

Niklas Hagström

# MATERIAALIRATKAISUJEN KEHITTYMINEN BALLISTISISSA HENKILÖSUOJAIMISSA

# TIIVISTELMÄ

Niklas Hagström: Materiaaliratkaisujen kehittyminen ballistisissa henkilösuojaimissa  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikan tutkinto-ohjelma  
Kandidaatintutkielma  
Huhtikuu 2023

---

Ballistiset henkilösuojaimet ovat päälle puettavia varusteita, jotka suojaavat ihmiskehoa eri kokoisilta ja eri nopeudella kulkevilta ammuksilta ja sirpaleilta. Henkilösuojaimet on tarkoitettu käytettäväksi taistelukentillä ja poliisityössä suojaamaan käyttäjän henkeä käyttöolosuhteissa kohdattavilta uhilta. Käyttöolosuhteiden vaihtuvuuden takia suojaimet räätälöidään vastaamaan olosuhteiden asettamia vaatimuksia, esimerkiksi vähentämällä suojainten määrää ja paino miniiniin marssittaessa pitkiä etäisyyksiä. Suojaimista eniten käytettyjä ovat luotiliivit, liiveihin liitettävät ballistiset levyt ja kypärät, joista jokainen suojaaa ihmiskehosta tietyn osan ja jokaiselle on asetettu eri vaatimukset täytettäväksi. Suojaimille asettavat vaatimuksia sekä yleisesti käytetyt standardit että suojaimia käyttävät tahot, kuten valtioiden puolustusvoimat.

Tässä työssä tutustutaan ballististen henkilösuojainten materiaaliratkaisuihin ja rakenteisiin tapahtuneisiin kehityksiin. Työssä käydään läpi henkilösuojainten historiaa, vertaillaan nykyään käytössä olevissa suojaimissa käytettyjä materiaaleja ja esitellään suojainten testaamiseen tarkoitettuja testausmenetelmiä sekä suojainten tulevaisuudennäkymiä. Työn tavoitteena on selvittää, miten henkilösuojaimissa käytetyt materiaaliratkaisut ovat muuttuneet ajan kuluessa ja niille asetettujen vaatimusten muuttuessa sekä suositaanko nykyään käytössä olevissa suojaimissa enemmän suojaavuutta vai liikkuvuutta. Työssä tarkastellaan näiden lisäksi tulevaisuuden suojaimia varten tehtyä kehitystyötä.

Materiaaliratkaisujen kehittymistä henkilösuojaimissa tarkasteltiin ruutiaseiden leviämisestä nykypäivään ja tarkastelu perustui julkisista lähteistä saatavilla oleviin tietoihin. Ajanjakson alussa käytetyistä metallisista panssareista siirryttiin 1900-luvun aikana käyttämään kuitulujitettuja komposiittikypäriä, monikerroksisia ja kuitupohjaisia luotiliivejä ja korkeampienergisiltä ammuksilta suojaavia keraamisia levyjä. Materiaaliratkaisujen kehittymisen ajavana voimana toimivat taistelukentillä käytettyjen aseiden vaarallisuuden kasvaminen, suojainten ja niihin soveltuvien materiaalien valmistuskustannusten muuttuminen ja suojaimiin soveltuvien uusien materiaalien kehittäminen. Esimerkiksi luotiliivejä edeltäneet sirpaleliivit kehitettiin suojaamaan maailmansodissa yleistyneiltä sirpaleilta ja nykyään käytössä olevat kypärät ja liivit mahdollistuivat rakenteiltaan 1970-luvulla kehitetyn aramidikuitu Kevlarin kaupallistumisen myötä. Tulosten perusteella nykyään käytössä olevissa suojaimissa on pitkään suosittu enemmän suojaavuutta, mutta uusimmissa suojaimissa on siirrytty arvostamaan enemmän liikkuvuutta. Suojainten kehityskohteissa, kuten aukseettisissa levyissä ja nanomateriaaleilla päällystetyissä kuiduissa, pyritään parantamaan nykysuojainten suojaustasoa ilman, että suojainten paino kasvaisi liikaa.

Avainsanat: henkilösuojain, luotiliivi, kypärä, ballistinen levy, ammus, ballistiikka.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. HENKILÖSUOJAINTEEN HISTORIASTA .....	3
2.1 Keskiajalta ensimmäiseen maailmansotaan .....	3
2.2 1800-luku ja ensimmäinen maailmansota .....	5
2.3 Ensimmäisestä maailmansodasta Vietnamin sotaan .....	8
3. MODERNIT HENKILÖSUOJAIMET .....	12
3.1 Kevlar ja muut aramidikuidut .....	12
3.2 Ballistiset keraamilevyt .....	17
3.3 Materiaalien vertailua .....	19
4. TULEVAISUUDENNÄKYMÄT .....	25
4.1 Ballistiset testausmenetelmät ja standardit .....	25
4.2 Tulevaisuuden materiaaliratkaisut henkilösuojaimissa .....	30
4.2.1 Luotiliivien kehittyminen .....	31
4.2.2 Ballististen levyjen kehittyminen .....	33
4.2.3 Kaikkiin suojaintyyppihin soveltuva kehittyminen .....	35
5. YHTEENVETO .....	39
LÄHTEET .....	41

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AP	Armor Piercing, panssarinläpäisevä
BABT	Behind Armor Blunt Trauma
BL	Ballistic Limit
ECH	Enhanced Combat Helmet
ESAPI	Enhanced Small Arms Protective Insert
FMJ	Full Metal Jacket, kokovaippa
FN	Flat Nose, tasakärkinen
HOSDB	Home Office Scientific Development Branch (UK)
HP	Hollow Point, reikäpää
IBA	Interceptor Body Armor
IHPS	Integrated Head Protection System
IOTV	Improved Tactical Outer Vest
ISAPO	Interim Small Arms Protective Overvest
JSP	Jacketed Soft Point, pehmeäkärkinen kokovaippa
NIJ	National Institute of Justice (USA)
NILECJ	National Institute of Law Enforcement and Criminal Justice (USA)
PASGT	Personal Armor System for Ground Troops
PVB	Polyvinyylibutyyraali
P-BFS	Perforation and Backface Signature
RBA	Ranger Body Armor
RN	Round Nose, pyöreäkärkinen
SJHP	Semi Jacketed Hollow Point, reikäpäinen osavaippa
SP	Soft Point, pehmeäkärkinen
UHMWPE	Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, Ultrasuurimolekyylinen polyeteeni

# 1. JOHDANTO

Ihmiset ovat taistelleet ja sotineet toisiaan vastaan ihmiskunnan alkuaajoista lähtien. Samalla, kun vastustajien voittamiseksi on kehitetty jatkuvasti tappavampia aseita, on tarve niitä vastaan tarkoitetuille suojaimille pysynyt korkeana. Erilaisten rakenteiden, kuten linnojen ja barrikadien, lisäksi on käytetty myös puettavia henkilökohtaisia suojaimia suojaamaan ihmiskehoa taistelukentillä ja ympäristössä koettavilta uhilta. Henkilösuojainten rakenne ja muoto ovat vaihdelleet alueen ja saatavilla olevien materiaalien mukaan, mutta niiden kaikkien tarkoituksena on ollut peittää ihmiskehosta tarpeelliseksi todettu määrä kestäväillä materiaaleilla, jotka ottavat vastaan erilaisten uhat ihmiskehon sijaan. Henkilösuojainten tarkoitus oli tuhansia vuosia suojata miekkojen ja jousien tapaisilta aseilta, minkä vuoksi niiden rakenne ja materiaaliratkaisut pysyivät pitkään lähes muuttumattomina. Merkittävä muutos henkilösuojainten tarpeessa ja tarkoituksessa tapahtui, kun ruutiaseet levisivät maailmalle ja syrjäyttivät hiljalleen siihen asti käytössä olleet aseet. Vanhat metalliset panssarit eivät kyenneet suojaamaan käyttäjiään tehokkaasti ruutiaseiden luodeilta ja niistä luopumisen jälkeen kesti monta vuosisataa kehittää uusia ballistisilta uhilta suojaavia henkilösuojaimia.

Ballistiset henkilösuojaimet ovat kehittyneet nykyisiin malleihinsa noin viimeisen sadan vuoden aikana ja niiden tarkoituksena on suojata ihmiskehoa erilaisilta ammuksilta, pääosin aseiden luodeilta ja esimerkiksi kranaateista lähteviltä sirpaleilta. Ennen ruutiaseita käytössä olleista metallisista panssareista poiketen ballistiset henkilösuojaimet suojaavat kehosta vain kaikkein tärkeimmät osat, kuten pään ja sisäelimet. Tähän ratkaisuun on päädytty, koska nykyajan taistelukentillä nopeuden ja liikkuvuuden merkitys on kasvanut ja koko vartalon suojaava panssari rajoittaisi niitä liikaa. Vastaavasti myös suojaimissa käytetyissä materiaaleissa suositaan painavampien metallien sijaan kevyempiä ja joustavampia polymeerikuituja. Kuitenkin aseiden nopean kehityksen takia liikkuvuuden ja suojaavuuden suhde muuttuu myös nopeasti, ja tätä varten pyritään kehittämään uusia, kevyempiä ja hyvin suojaavia materiaali- ja rakenneratkaisuja. Tässä työssä perehdytään ballististen henkilösuojainten kehittymiseen, niissä käytettyihin ja käytettäviin materiaaleihin sekä niiden rakenteissa tapahtuneisiin muutoksiin. Tarkoituksena on selvittää, miksi tiettyinä aikakausina on käytetty ajalle tyypillisiä henkilösuojaimia, miten materiaaliratkaisut ovat kehittyneet ajan kuluessa sekä miten suojaavuuden ja liikkuvuuden suhde on muuttunut ajan kuluessa. Työssä myös tarkastellaan, millaisia tulevaisuuden suojausratkaisuja on parhaillaan kehitteillä.

Työssä tarkastellaan sekä kypäriä, sirpale- ja luotiliivejä että ballistisia levyjä, mutta painopiste on liiveissä ja levyissä. Toisessa luvussa tutustutaan ruutiaseiden leviämisen vaikutuksiin henkilösuojaimissa ja ensimmäisten ballististen henkilösuojainten kehittymiseen 1900-luvun alun ja Vietnamin sodan lopun välisenä aikana. Kolmannessa luvussa perehdytään nykyaikaisiin ballistisiin henkilösuojaimiin, niissä tapahtuneisiin materiaali- ja rakennemuutoksiin lähivuosikymmeninä ja vertaillaan nykyään liiveissä ja levyissä käytössä olevia materiaaleja. Neljännessä luvussa tutustutaan henkilösuojainten suojauskyvyn arviointiin käytettyihin ballistisiin testausmenetelmiin ja esitellään tulevaisuuden henkilösuojaimia varten tehtyjä tutkimuksia. Viidennessä luvussa on yhteenveto työn sisällöstä ja johtopäätöksistä.

## 2. HENKILÖSUOJAINTEN HISTORIASTA

Tässä luvussa esitellään ennen moderneja henkilösuojaimia käytettyjä henkilösuojaimia. Tarkastelulla tuodaan esille materiaaliratkaisujen kehittymistä vuosisatojen aikana ja sitä, miten sotilaiden taistelukentällä kohtaamien uhkien vaihtuminen miekoista ja nuolista tuliaseisiin muutti henkilösuojainten tarvetta ja luonnetta. Henkilösuojaimia tarkastellaan esihistoriasta Vietnamin sotaan, eli tarkastelun kohteena ovat sellaiset henkilösuojaimet, joita ei juurikaan enää käytetä, kuten metalliset panssarit ja kypärät sekä alkeelliset sirpaleliivit.

### 2.1 Keskiajalta ensimmäiseen maailmansotaan

Ihmisten välille on syttynyt konflikteja ja taisteluita tuhansien vuosien ajan. Tiedon karttuessa ja materiaalien jalostuskyvyn kasvaessa ihminen on keksinyt aina vain kuolettavampia esineitä toisten vahingoittamiseen, mikä on vastaavasti luonut tarpeen keksiä keinoja puolustautua näiltä uhilta. Yksi suojautumisen keinoista, joka on pysynyt pääperiaatteeltaan melko muuttumattomana, on henkilökohtaiset suojaimet, joiden tarkoituksena on suojella niiden kantajaa ympäristön ja muiden ihmisten aiheuttamilta uhilta. Ihmiskunnan alkuaikoina nämä suojaimet valmistettiin yksinkertaisesti metsästettyjen eläinten nahoista sekä luista ja myöhemmin siirryttäessä viljely-yhteiskuntaan myös kankaista [1]. Ihmisen opittua louhimaan ja jalostamaan metalleja siirryttiin valmistamaan metallisia panssareita ja kypäriä, joiden avulla torjuttiin samoista metalleista valmistettuja miekkoja ja keihäitä.

Panssarien muoto, materiaali ja tyyli vaihtelivat alueen ja ajan valmistustekniikoiden mukaan. Pronssista ja raudasta siirryttiin paremmin suojaavaan teräkseen ja yksinkertaisten levyjen sijaan opittiin valmistamaan monimutkaisempia rakenteita, kuten nahkavaljaista ja metallilevyistä koostuneita suomuhaarniskoja, metallisia rintapanssareita (kuva 1a) ja metallirenkaista tehtyjä rengashaarniskoita [1], [2, s. 12, 16]. Suojaimet kuitenkin pysyivät pääosin metallisina niiden hyvän muovattavuuden ja suojaavuuden takia. Monimutkaisin ja suojaavin metallisuojoin oli keskiajan koko vartalon kattanut haarniska (kuva 1b), joka tarjosi aiemmista metallipanssareista poiketen käyttäjälleen suuremman liikkuvuuden [3]. Koska massatuotantoon ei kyetty, jäi panssareiden valmistus yksittäisten seppien työpajojen tehtäväksi ja niitä tuotettiin korkean hinnan vuoksi pieniä määriä suhteessa sotilaiden määrään. Metallisten panssarien ohella käytettiin esimerkiksi villasta ja kankaasta edullisemmin ja nopeammin valmistettavissa olevia paksuja takkeja,

joita voitiin käyttää joko erikseen tai rintapanssarien alla [1], [2, s. 17–18]. Armeijat koostuivat myös eri tavoin varustetuista joukoista ja keskiajan lopulla eli karkeasti vuosina 1275–1400 raskaasti ja kevyesti panssaroidusta ratsuväestä sekä raskaasti ja kevyesti varustetusta jalkaväestä. Näiden joukkojen varustus saattoi vaihdella suuresti, ja armeijaa ylläpitäneen tahon varallisuus vaikutti huomattavasti varusteiden määrään sekä laatuun. [4, s. 180–182]



**Kuva 1.** 1600-luvulla valmistetut rintapanssarit ja kypärä (a) [5] ja ritarin haarniska 1500-luvulta (b) [6].

Vaikka ruutiaseet keksittiin Kiinassa jo 900–1100-lukujen aikana, aiheuttivat ne suuren tarpeen muuttaa panssareita vasta niiden levittyä muualle maailmaan 1300-luvulla [7]. Muutoksen tarve ei kuitenkaan ollut välitön, sillä ensimmäiset ruutiaseet olivat melko epätarkkoja, etenkin pitkillä etäisyyksillä, ja samaan aikaan käytössä olleet jalkajouset olivat yleensä tehokkaampia läpäisemään panssareita [2, s. 18]. Ruutiaseiden yleistymistä vaikeutti myös niiden lataustekniikka, joka vaati aikaa ja täytyi suorittaa piipun edestä. Kun ruutiaseiden läpäisyvoima ja tarkkuus paranivat lähestyttäessä 1600-lukua, aikakauden seppien ainoa keino parantaa panssarien suojaavuutta oli tehdä panssareista paksumpia tai lisätä metallikerrosten määrää [3]. Paksumpi panssari oli luonnollisesti raskaampi käyttää ja kalliimpi valmistaa, mikä hiljalleen johti niiden käytön väheneeseen aseiden läpäisyvoiman ja kantaman kasvaessa, mutta keskiajalle tyypillisiä metallisia panssareita käytettiin kuitenkin niinkin myöhään kuin vuonna 1754 [2, s. 18].



## 2.2 1800-luku ja ensimmäinen maailmansota

Lähestyttäessä 1. maailmansotaa (1914–1918) muuttuivat valtioiden armeijat yhä suuremmiksi ja uudet aseet olivat aiempia tappavampia. Kun Puola-Liettuan ylläpitämä armeija oli suurimmillaan 1400-luvulla noin 100 000 sotilaan vahvuinen, oli Saksan keisarikunnan armeija vuonna 1918 suuruudeltaan noin 5,3 miljoonaa sotilasta [8]. Yksinkertaiset ruutiaseet olivat kehittyneet pistooleiksi, kivääreiksi ja konekivääreiksi, kanuunat muuttuivat pidemmän kantaman kenttätykeiksi ja Venäjän–Japanin sodan (1904–1905) aikana kehitettiin pohja moderneille käsikranaateille, jotka aiheuttivat vahinkoa luotien sijaan pienten sirpaleiden avulla [9]. Sotilaat joutuivat siis yhä vaarallisempien uhkien kohteeksi taistelukentillä, ja vaikka metallipanssareilla olisi voitu edelleen suojata sotilaita, niiden suuren liikkuvuuden rajoittamisen ja valmistuskustannusten kalleuden vuoksi niistä luovuttiin suuressa osin 1800-luvulle tultaessa.

Metallipanssareille pyrittiin kehittämään parempia korvaajia, ja monien tahojen kiinnostus kääntyi kohti polymeerejä, jotka ovat huomattavasti metalleja kevyempiä materiaaleja ja joiden massatuotanto on tyypillisesti metalleja edullisempää. Ranskan laivaston hyökättyä Ganghwadon saarelle vuonna 1866 Korean kuningas aloitti tutkimuksen luodinkestävän suojaimen kehittämiseksi [10]. Tuloksena syntyi 13–30 puuvillakerroksesta valmistettu liivi (kuva 2), jota korealaiset käyttivät Yhdysvaltain laivastoa vastaan vuonna 1871. Liivin todettiin olevan tehokas pysäyttämään tuolloin käytössä olleiden käsiaseiden luoteja, mutta se oli altis tulelle ja kosteudelle. [10] 1900-luvun taitteessa munkki Kazimierz Żegleń patentoi Yhdysvalloissa pistoolien aseilta suojaavan luotiliivin, joka koostui useasta kerroksesta silkkiä. Liivin testattiin olevan kykenevä suojaamaan käyttäjää muun muassa .38 kaliiperin revolverin luodeilta, mutta ei kivääreistä ammutuilta nopeammilta luodeilta. Żegleń sai myytyä liivinsä käyttöoikeudet Venäjän keisarikunnan alueella kapteeni Avenir Chemerzinille, joka alkoi valmistamaan suojaimia Venäjän–Japanin sotaa varten. Suojaimet koostuivat nikkelillä ja kromilla seostetusta teräslevystä, joka oli päällystetty Żegleńin silkkikerroksilla ja vuorattu 15 mm paksulla huopamatolla. Suojaimista huolimatta venäläiset hävisivät sodan ja silkkiiviin suosio hupeni 1910-luvulla sen kalleuden ja aseiden tehokkuuksien nousun takia. [11]



**Kuva 2.** Korealainen puuvillaluotiliivi 1800-luvun loppupuolelta [10].

Kun ensimmäinen maailmansota alkoi vuonna 1914, ei millään osapuolella ollut käytössä vakituista henkilösuojaimistoa osana sotilaidensa varustusta. Joillain sotilailla oli käytössä yksityisten tahojen kehittämiä suojaimia, mutta nämä olivat yleensä saatavilla vain kaikkein hyväosaisimmille ja eikä niiden tehokkuuksista voitu olla täysin varmoja. Britannian armeijan sotilaille myytiin metallilevyillä vuorattuja palveluspukuja ja ohuita silkin ja kankaan yhdistelmästä valmistettuja liivejä [12, 13]. Sodan edetessä osapuolten suuret ja kasvavat tappiot lisäsivät tarvetta kehittää henkilösuojaimia. Kaikki sodan osapuolet havaitsivat taistelujen alettua, että juoksuhautojen käyttöönotto lisäsi suuresti sotilaiden saamia päävammoja: sotilaat katsoessaan ulos juoksuhaudoista altistivat päänsä vihollistulle ja koko kehonsa alttiiksi vammoille rynnätessään taistelukentällä eteenpäin [12].

Yksinkertainen ratkaisu päävammojen vähentämiselle oli jo aiemmin käytössä ollut kypärä, jonka ottivat ensimmäisenä käyttöön ranskalaiset joukot vuonna 1914. Kypärä, joka oli aluksi yksinkertainen sotilaspuvun hatun alle laitettava metallinen kulho, ei kuitenkaan ollut ranskalaisille sotilaille mieleinen. Niitä käytettiinkin mieluummin ruoan tai nesteiden astiana, mikä kuvastaa henkilösuojaimen käyttömukavuuden merkitystä. Kypärät kuitenkin todettiin toimiviksi ratkaisuiksi vammojen vähentämiseksi ja niistä kehitettiin jo vuonna 1915 käyttöön otettu teräksinen Adrian-kypärä (kuva 3b). [12] Myös Britannian armeija varusti sotilaansa kypärillä pian ranskalaisten jälkeen, mutta Adrian-kypäristä poiketen brittiläinen Brodie-kypärä koostui matalahiilisen teräksen sijaan noin 12 % mangaania sisältäneestä teräksestä, joka tunnetaan myös nimellä Hadfieldin teräs.

Saksalaiset puolestaan käyttivät kypärissään martensiittistä piillä ja nikkelillä seostettua terästä, joka tarjosi Hadfieldin terästä parempaa suojaa luodeilta, mutta oli valmistuskustannuksiltaan kalliimpi huonomman kylmämuokattavuuden takia. [14, s. 5]

Kypärien lisäksi saksalaiset, britit ja italialaiset varustivat osan joukoistaan metallisilla panssareilla. Suuren painon ja nopeuden rajoittavuuden takia jalkaväkeä ei yleisesti varustettu niillä, mutta ne tarjosivat hyvää suojaa paikallaanpysyvälle sotilaille, joka saattoi esimerkiksi toimia konekiväärinmiehenä. [12] Saksalaisten konekiväärinmiesten käytössä ollut *Sappenpanzer*-panssari (kuva 3a) valmistettiin piillä ja nikkelillä seostetuista teräslavyistä. Panssari painoi 12–14 kg ja se ei painonsa tai levyjen äänekkyyden vuoksi sopinut rynnäkköihin tai partiointiin, mutta se tarjosi suojaa sirpaleilta ja kivääritulelta kehon lisäksi myös nivusille. [14, s. 6] Sodan edetessä englantilainen County Chemical Company -yritys kehitti noin 6 kg painaneen pehmustetun *Chemico Body Shield* -liivin, joka koostui useasta kerroksesta pellavaa, silkkiä ja puuvillaa. Liivi kykeni suojaamaan käyttäjäänsä noin 92 m/s kulkeneilta .45 kaliiperin ammuksilta, mutta sitä ei otettu yleiseen käyttöön. [14, s. 8]



**Kuva 3.** Saksalainen *Sappenpanzer*-panssari (a) [15] ja ranskalainen *Adrian-teräskypärä* (b) 1. maailmansodasta [16].

Britannian armeija kehitti myös niin sanotun kaulapannan, jonka tarkoituksena oli suojata juoksuhaudassa olevan sotilaan kaulaa ja olkapäitä. Pannan materiaaliksi valittiin silkin ja puuvillan seos, koska Britannian asekehityksestä vastaavan ministeriön kokeissa oli havaittu silkin olevan terästä parempi suojaamaan käyttäjänsä pieniltä sirpaleilta samassa painoluokassa. Lupaavista koetuloksista poiketen kaulapanta ei soveltunut sotakentillä käytettäväksi, sillä silkki oli terästä vaikeammin saatavissa oleva materiaali ja

valmistettujen koekappaleiden silkki heikkeni rakenteellisesti liikaa märissä taisteluolosuhteissa. [14, s. 8] Muita samankaltaisia erikoisempia tilanteita varten tarkoitettuja suojaajia kehitettiin sodan aikana, kuten suojalasit ja rengashaarniskat panssarivaunujen miehistöille, mutta yleistä nykyään käytetyn luotiliivin tapaista henkilösuojainta ei otettu käyttöön. Britannian armeijan lääkintäosasto arvioi taistelurintamilta saadun datan perusteella, että tehokkailla kokovartalonsuojaimilla olisi voitu estää  $\frac{3}{4}$ -osaa kaikista taistelukentällä aiheutuvista vammoista, mutta useiden edellä mainittujen innovaatioiden testaamisen jälkeen päätettiin kustannusten ja käyttöönottoon liittyvien ongelmien takia jättää yleinen henkilösuojain suunnittelematta ja käyttöönottamatta. [12]

### 2.3 Ensimmäisestä maailmansodasta Vietnamin sotaan

Ensimmäisen maailmansodan jäljiltä henkilösuojainten rooli sotilaiden henkien pelastamisessa oli tunnistettu, mutta suuria muutoksia sotilaiden varustuksissa ei nähty kuin vasta 1940-luvulla eli toisen maailmansodan (1939–1945) alettua. Kypärien tehokkuus oli tullut todistettua ensimmäisen maailmansodan aikana ja ne oli otettu osaksi sotilaiden varustusta. Kypärät pysyivät edelleen teräksisinä, mutta niistä kuitenkin suunniteltiin muodoltaan tehokkaammin suojaavia [17, s. 15]. Esimerkkinä Yhdysvaltojen armeijan M1-kypärä (kuva 4), joka kuului sotilaiden varustukseen vuosina 1941–1985 [18] ja koostui Hadfieldin teräksestä valmistetusta ulkokuoresta ja pehmustetusta sisäkuoresta [14, s. 8]. Siviilipuolella kuitenkin yritettiin sotien välillä kehittää erilaisia ratkaisuja. Yhdysvalloissa 1920-luvulla kauppias Leo Krause patentoi edellä mainitusta silkkisestä luotiliivistä alumiinilevyillä varustetun version [19] ja Martin Martinson patentoi poliisivoimille tarkoitettua kilven [20], joita ei kuitenkaan otettu laajasti käyttöön.



**Kuva 4.** Yhdysvaltojen armeijan M1-kypärä [18].

Modernien luotiliivien kehityksen voidaan katsoa alkaneen toisen maailmansodan aikana, kun Yhdysvaltojen armeijan ilmavoimissa huomattiin pommikoneiden miehistön jäsenten alttius kuolemille ja haavoittumille, vaikka itse pommikone olisi pysynyt lentokelpoisena viholliskontaktin jälkeen [17, s. 16]. Syyksi tunnistettiin ilmantorjuntatykkien ammuksista irronneet matalan nopeuden sirpaleet. Ratkaisuksi pommikoneiden miehistö saivat käyttöönsä M1-liivit, jotka valmistettiin canvas-kankaasta, täytettiin puuvillalla ja jotka oli varustettu pinta-alaltaan noin 12 cm<sup>2</sup> ja paksuudeltaan 1 mm Hadfieldin teräksestä tehdyillä levyillä (kuva 5a). [14, s. 10] Liivit tunnettiin nimellä *flak jacket*, koska ne torjuivat sirpaleita (engl. *flak*). Myöhemmin liivejä jalostettiin pommikoneen miehistön eri tehtäviä varten: esimerkiksi kuvan 5a M3-esiliinat soveltuivat paremmin ahtaimmissa tiloissa työskennelleille tykkimiehille. Lentäjien liivien ei katsottu soveltuvan maavoimien käyttöön vajaan 8 kg painon ja suuren liikkuvuuden rajoittavuuden takia, mitkä eivät olleet ongelmia pommikoneiden istuvalla miehistölle. [21]



**Kuva 5.** M1-liivi ja M3-esiliina (a) [22] ja M-1969 liivi (b) [23].

Yhdysvaltain armeija onnistui keventämään liivin painoa noin 5,5 kg:hen vaihtamalla teräslevyt alumiinisiksi ja valmistamalla liivin canvas-kankaan sijaan synteettisestä ja kevyemmästä nylonista, jonka keksi ja kaupallisti DuPont-yritys vuonna 1939 [24, s. 90]. Tärkeämmäksi innovaatioksi nousi kuitenkin Dow Chemical Company -yrityksen vuonna 1943 kehittämä Doron-materiaali, joka koostui lasikuitu- ja etyyliiselluloosahartsilaminaateista [17, s. 16]. Vaihtamalla alumiinilevyt Doron-levyihin saatiin luotiliivien paino tiputettua noin 3,5 kg:aan, minkä myötä liivejä käytettiin maavoimissa ja merijalkaväessä toisen maailmansodan lopussa, Korean sodassa (1950–1953) versiona M-1952 ja Vietnamin sodassa (1955–1976) versiona M-1969 (kuva 5b). Sekä M-1952 että M-1969 koostuivat 12 nylonkerroksesta ja olivat rakenteeltaan joustavia [21], eikä niitä suunniteltu luodinkestäviksi, vaan estämään sirpaleiden pääsyä kantajan kehoon ja mahdoli-

sesti pysäyttämään pitkältä kantamalta ammuttuja pienemmän kineettisen energian luoteja. Jälkimmäiseen oli lisätty kaulaa suojaava jäykkä kauluri, joka saattoi kuitenkin vaikeuttaa M1-kypärän käyttöä. [17, s. 17] Vaikka M-1969 liivien suojaavuus ja käytännöllisyys olivat todettu hyväksi, niiden käyttöä maavoimissa kuitenkin välteltiin Vietnamin trooppisten olosuhteiden ja liivin paksuuden takia. Vietnamin sodan aikana Yhdysvaltojen armeija kehitti ilmavoimiensa lentäjille panssarinlöpäisevien luotien torjumiseksi ke-raamisia levyjä, joiden suojaavuutta heikensi merkittävästi niiden taipumus murtua ensimmäisen osuman jälkeen. [21] Levyjen materiaaleina käytettiin alumiinioksidia  $Al_2O_3$  sekä boorikarbidia  $B_4C$ , jota käytettiin noin 20 % kevyemmän painon vuoksi myös jalkaväen liiveissä [14, s. 28].

**Taulukko 1.** Henkilösuojain materiaalien kehittyminen, mukailien lähteestä [3].

<b>Aikakausi:</b>	<b>Henkilösuojaimien materiaali ja tyyppi:</b>
<b>Esihistoria</b>	Liinavaate, pronssi, rauta, villa, puu, kyllästetty nahka
<b>Antiikki</b>	Rauta; tyyppeinä somu-, laminoitu- ja levypanssari
<b>Keskiaika</b>	Rauta, pronssi; tyyppeinä rengas- ja levypanssari
<b>1400-luku</b>	Rauta, teräs; koko kehon kattava haarniska
<b>1500-luku</b>	Teräs-mangaani-metalliseos; poimutettu panssari
<b>1600-luku</b>	Metallipanssarien paksuutta lisättiin tuliaseiden takia
<b>Venäjän-Japanin sota</b>	Silkkiliivi teräslevyn kanssa
<b>Ensimmäinen maailmansota</b>	Teräksiset kypärät, raskas metallinen panssari, panssaroitu liivi
<b>Toinen maailmansota</b>	Teräksiset kypärät, teräslevy, alumiinilevy, Doron-levy
<b>1960-luku ja myöhemmin</b>	Aramidikuidut, keraamit (alumiinioksidi, boorikarbidi, lasikuitu-komposiitti)

Taulukossa 1 esitellään tässä luvussa esitellyt ennen moderneja henkilösuojaimia käytössä olleet suojaimet ja niissä käytettyjä materiaaleja. Taulukosta nähdään, että metallit ovat olleet ajassa mitattuna suosituimpia materiaaleja henkilösuojaimissa, mikä selittyy pitkälti aseiden pysymisellä samankaltaisina tuliaseiden keksimiseen asti ja kyvyttömyys hyödyntää tai jalostaa monimutkaisempia materiaaleja. Tuliaseiden keksiminen muutti sodankäyntiä niin paljon, että aluksi ne tekivät metallisista suojaimista lähes hyödyttömiä

ja lopulta pakottivat armeijat keksimään uusia tapoja suojaamaan sotilaansa niiltä. Täysin metalliset suojaimet tekivät paluun ensimmäisen maailmansodan aikana, mutta niistä siirryttiin melko pian polymeerien ja metallien yhdistelmäsuojaimiin. Tuliaseet myös muuttivat suojainten tarkoitusta: kun ennen metallisen panssarin tarkoitus oli estää miekan tai jousen läpipääsy koko kehon alalta, luotiliivit ja kypärät suojasivat vain osaa kehosta ja ne kykenivät suojaamaan käyttäjänsä vain vaarattomimmilta uhilta, kuten alhaisen nopeuden sirpaleilta ja pitkän kantaman päästä ammutuilta luodeilta. Tästä huolimatta jo toisen maailmansodan aikana liivien yhdessä kypärien kanssa todettiin olevan niin tehokkaita estämään kuolemia ja vakavia haavoittumia, että ne ovat jääneet osaksi armeijoiden varustusta.

### 3. MODERNIT HENKILÖSUOJAIMET

Tässä luvussa käsitellään moderneja henkilösuojaimeja ja niissä viime vuosikymmeninä tapahtuneita materiaalimuutoksia. Vaikka nykyiset henkilösuojaimet ovat pysyneet viime luvun lopussa esitettyjen M-1969 liivien tapaisina, eli metalli- tai keraamilevyillä varustettuina kuitupohjaisina liiveinä, on suojausten kyky suojata käyttäjää parantuneet huomattavasti Vietnamin sodan ajoista uusien materiaalien kehittymisen ja käyttöönoton myötä. Muutoksia on tapahtunut myös suojausten rakenteissa, modulaarisuudessa ja suojaustavoissa.

#### 3.1 Kevlar ja muut aramidikuidut

Jo Vietnamin sodan aikana 1970-luvun alussa aloitettiin Yhdysvaltojen armeijassa jälleen kehittämään uutta versiota sirpaleliivistä sodan aikana havaittujen heikkouksien eli alhaisen käyttömukavuuden ja liikkuvuuden rajoittuvuuden takia. Kehitystyön aloittamiseen vaikutti suuresti myös uuden lupaavan materiaalin, kauppanimeltään Kevlarin, markkinoille tulo. Kevlar eli polyparafenyleenitereftaalamidi on DuPont-yrityksen kehittämä ja vuonna 1971 kaupallistama synteettinen aramidikuitu [14, s. 23], joka sopi henkilösuojaimeihin ominaisuuksiltaan erinomaisesti. Ominaisuuksia on esitetty tarkemmin luvun 3.3 taulukossa 2, mutta Kevlar, josta on kehitetty useita eri versioita, on kevyt, korkean murtolujuuden ja pienen murtovenymän materiaali, joka on myös mittapysyvä ja tehokas vastustamaan kemikaalien vaikutuksia [3]. Kuitumaisena materiaalina Kevlarista pystyttiin nylonin tapaan kutomaan kangasliivejä ja koska aramidikuidut kykenevät nylonkuituja paremmin jakamaan ammuksista välittyvän energian suuremmalle alalle, tapahtui Kevlar-liiveissä ammusten osuessa niihin paljon vähemmän muodonmuutosta ja kuitujen sulamista [25].

Kevlarista kiinnostuttiin samanaikaisesti sekä Yhdysvaltojen armeijassa että poliisivoimissa. Ennen Kevlarin kaupallistumista poliiseille oli saatavissa vain sotilaille tarkoitettuja sirpaleliivejä, jotka olivat liian raskaita yleiseen poliisityöhön [14, s. 30], ja liian heikosti suojaavia nylonliivejä. Koska minkäänlaisia standardeja tai testausmenetelmiä materiaalin ballistisen suojauskyvyn määrittämiseksi ei ollut luotu, päätettiin oikeusministeriön alaisessa *National Institute of Law Enforcement and Criminal Justice* (NILECJ) -instituutiossa suorittaa testi, jossa 100 vuolta puettiin Kevlar-liiveihin ja ammuttiin .22 ja .38 kaliiperin pistooleilla. Vuohet saivat pahimmillaan vain isoja mustelmia, mikä vakuutti paikalla olleet Kevlarin soveltuvuudesta liiveihin ja tarkemmat testit aloitettiin [3], [14,



s.30]. Sopivien kerrosmäärien lisäksi testeissä saatiin määritettyä, että Kevlarin ballistiset suojausominaisuudet heikkenivät sen kastuessa tai ollessa liian kauan kontaktissa auringonvalon kanssa, minkä takia liivit päätettiin päällystää vedenkestävillä ulkokerroksilla [14, s. 31].



**Kuva 6.** Floridalainen ylikonstaapeli John M. Russi esittelee uutta luotiliiviään vuonna 1977 [26].

Aiemmin harvoin käytössä olleet ja noin 4 kg painaneet nylonliivit vaihdettiin vain 1 kg painaneisiin Kevlar 29 -materiaalista valmistettuihin liiveihin (kuva 6), jonka pystyi helposti piilottamaan poliisiunivormun alle [2, s. 33] ja joita pystyi käyttömukavuuden puolesta pitämään päällä koko työpäivän [14, s. 31]. Liiveistä oli myös mahdollista valmistaa suojaavampia versioita kasvattamalla Kevlar-kerrosten määrää. Edellä mainitussa 1 kg liivissä kerroksia oli yhteensä yhdeksän ja se kykeni torjumaan tehokkaasti pienimpien kaliiperien käsiaseet. Vaativampia tilanteita varten valmistettiin 18 kerroksesta koostuva liivi, jota suositeltiin käytettäväksi 9 mm ja .357 kaliiperin käsiaseita vastaan. Mikäli uhkana oli korkeaenergisempi ammus, hankittiin suojaavuutta kerrosten kasvattamisen sijaan liiveihin asetettavilla keraamisilla levyillä. [2, s. 33–34] Vuonna 1975 noin 5 000 Kevlar-liiviä jaettiin Yhdysvaltain poliisiasemille käytettäväksi [3], [14, s. 31]. Kuvasta 6 nähdään myös, että liivi oli varustettu usealla tarranauhalla, joiden avulla sitä oli helppo säätää käyttäjälle sopivaksi.

Yhdysvaltojen asevoimissa kehitettiin puolestaan Vietnamin sodan sirpaleliivien pohjalta uusi *Personal Armor System for Ground Troops* eli PASGT-liivi (kuva 7a). Liivi painoi edeltäjänsä tavoin noin 4 kg ja sen uloimmat kerrokset olivat nylonia ja sisäkerrokset Kevlaria. [14, s. 32] Kuvia 5b ja 7a vertaamalla voidaan myös huomata, että PASGT-liivit oli varustettu naamioinnilla, kun M-1969 liivit olivat yksivärisiä. Liivien värimaailmaa ja

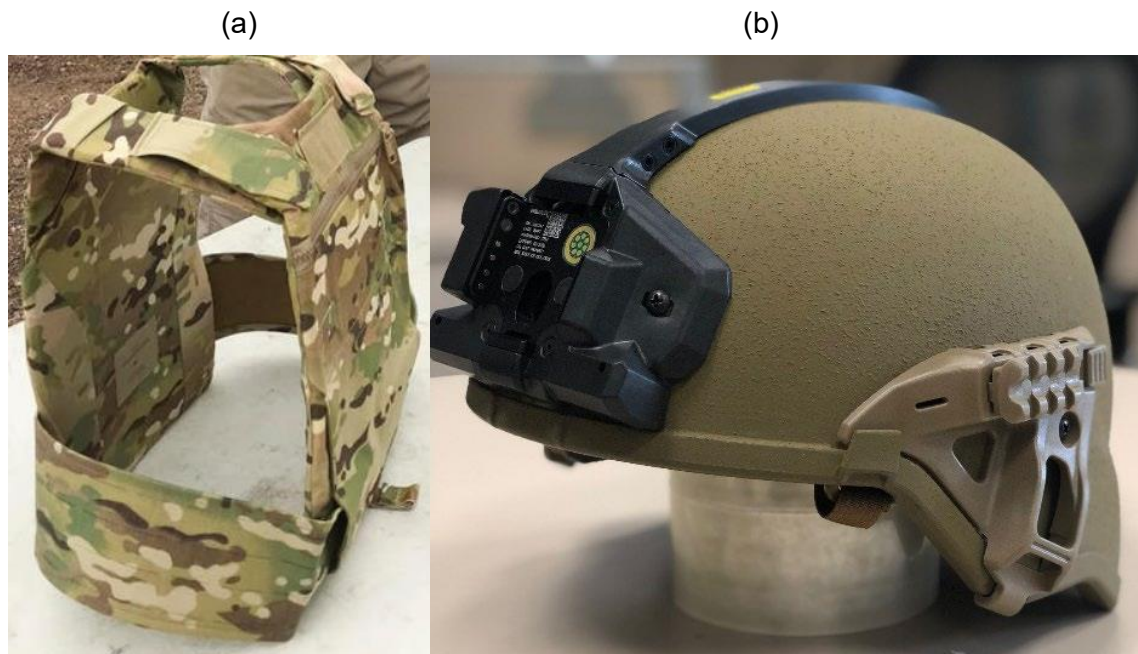
kuviointia muuttamalla saatiin ne sopimaan paremmin eri maastotyyppeihin, mikä vähensi vihollisten kykyä havaita liivin kantaja, jolloin kantajan selviytymisen mahdollisuudet nousivat. PASGT-liivit suojasivat kuitenkin edeltäjänsä tapaan kantajaansa pääosin vain sirpaleilta ja kiväärien luotien tai korkeaenergisten ammusten torjumiseen oli edelleen käytettävä metallisia tai keraamisia levyjä [21]. PASGT-liivit olivat kuitenkin huomattavasti edeltäjiään suojaavampia sekä mukavampia pitää yllä. Niitä käytettiin ensi kerran sotatilanteessa Grenadan miehityksessä vuonna 1983 [21].



**Kuva 7.** Yhdysvaltojen asevoimien PASGT-liivi (a) [27] ja PASGT-kypärä (b) [28] Persianlahden sodasta.

Kevlar poikkesi aiemmista suojaimissa käytetyistä materiaaleista myös siten, että se soveltui liivien ohella myös kypärien materiaaliksi. Yhdessä PASGT-liivin kanssa käytettäväksi sotilaille suunniteltiin vuonna 1982 käyttöönotettu PASGT-kypärä (kuva 7b), jonka komposiittirakenne koostui Kevlarista ja PVB-muovista [14, s. 32]. Tämä oli ensimmäinen sotilaille tarkoitettu kypärä, joka ei koostunut pääosin metallista. Verrattuna aiemmin käytössä olleeseen M1-kypärään, PASGT-kypärästä oli saatavilla yhden koon sijaan viisi eri kokoa ja jokaisessa oli itse säädettävä hihnasto, se suojaisi pään alasta 11 % enemmän kuin M1-kypärä ja oli M1-kypärää paremmin ilmastoitu [28]. Nämä muutokset tekivät uudesta kypärästä huomattavasti aiempaa käyttömukavamman, mikä auttoi sotilaita jaksamaan pitämään kypärää päässään pitkiä ajanjaksoja. Kuvassa 7b korvien kohdalla näkyvä pullistuma teki PASGT-kypärästä myös M1-kypärää helpomman käyttää yhdessä kommunikaatiolaitteiden kanssa [29]. Kypärän paino pysyi lisäyksistä huolimatta samassa painoluokassa kevyempien materiaalien vuoksi; M1 painoi noin 1,55 kg ja PASGT kypärä koon mukaan 1,4–1,9 kg [30].

PASGT-varusteiden jälkeen liivien ja kypärien rakenteet ovat pysyneet melko muuttumattomina eli monikerroksisina ja kuitupohjaisina. Uusien suojaavampien materiaalien puuttuessa ollaan liiveihin keksitty asteittain lisäominaisuuksia ja lisätty suojaustasoa modulaarisuuden kautta eli kehittämällä erilaisia lisäsuojaimia, esimerkiksi nivusille ja olkapäille, joita voi käyttää perusliivin kanssa tilanteen niin vaatiessa [21]. Yhdysvaltain armeijassa 1990-luvulla kehitetystä *Interceptor Body Armor* eli IBA-suojaimesta lähtien liivit ovat sisältäneet nauhakujastoja esimerkiksi lipas- ja ensiaputaskuja varten [21]. IBA-liiveistä asti liivit ovat myös olleet aiempaa suojaavampia, koska ne on suunniteltu suojaamaan sirpaleiden ohella myös pienten käsiaseiden ammuksilta [3]. Vuonna 2007 käyttöön otettu *Improved Outer Tactical Vest* eli IOTV-liivi sisälsi nopean vapautusmekanismiin, jolla liivin sai otettua nopeasti pois päältä vaaratilanteissa, esimerkiksi liivin syttyessä tuleen [21]. Lisäosien tarjoama suoja osoittautui kuitenkin esteeksi Afganistanin vuoristoisessa maastossa, jossa täysin varustetun IOTV-suojaimen noin 14,5 kg paino rajoitti liikkuvuutta liikaa [21]. Uusimmissa liiveissä pyritäänkin tehostamaan liikkuvuutta suojaavuuden kustannuksella. Esimerkiksi Yhdysvaltojen asevoimien seuraava, *Modular Scalable Vest* eli MSV-liivi (kuva 8a) painaa reilu 3 kg vähemmän kuin IOTV-liivi ja suojaaa kehosta pienemmän alan, mutta tarjoaa huomattavasti edeltäjäänsä paremman liikkuvuuden ja käyttömukavuuden [31]. Vastaavasti Suomen maavoimissa vuonna 2019 käyttöön otettu M17-liivi on edeltäjäänsä kevyempi ja tarjoaa paremman liikkuvuuden [32], mutta suojaaa kehosta vähemmän.



**Kuva 8.** Yhdysvaltojen armeijan MSV-liivi ilman lisävarusteita (a) [31] ja IHPS-kypäriä varustettuna pimeänäkölaitteille ja muille lisäosille tarkoitetuilla kiskoilla (b) [33].

Kevlarin ohella myös muita ballistisiin henkilösuojaimiin soveltuvia kuitumateriaaleja on kehitetty, tosin ne ovat vasta viime vuosikymmeninä kyenneet valtaamaan markkina-alaa ensimmäisenä kaupallistetulta Kevlarilta. Kevlarin tapaisia aramidikuituja ovat nimillä Twaron ja Technora myytävät kuidut, joista Twaronia on käytetty Kevlarin ohella muun muassa Yhdysvaltain armeijan IBA-liiveissä [34]. Aramidikuitujen lisäksi markkinoilta löytyy muun muassa Spectra ja Dyneema, jotka molemmat on valmistettu ultra-suurimolekyylisestä polyeteenistä (UHMWPE), jonka tiheys on aramidikuituja pienempi, mutta sen käyttölämpötila-alue on aramideja kapeampi ja se on alttiimpi virumiselle [35]. Virumisalttiuden takia polyeteenikuiduissa esiintyy aramidikuituja herkemmin ei-toivottua muodonmuutosta ammusten suurten energiamäärien välittyessä niihin, minkä takia niiden käyttö vaatii virumisen vaikutuksia heikentävän pintakerroksen [25]. UHMWPE-materiaaleja on käytetty muun muassa vuonna 2014 Yhdysvaltain armeijassa käyttöön otetussa *Enhanced Combat Helmet* eli ECH-kypärässä [36]. Näitä materiaaleja verrataan tarkemmin toisiinsa luvun 3.3 taulukossa 2.

Uusien materiaalien ohella henkilösuojainten ominaisuuksia on saatu parannettua myös valmistustekniikoiden kehitysten kautta. Yhdysvaltojen armeijan uusin kypärämalli, *Integrated Head Protection System* eli IHPS (kuva 8b) sisältää reiättömän kiinnitysjärjestelmän leukanauhoille, minkä ansiosta kypärän rakenteeseen ei tarvitse tehdä mekaanisia ominaisuuksia heikentäviä epäjatkuvuuskohtia eli reikiä [37]. Suojainten valmistamisessa voidaan myös hyödyntää tietokoneavusteista suunnittelua, jonka avulla saadaan paremmin arvioitua esimerkiksi liivin rakenteen ja materiaalien soveltuvuutta ballistiseen suojaukseen. Tietokoneavusteinen mallintaminen vaatii yleensä tiettyjen oletusten tekemistä, kuten esimerkiksi liivin kuitujen ominaisuuksien homogenisoimista todellisuudesta poiketen. Sen avulla voidaan kuitenkin säästää resursseja, kun toimimattomat mallit voidaan jättää toteuttamatta käytännössä ja toimivien mallien rakennetta voidaan optimoida ennen ballistiseen testaukseen siirtymistä. Tietokoneiden avulla voidaan nykyään luotettavasti mallintaa esimerkiksi tilanne, jossa Twaron-aramidikuidusta koostuvaa monikerroksista rakennetta pehmeään taustamateriaalin päällä ammutaan 9 mm pistoolin luodilla [38]. Tuloksena saadaan vastaavaa kokeellista tilannetta vastaavat arvot luodin aiheuttamasta vahingosta kuituihin, luodin aiheuttamasta syvennyksestä taustamateriaaliin ja luodin kokemasta fyysisestä muodonmuutoksesta [38].

### 3.2 Ballistiset keraamilevyt

Ballistisia levyjä on saatu kehitettyä suojaavimmiksi uusien materiaaliratkaisujen kautta sirpaleliivien tapaan. Viimeistään Vietnamin sodan aikana oli siirrytty puhtaista metallilevyistä pääosin keraamisiin, koska ne ovat suuren kovuutensa ansiosta panssarinläpäiseviä luoteja vastaan parhaiten pärjäävä materiaaliryhmä [39]. Niiden käyttötapa liiveihin erikseen lisättävinä levyinä pysyi kuitenkin samana 1990-luvulle asti, jolloin Yhdysvaltojen asevoimat alkoivat kehittämään liivejä, joissa levyt olivat osa itse liiviä. Yhdysvaltojen maavoimien erikoisjoukoille tarkoitettussa *Ranger Body Armor* eli RBA-liivissä oli sirpaleliivin mukana alumiinioksidista valmistetut levyt suojaamassa rintaa ja selkää kivääreissä käytetyiltä 7,62 mm luodeilta [21]. Vuonna 1996 kehitettiin PASGT-liivin päälle puettava *Interim Small Arms Protective Overvest* eli ISAPO-liivi, joka sisälsi kaksi boori-karbidilevyä. Levyt kuitenkin painonsa takia rajoittivat sotilaiden liikkuvuutta ja aiheuttivat nopeammin väsymistä. Pelkät sirpaleliivit painoivat noin 4 kg, kun sekä RBA-liivi levyjen että PASGT-liivi yhdessä ISAPO-liivin kanssa painoivat noin 11 kg [21]. ISAPO-liivin jälkeen kehitetyissä suojaimissa käytettiin levyjä suojaamaan pelkän torson sijaan suurempaa osaa kehosta. *Enhanced Small Arms Protective Insert* eli ESAPI-levyn (kuva 9) tyyppiset levyt suojasivat ISAPO-liivin levyjen tapaan rintaa ja selkää, ja näiden lisäksi kehitettiin levyjä sisältäneet suojaimet olkapäitä ja käsien yläosia varten sekä erillinen suojaimeen vatsan alueelle [21].



**Kuva 9.** ESAPI-levyjä esillä vuonna 2021 [40].

Kuitupohjaiset liivit, joiden suojaaminen perustuu ammusten kineettisen energian absorboimiseen joko kuitujen plastisen muodonmuutoksen tai energian lämmöksi muuttamisen kautta [41, s. 3], suojaavat käyttäjää sirpaleilta ja pienten käsiaseiden luodeilta. Kovat keraamiset levyt sen sijaan kykenevät pysäyttämään jopa .30 kaliiperin panssarinläpäiseviä luoteja [21]. Levyjen, jotka tyypillisesti koostuvat joko yhdestä keraamista tai

keraami-metalli-laminaateista, toiminta perustuu paikalliseen hajoamiseen iskuja vastaanottaessa, ammuksen hidastamiseen ja sen kineettisen energian jakamiseen isomalle alalle. Kuvassa 10 havainnollistetaan levyn käyttäytymistä ballistisessa iskutilanteessa. Kova keraamipinta tylsistää ammuksen kärjen ja hajottaa sen pienemmiksi osiksi, mikä heikentää ammuksen läpäisykykyä. Ammus kykenee suuren energiansa avulla kuitenkin hajottamaan keraamia osuma-alueen lähetyviltä ja läpäisee keraamin pinnan. Keraamin taakse asetettu pehmeä kerros jakaa ammukselta välittyvää energiaa suuremmalle alalle, jolloin yksittäisiin kohtiin levyä ei kohdistu liian suurta kuormitusta [40] ja ammus pysähtyy tehokkaammin. Takakerroksen tehtävänä on myös estää sekä ammuksen että keraamista haurasmurtuman yhteydessä irtoavien sirpaleiden pääsy kosketuksiin ihmiskehon kanssa [41, s. 4].

Levyjen kohdalla tyypillisenä ongelmana on painon ja suojaavuuden suhde, koska parempi suojaavuus tarkoittaa paksumpaa ja painavampaa levyä, minkä takia levyjen materiaaleina pyritään käyttämään mahdollisimman kevyitä materiaaleja. Myös levyjen koon kanssa on tehtävä kompromisseja, sillä liian suuret levyt voivat rajoittaa kantajan ruumiinosien liikkuvuutta. Metalleja kevyempien keraamien ollessa tyypillisesti kalliita ja vaikeasti muovattavissa olevia materiaaleja on levyjen kohdalla myös kustannuksilla suuri merkitys, koska käytössä hajoamaan tarkoitetuista levyistä ei haluta maksaa liikaa. Alumiinioksidia on suosittu pitkään sen alhaisten valmistuskustannusten ja useiden saatavilla olevien valmistusmenetelmien, muun muassa puristusmuovauksen ja lietevalun, vuoksi, vaikka se on boori- ja piikarbidia, joista voidaan tyypillisesti valmistaa tuotteita vain kuumapuristamalla, tiheämpi materiaali [3]. Koska rakenteissa esiintyvät epätäydellisyydet voivat alentaa keraamien ominaisuuksia huomattavasti, pyritään valmistuksessa käytetystä valmistustavasta huolimatta saavuttamaan mahdollisimman alhainen huokoisuus ja minimoimaan säröjen määrää. Yleinen tapa näiden saavuttamiseksi on käyttää pienen partikkelikoon jauheita ja antaa sintrausta käytettäessä kappaleen vihreän tilan sintraantua riittävästi.

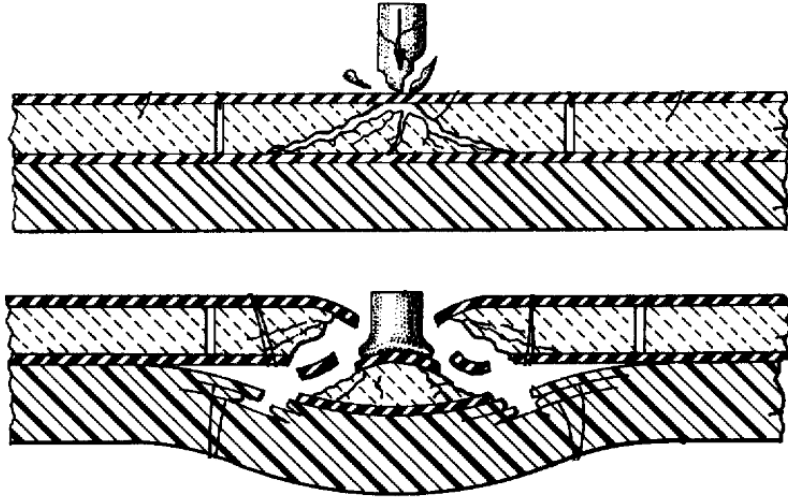
May 5, 1970

R. L. COOK

3,509,833

HARD FACED CERAMIC AND PLASTIC ARMOR

Filed March 28, 1963



**Kuva 10.** Keraamisen levyn murtumisen havainnekuva Richard L. Cookin patentista vuodelta 1963, muokattu lähteestä [42].

Ballististen levyjen kohdalla tärkeimpiä mekaanisia ominaisuuksia ovat suuri kovuus ja puristuslujuus sekä alhainen tiheys painon minimoimisen vuoksi. Suuri kovuus kuluttaa tehokkaammin ammuksen levyyn kanssa kontaktiin joutuvaa osaa, mikä heikentää ammuksen kykyä läpäistä levy. Ja koska ammukset kohdistavat suojaimiin puristavia voimia, suuri puristuslujuus vaatii ammuksilta enemmän energiaa levyn läpäisemiseksi, mikä edistää levyn kykyä olla murtumatta. [43] Näiden lisäksi myös korkea kimmomoduuli, murtolujuus ja sitkeys ovat haluttuja ominaisuuksia, jotta levy kykenee muuttamaan ammuksilta vastaanottamansa energian muodonmuutokseksi ilman hajoamista. Levyjen kohdalla on oleellista myös huomioida *Behind Armor Blunt Trauma* eli BAPT-ilmio, jolla tarkoitetaan tilannetta, jossa levy onnistuneesti estää ammuksen läpäisyn ja näin kehon haavoittumisen, mutta ammuksen kineettinen energia kulkeutuu levyn läpi ja haavoittaa kehoa [44]. Pienten energiamäärien kohdalla kehoon saattaa muodostua vain mustelmia, mutta suurilla energiamäärillä, varsinkin jos ammus osuu selkärangan tai vatsan alueelle, voi ammuksen osuma ja BAPT-ilmio johtaa kuolemaan. Tämän ilmiön vaikutuksia voidaan lieventää käyttämällä paksumpia eli paremmin energiaa absorboivia levyjä, mikä luonnollisesti lisää levyjen painoa ja täten sotilaan kantamaa kuormaa, tai parantamalla levyn taakse tulevien pehmeiden kerrosten energian absorptiokykyä. [44]

### 3.3 Materiaalien vertailua

Ballistisiin henkilösuojaimiin soveltuvia materiaaleja on lukuisia ja niiden soveltuvuuden taso riippuu mekaanisten ominaisuuksien lisäksi myös valmistusteknisistä seikoista.

Taulukossa 2 on esitelty polymeerikuitumateriaaleja, joita on käytetty sirpale- ja luotiliiveissä, ja taulukossa 3 on esitelty metalleja ja keraameja, joita on käytetty aiemmin panssareissa tai kypärissä ja nykyään ballistisissa levyissä. Taulukkojen avulla havainnollistetaan, miten materiaaliratkaisujen kehittyminen on vaikuttanut henkilösuojainten kykyyn suojata käyttäjänsä ja miten materiaalit eroavat toisistaan.

**Taulukko 2.** Ballistisissa henkilösuojaimissa käytettyjen polymeeripohjaisten kuitumateriaalien mekaanisia ominaisuuksia.

Materiaali	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Kimmokerroin (MPa)	Murtolujuus (MPa)	Murtovenymä (%)
Nylon 6 [45, s. 320] [46, s. 135]	1 130–1 160	725–863	41,3–165	300
Kevlar 29 [47, s. 218]	1 440	58 900	2 600	4,0
Kevlar 149 [45, s. 325]	1 470	160 000	3 400	1,5
Kevlar KM2 [48, s. 379]	1 440	70 000	3 300	4,0
Twaron [48, s. 379]	1 450	60 000– 145 000	2 700–3 600	2,3–4,2
Technora [48, s. 379]	1 390	70 000	3 000	4,4
Spectra [48, s. 379]	970	73 000– 124 000	2 400–3 340	2,8–3,0
Dyneema [48, s. 379]	970	87 000	2 600	3,5
Zylon [48, s. 32]	1 560	280 000	5 800	2,5

Mekaanisten ominaisuuksiensa puolesta kaikki materiaalit ensimmäisissä sirpaleliiveissä käytettyä nylonia lukuun ottamatta ovat samoissa kokoluokissa. Nylonin ja Kevlarin version 29, jota käytettiin esimerkiksi PASGT-liiveissä, ominaisuuksia vertaamalla voidaan nähdä, miksi siirtyminen Kevlariin sirpaleliivien materiaalina lisäsi liivien suojaavuutta niin huomattavasti ja mahdollisti sirpaleiden lisäksi myös pieniltä luodeilta suojaavat rakenteet. Sekä kimmokerroin että murtolujuus siirtyivät sadoista tuhansiin megapaskaleihin ja murtovenymä laski sadoista prosenteista yksittäisiin. Aramidi- ja polyeteenikuiduista valmistetut liivit eivät nylonia jäykempinä ja murtumista kestävämpinä materiaaleina muuta muotoaan yhtä herkästi tai suuresti ammusten osuessa niihin. Vaikka sekä murtolujuus että -venymä vaikuttavat polymeerin kykyyn muuttaa ammuksen iskuenergia muodonmuutokseksi, on nylonin murtolujuus niin pieni, että se ei käytännössä kykene hyödyntämään suurta murtovenymäänsä osumatilanteissa. Ainoa etu nylonilla aramidikuituihin nähden on sen alhaisempi tiheys, joka on kuitenkin polyeteenikuituja suurempi.



Taulukon 2 ylemmän osion aramidikuidut ja keskiosion UHMWPE-kuidut näyttävät olevan mekaanisilta ominaisuuksiltaan samassa kokoluokassa polyeteenikuitujen selkeästi alempaa tiheyttä lukuun ottamatta. Kaikilla kuitutyypeillä on kuitenkin omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Kevlar-kuitujen on havaittu menettävänsä tehokkuudestaan suojata .22 kaliperin ammuksilta jopa 40 % kuitujen ollessa märkiä ja kuitujen vahvuus voi heikentyä, mikäli ne joutuvat olemaan pitkän aikaa korotetun lämpötilan ja/tai korkean ilmankosteuden olosuhteissa [3]. Tämä mekaanisten ominaisuuksien heikentymisen suuruus ja vaikutukset rakenteeseen riippuvat vahvasti olosuhteista: esimerkiksi tuhka voi edistää kuitujen kosteuden absorptiota ja kemiallista hajoamista [3]. UHMWPE-kuitujen ominaisuudet ovat myös alttiita heikkenemään eri olosuhteissa ja niihin vaikuttavat esimerkiksi UV-säteily ja korkea ilmankosteus [3]. UHMWPE-kuitujen heikkoutena on myös kuitujen välinen alhainen kitkakerroin, jonka takia ne pääsevät helposti liikkumaan toistensa suhteen. Kun liike vaatii vähemmän energiaa, kykenevät kuidut absorboimaan vähemmän ammusten iskuenergiaa muodonmuutoksen kautta. UHMWPE-kuituja käytetäänkin lähinnä komposiittirakenteissa [3], kuten edellä mainituissa ECH-kypärissä, sekä keraamilevyjen taakse tulevissa kerroksissa. Muovimatriisissa kuitulujitteina toimiessaan polyeteenikuiduilla on erinomainen kyky vastaanottaa keraamin tylpistämiä ammuksia ja absorboida niiden energiaa [39].

Taulukon 2 perusteella selkeästi mekaanisten ominaisuuksien puolesta paras materiaali liiveille on synteettinen Zylon-kuitu, joka on aromaattinen polyesteri ja tunnetaan myös nimellä PBO. Tämä ei kuitenkaan ole ollut vuoden 2005 jälkeen laajassa käytössä henkilösuojaimissa, koska usea Yhdysvaltojen poliisi sai kuolettavia vammoja, kun päälle puettu liivi yllättäen ei suojannutkaan ammuksilta [49]. Näiden tapahtumien pohjalta aloitettiin tutkimuksia, joissa Zylon-kuitujen todettiin hajoavan molekyyllitasolla ulkoisen kosteuden seurauksena, mikä heikentää huomattavasti kuitujen murtolujuutta ja täten käyttöikä [49]. Vastaavanlainen tapahtuma aiheutti vaikeuksia yhdysvaltalaisen Pinnacle Armor -yrityksen nimellä *Dragon Skin* myymälle luotiliiville, joka sisälsi useita päällekkäisiä ja pyöreitä keraamilevyjä. *Dragon Skin* -liivit kykenivät täyttämään uusina tarkemmin luvussa 4.1 esiteltävän NIJ standardin aikanaan voimassa olleen version 0101.04 asettamat vaatimukset, mutta niiden todettiin olevan kykenemättömiä ylläpitämään tätä suojastasoja niille ilmoitetun takuuajan eli kuuden vuoden ajan [50]. Zylon-kuitujen tapaan myös *Dragon Skin* -liivien mekaaniset ominaisuudet heikkenivät olosuhteiden, kuten lämpötilan ja ilmankosteuden, vaikutusten takia. Tämä johti vuonna 2007 NIJ-organisaation epäämään näiltä liiveiltä standardin mukaisuuden, mikä heikensi liivien uskottavuutta ja täten myyntikelpoisuutta poliisivoimille ja siviileille. [50]

**Taulukko 3.** Ballistisissa henkilösuojaimissa käytettyjen metallien ja keraamien mekaanisia ominaisuuksia

Materiaali	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Kovuus HV	Murtolujuus (MPa)	Murtositkeys (MPa/m <sup>1/2</sup> )
Alumiini 7075 [51, s. 238], [52, s. 519]	2 710	167*	228–572	24
Teräs 4340 [51, s. 861, 870, 874], [52, s. 150]	7 850	311–490	745–1760	50–87,4
98 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [41, s. 233] [54, s. 813]	3 800	1 600	262	4,5
AlN [55, s. 303], [56, s. 792]	3 260	1 530	300–500	3,0–4,5
B <sub>4</sub> C [41, s. 233] [56, s. 792]	2 520	3 200	300–500	2,8
SiC [41, s. 233] [56, s. 792]	3 100–3 220	1 200–2 700	500–850**	3,2–5,0
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> [52, s. 813] [56, s. 792]	3 300	1 300	500–1200	4,0–8,0

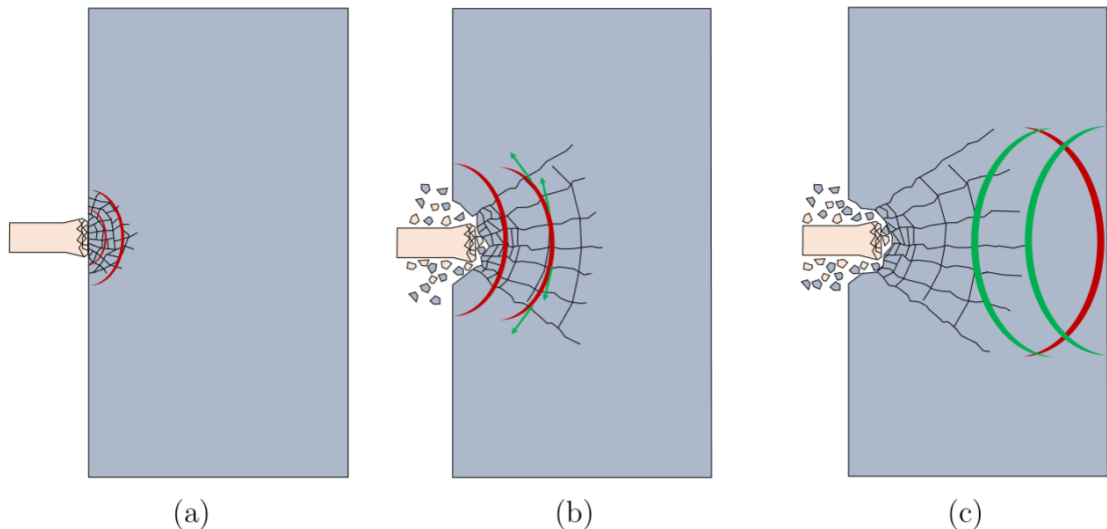
\*Yleinen arvo alumiinille.

\*\*Arvo kuumapuristetun piikarbidin murtolujuudelle.

Vertailemalla taulukossa 3 esitettyä terästä keraameihin voidaan havaita, että teräksen tiheys on noin kaksinkertainen keraameihin nähden ja sen murtolujuuden ja -sitkeyden arvot ovat seosaineista ja valmistustavasta riippuen suuremmat. Keraameilla on tiheyden lisäksi etuna myös paljon suurempi kovuus, joka on boorikarbidilla noin kuusinkertainen teräkseen verrattuna. Alumiinilla puolestaan on suurinta osaa taulukon 3 keraameja pienempi tiheys, mutta sen muut ominaisuudet ovat terästä pienempiä. Metalleilla on etunaan myös alemmat valmistuskustannukset, koska metalleja on edullisempi valmistaa ja muovata esimerkiksi valssaamalla verrattuna hauraiden keraamien sintraamiseen tai kuumapuristukseen. Metallien sijaan levyissä kuitenkin suositaan keraameja suuremman kovuuden ja puristuslujuuden takia. Esimerkiksi alumiinioksidin puristuslujuus on 2 500 MPa ja boorikarbidin 2 900 MPa [56, s. 792]. Teräksistä on kuitenkin valmistettu erittäin korkean kovuuden versioita, esimerkiksi Bisalloy Steel -yrityksen valmistaman teräksen kovuus on luokkaa 570–640 HB [57], mutta näitä käytetään ballististen levyjen sijaan panssaroiduissa ajoneuvoissa. Maailmansotien ajan kypärissä käytetyn Hadfieldin teräksen kovuus voi sen martensiittiseksi muuttuessa nousta arvoon 600 HV [54, s. 600], mutta tämän teräksen käyttöä vaikeuttaa sen alttius muokkauslujittumiselle valmistuksen aikana.

Taulukon 3 mukaan keraameilla on sekä teräksiä että alumiineja pienemmät murtositkeyden arvot, mutta tämä ei kuitenkaan ole ongelma ballistisissa tilanteissa. Alhainen murtositkeys johtuu keraamien rakenteissa aina läsnä olevista virheistä, kuten sidosainejäämistä tai huokosista. Nämä virheet eivät kuitenkaan alenna tarvittua kriittistä jännitystä säröjen etenemiselle, koska ammusten levyihin kohdistama kuormitus on puristavaa. [41, s. 212] Levyjen kohdalla on myös tärkeää huomioida kerrosten välinen akustinen impedanssiero. Ammuksen osuessa levyyn lähtee levyn pinnasta kulkemaan puristava jännitysaalto ja kun aalto kohtaa kerrosten välisen rajapinnan, osa aallosta heijastuu takaisin vetoaaltona. Mitä suurempi rajapinnan välisten materiaalien impedanssien, joka riippuu materiaalin tiheydestä ja äänen kulkunopeudesta sen sisällä, ero on, sitä suurempi heijastunut aalto syntyy [58]. Levyn päällimmäisen kerroksen ollessa keraaminen halutaan mahdollisimman pieni impedanssiero, koska vetojännityksille heikoissa keraameissa kulkiessaan vetoaalto edistää keraamiosan murtumista (kuva 11) [59]. Päällimmäisen kerroksen ollessa puolestaan esimerkiksi alumiininen, tulee impedanssierosta tarkoituksella suuri, jolloin suurempi osa ammuksen iskuenergiasta jää alumiinikerrokseen ja keraamikerros kuluu vähemmän [58].

Taulukon 3 keraameista levyissä tyypillisesti käytetään korkean puhtausasteen alumiinioksideja, piikarbideja ja boorikarbideja, joista ensimmäisten valmistuskustannukset ja ballistinen suojauskyky ovat alimmat ja viimeisen korkeimmat. Boorikarbidi on taulukon keraameista sekä kevyin että kovin, minkä takia sitä suositaan kaikkein vaativimpiin käyttötilanteisiin tarkoitetuissa levyissä, mutta se ei ole alumiinioksideja tai piikarbideja tehokkaampi korkean nopeuden kivääriluoteja vastaan. Boorikarbidi käyttäytyy tällaisten ammusten osuessa lasimaisesti, koska sen leikkauslujuus alenee huomattavasti tällaisessa korkean energian shokkitilanteessa, mikä edistää rakennetta heikentävien leikkausnauhojen syntymistä. [39] Alumiinioksidia on pitkään suosittu sen alhaisten valmistuskustannusten takia, mutta piikarbidi on syrjäyttämässä sen vähemmän vaativien käyttötilanteiden materiaalina paremman kovuuden ja keveyden vuoksi. Piikarbidin ominaisuudet riippuvat kuitenkin vahvasti käytetystä valmistusmenetelmästä: sintraamalla syntyvän rakenteen kovuus 2 700 HV on kuumapuristamalla syntyvää kovuutta 2 200 HV suurempi, mutta sintraamisen valmistuskustannukset ovat puristukseen nähden liki kaksinkertaiset [41, s. 233].



**Kuva 11.** Puristusaalto lähtee etenemään keraamissa välittömästi iskun jälkeen (a), keraami säröilee ja murtuu ja uusia puristus- ja vetoaaltoja syntyy (b), vetoaaltoja heijastuu levyn rajapinnasta (c) [60].

Maailmansodissa ja Vietnamin sodassa käytettyihin suojaimein verrattuna nykyään käytössä olevat ballistiset henkilösuojaimet ovat huomattavasti edeltäjiään suojaavampia, mikä johtuu lähes täysin Kevlarin tapaisten kuitumateriaalien kehittämisestä. Uudet kuitumateriaalit ovat mahdollistaneet sekä kevyempien että sirpaleiden lisäksi myös käsiaseiden luodeilta suojaavien liivien valmistamisen. Ballistisissa levyissä on siirrytty suuremmista yksittäisistä levyistä useista levyistä koostuviin kokonaisuuksiin, jotka suojaavat paremmin eri kehonosia. Pitkään suojaimissa keskittyneiden ominaisuuksien lisäksi suunnittelussa huomioidaan nykyään paremmin myös muita seikkoja: ammusten pysäyttämisen ja suojainten hajoamisen mahdollisuuksien lisäksi huomiota annetaan myös käyttömukavuudelle ja BAPT-ilmiön tapaisten uhkien minimoimiselle. Aseiden nopeasta kehitystahdista poiketen henkilösuojainten kohdalla on kyetty saavuttamaan vain inkrementaalisia parannuksia Kevlarin tapaisten uusien materiaali-innovaatioiden puuttuessa. Pieniä parannuksia saavutetaan kuitenkin jatkuvasti ja käyttäjien kokemien uhkien muuttuessa vaarallisemmiksi pysyy henkilösuojainten käyttö- ja kehittämistarve korkealla myös lähitulevaisuudessa.

## 4. TULEVAISUUDENNÄKYMÄT

Tässä luvussa tarkastellaan sekä nykyään käytössä olevia ballistisia standardeja ja testausmenetelmiä että henkilösuojainten tulevaisuudennäkymiä. Koska henkilösuojainten tarkoituksena on estää käyttäjien haavoittuminen, on niille asetettu useita vaatimuksia ja luokituksia suojaavuuden tason perusteella. Eri maat ja organisaatiot käyttävät omia standardejaan suojainten kyvykkyyksien määrittämisessä, mutta niiden kaikkien tarkoituksena on varmistaa, että testattava suojain soveltuu suojaamaan käyttöolosuhteiden oletetuilta uhilta. Uusia materiaaliratkaisuja suunniteltaessa näiden standardien tunteminen on oleellista, jotta voidaan arvioida, täyttääkö suunniteltu suojainmalli suojaavuudelle asetetut vaatimukset.

### 4.1 Ballistiset testausmenetelmät ja standardit

Ballististen henkilösuojainten testaaminen sisältää lähes aina suojaimen altistamisen erilaisille ammuksille, koska tämä on yksinkertaisin tapa määrittää suojaimen suojauskyky. Kokeissa tutkitaan yleensä suojaintyyppistä riippumatta, mitkä luodit tai sirpaleet kykenevät läpäisemään suojaimen ja mikäli läpäisyä ei tapahdu, voidaan esimerkiksi tutkia ammuksen kypärään jättämän jäljen syvyyttä. Koska juuri mikään suojain ei kykene suojaamaan kantajaa luotettavasti esimerkiksi samaan osaan kohdistuvalta jatkuvalta sarjatu- lelta tai usealta käsikranaatilta samanaikaisesti, odotetaan suojainten yleensä kestävän muutamia osumia samaan suojaimen osaan. On myös tärkeää havaita, että saman kaliiperin ammuksia on saatavilla erityyppisinä ja eri materiaaleista valmistettuina, joten standardin mukaisen suojaustason saavuttanut suojain ei välttämättä suojaakaan kaikilta saman kaliiperin ammuksilta [61]. Esimerkiksi 9 mm lyijy-ytimisiltä luodeilta suojaava liivi ei välttämättä suojaakaan vastaavalta luodilta, jos sen ulkokuori on valmistettu teräksen sijaan köyhdytetystä uraanista.



**Kuva 12.** Kaupallisesti saatavilla olevia luotityyppejä [62].

Kuvassa 12 on esitetty tyypillisiä ja kaupallisesti saatavilla olevia luotityyppejä. Luotien ytimet ovat tavallisesti valmistettu lyijystä, ja niitä ympäröi kovemmasta metallista valmistettu vaippa (engl. *jacket*). Vaippa voi joko peittää ytimen kokonaan, kuten *Full Metal Jacket* (FMJ) eli kokovaippaluodeissa, tai peittää siitä vain osan, jolloin puhutaan osavaippaluodeista. Täysin peitettyt luodit voidaan ampua kovemmilla nopeuksilla ilman pehmeämmän ytimen hajoamista ja niillä on tyypillisesti parempi läpäisykyky muihin luotityyppeihin verrattuna [63]. *Hollow Point* (HP) eli reikäpääluodeissa on vaipan kärjessä reikä, joka saa iskuhetkellä ytimen leviämään nopeasti kohteen pintaan ja jakamaan energiaa laajalle alalle [63]. Energian jakaminen, jonka voimakkuutta voidaan säätää vaipan peittävyttä muuttamalla, heikentää luodin kykyä läpäistä kohde, jolloin luodin aiheuttama vahinko keskittyy kohteen pintaan. *Soft Point* (SP) eli pehmeäkärkiset luodit leviävät HP-luotien tapaan, mutta niiden läpäisykyky on suurempi ja niiden tarkoituksena on aiheuttaa luodin halkaisijaa suurempi reikä kohteeseen [63]. Muita luotityyppejä ovat muun muassa pyöreäkärkiset *Round Nose* (RN) -luodit ja panssarinläpäisevät AP-luodit, joiden tehokkaampi läpäisykyky perustuu lyijyä kovempaan ydinmateriaaliin, kuten teräkseen tai volframikarbidiin [64]. Henkilösuojaimia testattaessa ja kehitettäessä on tärkeää kyetä määrittelemään, miltä ammuksilta suojaamiseen suojain on tarkoitettu.

Yksi ensimmäisenä luoduista ja yleisimmin käytetyistä standardeista ballististen suojaus-tasojen määrittämiseen poliisi- ja siviilikäyttöön päätyvien suojainten kohdalla on Yhdysvaltain oikeusministeriön alaisena toimivan *National Institute of Justice* (NIJ) -organisaation vuoden 2008 standardi *Ballistic Resistance of Body Armor* 0101.06. Standardin versio 0101.00 kehitettiin alun perin vuonna 1972 poliisien henkilösuojainten testaamista varten ja se oli tarkoitus päivittää versioon 0101.07 vuoden 2019 alussa [65]. Standardi 0101.06 asettaa minimivaatimukset sekä henkilösuojainten ballistisen suojauskyvyn että ballististen testausmenetelmien parametrien osalta. Edellä mainitun ammusten versioiden laajan saatavuuden vuoksi standardissa asetetut vaatimukset suojaavuuden kannalta on asetettu yläkanttiin Yhdysvalloissa toimivien poliisien kohtaamien uhkien osalta, sillä näin suojain on luotettavampi testissä käytettyjä ja pienempiä uhkia vastaan. Standardi ei ota kantaa suojainten kykyyn puolustautua teräaseilta, tätä varten on laadittu muun muassa NIJ standardi 0115.00. [61]

Taulukossa 4 on esitelty osa standardin 0101.06 asettamista vaatimuksista henkilösuojainten suojaintasoa mittaaville testeille. Standardin mukaan suojaimet voidaan jakaa taulukon mukaisesti viiteen tasoon, jotka määrittelevät millaisia ammuksia suojaimen tulee kestää, jotta sen voitaisiin katsoa kuuluvan tietylle tasolle. Näiden tasojen lisäksi on olemassa vapaammin määritettävissä oleva erikoistaso, jota käytetään lähinnä tasoa IV

vaarallisempien uhkien suojaamiseen tarkoitettujen suojainten arvioimiseen. Tasot IIA, II ja IIIA koskevat lähinnä luotiliivejä, tasot III ja IV puolestaan kovia ballistisia levyjä. Liivejä voidaan testata myös yhdessä levyjen kanssa, mutta tällöin käyttäjiä varten on levyihin selkeästi merkittävä, että esimerkiksi suojaintaso III on saavutettavissa vain levyn ja liivin yhdistelmällä. Suojainten käytön aikana kokevan kulumisen mallintamiseksi standardissa ohjeistetaan ja vaaditaan testaamaan suojaimia koettamisen jälkeen. Tämä koettaminen, joka tehdään kaikille levyille ja osalle liiveistä, sisältää suojaimen altistamista lämmölle, ilmankosteudelle ja mekaaniselle kulutukselle. Taulukon *Luodin nopeus* -sarakkeessa suluissa olevat nopeusarvot viittaavat täysin uusiin liiveihin ja avonaisiin arvot käsiteltyihin liiveihin. *Laukausten kokonaismäärä* -sarakkeen suuri ero liiveille ja levyille tarkoitettujen tasojen välillä johtuu liiveillä tehtävän uusien suojainten koettamisen lisäksi myös siitä, että liiveistä testataan sekä pieniä ja suuria näytteitä, kun levyillä vastaavaa kokojakoa ei tehdä. *Luodin tyyppi* -sarakkeen termit S&W, Magnum, SIG ja M2 viittaavat asetyyppeihin. [61]

**Taulukko 4.** NIJ standardin 0101.06 mukaisien ballististen testien vaatimuksia [61]

Suojaintaso	Luodin tyyppi	Luodin massa (g)	Luodin nopeus ( $\pm 9,1$ m/s)	Laukausten kokonaismäärä
IIA	9 mm FMJ RN	8,0	355 (373)	144
	.40 S&W FMJ	11,7	325 (352)	
II	9 mm FMJ RN	8,0	379 (398)	144
	.357 Magnum JSP	10,2	408 (436)	
IIIA	.357 SIG FMJ FN	8,1	430 (448)	144
	.44 Magnum SJHP	15,6	408 (436)	
III	7.62 mm NATO FMJ	9,6	847	24
IV	.30 kaliiperin M2 AP	10,8	878	24

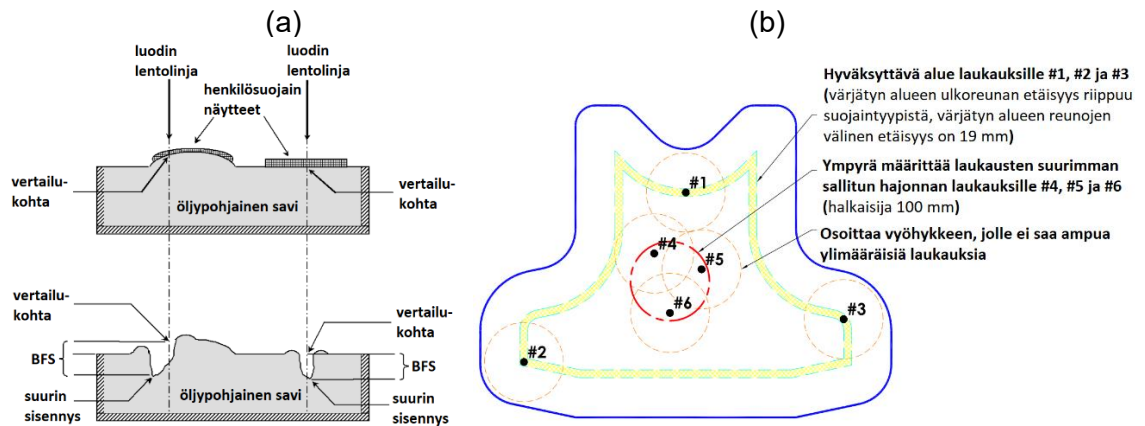
Standardissa esitetään kaksi testiä, jotka suojaimen on läpäistävä kuuluakseen johonkin standardin määrittämistä tasoista. Ensimmäinen näistä on *Perforation and Backface Signature* eli P-BFS-testi, jossa mitataan sekä näytteen läpäisynestokykyä että ammuksista aiheutuvaa BABT-ilmiötä, johon testin nimen BFS-osio viittaa. Erän näytteet asetetaan yksitellen tukirakenteeseen, joka koostuu jäykän puu- tai metalliraamin sisällä olevasta lämmitetystä öljypohjaisesta savesta, yhdellä standardin kolmesta esittämästä tavasta [61]. Tämän jälkeen näytettä ammutaan suojaintasosta ja näytteen käsittelystä riippuen taulukossa 4 esitetyillä ammuksilla ja nopeuksilla. Tyypillistä näytettä ammutaan yhteensä kuusi kertaa, lukuun ottamatta 1–6 kertaa ammuttavia tyyppin IV näytteitä, standardin määrittämältä etäisyydeltä. Läpäistäkseen tämän testin, ei mikään ammutuista

luodeista saa läpäistä näytettä eikä mikään luodeista saa aiheuttaa näytteen takana olevaan saveen liian suurta syvennystä (kuva 13a). Jokaisen ammutun luodin nopeus mitataan ja liian hitaat ja nopeat tai väärästä tulokulmasta ammutut luodit täytyy ampua uudelleen. Luotien on myös osuttava standardin määrittämille alueille (kuva 13b), jotta liivien kohdalla kyetään määrittämään näytteen eri osien suojauskyky. [61]

Toinen standardin mukainen testi on *Ballistic Limit* eli BL-mittaus, jonka tarkoituksena on statistisesti arvioida suojaimen kykyä estää ammusten läpäisy. BL-mittauksessa pyritään selvittämään suojaimen  $V_{50}$ -arvo, joka kuvaa nopeuden arvoa, jolla ammuksen mahdollisuus läpäistä näyte on 50 %. [61]  $V_{50}$ -arvo kuvaa iskunopeutta, ei ammuksen lähtönopeutta, ja mitä suurempi suojaimen  $V_{50}$ -arvo on, sitä paremmin se suojaa mitattavan tason ammuksilta [65]. BL-mittauksessa näytteitä ammutaan kaikilla suojaintasoilla samoilla luodeilla, kuin P-BFS-mittauksessa ja läpäisyvaatimukset riippuvat testattavasta tasosta. Näytteen  $V_{50}$ -arvon tulee kuitenkin olla korkeampi, kuin taulukossa 4 esitetyt nopeuden maksimiarvot eli esimerkiksi tason II näytettä ammuttaessa 9 mm FMJ RN -luodilla täytyy iskunopeuden olla vähintään 407,1 m/s. Näytettä ammutaan riittävän monta kertaa  $V_{50}$ -arvon löytämiseksi ja määrä vaihtelee tasoittain, mutta jos nopeutta ei kyetä luotettavasti löytämään testausolosuhteissa, katsotaan näytteen läpäisseen BL-mittauksen. Esimerkiksi tason III mittauksessa tarvitaan neljä suojainnäytettä, joita ammutaan yhteensä vähintään 24 kertaa. Jos ammuksista vähintään kuusi läpäisi näytteen ja vähintään 12 pysähtyi näytteeseen niin, että iskunopeuksien suurin ero oli 27 m/s, ei enempää laukauksia tarvita ja  $V_{50}$ -arvo voidaan selvittää laskemalla nopeuksien aritmeettinen keskiarvo. [61]

Kun näyte-erä on onnistuneesti läpäissyt sekä P-BFS- että  $V_{50}$ -testin, voi suojaimen valmistaja käyttää tätä hyväkseen esimerkiksi mainostaessaan tuotteensa luotettavuutta ja moni taho, kuten Yhdysvaltojen poliisivoimat, pitävät standardin läpäisyä vaatimuksena tuotteen ostamiselle. NIJ standardia 0101.06 oli käytetty 16 maassa vuonna 2018 ja sen avulla oli arvioitu vuoden 2017 lopussa yli 1 100 eri suojainta [66].





**Kuva 13.** NIJ standardin 0101.06 mukainen BFS-mittaus (a) ja sallitut osuma-alueet luotiliivin P-BFS-mittauksessa (b), muokattu lähteestä [61].

NIJ standardin 0101.06 ohella myös muita standardeja on kehitetty ja niitä käytetään lähinnä poliisivoimille tarkoitettujen suojainten arvioimiseen. Yhdistyneissä kuningaskunnissa on esimerkiksi käytössä *Home Office Scientific Development Branch* eli HOSDB-organisaation vuoden 2007 standardi, joka esittää seitsemän suojaustasoa ja asettaa NIJ standardista poiketen näytteelle vaatimuksia kestää ammusten lisäksi veitsien ja piikkien aiheuttamaa vahinkoa [3]. Virallisten NIJ- ja HOSDB-standardien lisäksi henkilösuojaimissa käytettyjä ja niihin soveltuvia uusia materiaaliratkaisuja voidaan koettaa tyypillisillä materiaalitekniikan mittausmenetelmillä. Esimerkiksi Zylon-kuiduissa käytetyn PBO-polymeerin mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä korotetussa lämpötilassa ja korkeassa ilmankosteudessa voidaan mitata asettamalla kuiduista valmistettuja kapaleita olosuuhdekaappiin ja tarkastelemalla muutoksia kuitujen rakenteessa mikroskopian, vetokokeiden ja spektroskopian avulla [67]. Kuiduissa tapahtuvat muutokset ovat riippuvaisia olosuuhdekaapissa vietetystä ajasta: 50 °C lämpötilassa ja 60 % ilmankosteudessa voidaan kuitujen murtolujuuden havaita laskevan noin 40 % kuitujen ollessa kaapissa 157 päivää ja havaita, että lujuuden lasku aiheutui lähinnä ulkoisen kosteuden takia [67]. Termogravimetrialla voidaan puolestaan osoittaa, että PBO-kuidut hajoavat vasta yli 700 °C lämpötilassa ja ne kiteytyvät lämpötilan kohotessa [68]. Ominaisuuksien laskemisesta huolimatta kuidut eivät siis hajoaisi täysin tyypillisissä käyttöolosuhteissa, vaikka ne altistuisivatkin korotetuille lämpötiloille ja ilmankosteuksille pitkiäkin aikoja.

NIJ- tai HOSB-standardia käytetään lähinnä arvioimaan poliisivoimien ja siviilien käyttöön tulevia henkilösuojaimia, joten ne eivät sovellu täysin taistelukentille tarkoitettujen suojainten suojainkyvyn arvioimiseen vaarallisempien uhkien vuoksi. Eri sotilastahot ovat luoneet näitä suojaimia varten omat standardinsa. Yksi näistä on Yhdysvaltojen armeijan käyttämä MIL-STD-662F standardi, joka soveltuu muun muassa luotiliivien, laivoissa ja lentokoneissa käytettävien sisäisten ja ulkoisen panssarien sekä silmien suo-

jaksi tarkoitettujen visiirien suojauskyvyn arviointiin [3]. Tämä standardi asettaa NIJ standardin tavoin parametrit, kuten ammustyypit ja ammusten nopeudet, suojaustyypin testaamiselle ja siinä suojauskykyä testataan edellä esitetyllä  $V_{50}$ -mittauksella [3]. Vastavanhaisia standardeja löytyy sotilasorganisaatio NATO:lta, joka ylläpitää peräti 1 200 eri sotilastoimintaan liittyvää STANAG standardia [69]. Näistä osa, kuten standardi 2902 *Non-Ballistic Test Methods and Evaluation for Combat Helmets*, on julkisia [70], mutta eniten NATO:n joukkojen suorituskykyyn vaikuttavat standardit, kuten luotiliivien ballistisen suojauskyvyn arviointiin tarkoitettu standardi 2920 *Classification of Personal Armour*, ovat salaisia [71], kuten monen muunkin sotilastahon käyttämät standardit.

## 4.2 Tulevaisuuden materiaaliratkaisut henkilösuojaimissa

Taistelukentillä ja muissa käyttöolosuhteissa tapahtuvien muutosten takia henkilösuojainten suojaustason vaatimukset asetetaan käyttäjien kokemien uhkien perusteella. Suuremmat uhat vaativat parempaa suojausta, mikä tarkoittaa yleensä suurempaa painoa. Henkilösuojainten kehitystyön yksi päätavoite onkin painon minimointi ilman, että ballistinen suojaustaso alenisi liikaa. Tähän on pyritty pääsemään modifioimalla jo käytössä olevia materiaaleja, kehittämällä uudenlaisia komposiittiratkaisuja, ja ottamalla mallia luonnossa esiintyvistä suojaimista. Uusissa ratkaisuissa täytyy myös huomioida ballististen iskujen kesto-aika, joka on tyypillisesti 50–200  $\mu$ s [39]. Esimerkiksi luvussa 4.2.2 esiteltävien aukseettisten komposiittilevyjen ytimen täytyy kyetä reagoimaan ammuksen osuun tässä ajassa, jotta sen tarjoamista eduista olisi jotain hyötyä. Luonnollisesti suojaimia käyttävien tahojen, kuten poliisivoimien ja armeijoiden, suuren henkilöstömäärien vuoksi kustannusten suuruudella on uusien ratkaisujen kohdalla huomattava merkitys ratkaisun toteutuskelpoisuuteen. Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi huomiota annetaan myös suojainten liikkuvuuden rajoittavuudelle sekä suojainten käytön fysiologisille vaikutuksille. Esimerkiksi armeijoissa sekä poliisivoimissa työskentelee nykyään yhä useammin ja enemmän naisia, minkä takia on alettu kehittää nykyisten miesten vartaloihin perustuvien suojainten ohelle naisille paremmin sopivia suojaimia käyttömukavuuden parantamiseksi [72].

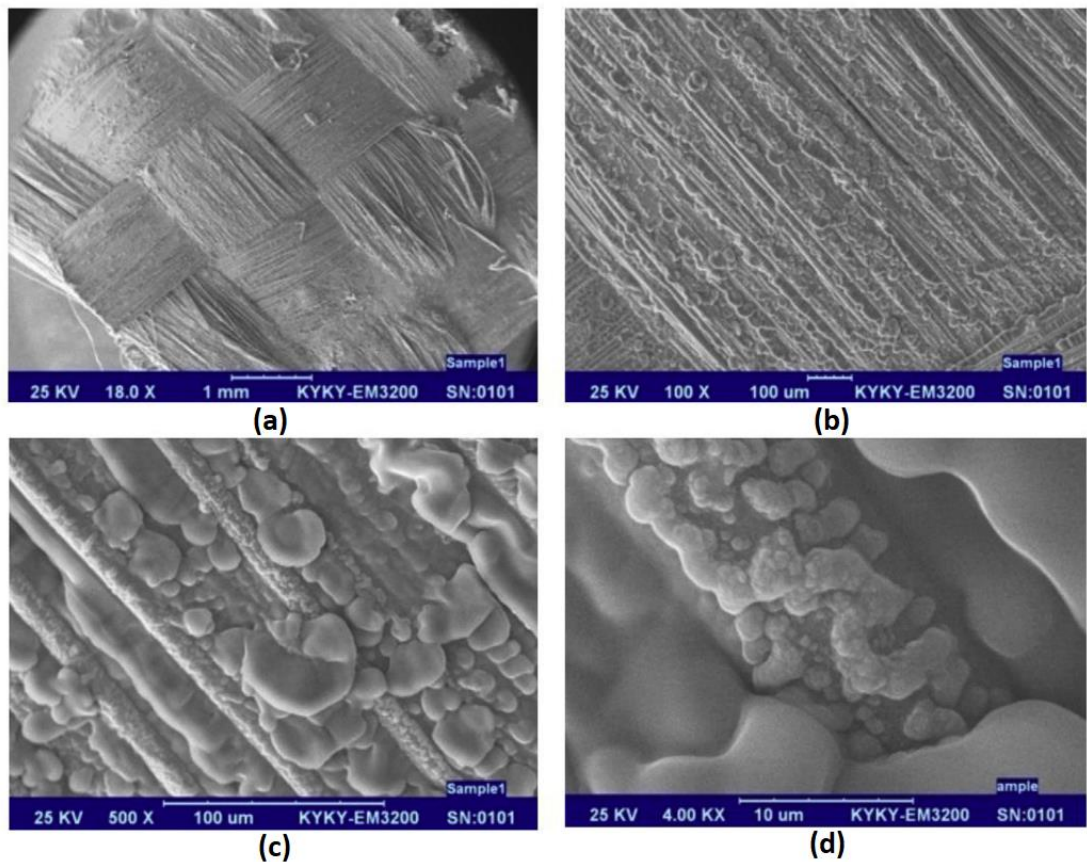
### 4.2.1 Luotiliivien kehittyminen

Luotiliiveissä käytettyjen kuitujen kohdalla kehitystyössä on keskitytty parantamaan kuitujen kykyä absorboida ammusten energiaa esimerkiksi lisäämällä kuitujen muodonmuutospotentiaalia ennen murtumista ja nostamalla kuitujen välistä kitkakerrointa. Yksi tapa tämän saavuttamiseksi on päällystää kuidut kerroksella, joka kiinnittää kuidut tiiviimmin kiinni toisiinsa. UHMWPE-kuituja on päällystetty muun muassa sinkkioksidilla ZnO. Aluksi kuitujen pintaan on luotu adheesiokerros happiplasmakäsittelyllä, jonka jälkeen ZnO-kerros on kasvatettu kuitujen pintaan [73]. Pinnoituksen myötä UHMWPE-kuitujen välinen kitkakerroin kasvoi noin 660 % ja ballistisessa läpäisykokeessa  $V_{50}$ -nopeus kasvoi noin 59 % [73]. Vaikka päällystäminen tuottikin huomattavia parannuksia kuitujen ominaisuuksissa, on menetelmä kuitenkin monimutkainen ja melko kallis soveltuakseen suurten luotiliivimäärien päällystämiseen. Kustannustehokkaampana ratkaisuna Twaron-kuituja on päällystetty kaupallisesti saatavalla kumipohjaisella aerosolilla, joka suihkuttamisen jälkeen kovettuu 24 tunnissa [74]. Verrattuna ZnO-päällystykseseen kumipäällyste tuotti vain 18 % noston läpäisykokeen  $V_{50}$ -nopeudessa [74], mutta kustannuksiltaan se on huomattavasti edullisempi. Kyseisen aerosolin luoma pinnoite on kuitenkin termisesti stabiili vain lämpötila-alueella  $-28,8\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$  [74] eli sen tarjoamat edut voivat heikentyä ääriolosuhteissa.

Toinen paljon tutkittu menetelmä luotiliivien suojauksen parantamiseksi on leikkauspaksunevien nesteiden käyttö. Näiden nesteiden, jotka ovat hiukkassuspensioita, viskositeetti kasvaa suurten leikkausjännitysten alaisuudessa. Käytännössä ne muuttuvat ammusten osumishetkellä viskoosista nesteestä viskoelastiseksi kiinteäksi viskositeetin suuren kasvun takia ja jännityksen poistuttua takaisin nesteeksi [75]. Nestemäisessä olomuodossa neste ei vaikuta negatiivisesti luotiliivin liikkuvuuteen ja kovettuessaan se edistää energian jakamista kuitujen välillä [76] ja nostaa kuitujen välistä kitkakerrointa eli lisää niiden energian absorptiokykyä [75]. Nesteisiin voidaan myös lisätä keraamisia jauheita tai hiilinanoputkia näiden vaikutusten kasvattamiseksi, millä voidaan vähentää tarvittavan nesteen määrää. Esimerkiksi kolme 10 % boorikarbidijauhetta sisältävällä leikkauspaksunevalla nesteellä muokattua Twaron-kuitukerrosta absorboi iskuenergiaa lähes yhtä paljon kuin saman pinta-alamassan omaava nelikerroksinen ja muokkaamaton Twaron-kerrasto [75].

Kuvassa 14 esitetään SEM-kuvia leikkauspaksunevilla nesteillä impregnoitujen Kevlar-kuitujen pinnoista eri suuruuksilla. Kuvista 14a ja 14b ilmenee, että neste täyttää kuitujen väliin jääviä tyhjiä tiloja. Täyttymisen tasaisuus koko kuitukerroksen alalla riippuu nesteen määrästä, joten kuvassa 14a esiintyvät yhtenäiset alueet suojaavat todennäköisesti

paremmin ammuksilta kuin selkeästi yksittäisiä kuituja sisältävät alueet. Kuvista 14c ja 14d ilmenee, että neste kiinnittyy kuitujen pintoihin pieninä kasaumina. Nämä kasaumat parantavat kuitujen kitkakerrointa sekä liittämällä kuituja kiinni toisiinsa että helpottamalla tarttumista viereisiin kuituihin kuitujen liikkeessä. Nesteiden suojaimen suojausta-soa parantava vaikutus riippuu pitkälti siitä, kuinka tasaisesti neste saadaan jakautumaan kuitujen pinnoille ja väleihin. Leikkauspaksunevien nesteiden heikkouksina on suojausten lisääntynyt paino [76], joka voi nousta paljon liivien kuitujen suuren alan vuoksi, ja lämpötilamuutosten suuri vaikutus nesteiden stabiilisuuteen [76], mikä heikentää nesteiden käyttökelpoisuutta ääriolosuhteissa.



**Kuva 14.** SEM-kuvia 35 p-% SiC-nanopartikkeleita sisältäneellä leikkauspaksunevalla nesteellä impregnoituista Kevlar-kuiduista 18- (a), 100- (b), 500- (c) ja 4000-kertaisella suurennoksella [77].

Liivien yhteensopivuutta nanomateriaalien kanssa, esimerkiksi niiden lisäämistä kuitujen pinnoille, on myös tutkittu. Nanomateriaalien, joiden yksikkökoko on 1–100 nm vähintään yhdessä dimensiossa, pinta-alan ja tilavuuden välinen suhde on erittäin korkea, minkä takia niillä on tyypillisesti korkea energianabsorptiokyky, ja ne eivät lisää rakenteen painoa oleellisesti [76]. Nanomateriaalien etuna ovat niiden käyttötavan monipuolisuus ja korkeat mekaaniset ominaisuudet. Esimerkiksi hiilinanoputkia, joiden laskennallinen murtolujuus on 200 GPa ja kimmokerroin 1 TPa, voidaan liittää tai kasvattaa kuitujen

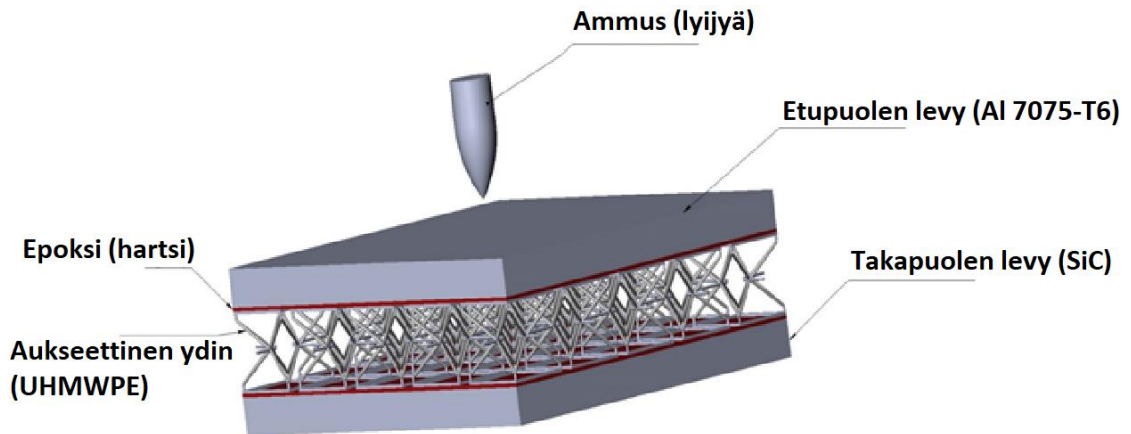
pintoihin, seostaa leikkauspaksuneviin nesteisiin ja käyttää komposiittirakenteissa lujitteina [76]. Nanomateriaalien tyypillisiä ongelmia ovat niiden heikko adheesio liiveissä käytettyihin kuituihin, minkä takia yleensä vaaditaan erillinen adheesiokerros, ja nanopartikkelien jakaminen homogeenisesti matriisimateriaaliin, jotta partikkelit voivat vaikuttaa koko matriisin alalla [76]. Käytettäessä hiilinanoputkia leikkauspaksunevassa nesteessä tai grafeenikerroksia on homogeeninen jakaantuminen pienempi ongelma ja näiden kohdalla onkin tärkeämpää löytää optimaalinen partikkelimäärä nesteessä tai grafeenikerrosmäärä. Esimerkiksi korvaamalla luotiliivin 20:stä Kevlar 29 -kerroksesta 10 grafeenilaminaateilla saatiin mallinnuksessa suurinta pääjännitystä ammuksen osuman jälkeen alennettua 81 % liivien kerroksissa [78] ja neljään Kevlar-kerrokseen impregnoidun leikkauspaksunevan nesteen energianabsorptiokyky parani liki kolminkertaiseksi kasvatettaessa piikarbidinanopartikkelien osuutta 15 p-%:sta 35 p-%:iin [77].

#### 4.2.2 Ballististen levyjen kehittyminen

Korkeaenergisten, yleensä kivääreistä ammutuilta luodeilta suojaamiseen käytetään edelleen ballistisia levyjä, mutta yhtenäisen rakenteen sijaan nykyään keskitytään kehittämään komposiittirakenteita. Komposiittirakenteissa on monoliittisiin verrattuna yleensä enemmän valmistukseen liittyviä ongelmia, kuten eri materiaalien liittäminen toisiinsa adheesiokerroksilla ja suurempi tarve materiaaleille rakenteen tuottamiseksi. Niillä on kuitenkin potentiaali olla huomattavasti suojaavampia eri materiaalikerrosten tuomien ominaisuuksien ansiosta. Esimerkiksi 23 kerroksesta koostuvaan 300 x 300 mm ja 700 g painavaan levyyn; jonka kerrokset sisälsivät kumia, leikkauspaksunevaa nestettä, eboniittia, alumiinioksidia sekä Kevlar- ja hiilikuituja; syntyi AK-47 kivääristä nopeudella 838 m/s ammutulla luodilla vain 7,5 mm syvennys sen takaosaan ilman rakenteen hajoamista useankaan osuman jälkeen [79]. Tulosten perusteella levy täyttäisi NIJ standardin version 0101.03 tason III vaatimukset [79], mutta sen käytännöllisyyttä voi rajoittaa valmistuksen kalleus.

Toinen lähestymistapa on pitää levyn rakenne nykyään käytössä olevien tapaisena, mutta muuttaa rakenne yhtenäisestä useaksi pienemmäksi yksiköksi. Mikäli ammus osuu vain yhteen yksikköön, keskittyy ammuksen energia ja täten murtuminen parhaimmassa tapauksessa vain tähän yksikköön, mikä edistää levyn kykyä suojata käyttäjää usealta ammukselta. Levystä voidaan valmistaa modulaarinen, jolloin vaurioituneet yksiköt voidaan vaihtaa helposti ja rakenteen paino kevenee, kun osa painavammasta keeramista korvataan yksiköiden väleihin jäävässä tilassa polymeerillä. [80] Myös levyjen pinnan muotoa voidaan muuttaa tasaisesta sisältämään useita pieniä pyramideja tai

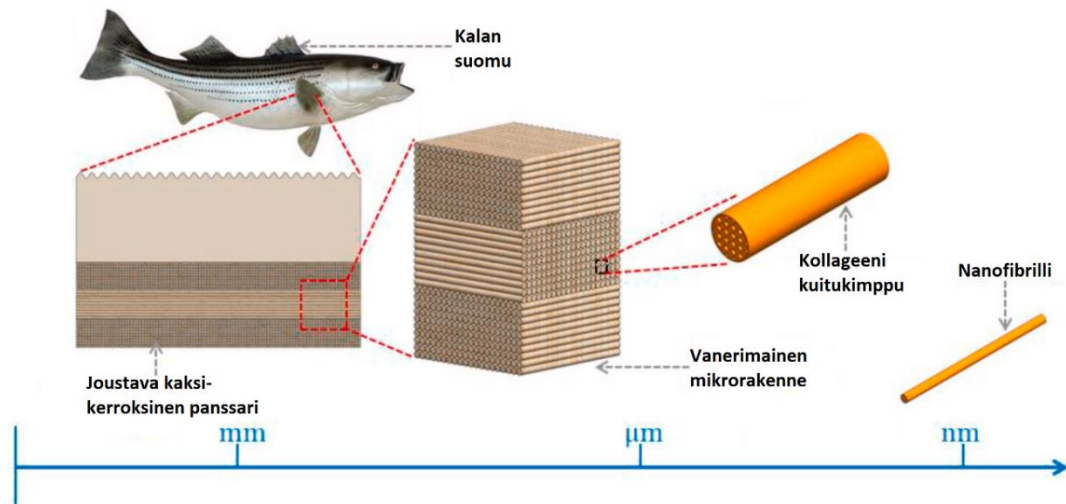
puolipalloja, jotka voivat olla joko koveria tai kuperia. Verrattaessa 8 mm paksua pinta-muotoiltua alumiinioksidilevyjä muotoilemattomaan voidaan muotoilulla saavuttaa parempi kyky levyille absorboida ammuksen kineettistä energiaa. Kun ammuksen kineettinen energia alussa oli 17 kJ, muotoilematon levy laski sen noin 10 kJ:een ja muotoiltu parhaimmillaan alle 7 kJ:een. [81] Muotoilulla saavutettu parannus on pienempi verrattuna levyn paksuuden kaksinkertaistamiseen [81], mutta paksuuden kasvattaminen lisää luonnollisesti levyn painoa muotoilua enemmän.



**Kuva 15.** Havainnekuva aukseettisen suojaimeen rakenteesta, muokattu lähteestä [82].

Kuvassa 15 on esitetty komposiittirakenne, jonka ydin koostuu aukseettisesta materiaalista. Aukseettisilla materiaaleilla on negatiivinen Poissonin vakio eli ballistisessa tilanteessa niiden tilavuus pienenee ammuksen puristuskuorman alaisuudessa [82]. Positiivisen Poissonin vakion materiaaleihin verrattuna aukseettisilla materiaaleilla on tyypillisesti parempi energian absorptiokyky ja kyky vastustaa leikkausjännitystä sekä murtumista [83]. Verrattuna tavanomaiseen yhtenäiseen keraamilevyyn kuluu ammuksen energiasta suuri osa sandwich-rakenteenkin kohdalla kovan ulkokuoren läpäisyyn. Aukseettinen ydin kuitenkin muuntaa ammuksen jäljelle jäänyttä energiaa tehokkaammin elastiseen muodonmuutokseen kuin perinteinen keraamilevy plastiseen, mikä ehkäisee suuresti ammuksen kykyä läpäistä koko sandwich-rakenne. [82] Aukseettinen ydin, joka sisältää paljon vapaata tilavuutta, vaikeuttaa myös ammukselta syntyvien puristusaaltojen kykyä kulkeutua rakenteen lävitse takalevyyn ja sen kautta ihmiskehoon. Verrattaessa kuvan 15 mukaista sandwich-rakennetta monoliittiseen levyyn, joka koostuu vastaavasta alumiinista, liimana toimivasta epoksista ja piikarbidista, pärjäsivät aukseettisen ytimen tuoma rakenne huomattavasti paremmin 7,8 g lyijyammusta vastaan [82]. Sandwich-rakenteessa takalevy vaurioitui ammuksen nopeuden ollessa 600 m/s, kun monoliittisella levyllä vastaava tapahtui jo 400 m/s nopeudella [82].

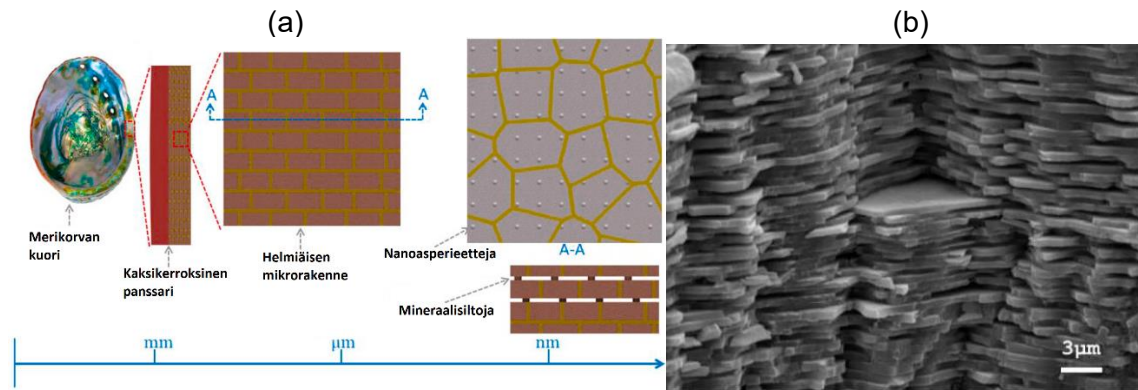
### 4.2.3 Kaikkiin suojaintyyppihin soveltuva kehittyminen



**Kuva 16.** Kalan suomujen rakenne, muokattu lähteestä [84].

Edellä esitettyjen käytössä olevien suojainten modifioinnin lisäksi myös luonnosta on alettu etsimään inspiraatiota henkilösuojaimiin. Luonnossa elää useita eliöitä, joilla on uniikkeja panssarointeja, jotka eivät rajoita elion liikkuvuutta ja tarjoavat erinomaista suojaa elion kokemia uhkia vastaan. Esimerkiksi kuvassa 16 esiteltävien kalojen suomujen rakenne koostuu kovasta mineraalipohjaisesta läpäisyltä suojaavasta kerroksesta, jonka alla on energiaa tehokkaasti hävittävä laminaattikerrasto. Alempi rakenteeltaan vanerilevyä muistuttavan laminaattikerraston kerrokset koostuvat kollageenikuitukimpuista, jotka ovat orientoituneet eri suuntiin kerroksittain. Yksittäinen kimppu voidaan mieltää kuitulujitetuksi komposiitiksi, jossa lujittavina kuituina toimivat nanofibrillit. Kerrosten orientoitumisen vaihtuminen vaikeuttaa huomattavasti säröjen etenemistä rakenteessa ja orientaation takia esimerkiksi rakenteen murtolujuus on samaa kokoluokkaa kaikista suunnista tarkasteltuna. Ylempi mineraalikerros suojaa kalaa tehokkaasti teriltä, kuten saalistajien hampailta ja kynsiltä, hyvän puristuslujuuden ja kovuuden avulla. [84]

Suomujen suojauskykyä parantaa myös se, että suomut ovat paikoittain päällekkäin, ja vastaavaa rakennetta on käytetty hyväksi jo antiikin Rooman ajan metallisissa suomupanssareissa. Modernissa versiossa suomut voivat koostua esimerkiksi piikarbidista, alumiinista ja Kevlarista siten, että alin yhtenäinen Kevlar-kerros pitää suomut paikallaan [85]. Levyjen osittainen päällekkäisyys mahdollistaa iskuenergian jakautumisen tehokkaammin rakenteeseen, minkä suuruutta voidaan säädellä muuttamalla suomujen peittävyttä ja kaltevuutta pohjakerrokseen verrattuna. Nopeudella 878 m/s ammuttuja ammuksia vastaan edellä mainituilla komposiittisuomuilla tarvittiin 12,5 % pienempi massa-pinta-ala verrattuna täysin piikarbideista koostuviin suomuihin. [85]



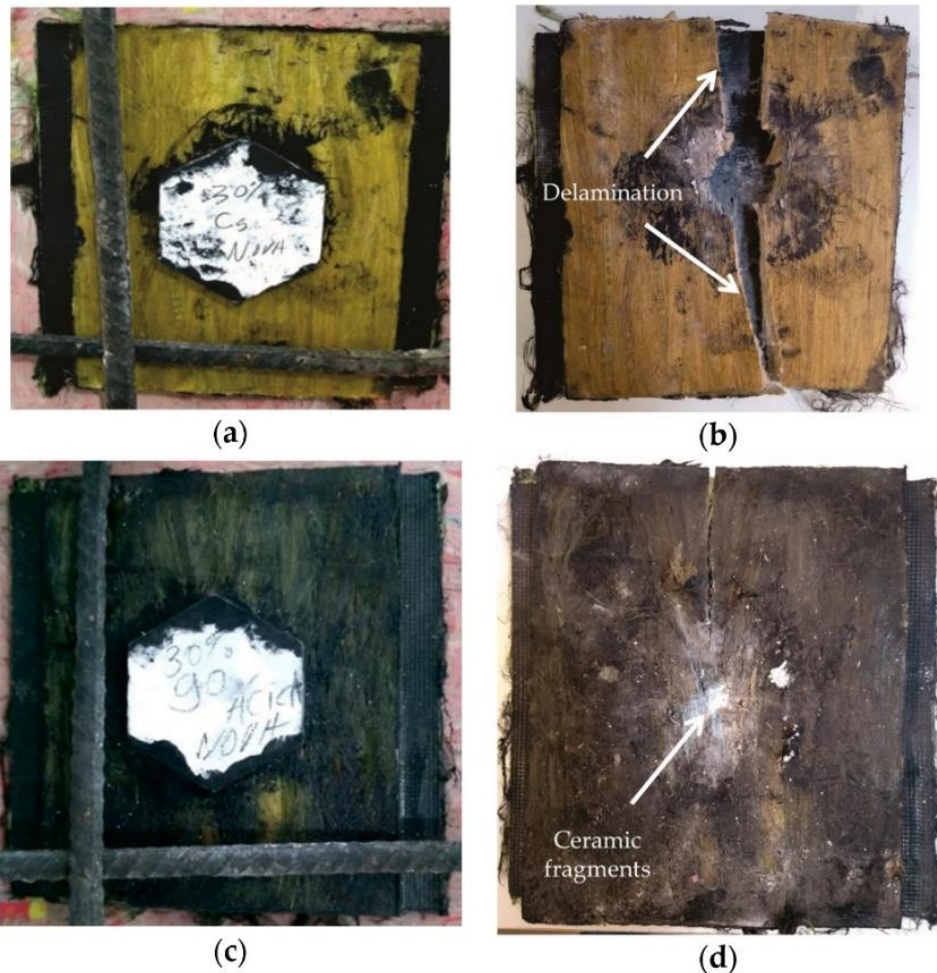
**Kuva 17.** Nilviäisen kuoren rakenne (a), muokattu lähteestä [84], ja elektronimikroskooppikuva helmiäisen murtopinnasta (b) [86].

Vastaavanlaisia rakenteita voidaan kehittää mallintamalla muiden eliöiden panssareita. Joidenkin nilviäisten kuori koostuu kovasta ja hauraasta ulkokerroksesta sekä helmiäiseksi kutsutusta sisäkerroksesta. Tyypillisen yhtenäisen ja iskuilta suojaavan ulkokerroksen sijaan mielenkiintoa on herättänyt helmiäiskerros, jonka aragoniittisista monikulmiolevyistä orgaanisessa matriisissa koostuva rakenne on esitetty kuvassa 17a. Matriisi mahdollistaa levyjen rotaation kuormituksen alaisuudessa, mikä edistää rakenteen murtolujuutta sekä sitkeyttä [84]. Aragoniittilevyt puolestaan ovat tehokkaita estämään säröjen etenemistä vähentämällä särön kärjen jännitysintensiiteettiä levyjen läpäisyn jälkeen. Levyt kykenevät myös lukkiutumaan toisiinsa aaltoilevan rajapinnan avulla, mikä edistää muokkauslujittumista, ja levykerrokset ovat liittyneet toisiinsa mineraalisilloilla (kuva 17b). Levyjen pinoilla olevat nanoasperieetit puristuvat kasaan paikallisen sisenäyksen tapahtuessa, mikä absorboi energiaa. [84] Helmiäisrakenteen innoittamana on esimerkiksi kehitetty levy, joka koostui mineraalisilloilla yhdistetyistä kerroksista boorikarbidilevyjä polyureamatriisissa. Verrattuna vastaavan massatiheyden yhtenäiseen boorikarbidilevyyn, helmiäismäinen komposiittirakenne pärjäs huomattavasti paremmin levyjä ammuttaessa 600 m/s nopeudella kulkeneella ammuksella. Kun yhtenäisen levyn läpäisyn jälkeen luodin jäännösnopeus oli 293 m/s, oli se optimoidulla helmiäisrakenteella vain noin 6 m/s. [87] Tällaisten luonnonrakenteita mallintavien biomimeettisten suojainten ongelmana on kuitenkin niiden monimutkaisten rakenteiden valmistusvaikeudet [3]. Uudenlaiset valmistusmenetelmät, kuten 3D-tulostuksen tai laserikaiverruksen [84], käyttö voi olla vaadittua ja niiden valmistus voi kustantaa enemmän verrattuna nykyään aktiivisesti käytössä oleviin menetelmiin.

Eliöiden rakenteiden lisäksi myös luonnonkuitujen tapaisten luonnonmateriaalien soveltuvuutta ballistisiin suojaimiin on tutkittu niiden ympäristöystävällisyyden ja runsaan saatavuuden takia. Indonesiassa on valmistettu ja koetettu eri luonnonkuiduista, kuten bambusta ja hampusta, valmistettuja komposiitteja, joissa matriisimateriaaleina käytettiin muun muassa polyesteriä ja epoksia. Komposiitit kykenivät parhaimmillaan täyttämään



NIJ standardin 0101.06 tasojen IIA ja II vaatimukset, mikä osoittaa niiden soveltuvuuden käytettäväksi pieniltä käsiaseilta suojaavissa henkilösuojaimissa. Luonnonkuidut voivat olla joillain alueilla erittäin kustannustehokas ratkaisu ja henkilösuojaimissa hyödyntämisen kautta voidaan tavallisesti jätteeksi päätyville ananaksen lehtien tapaisille luonnonkuiduille saada uusia käyttötarkoituksia. [81] Kasviperäisten kuitujen lisäksi tulivuoren magmasta syntyvästä basaltista on tehty kuituja, joiden on todettu olevan käyttökelpoisia komposiittisuojaimissa kuitujen hyvän iskujen kestokyvyn ansiosta [76]. Kustannustehokkaana ratkaisuna luonnonkuitujen toimivuutta yhdessä nanomateriaalien kanssa on myös tutkittu. 30 p-% grafeenioksidilla päällystettyjä curaua-kasvin kuituja sisältänyt epoksikomposiitti pärjasi NIJ standardin tason III testissä yhtä hyvin kuin vastaavan paksuinen Kevlar-kerros, kun molemmat toimivat komposiittilevyn toisena kerroksena. Verrattuna vastaavaan päällystämättömiä kuituja sisältäneeseen komposiittiin, ei päällystetty versio haljennut sitä ammuttaessa 7,62 mm luodilla (kuva 18). [89]



**Kuva 18.** Kaksikerroksinen levy ennen (a, c) ja jälkeen (b, d) ballistisen testin: yhdessä epoksikomposiittikerroksessa 30 p-% päällystämättömiä (a, b) ja toisessa 30 p-% grafeenioksidipäällystettyjä (c, d) curaua-kuituja [89].

Uusilta ja vaarallisemmilta aseilta suojautumista varten on henkilösuojainten kehitystyössä alettu tutkimaan montaa eri mahdollista ratkaisua. Pitkään käytössä olleet kuitu- ja keraamimateriaalit eivät tulevaisuudessa todennäköisesti yksinään kykene suojaamaan käyttäjää luotettavasti ja yksinkertaisena ratkaisuna nykysuojainten liivien kerrosmäärän tai levyjen paksuuden kasvattaminen rajoittaisi liikkuvuutta liikaa. Kehitystyössä on päädytty tutkimaan komposiittirakenteita ja nykyisten kuitumateriaalien päällystämistä esimerkiksi nanomateriaaleilla. Näille kehityssuunnille tyypillisiä piirteitä ovat suojaimissa käytettyjen eri ryhmiin kuuluvien materiaalien määrän kasvu ja siirtyminen käyttämään pienempiä rakenneosia. Kustannustehokkuutta pyritään myös parantamaan, varsinkin uusien ratkaisujen monimutkaisten rakenteiden vuoksi, ja tutkimusta on myös tehty edullisten luonnonkuitujen käyttökelpoisuudesta. Kaikkien uusien ratkaisujen kehitystyön taustalla toimii suojaimille asetetut vaativat standardit, joiden läpäisyllä osoitetaan suojaimen kyky pelastaa ihmishenkiä. Aseiden vaarallisuuden kasvaessa myös standardien vaatimuksia kiristetään vastaamaan niitä paremmin, mikä edistää suojainten suojaintason pysymistä korkeana.

## 5. YHTEENVETO

Ballistissa henkilösuojaimissa tapahtuneita muutoksia ajan kuluessa voidaan pitkälti selittää uusien suojaimiin soveltuvien materiaalien ja materiaaliyhdistelmien kehittymisellä sekä suojaimiin soveltuvien materiaalien kustannustehokkuuksien että käytössä koettavien uhkien muutoksella. Ensimmäiset ruutiaseet olivat läpäisykyvyiltään tehottomia ja metalliset panssarit suojasivat käyttäjää niiden lisäksi hyvin samaan aikaan käytössä olleilta miekoilta ja jousilta. Läpäisytehostuksen ja tarkkuuden kasvaessa ruutiaseet syrjäyttivät miekkojen tapaisten aseiden roolin sotilaiden varustuksessa ja tekivät metallipanssareista lähes käyttökeltottomia. 1900-luvulla uusien aseiden, kuten kranaattien, ilmestymisen myötä todettiin sirpaleilta suojautumisen olevan järkevää henkien pelastamiseksi ja päädyttiin kehittämään kuitupohjaisia liivejä. Kevlarin keksimisen jälkeen luotiliivien rakenne on vakiintunut monikerroksiseksi kuitukerrastoksi ja ne kykenevät suojaamaan tehokkaasti myös pienempien käsiaseiden luodeilta sirpaleiden lisäksi. Kevlarin ohella suojainten kuitumateriaaleina käytetään nykyään myös UHMWPE-kuituja ja ballistisissa levyissä on siirrytty käyttämään pääosin keraameja tarjoamaan suojaa korkeenergisemmiltä ammuksilta. Suojaimissa ei kuitenkaan ole tapahtunut rakenteen tai käytettyjen materiaalien puolesta radikaaleja muutoksia viime vuosikymmeninä, koska nykyiset ratkaisut kykenevät vastaamaan nykyisiin uhkiin vähintään tyydyttävällä tasolla.

Keskiajan metallipanssarien aikana pyrittiin keho peittämään kokonaan, jotta ritarin taistelukyky pysyisi korkeana pitkään miekaniskun tapaisia uhkia vastaan suojaamalla keho niiltä tehokkaasti suojaavilla metallilevyillä. Siirryttäessä käyttämään sirpaleliivejä oli suuri paino ja peittävyys alussa niin suuri este taistelukenttien vaatimalle nopealle liikkumiselle, että useita liivityyppejä ei otettu ollenkaan käyttöön. Sopivien materiaalien löytymisen jälkeen liivien painot saatiin halutun alhaiselle tasolle, mikä edesauttoi niiden laaja-alaista käyttöönottoa. Aseiden vaarallisuuden kasvaessa liivien paino kasvoi niihin lisättyjen ballististen levyjen ja liivien kuitukerrosten lisäyksen kautta: liivien paino nousi muutamasta kilosta lähemmäksi 20 kg:aa. Viime vuosikymmenenä on liikkuvuuden taas todettu olevan tärkeämmässä roolissa, minkä takia uusimmista liiveistä valmistetaan edeltäjiään kevyempiä. Liivit ovat kuitenkin pitkään olleet modulaarisia, koska esimerkiksi oltaessa pitkiä aikoja samalla alueella vartiointitehtävissä korkeampi suojaavuus on liikkuvuutta tärkeämpää. Modulaarisuus mahdollistaa kevyempien perusliivien käytön ja eri tasolta suojaavia uhkia vastaan tarkoitettujen lisäosien liittämisen perusliiviin tarpeen vaatiessa, mikä vähentää kustannuksia ja tarpeen usean eri liivityypin kehittämiseksi.

Aseiden vahingon aiheuttamisen kyky kehittyä jatkuvasti, jonka takia tarve kehittää paremmin suojaavia suojaimia pysyy jatkuvasti korkeana. Henkilösuojausten kohdalla kehitys keskittyy uusien materiaaliyhdistelmien, kuten ballististen levyjen kohdalla aukseettisten materiaalien, tutkimiseen ja jo käytössä olevien materiaalien muokkaamiseen, esimerkiksi kuitujen päällystämiseen nanomateriaaleilla. Monet keinot on jo todettu käytökelpoisiksi ja suojaimiin soveltuviksi, mutta ongelmaksi ovat nousseet joidenkin osalla korkeat kustannukset ja toisten kohdalla puutteet käyttäjien asettamiin vaatimuksiin vastattaessa. Biomimeettinen helmiäisrakennetta mallintava levyrakenne on kyllä perinteistä yhtenäistä levyä tehokkaampi suojaamaan käyttäjää ammuksilta, mutta sen monimutkainen rakenne kasvattaa valmistuskustannukset paljon perinteistä levyä korkeammiksi. Kehitystyössä suuri merkitys annetaan standardeissa asetetuille ja käyttäjien itse asettamille vaatimuksille. Suojaimet on jo pitkään naamioitu käyttöympäristön kasvillisuutta muistuttaviksi, koska paras suoja uhilta on olla tulematta havaituksi. Joillain alueilla voidaan kokea äärimmäisiä lämpötiloja, jolloin materiaaliratkaisujen terminen stabiilisuus on ehdoton vaatimus. Poliisit kokevat työssään eri tason uhkia kuin sotilaat, jolloin he eivät tarvitse yhtä tehokkaita ja raskaita suojaimia. Nykyisistä ruutipohjaisista aseista siirryttäessä tulevaisuudessa uudentyypisiin aseisiin syntyy todennäköisesti tarve uudentyyppisille suojaintyypeille ja nykyään käytössä olevat muuttuvat tehottomiksi. Suojausten kehitystyö tulee olemaan oleellisessa roolissa ihmishenkien pelastamisessa niin kauan, kun uusia konflikteja syntyy ja tehokkaampien aseiden kehitystyö jatkuu.

# LÄHTEET

- [1] P. Mansoor, armour, Encyclopaedia Britannica, 1998, päivitetty 16.5.2019. Saatavissa (viitattu 14.2.2023): <https://www.britannica.com/topic/armour-protective-clothing>
- [2] R.C. Laible, Ballistic Materials and Penetration Mechanics, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1980, 296 p.
- [3] R. Yadav, M. Naebe, X. Wang, B. Kandasubramanian, Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems, RSC Advances, Vol.6, No.116, Dec 2016, pp.115145–115174.
- [4] D. Nicolle, Medieval Warfare Source Book: Warfare in Western Christendom, Arms and Armour Press, London, 1996, 320 p.
- [5] M. Puhakka, haarniska ja kypärä; kapalin, Turun museokeskus, Finna, esinekoelma. Saatavissa (viitattu 14.2.2023): <https://www.finna.fi/Record/tmk.161010803792100?imgid=9>
- [6] Suomen kansallismuseo, haarniska; Akseli Kurjen haarniska, Finna, historialliset kokoelmat. Saatavissa (viitattu 14.2.2023): <https://www.finna.fi/Record/museovirasto.4AF4A025A21020FFEE70C8212B99D0E3?imgid=1>
- [7] Encyclopedia Britannica, gunpowder, 1998, päivitetty 31.8.2021. Saatavissa (viitattu 14.2.2023): <https://www.britannica.com/technology/gunpowder>
- [8] P. Bienaimé, A. Rosen, The World's Largest Armies From Antiquity To The Present, Business Insider, 2014, päivitetty 27.11.2014. Saatavissa (viitattu 28.2.2023): <https://www.businessinsider.com/this-ambitious-graphic-shows-the-size-of-standing-armies-from-antiquity-to-the-present-2014-11?r=US&IR=T>
- [9] Encyclopaedia Britannica, grenade, 1998, päivitetty 10.2.2023. Saatavissa (viitattu 14.2.2023): <https://www.britannica.com/technology/grenade>
- [10] Cultural Heritage Administration of the Republic of Korea, Cotton Armor, National Registered Cultural Heritage. Saatavissa (viitattu 14.2.2023): [http://english.cha.go.kr/chaen/search/selectGeneralSearchDetail.do?mn=EN\\_02\\_02&sCcebKdcd=79&ccebAsno=04590000&sCcebCtcd=11&pageIndex=1&region=&canAsset=&ccebPcd1=&searchWrd=COTTON+ARMOR&startNum=&endNum=&stCcebAsdt=&enCcebAsdt=&cancelled=&ccebKdcd=&ccebCtcd=](http://english.cha.go.kr/chaen/search/selectGeneralSearchDetail.do?mn=EN_02_02&sCcebKdcd=79&ccebAsno=04590000&sCcebCtcd=11&pageIndex=1&region=&canAsset=&ccebPcd1=&searchWrd=COTTON+ARMOR&startNum=&endNum=&stCcebAsdt=&enCcebAsdt=&cancelled=&ccebKdcd=&ccebCtcd=)
- [11] S. Łotysz, Tailored to the Times: The Story of Casimir Zeglen's Silk Bullet-Proof Vest, Arms & Armour, Vol.11, No.2, Oct 2014, pp. 164–186.
- [12] D. Payne, Body Armour For The Western Front In The Great War, The Western Front Association, 2008, päivitetty 23.12.2008. Saatavissa (viitattu 15.2.2023): <https://web.archive.org/web/20100323074030/http://www.westernfrontassociation.com/great-war-on-land/73-weapons-equipment-uniforms/879-body-armour.html>

- [13] Imperial War Museums, Body Armour, Chemico Body Shield: British. Saatavissa (viitattu 20.2.2023): <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30016199>
- [14] S. Dunstan, Flak Jackets: 20th Century Military Body Armour, Osprey Publishing Ltd, London, 1984, 40 p.
- [15] Imperial War Museums, Boddy Armour (Sappenpanzer): German. Saatavissa (viitattu 22.2.2023): <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30110403>
- [16] The Smithsonian National Museum of African American History & Culture, French Adrian Helmet. Saatavissa (viitattu 22.2.2023): [https://nmaahc.si.edu/object/nmaahc\\_2017.111.9](https://nmaahc.si.edu/object/nmaahc_2017.111.9)
- [17] S.C. Tucker, Instruments of War – Weapons and Technologies That Have Changed History, ABC-CLIO, Santa Barbara, 2015, 454 p.
- [18] Imperial War Museums, Steel Helmet, M-1: USA. Saatavissa (viitattu 24.2.2023): <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30100907>
- [19] US 1465767A, Bulletproof armor. (L. Krause) US 618229A, 10.2.1923. Julk. 21.8.1923. 3 p. Saatavissa (viitattu 20.2.2023): <https://patents.google.com/patent/US1465767>
- [20] US 1466669A, Shield. (M. Martinson) US 627066A, 23.3.1923. Julk. 4.9.1923. 2 p. Saatavissa (viitattu 20.2.2023): <https://patents.google.com/patent/US1466669A/en>
- [21] C.E. Howard, This Vest May Save Your Life! U.S. Army Body Armor from World War II to Present, Veritas, Vol.16. No.1, 2020, pp. 21–30.
- [22] Imperial War Museums, Body Armour, M-1 Flyer's Vest & M-3 Apron: US Army Air Force. Saatavissa (viitattu 21.2.2023): <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30106963>
- [23] Imperial War Museums, Body Armour, M69 Fragmentation Vest: US. Saatavissa (viitattu 21.2.2023): <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30014209>
- [24] P. A. Ndiaye, Nylon and Bombs: DuPont and the March of Modern America, The John Hopkins University Press, Baltimore, 2007, 289 p.
- [25] B. Pushpa, S. Pushpa, Ballistic protective clothing: An overview, Indian Journal of Fibre & Textile Research, Vol.22, Dec 1997, pp. 274–291.
- [26] M.T. Foley, Sergeant John M. Russi demonstrates the new bullet-proof vest – Tallahassee, Florida, Florida Memory – State Library and Archives of Florida, 1977. Saatavissa (viitattu 28.2.2023): <https://www.floridamemory.com/items/show/134027>
- [27] Imperial War Museum, Body Armour, PASGT (US). Saatavissa (viitattu 28.2.2023): <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30013077>
- [28] Imperial War Museum, Helmet, PASGT: US. Saatavissa: (viitattu 1.3.2023): <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30101205>

- [29] C.Y. Tham, V.B.C. Tan, H.P. Lee, Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.35, No.5, May 2008, pp. 304–318.
- [30] F. Samil, N.V. David, An Ergonomic Study of a Conventional Ballistic Helmet, *Procedia Engineering*, Vol.41, 2012, pp. 1660–1666.
- [31] M. Cox, Army Eyes Narrower Body Armor to Shave Off Weight, *Military.com*, 2018, päivitetty 9.8.2018. Saatavissa (viitattu 30.3.2023): <https://www.military.com/kitup/2018/10/09/army-eyes-narrower-body-armor-shave-weight.html>
- [32] Maavoimat, Jalkaväen taistelijoille uudet suojaliivit, 2019, päivitetty 29.8.2019. Saatavissa (viitattu 30.3.2023): <https://maavoimat.fi/-/jalkavaen-taistelijoille-uudet-suojaliivit>
- [33] R. Jacquette, DLA Clothing & Textiles Ballistic Helmets, USA Defense Logistics Agency, 2021, päivitetty 18.11.2021. Saatavissa (viitattu 2.3.2023): [https://www.dla.mil/Portals/104/Documents/TroopSupport/Clo-Tex/2021%20JAPBI/Ballistic%20Helmets.pdf?ver=fiwt\\_05tLaT-fojmK4ZhiDQ%3D%3D](https://www.dla.mil/Portals/104/Documents/TroopSupport/Clo-Tex/2021%20JAPBI/Ballistic%20Helmets.pdf?ver=fiwt_05tLaT-fojmK4ZhiDQ%3D%3D)
- [34] U.S. Army Program Executive Office Soldier, Interceptor Body Armor (IBA), 2006, päivitetty 8.2006. Saatavissa (viitattu 5.3.2023): [https://web.archive.org/web/20070625011019/https://peosoldier.army.mil/factsheets/SEQ\\_SSV\\_IBA.pdf](https://web.archive.org/web/20070625011019/https://peosoldier.army.mil/factsheets/SEQ_SSV_IBA.pdf)
- [35] R.A. Lane, High Performance Fibers for Personnel and Vehicle Armor Systems – Putting a Stop to Current and Future Threats, *AMPTIAC Quarterly*, Vol.9, No.2, 2005, pp. 3–9.
- [36] Marine Corps Systems Command, Enhanced combat helmet heads to production, 2013, päivitetty 30.7.2013. Saatavissa (viitattu 5.3.2023): <https://web.archive.org/web/20131207124349/http://www.marcorsyscom.marines.mil/News/PressReleaseArticleDisplay/tabid/8007/Article/147086/enhanced-combat-helmet-heads-to-production.aspx>
- [37] R. Pickrell, US Army's new helmets and body armor will make soldiers lighter, faster and even harder to kill, *Business Insider*, 2019, päivitetty 7.5.2019. Saatavissa (viitattu 6.3.2023): <https://www.businessinsider.com/us-army-new-helmets-body-armor-will-make-soldiers-harder-to-kill-2019-3?r=US&IR=T>
- [38] P. Kędzierski, A. Morka, A comprehensive approach to the modeling and simulation of ballistic textiles, *Composite Structures*, Vol. 292, July 2022, 115643.
- [39] I.G. Crouch, Body armor – New materials, new systems, *Defence Technology*, Vol.15, No.3, June 2019, pp. 241–253.
- [40] L. Kim, Female Body Armor Demonstration, Travis Air Force Base, 2021, päivitetty 1.4.2021. Saatavissa (viitattu 6.3.2023): <https://www.travis.af.mil/News/Photos/igphoto/2002621929/>
- [41] P.J. Hazell, *Armour: Materials, Theory, and Design*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2016, 360 p.

- [42] US 3509833A, Hard faced ceramic and plastic armor. (R.L. Cook) US 26876563A, 28.3.1963. Julk. 5.5.1970. 5 p. Saatavissa (viitattu 15.3.2023): <https://patents.google.com/patent/US3509833A/en>
- [43] M. Fejdyś, K. Kośła, A. Kucharska-Jastrzābek, M. Łandwijt, Influence of ceramic properties on the ballistic performance of the hybrid ceramic-multi-layered UHMWPE composite armour, *Journal of the Australian Ceramic Society*, Vol.57, Oct 2020, pp. 149–161.
- [44] L. Cannon, Behind Armour Blunt Trauma – an emerging problem, *BMJ Military Health*, Vol.147, Feb 2001, pp. 87–96.
- [45] M. Jawaid, M. Thariq, *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, Woodhead Publishing, Duxford, 2018, 364 p.
- [46] S.E.M. Selke, J.D. Culter, R.A. Auras, M. Rabnawaz, *Plastics Packaging – Properties, Processing, Applications, and Regulations (4<sup>th</sup> Edition)*, Carl Hanser Verlag, München, 2021, 474 p.
- [47] S.M. Stuart, *Handbook of Composite Reinforcement*, VCH Publishers, Palo Alto, 1993, 693 p.
- [48] M. Miao, J.H. Xin, *Engineering of High-Performance Textiles*, Woodhead Publishing, Duxford, 2018, 527 p.
- [49] D. Tompkins, *Body Armor Safety Initiative*, National Institute of Justice, 2006, päivitetty 1.1.2006. Saatavissa (viitattu 8.3.2023): <https://nij.ojp.gov/topics/articles/body-armor-safety-initiative>
- [50] J.S. Bybee, *United States Court Of Appeals For The Ninth Circuit, Pinnacle Armor, Inc. v. United States No. 08-16209, D.C. No. 1:07-CV-01655-LJO-DLB*, United States Court Of Appeals For The Ninth Circuit, 2011.
- [51] W.D. Callister, Jr., D.G. Rethwisch, *Callister’s Materials Science and Engineering (10<sup>th</sup> Edition)*, Wiley-Blackwell, Hoboken, 6.5.2020, 944 p.
- [52] C.L. Yaws, *Yaws’ Handbook of Properties of the Chemical Elements*, Knovel, Beaumont, 2011, 588 p.
- [53] V. Rudnev, G.A. Fett, S.L. Semiatin, *ASM Handbook Volume 4C – Induction Heating and Heat Treatment*, ASM International, 2014, 800 p.
- [54] P.J. Blau, *ASM Handbook, Volume 18 – Friction, Lubrication, and Wear Technology*, ASM International, 1992, 896 p.
- [55] G.E. Totten, *ASM Handbook Volume 4E – Heat Treating of Nonferrous Alloys*, ASM International, 2016, 700 p.
- [56] M. Kutz, *Mechanical Engineer’s Handbook, Volume 1 – Materials and Engineering Mechanics (4<sup>th</sup> Edition)*, John Wiley & Sons, 2015, 1025 p.
- [57] S. Ryan, H.J. Li, M. Edgerton, D. Gallardy, S.J. Cimpoeru, *Ballistic Evaluation of an Australian ultra-high hardness steel*, *Proceedings of 29<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics*, DEStech Publications, Inc., Vol.29, May 2016, pp. 1773–1778.



- [58] D. Luo, Y. Wang, F. Wang, H. Cheng, B. Zhang, Y. Zhu, The influence of metal cover plates on ballistic performance of silicon carbide subjected to large-scale tungsten projectile, *Materials & Design*, Vol.191, Jun 2020, 108659.
- [59] M.J. Pawar, A. Patnaik, S.K. Biswas, U. Pandel, I.K. Bhat, S. Chatterjee, A.K. Mukhopadhyay, R. Banerjee, B.P. Babu, Comparison of ballistic performances of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN ceramics, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.98, Dec 2016, pp. 42–51.
- [60] T. Gentieu, Development of filled polymers for the replacement of ceramics used as ballistic protection layer, Université de Bordeaux, Oxford Brookes University, 2018.
- [61] Ballistic Resistance of Body Armor NIJ, National Institute of Justice, NIJ Standard-0101.06, Washington, DC, 2008, 75 p.
- [62] M. Çakır, Penetration of Metallic Plates by Kinetic Energy Projectiles, technical report, Middle East Technical University, Ankara, 2014, 35 p.
- [63] H.L. Rao, Ammo Basics: Common Bullet Types, NRA Women, 2022, päivitetty 13.1.2022. Saatavissa (viitattu 19.3.2023): <https://www.nrawomen.com/content/ammo-basics-common-bullet-types/>
- [64] Encyclopaedia Britannica, Armour-piercing projectiles, 1998, päivitetty 4.4.2023. Saatavissa (viitattu 6.4.2023): <https://www.britannica.com/technology/armour-piercing-projectile>
- [65] A. Jahkonen, Kuituvahvistetut ballistiset henkilösuojavarusteet ja niiden vaatimukset, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Kuitu- ja tekstiilitekniikan koulutusohjelma, Tampere, 2013, 69 s.
- [66] M.E. Greene, J. Horlick, D.A. Longhurst, L.L. Miller, M. O’Shea, D. Otterson, C. Robinson, D.A. Stoe, R.A. Sundstrom, The Next Revision of the NIJ Performance Standard for Ballistic Resistance of Body Armor, NIJ Standard 0101.07: Changes to Test Methods and Test Threats, National Institute of Justice, 2018, päivitetty 30.9.2018. Saatavissa (viitattu 17.3.2023): <https://nij.ojp.gov/topics/articles/next-revision-nij-performance-standard-ballistic-resistance-body-armor-nij-standard>
- [67] J. Chin, A. Forster, C. Clerici, L. Sung, M. Oudina, K. Rice, Temperature and humidity aging of poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole) fibers: Chemical and physical characterization, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.92, No.7, Jul 2007, pp. 1234–1246.
- [68] K. Tamargo-Martínez, S. Villar-Rodil, J.I. Paredes, M.A. Montes-Morán, A. Martínez-Alonso, J.M.D. Tascón, Thermal decomposition of poly(p-phenylene benzobisoxazole) fibres: monitoring the chemical and nanostructural changes by Raman spectroscopy and scanning probe microscopy, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.86, No.2, Nov 2004, pp. 263–268.
- [69] North Atlantic Treaty Organization, NATO Standardization Office, päivitetty 9.6.2017. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): [https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics\\_124879.htm?selectedLocale=en](https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_124879.htm?selectedLocale=en)

- [70] Non-Ballistic Test Methods and Evaluation Criteria for Combat Helmets, NATO Standardization Office, STANAG 2902, Brussels, 2019, 114 p.
- [71] NATO Standardization Office, Search Standards – STANAG 2920. Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://nso.nato.int/nso/nsdd/main/standards?search=2920>
- [72] C.E. Coltman, B.R. Brisbane, J.R. Steele, Bra-body armour integration, breast discomfort and breast injury associated with wearing body armour, *Ergonomics*, Vol.64, No.12, Aug 2021, pp. 1623–1633.
- [73] K. Steinke, H.A. Sodano, Improved inter-yarn friction and ballistic impact performance of zinc oxide nanowire coated ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), *Polymer*, Vol.231, Sep 2021, 124125.
- [74] D. Weerasinghe, M.R. Bambach, D. Mohotti, H. Wang, P.J. Hazell, High-Velocity projectile impact response of rubber-coated aramid Twaron fabrics, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.229, Sep 2022, 107515.
- [75] Y.J. Xu, H. Zhang, G.Y. Huang, Ballistic performance of B4C/STF/Twaron composite fabric, *Composite Structures*, Vol.279, Jan 2022, 114754.
- [76] S. Wu, P. Sikdar, G.S. Bhat, Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches, *Defence Technology*, Vol.21, March 2023, pp. 33–61.
- [77] A. Khodadadi, G. Liaghat, S. Vahid, A.R. Sabet, H. Hadavinia, Ballistic performance of Kevlar fabric impregnated with nanosilica/PEG shear thickening fluid, *Composites Part B: Engineering*, Vol.162, April 2019, pp. 643–652.
- [78] S. Vignesh, R. Surendran, T. Sekar, B. Rajeswari, Ballistic impact analysis of graphene nanosheets reinforced kevlar-29, *Materials Today: Proceedings*, Vol.45, No.2, 2021, pp. 788–793.
- [79] A.E. Jassem, A.J. Jawad, A.O. Samarmad, A.F. Hamzah, Numerical and Experimental Study of Multi-layer Armors for Personal Protection, *Physics and Chemistry of Solid State*, Vol.23, No.3, Aug 2022, pp. 550–558.
- [80] US 8402876B2, Ballistic lightweight ceramic armor with cross-pellets. (H. Cohen) US 13/094,851, 27.4.2011. Julk. 26.3.2013. 14 pp. Saatavissa (viitattu 21.3.2023): <https://patents.google.com/patent/US8402876/en>
- [81] A. Morka, B. Jackowska, T. Niezgodna, Numerical Study of the Shape Effect in the Ceramic Based Ballistic Panels, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol.16, No.4, 2009, pp. 539–548.
- [82] I.A. Shah, R. Khan, S.S.R. Kolor, M. Petru, S. Badshah, S. Ahmad, M. Amjad, Finite Element Analysis of the Ballistic Impact on Auxetic Sandwich Composite Human Body Armor, *Materials*, Vol.15, No.6, Mar 2022, 2064.
- [83] S. Yang, C. Qi, D. Wang, R. Gao, H. Hu, J. Shu, A Comparative Study of Ballistic Resistance of Sandwich Panels with Aluminum Foam and Auxetic Honeycomb Cores, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol.5, Jun 2013
- [84] A. Ghazlan, T. Ngo, P. Tan, Y.M. Xie, P. Tran, M. Donough, Inspiration from Nature's body armours – A review of biological and bioinspired composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol.205, Jan 2021, 108513.

- [85] P. Liu, D. Zhu, Y. Yao, J. Wang, T.Q. Bui, Numerical simulation of ballistic impact behaviour of bio-inspired scale-like protection system, *Materials and Design*, Vol.99, Jun 2016, pp. 201–210.
- [86] F. Heinemann, Datei:Nacre fracture.jpg, Wikipedia, 2007, päivitetty 14.12.2007. Saatavissa (viitattu 21.3.2023): [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Nacre\\_fracture.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Nacre_fracture.jpg)
- [87] M. Grujicic, S. Ramaswami, J. Snipes, Nacre-like ceramic/polymer laminated composite for use in body-armor applications, *Materials Science*, Vol. 3, No.1, Jan 2016, pp. 83–113.
- [88] I.R. Aminudin, S. Aritonang, Potential of natural fiber composite materials for bulletproof vest applications, *Defense and Security Studies*, Vol.4, Jan 2023, pp. 8–14.
- [89] U.O. Costa, L.F.C. Nascimento, J.M. Garcia, S.N. Monteiro, F.S. da Luz, W.A. Pinheiro, F.C.G. Filho, Effect of Graphene Oxide Coating on Natural Fiber Composite for Multilayered Ballistic Armor, *Polymers*, Vol.11, No.8, 2019, 1356.