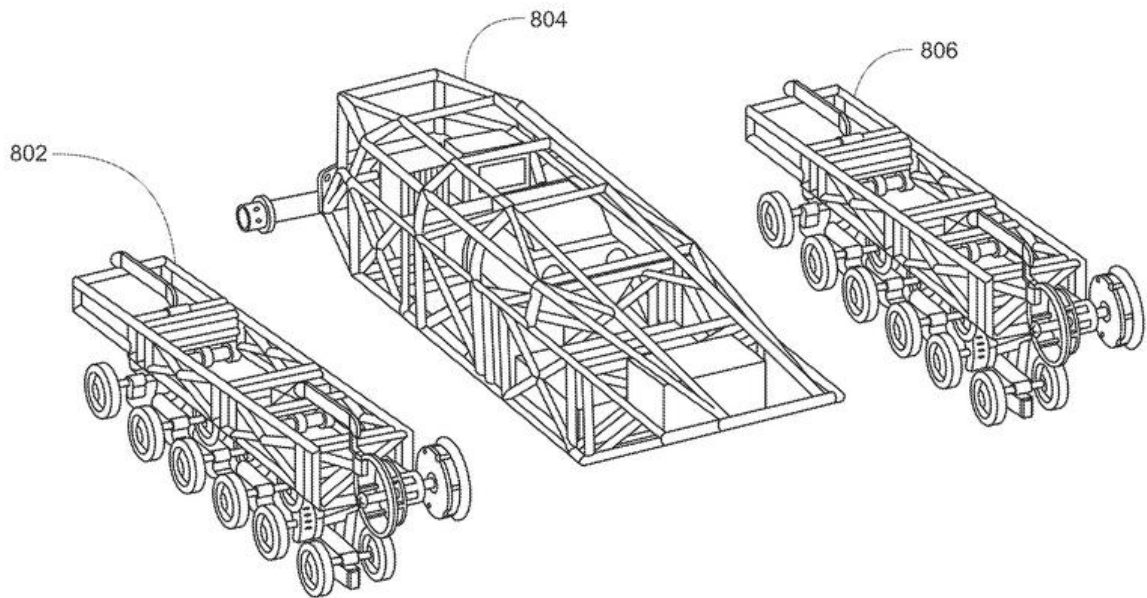
5.1.3 Alustaratkaisu 2: Putkirunkokonsepti

Toinen ratkaisu on putkirunkoinen alusta, putkirunkoja käytetään mm. kilpa-autoissa ja kevyissä partioajoneuvoissa. Putkirunko voidaan muovata haluttuun muotoon ja on konstruktion optimoinnin näkökulmasta oivallinen, sillä materiaalia tarvitsee olla vain siellä missä sitä tarvitaan. Tällaisessa ratkaisussa runko kannattaisi tehdä UHSS putkista, joita valmistetaan myös Suomessa. Kuvassa 19 on esimerkki putkirunkorakenteisesta maastoajoneuvosta.



Kuva 19 Putkirunkoinen maastoajoneuvo. (Pat. US 20100236844 A1 2010)

Putkirunkokonseptissa korirakenne voisi myös olla putkirunkovahvisteinen rakenne, mikä liitetään mekaanisesti alustaan. Vaihtoehtoisesti koria vahvistavat putket voivat olla integroituna ajoneuvon luurankoon, jolloin päälle asetettava varsinainen kori olisi vain suojarakenne. Akselit tai telarungot olisivat putkirunko ratkaisussa myös erillisiä rakenteita runkopalkin tavoin. Kuvassa 20 esitellään putkirungon tarjoamaa modulaarisuutta alusta ja telarungot erillään.

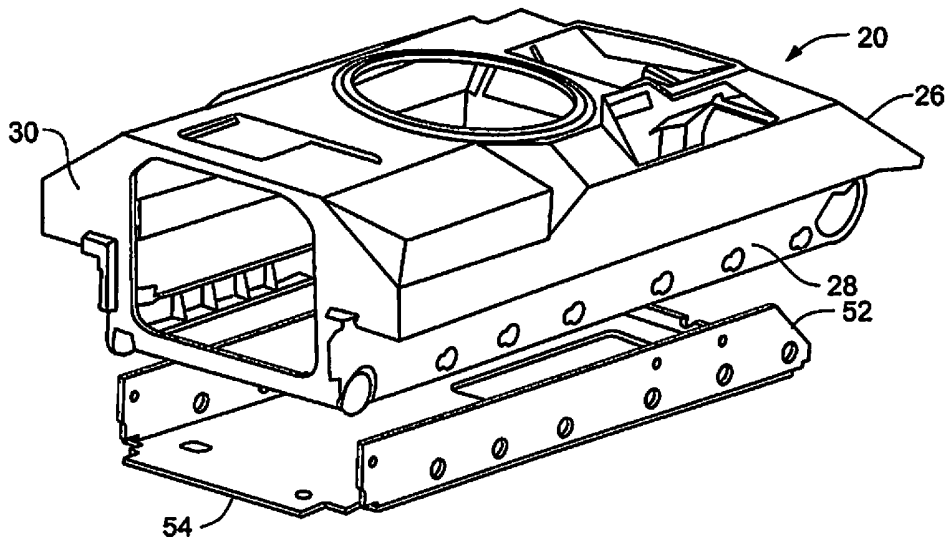


Kuva 20 Putkirunkoisen maastoajoneuvon pääkomponentit. Kori voisi olla erillinen tai kuulua alustarakenteeseen. (Pat. US 20100236844 A1 2010)

Putkirunkoisessa ratkaisussa miehistön suojaus toteutettaisiin runkopalkki rakenteen tavoin, missä koriin asetetut kuitukomposiittipaneelit suojaisivat miehistöä. Vaihtoehtoisesti mielenkiintoinen vaihtoehto olisi pohjan suojaaminen alumiini-kerami tai kuitukomposiitti-kerami levyillä. Keraamien tehokkuudesta sirpaleita vastaan ei kuitenkaan ole tuloksia, joten asiaa tulisi tutkia tarkemmin. Paneloidun rakenteen tiiveys olisi myös huomattavasti alhaisempi kuin yhtenäisen alumiinisen tai kuitukomposiittisen rakenteen. Heikko tiiveys vaikeuttaisi ajoneuvon potentiaalisen amfibio-ominaisuuksien kehittämistä. Putkirunkorakenteen aiheuttamat saumat paneelien välissä myös vaikeuttaisivat MIL-standardin mukaisen suojaustason saavuttamista. Putkirunko kuitenkin tarjoaa erinomaiset mahdollisuudet modulaarisen ajoneuvon suunnitteluun.

5.1.4 Alustaratkaisu 3: Yhdistetty pohja ja runko konsepti

Kolmas ratkaisu on korin pohjaneelin integroiminen alustaan, eli alusta itsessään toimisi korin pohjana ja kori olisi erillinen pohjan päälle sijoitettava koppi. Ajoneuvon akselit tai telarungot olisivat myös integroitu pohjaan. Tällaisessa tapauksessa pohja kantaa huomattavasti enemmän kuormaa ja sen tulee myös suojata, verrattuna esimerkiksi runkopalkki ratkaisuun, missä runkopalkki kantaa suuren osan kuormasta eikä sen tule suojata. Maanpinnan suhteen normaalien kuormitusvektorien vuoksi pohja kantaa myös huomattavasti taivutusta, täten vähemmän tiheät materiaalit ovat edullisia. Taivutuskestävyyteen voidaan lisäksi vaikuttaa tekemällä pohja kennorakenteiseksi, sillä pinta- ja pohjalevyn etäisyyden lisääminen toisistaan lisää rakenteen lujuutta. Pohjarakenteen suojaustaso kuitenkin heikkenee sirpaleita vastaan, mikäli materiaali tehdään useasta ohuesta levystä yhden paksun sijaan (Wadley H. N. G. et al. 2013, s.126). Kuvassa 21 on esimerkki ajoneuvosta missä ajoneuvo koostuu pohjaosasta ja päälle sijoitettavasta korista.



Kuva 21 Panssariajoneuvon alustarakenne toimii suojana jalkaväkimiinoja vastaan ja suojaa lisäksi mm. voimansiirtoa. (Pat. US 20140208931 A1 2012)

Alustaratkaisun materiaaliksi sopisi siis hyvin kevyt monikäyttöinen materiaali kuten esimerkiksi alumiini. Pohja tulisi edelleen paneloida kuitukomposiitti suojapaneeleilla massan säästämisen vuoksi. Pohja voitaisiin hitsata levyistä tai valmiiksi kennorakenteiksi

pursotetuista paneeleista. Vaihtoehtona voisi olla alumiinisen kennorakenteen täyttö kuitukomposiittipaneeleilla, tämä ratkaisu mitätöisi paneelien tilavuustehottomuuden. Alustarakenteen voisi tehdä myös kuitukomposiittikerroslevyrakenteesta, missä kaksi kuitukomposiittilevyä erotetaan toisistaan muovivaahdolla, muovilla, paperilla tai alumiinilla. Tällöin pohja ei toimisi suojamateriaalina ja tilavuustehokkuus heikentyisi, mutta rakenne olisi erittäin kevyt ja luja ja suojapanelointia voitaisiin massan puolesta lisätä. Teräs ei ole yhdistetty pohja ja runko konseptissa hyvä valinta korkean tiheydensä vuoksi, jolloin levyjen paksuus alenisi huomattavasti, mikä heikentäisi oletettua sirpalesuojakykyä ja, rakenteesta riippuen, myös kuormakantokykyä.

5083, 5059 ja 7039 alumiiniseokset ovat konseptiin sopivia ja hyviä monikäyttöisiä materiaaleja, jotka ovat lisäksi kustannusominaisuuksiltaan kilpailukykyisiä. 6061 on sopiva, mikäli rakenne halutaan pursottaa. Tutkimuksen aikana huomattiin myös, että mikäli painoa tulisi säästää niin paljon, että alumiini levyjen paksuus jäisi liian ohueksi ja suojaustaso täten laskisi oletettua alemmaksi, niin voidaan myös käyttää AZ31B magnesium seosta. AZ31B magnesium seos on kuitenkin huomattavasti edellä mainittuja alumiineja kalliimpi materiaali ja tässä tapauksessa kuitukomposiittinen pohja voisi olla parempi ratkaisu.

5.2 Tutkimuksen objektiivisuus

Tutkimuksen tekijällä ei ole yhteyksiä materiaalien valmistajiin tai toimittajiin eikä aikaisempaa kokemusta vastaavanlaisen ajoneuvon pohjan ja korin materiaalien valintaan liittyen, eli puolueellisuutta tiettyä materiaalityhmää, valmistajaa tai toimittajaa kohtaan ei ole. Vaatimukset ja uhat, joiden pohjalta materiaaliominaisuuksien määrittäminen ja valinta tehtiin perustuvat MIL-standardiin. Haastattelut tehtiin marras- ja joulukuussa 2017 ja kysymykset olivat haastateltaville kohdennettuja. Kustannukset selvitettiin seosaineiden pörssihinnan ja verkkokauppojen myyntihinnan perusteella joulukuussa vuonna 2017. Tarkempi hintojen määrittäminen on tarpeen, missä hintaa tulee verrata tiettyyn materiaaliominaisuuteen tarkemman kustannusarvion luomiseksi.

5.3 Keskeiset johtopäätökset.

Materiaalit tulee valita lopullisen rakenteen mukaisesti. Alustakonseptista riippuen korin ja alustan toiminnot vaihtelevat konstruktio- ja suojausominaisuuksien suhteen. Taulukossa 8 on sopivia materiaalityyppejä alustakonseptista riippuen.

Taulukko 8. Konseptikohtainen materiaalityypitys.

| Kohde \ Toiminto | Suoja | Konstruktio |
|------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Kori | UHMW-PE kuitukomposiitti | Lasikuitukomposiitti |
| Alustakonsepti 1 | <i>Alusta ei suojaa</i> | UHSS |
| Alustakonsepti 2 | <i>Alusta ei suojaa</i> | UHSS -putki |
| Alustakonsepti 3 | Alumiini + UHMW-PE kuitukomposiitti | Alumiini |

5.4 Jatkotoimenpiteet

Tutkimuksessa vastattiin kysymyksiin kannattaako kori ja pohja tehdä useasta eri materiaalista ja mikä materiaali on sopivin kustannus-suojaus-paino suhteeltaan. Tutkimus myös perehdyttää konstruktion suunnittelijan potentiaalisiin uhkiin, materiaaleihin ja rakennekonsepteihin. Täten tutkimus tarjoaa pohjan rakenteen suunnitteluun ja lopulliseen materiaalityypitykseen.

Jatkotutkimusaiheiksi jää ajoneuvorakenteen suunnittelu ja lopullinen materiaalityypitys. Lisäksi materiaalin pinnoitusta ei otettu huomioon, jota kannattaisi tutkia. Kirjallisuustutkimuksen aikana havaittiin, että ulkopinnan pinnoittaminen elastomeerilla voi parantaa materiaalin suojaominaisuuksia sirpaleita vastaan. Materiaalien kustannuksia tulisi myös tutkia tarkemmin, missä materiaalit hinnoiteltaisiin yksiselitteisesti ominaisuuksien, valmistettävyyden ja logistiikan suhteen oletuksella, että ajoneuvo valmistetaan Suomessa.

6 YHTEENVETO

Miehistönkuljetusajoneuvon pohjan ja korin materiaalia valittaessa on tärkeää tietää osien oletetut kuormitustilat ja vaatimukset. Täten tutkimuksessa luotiin erilaisia konsepteja mihin erilaiset materiaalit soveltuvat hyvin. Jokaisessa konseptissa todettiin, että ajoneuvon pohja ja kori kannattaa tehdä eri materiaaleista. Suojamateriaalina sirpaleita vastaan tehokkain materiaali on UHMWPE-kuitukomposiitti painon ollessa kriittinen, huonona puolena on kuitukomposiittipaneelien huono tilavuustehokkuus. UHMWPE-kuitukomposiittipaneelien hintaa ei tutkimuksessa saatu arvioitua kirjallisuuslähteiden pohjalta. Konstruktiomateriaalina kannattaa käyttää konseptista riippuen alumiinia tai ultra lujaa terästä, parempia konstruktiomateriaaleja on tarjolla painon ja lujuuden suhteen, kuten esimerkiksi alumiini-litium seoksia, mutta näiden tuomat kustannukset ovat huomattavasti korkeampia.

Materiaalien vertailu tapahtui tietyin määritetyin arvoin, mitkä kirjallisuuden perusteella todettiin merkittäviksi ja lisäksi hyödynnettiin julkisesti saatavilla olevia koetuloksia. Materiaalien lopullinen suojauskyky määritettiin kirjallisuudesta saatujen V_{50} -arvojen perusteella 12.7 mm FSP:tä vastaan. Suojausarvojen tuloksia tulkitessa tulee ymmärtää, että sirpaleen koko ja muoto voi vaihdella, mikä muuttaa absoluuttisia arvoja. Suojausarvot eivät siis käy lopullisen konstruktion paksuuden määrittämisessä, mutta toimivat kuitenkin hyvin materiaalien vertailuarvoina. Materiaalien konstruktiiivisten ominaisuuksien määrittelyssä käytettiin materiaalin vetolujuutta tiheyden suhteen. Tämä toimii hyvänä suuntaa antavana vertailuarvona, mutta sen varaan lopullista valintaa ei voi jättää, sillä lopullisista kuormitustiloista riippuen optimi konstruktiomateriaali voi vaihdella. Usein alhaisemman tiheyden omaavilla materiaaleilla on parempi taivutuslujuus vetolujuuteen nähden kuin tiheimmillä materiaaleilla. Kuitukomposiiteilla ominaislujuus on riippuvainen kuitujen suunnasta, mihin voidaan vaikuttaa suunnittelulla. Hinnan määrittäminen tapahtui seosaineiden pörssihinnan ja seosten ja yhdisteiden verkkokauppahinnan mukaan. Lopullinen hintamäärittäminen kannattaisi tehdä materiaalin kustannus suhteutettuna tiettyyn ominaisuuteen.

Tutkimuksen aihe oli erittäin laaja, mikä rajoitti tulosten tarkkuutta. Tutkimus kuitenkin laajensi työn tekijän tietoa ja ymmärrystä huomattavasti aiheeseen ja alaan liittyen.

LÄHTEET

Bartus, S. 2009, Evaluation of Titanium-5Al-5Mo-5V-3Cr (Ti-5553) Alloy Against Fragment and Armor-Piercing Projectiles. Army Research Laboratory.

Björk, T. 2017. RE: Kysymys: Ultra luja teräs ja luja alumiini [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Christoph von Rentzell. Lähetetty 22.11.2017 klo 12.53 (GMT +0200).

Chen, X. 2016. Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 66. Cambridge: Woodhead Publishing. 548 s.

Cimpoeru, S. J. 2016. The Mechanical Metallurgy of Armour Steels, Australian Department of Defence.

Cunniff, P.M. 1999, Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems, Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, s. 1303-1310.

Dowling, N.E. 2013. Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Fourth Edition. Harlow: Pearson Education Limited. 954 s.

Gooch, W. Burkins, M. Squillacioti, R. 2007. Ballistic testing of commercial aluminum alloys and alternate processing techniques to increase the availability of aluminum armor. 23rd international symposium of ballistics. s.981-988

Harris, C. E., Shuart, M. J., Gray, H. R. 2002. A Survey of Emerging Materials for Revolutionary Aerospace Vehicle Structures and Propulsion Systems. NASA/TM-2002-211664. 40 s.

Hearle, J. 2001. High-Performance Fibers. The Textile Institute. Cambridge: Woodhead Publishing. 344 s.

Hu, H. 1995, Buckling analyses of fiber-composite laminate plates with material nonlinearity, *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 19, no. 3, s. 169-179.

Kari, M. Hakala, A. Pääkkönen, E. Pitkänen, M. V. 2008a. Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025, osa 1 Teknologian kehitys. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. 564 s.

Kari, M. Hakala, A. Pääkkönen, E. Pitkänen, M. V. 2008b. Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025, osa 2 Puolustusjärjestelmien kehitys. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. 279 s.

Lu, G. & Yu, T. 2003, Energy Absorption of Structures and Materials in Energy Absorption of Structures and Materials, s. 19-20.

Maavoimat. 2017. RG32M. [Viitattu 04.10.2017]. Saatavissa: <http://maavoimat.fi/rg32>

MILMAC. 2018. Overview. [Viitattu 18.01.2018]. Saatavissa: <http://www.milmacsweden.com/overview/>

Motor Trend. 2017. Oshkosh JLTV First Drive Review. [Viitattu 17.10.2017]. Saatavissa: <http://www.motortrend.com/news/oshkosh-jltv-first-drive/>

NASA, Normal Shock Wave Equations [verkkodokumentti]. [Viitattu 17.10.2017]. Saatavissa: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/normal.html>

Ngo, T. Mendis, P. Gupta, A. & Ramsay, J. 2007, Blast loading and blast effects on structures - An overview, *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 7, s. 76-91.

Nguyen, L. H. Ryan, S. Cimpoeru, S. J. Mouritz, A. P. Orifici, A. C. 2016, The Efficiency of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Composite Against Fragment Impact. *Experimental Mechanics*, vol. 56, s.595-605.

O. Bouaziz, S. Allain, C. Scott. 2007. Effect of grain and twin boundaries on the hardening mechanism of twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia*, vol 58, s. 484-487.

O'Masta, M. R. Deshpande, V. S. Wadley, H. N. G. 2014. Mechanisms of projectile penetration in Dyneema encapsulated aluminum structures. *International Journal of Impact Engineering*. vol. 74 s.16-35.

Pat. US 20100236844 A1. 2010. Fast tracked ground vehicle. Howe And Howe Technologies, Inc. [Viitattu 29.1.2018]. Saatavissa: <http://www.google.com/patents/US20100236844>

Pat. WO 2004039565 A1. 2004. Process for the manufacture of a ballistic-resistant moulded article. Dsm Ip Assets B.V. [Viitattu 12.12.2017]. Saatavissa: <https://www.google.com/patents/WO2004039565A1>

Pat. US 20140208931 A1. 2012. Armored vehicle with bolt-on bottom. Amikam Shmargad. [Viitattu 5.2.2018]. Saatavissa: <http://www.google.com/patents/US20140208931>

Pérez-Bergquist, S. J. Gray, G. T. Carreta, E. K. Trujillo, C. P. Pérez-Bergquist, A. 2011, The dynamic and quasi-static mechanical response of three aluminium armor alloys: 5059, 5083 and 7039. *Materials Science and Engineering A*. vol. 528, s. 8733-8741.

Phoenix, S. L. Porwal, P. K. 2003. A new membrane model for the ballistic impact response and V_{50} performance of multi-ply fibrous systems. *International Journal of Solids and Structures*. vol. 40 s. 6756

Practical Welding Today. 2011. Weldable and unweldable aluminum alloys 11.5.2011, [Viitattu 16.12.2017]. Saatavissa: <https://www.thefabricator.com/article/aluminumwelding/weldable-and-unweldable-aluminum-alloys>

Qian, D., Bao, L., Takatera, M., Kemmochi, K. and Yamanka, A. 2010. Fiber-reinforced polymer composite materials with high specific strength and excellent solid particle erosion resistance. *Wear*, 268(2-3), s. 637-642.

Roessig, K. Mason, J. 1998. Adiabatic shear localization in dynamic punch test, part I: experimental investigation. *International Journal of Plasticity*. vol. 15, s. 241-262.

Shannon, R. Huijun, L. Edgerton, M. Gallardy, D. Cimpoeru, S. 2016. Ballistic testing of an Australian ultra-high hardness steel. 29th International Symposium on Ballistics. s. 1773-1778. (Erilliset seminaarikalvot [Viitattu 8.12.2017] täydellisine materiaaliarvoineen saatavissa:

<https://ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2016/ballistics/RyanThursday.pdf>)

Showalter, D. Placzankis, B. Burkins, M. 2008. Ballistic Performance Testing of Aluminum Alloy 5059-H131 and 5059-H136 for Armor Applications. Army Research Laboratory.

Skrzypek, J.J. Ganczarski, A.W. 2015, *Mechanics of Anisotropic Materials*. Cham: Springer International Publishing. 311 s.

Steel Market Development Institute. 2016. Steel Industry Technology Roadmap for Automotive. [Viitattu 08.12.2017]. Saatavissa: http://www.autosteel.org/Autosteel_org/document-types/research-reports/2016-roadmap/future-steel-solutions.aspx

Unified Facilities Criteria (UFC), 2008. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. United States of America Department of Defense.

Vuorinen, J., Mustakangas, M. & Annala, M. 2016. Komposiitit loputtomasti mahdollisuuksia. [verkkodokumentti]. [viitattu 4.2.2017] Tampereen teknillinen yliopisto, Patria, Muoviteollisuus Ry. 20 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.muoviteollisuus.fi/document.php/1/252/komposiitit_-_loputtomasti_mahdollisuuksi/9e832437f8e4e6f3e76e45b5d93d6bf1

Wadley, H. N. G. Dharmasena, K. P. O'Masta, M. R. Wetzel, J. J. 2013. Impact Response of aluminium corrugated core sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 62. s. 114-128.

Walsh, P. J. Hu, X. Cunniff, P. Lesser, A. J. 2006, Environmental effects of Poly-p-phenylenebenzobisoxazole Fibers. I. Mechanisms of Degradation, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 102, s. 3517-3525.

Wildfred, E. et al. 1981, a Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loadings on Structures. Amarillo, Texas: U.S. Department of Energy. s. 3-1 – 3-4.

Wilusz, E. 2008. *Military Textiles*. The Textile Institute. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 384 s.

1. Pysäytetäänkö kevyen kranaatin* sirpaleet yleensä ajoneuvon suoja-/runkorakenteen ulkopinnalla vai sisäpinnalla. Kumpi tapa olisi soveltuvampi käyttää kevyessä ajoneuvossa** missä massa on erittäin kriittinen?

*Kevyt kranaatti = noin puoli kiloa räjähdysainetta

**Kevyt ajoneuvo = Paino alle 6000 kg, vrt. iso maastoauto millä on hyvä kuljetuskapasiteetti

2. Käytetäänkö konstruktiomateriaalina ja suojausmateriaalina samaa materiaalia erittäin painokriittisissä ajoneuvoissa? Onko massan kannalta kannattavampaa valmistaa ajoneuvo yhdestä materiaalista, mikä kantaa ja suojaa vai esimerkiksi kahdesta materiaalista, missä toinen kantaa kuormaa ja toinen suojaa matkustajia ja ajoneuvon kriittisiä osia? Ballistisena uhkana tässä tapauksessa on kranaatin sirpale.

3. Onko keraamien käyttö kannattavaa kevyessä suojauksessa? Keraamit eivät ole sopivia suojaukseen yksinään, ilman taustalevyä eivätkä toimi konstruktiomateriaalina, joten kasvaako keraamien tehokkuus massaan nähden suojaustasoa ja kokonaismassaa kasvatettaessa?

4. Eroaako perus periaatteet ajoneuvosuunnittelussa kehitettäessä suojausta 155 mm tykistön ammukselta ja 300g:n käsikranaatilta?

5. Mitkä materiaaliominaisuudet ovat merkittävimpiä optimoidessa ajoneuvon ballistisia- ja miinasuojausominaisuuksia?

6. Mitä materiaaleja yleensä käytetään kevyissä sirpalesuojatuissa ajoneuvoissa?

7. Ovatko kennorakenteet kannattava ratkaisu suojauksen osalta hyvin massakriittisen ajoneuvon suunnittelussa? Tässä tapauksessa todella ohut aihio levy kennoina vastaan yksi paksumpi levy sellaisenaan, kokonaispainon pysyessä samana.

8. Mitkä ovat mielestäsi huomioonotettavimpia seikkoja panssariajoneuvon rungon, pohjan ja korin suunnittelussa?

9. Mitkä ovat tyypillisimmät alumiinin, teräksen ja kuitukomposiitin vauriomuodot 3,9 g sirpaleen iskeytyessä kyseiseen materiaaliin?

10. Mistä sirpaleet läpäisevät panssariajoneuvon?

11. Miten ajoneuvot hajoavat miinaiskussa?

12. Miten näet taistelukentän kehityksen? Mitä uusia uhkia on tulossa?

13. Miksi alumiinia käytetään konstruktiomateriaalina niin paljon useissa sovelluksissa vaikka UHSS teräs voi tarjota paremman ominaislujuuden?

