

Paisutetun polypropeenin (EPP) soveltuvuus kehon suojaus komponenteissa

Paisutetun polypropeenin iskua vaimentavat ominaisuudet

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK), Prosessi- ja materiaalitekniikka

2022

Matias Aaltonen

Tiivistelmä

Tekijä(t) Aaltonen, Matias	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika 2022
	Sivumäärä 49	
Työn nimi Paisutetun polypropeenin (EPP) soveltuvuus kehon suojaus komponenteissa Paisutetun polypropeenin iskua vaimentavat ominaisuudet		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), Prosessi- ja materiaalitekniikka, Polymeeri- ja kuitutekniikka		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Mauri Nylund, Toimitusjohtaja, iBP-Tech oy		
Tiivistelmä <p>Työssä selvitettiin paisutetun polypropeenin ominaisuudet, valmistustekniikka ja soveltuminen kehon suojaus komponenttiin ominaisuuksiltaan. Lisäksi tehtiin selvitys EPP tuotteen kustannuksien muodostumisesta ja markkinoista. Materiaalin pohjatietoja oli vain ennalta tiedossa ajoneuvo- ja pakkausteollisuudesta, nämä tiedot eivät suoraan riittäneet materiaalin soveltuvuuden varmistamiseksi kehon suojauksessa. Soveltuvuuden tutkiminen toteutettiin syvemmillä kirjallisuuskatsauksella ja kokeellisilla tutkimuksilla. Tutkimuksen mittaukset tehtiin jääkiekkohousujen lonkkasuojus prototyypeille ampumalla niihin jääkiekko. Kiekon iskua mitattiin kiihtyvyyssantureilla.</p> <p>Mittaus tuloksien ymmärtämiseksi tarvittiin tehdä lisäselvitys suojausmekanismeista. Tietoa suojausmekanismin toimivuudesta selvitettiin kirjallisuudesta, sekä omilla pohdinnoilla.</p> <p>Mittaus tuloksista saadaan selville suojuksen iskua jakavan ja iskua vaimentavan ominaisuuden toimivuus. Vertailemalla prototyyppien tuloksia nykyisten suojuksien tuloksiin, voidaan tehdä johtopäätökset EPP soveltuvuudesta suojaus komponentteihin.</p> <p>Paisutettu polypropeeni osoittautuu erittäin hyväksi materiaaliksi suojuksiin niin ominaisuuksiltaan kuin kustannus kuluiltaan. EPP:n hyödyntäminen vaatii ymmärrystä suojausmekanismeista ja materiaalin ominaisuuksista. Suunniteltaessa suojusta, jossa aiotaan hyödyntää EPP:tä, tulee ottaa huomioon materiaalin tiheydet sekä suojaattavan kohteen vaatimukset ja ympäristön vaikutukset.</p>		
Asiasanat Paisutettu polypropeeni, EPP, Suojus, Suojavaruste, Iskunvaimennus, Jääkiekko, Suojausmekanismi		

Abstract

Author(s) Aaltonen, Matias	Type of Publication Thesis, UAS Number of Pages 49	Published 2022
Title of Publication Suitability of expanded polypropylene (EPP) in body protection components Impact absorption properties of expanded polypropylene		
Degree and field of study Bachelor of Engineering, Process and material Engineering, polymer and fiber technology		
Name, title and organisation of the client Mauri Nylund, Chief executive officer, iBP-Tech Ltd		
Abstract <p>The objective of the research was to find out properties of expanded polypropylene and if it's useable material in protective gears, also process technology and manufacturing expenses of EPP was researched. Basic information of EPP's knowledge was only known from automotive and packaging industry, this available knowledge wasn't enough to be convinced that EPP would perform in protective gears. More knowledge of the material was gathered from the literature and by an experimental study. Study was executed with a pneumatic cannon that shoots an ice hockey puck to the prototype of a hip protector. Impact of the puck was measured with acceleration sensors.</p> <p>Further clarification of protection mechanisms was required to understand the results from the measurements. This information was gathered from the literature and company's own conclusions.</p> <p>Measurement results shows how protective components are capable to distribute and absorb the impact energy. To make conclusion if EPP is useable material, it is needed to compare results from prototype protectives to protectives being currently used in the hockey pants.</p> <p>Results of the study shows that EPP is performing very well in protective gears. Expenses of EPP products are at competitive level. Utilization of EPP requires knowledge of protection mechanism and material properties. The density of EPP needs to be calculated, when designing a protective where EPP is to be used. Requirements of protected object and environmental impact are also mandatory factors to be take in account.</p>		
Keywords Expanded polypropylene, EPP, Protector, Protective gear, impact absorption, Ice hockey, Protection mechanism		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Paisutettu polypropeeni EPP	2
2.1	Polypropeeni.....	2
2.1.1	Kemiallinen rakenne	2
2.1.2	Kemialliset ominaisuudet	3
2.1.3	Mekaaniset ominaisuudet	4
2.1.4	Lisäaineet ja raaka-aineen modifiointi.....	5
2.1.5	Polypropeenin vaahdotustekniikat	5
2.2	EPP tuotteiden valmistustekniikka ja ominaisuudet.....	6
2.2.1	Helmiryynin paisutus.....	6
2.2.2	Höyrytys muotovalu	8
2.2.3	EPP tuotteiden ominaisuudet.....	9
2.3	EPP markkinat.....	9
2.3.1	Materiaalin hankintakustannukset.....	10
2.3.2	Materiaalin ekologisuus	10
2.3.3	Valmistuskustannukset	10
3	Kehon suojukseen kohdistuvat vaatimukset.....	12
3.1	Suojaus mekanismi.....	12
3.2	Suojuksien muotoilu ja suunnittelu	13
3.3	EPP materiaalin hyödyntäminen suojuksissa.....	14
4	Kokeellinen tutkimus prototyyppi komponentin toiminnasta	15
4.1	Tutkimus ja mittausmenetelmät	15
4.1.1	Kokeellisen tutkimuksen tavoite	20
4.1.2	Mittausjärjestely	20
4.2	Mittaustulokset.....	20
4.2.1	Suojus prototyyppi 1	20
4.2.2	Suojus prototyyppi 2	26
4.2.3	Suojus prototyyppi 3	31
4.2.4	Suojus prototyyppi 4	35
4.2.5	Lonkkasuojus TP 9000 jääkiekkohousuista	40
4.2.6	Lonkkasuojus elementti Kofo	42
4.3	Tuloksien analysointi	44
5	Yhteenveto ja pohdinta	47
	Lähteet	48

1 Johdanto

Liikkumisen, urheilun ja arkipäivän aikana voi sattua tapahtumia, missä ihmisen keho iskeytyy johonkin tai kehoon iskeytyy jotakin. Iskulta halutaan suojautua ja siksi on olemassa monenlaisia suojaavia varusteita. Tässä työssä selvitetään paisutetun polypropeenin (EPP) soveltuvuus suojaavien varusteiden pehmusteena. Varusteet on yleensä mielletty painaviksi, kömpelöiksi ja häiritseviksi. Varusteiden tuotekehityksessä on tämän takia kiinnitetty erityisesti huomiota varusteiden painoon ja muotoiluun siten, että ne eivät häiritse ihmisen toiminnallisuutta. Paisutetun polypropeenin uskotaan olevan ratkaisu kevyempiin ja parempiin varusteisiin.

Työn toimeksiantaja on iBP-tech oy, joka on perustettu vuonna 2016. Yritys perustettiin hoitamaan Tacklan tuotekehitystä ja suojus patenttien hallintaa. Tacklan pohjalta yrityksessä on usean vuosikymmenen kokemus jääurheilu suojuksien valmistuksesta ja kehittämisestä. iBP on lyhennys sanoista intelligent body protection. iBP:n toimiala on varusteiden tuotekehitys ja suojausteknologian kehitys. Yritys tilasi tämän työn oman tuotekehitys prosessien avuksi. Tuotekehityksen kohteena on jääkiekkohousujen suojuukset.

Työssä selvitetään vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

- Mitkä ovat polypropeenin (PP) ominaisuudet?
- Miten EPP valmistetaan?
- Miten EPP:n valmistusprosessin kustannukset muodostuvat?
- Mitkä ovat suojaamisen mekanismit?
- Kuinka hyvin ja miten EPP vaimentaa iskua?
- Kuinka hyvin EPP kestää iskuja?
- Mitä etuja EPP tuo varusteiden suunnitteluun?

Näiden selvityksien lisäksi tehdään kokeellinen tutkimus prototyyppi suojuksien toiminnasta. Tutkimuksella selvitetään prototyyppi suojuksen iskua jakava ja vaimentava toimintakyky. Tutkimus toteutetaan ampumalla kiekko suojukseen ja mittaamalla suojuksen alla tapahtuvat kiihtyvyydet. Työn tuloksena saadaan kerättyä tutkimuksista dataa tuotekehitykseen ja analyyseistä saadaan tärkeää tietoa tuotekehityksen avuksi.

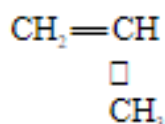
2 Paisutettu polypropeeni EPP

2.1 Polypropeeni

Polypropeeni on termoplastinen ja kuuluu osakiteisiin valtamuoveihin. Se on yksi eniten käytetyistä muovilaaduista. Polypropeenia käytetään laajasti pakkauksissa, kalvoissa, kulluttaja tavaroissa, sairaanhoito välineissä ja kuitu sovelluksissa. (Maier & Calafut 1998, 1.)

2.1.1 Kemiallinen rakenne

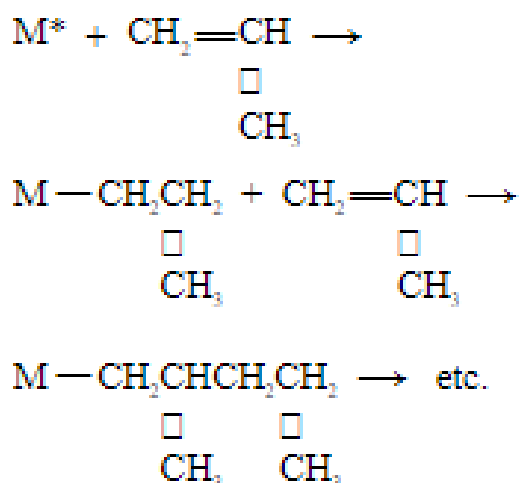
Propeenista polymerisoitu polymeeri muodostuu pelkästään hiilestä ja vedystä. Propeeni on kolme hiiliatomia ja kuusi vetyatomia, sekä yksi hiilivetyjen välinen kaksoissidos. Propeenin kemiallinen rakenne on esitetty kuvassa 1. (Maier & Calafut 1998, 3.)



Propylene

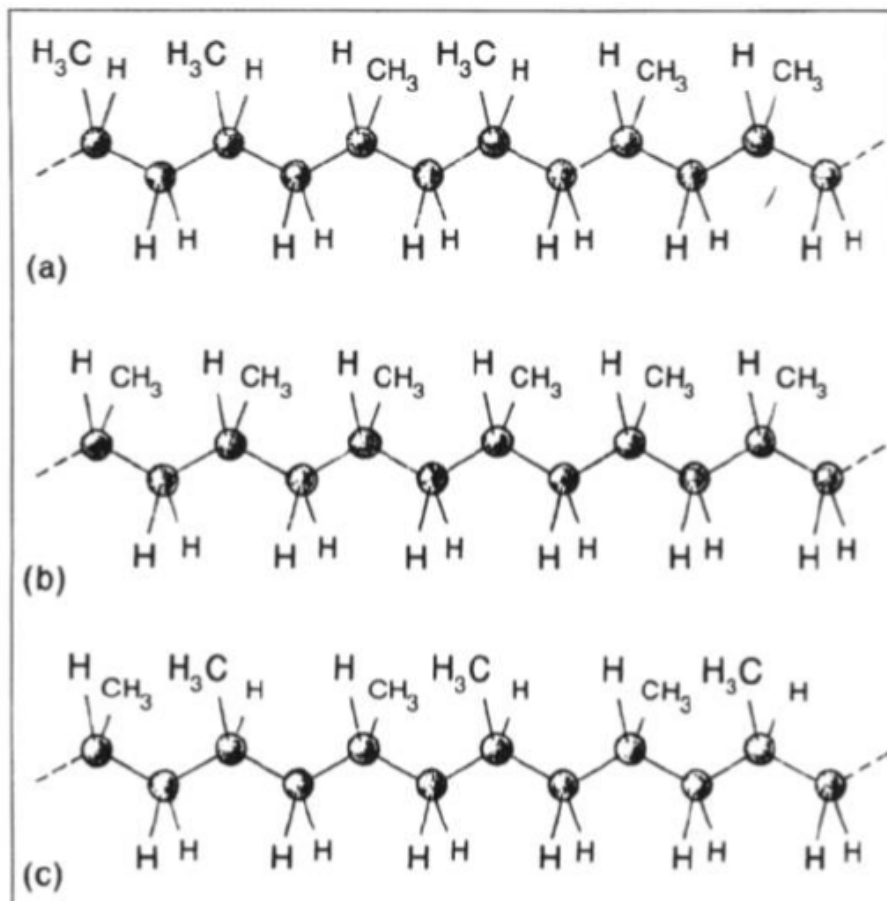
Kuva 1. Propeenin kemiallinen rakenne (Maier & Calafut 1998, 3)

Propeeni polymeroidaan additiopolymerointina, jossa ensimmäinen propeeni molekyyli liitetään katalyyttiin, jonka jälkeen monomeerit liittyvät ketjureaktiona toistensa perään kaksoissidoksen purkautuessa. Kuvassa 2 esitetään ketjupolymerointi reaktio, jossa M on katalyytti. (Maier & Calafut 1998, 3).



Kuva 2. Propeenin polymerointi reaktio (Maier & Calafut 1998, 3)

Propeeni voi liittyä ketjuun kahdella eri tavalla. Tämän takia polypropeenia voi muodostua kolmella erilaisella rakenteella, jotka ovat isotaktinen, ataktinen ja syndiotaktinen. Nämä rakennemuodot ovat esitettynä kuvassa 3. Ataktisessa rakenteessa liittymisjärjestys molekyyliä on täysin sattumanvarainen. Isotaktisessa rakenteessa molekyylit ovat liittyneet täysin samaan järjestykseen ja syndiotaktisessa rakenteessa molekyylit vaihtelevat järjestyksestä symmetrisesti. (Matar & Hatch 2001, 309–311.)



Kuva 3. Polypropeenin rakenne muodot, a) Ataktinen, b) Isotaktinen, c) syndiotaktinen (Matar & Hatch 2001, 310)

2.1.2 Kemialliset ominaisuudet

Muoveilla yleisesti on hyvä kemiallinen kestävyys sekä ominaisuus/paino hyötysuhde. Useat polymeerit kestävät korkeita ja matalia lämpötiloja. Polypropeenin sulamis- ja lasittumispiste on korkeampi verrattuna muihin valtamuoveihin. Täysin isotaktisen polypropeenin teoreettinen sulamispiste on noin 171–176°C. Tuotantoon valmistetun isotaktisen polypropeenin sulamispiste vaihtelee 160–166°C välillä. Tämän pudotuksen aiheuttaa ataktisuuden pitoisuus massassa. Ataktinen rakenne alentaa sulamispistettä niin, että kiteisyyden ollessa 30 % on sulamispiste noin 130°C. Korkean sulamispisteen ansiosta PP kestää

pitkäaikaista altistumista jopa 107°C lämpötilalle ja lyhytkestoista altistumista aina 121°C asti. (Maier & Calafut 1998, 3–14.)

Polypropeenilla on erittäin hyvä kemikaalien kestävyys. Se kestää vahingoittumatta saippuaa, alkoholia ja vettä. Näiden lisäksi se kestää hyvin nestemäisiä hiilivety yhdisteitä sekä kloori pitoisia liuottimia, mutta näiden vaikutuksesta voi ilmetä lievää turvotusta ja pehmenemistä. Vahinkoa kemiallisesti polypropeenille voi aiheuttaa suurta hapettumista aiheuttavat yhdisteet kuten typpi- ja rikkihappo. (Maier & Calafut 1998, 7.) Taulukossa 1 on esitetty polypropeenin mitatut ominaisuus arvot.

Properties of Polypropylene

Density, g/cm ³	0.90–0.91
Fill temperature, max. °C	130
Tensile strength, psi	3,200–5,000
Water absorption, 24 hr., %	0.01
Elongation, %	3–700
Melting point, T _m °C	176
Thermal expansion, 10 ⁻⁵ in./in. °C	5.8–10
Specific volume, cm ³ /lb	30.4–30.8

Taulukko 1. Polypropeenin tekniset lukuarvot (Matar & Hatch 2001, 332)

2.1.3 Mekaaniset ominaisuudet

Polypropeeni on erittäin kestävä ja sillä on hyvät mekaaniset ominaisuudet. Sen vetolujuus ja joustavuus näkyvät taulukossa 1. Polypropeenin kovuus, jäykkyys ja sitkeys muuttuvat sen rakenteen ja kiteisyyden mukaan. Isotaktisen PP:n kiteisyys on suurin, jonka takia sen rasituksen kesto ja jäykkyys ovat suuremmat. Syndiotaktisen rakenteen jäykkyys sekä kovuus ovat pienemmät, mutta sitkeys suurempi, joten se kestää iskuja paremmin. Ataktinen rakenne on kaikista vähä kiteisin ja se on huomattavasti pehmeämpi ja taipuisampi. Kiteisyyden laskiessa jäykkyys ja kovuus pienenevät, mutta sitkeys ja iskun kesto parantuvat. Erittäin korkean kiteisyyden omaava polypropeeni on leikkaus taivutus testissä 1 % taipumalla 2067–2412 MPa ja pienemmän kiteisyyden yleispolypropeenilla 1378–1654 MPa. (Maier & Calafut 1998, 14–15.)

Polypropeenin läpinäkyvyys määräytyy myös kiteisyyden mukaan. Mitä vähemmän kiteisyyttä, sitä kirkkaampaa PP on. Kuitenkin kirkkaan PP saavuttaminen kiteisyyttä vähentämällä aiheuttaa lujuuden ja kovuuden alentumista, sekä lämmönkestokyvyn alentumista. (Maier & Calafut 1998, 15.)

2.1.4 Lisäaineet ja raaka-aineen modifiointi

Muovien valmistuksessa käytetään monia erilaisia lisäaineita, joilla halutaan vaikuttaa raaka-aineen ominaisuuksiin ja työstettävyyteen. Eri kemikaaleja käytetään niitä lisäämällä raaka-aineeseen joko ennen prosessia tai prosessin jälkeen. Jotkin lisäaineista lisätään vasta valmiin tuotteen pinnalle. Lisäaineilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi raaka-aineen uv-säteilyn keston, palamisen estämiseen, katalyyttien poistumiseen, solurakenteen lisäämiseen, värjättävyyteen ja staattisiin ominaisuuksiin. Tärkein lisäaine polypropeenille on hapettumisenestoaine. Polypropeeni vaati hapettumisenestoaineen, sillä ilman sitä se alkaisi hajoamaan hapettumalla välittömästi muodostumisensa jälkeen. Muovit voidaan myös paisuttaa tai vaahdottaa lisäämällä raaka-aineeseen paisuteaine joko ennen prosessia tai prosessina aikana. Paisuteaineet voivat olla joko kemiallisia tai fyysisiä. (Maier & Calafut 1998, 27–47.)

2.1.5 Polypropeenin vaahdotustekniikat

Muovit voidaan vaahdottaa käyttäen pääsääntöisesti samoja valmistus menetelmiä kuin normaalien muovien valmistuksessa. Valmistus menetelmät vaativat kuitenkin muutoksia ja lisäyksiä, sillä vaahdotamisprosessi käy läpi kolme lisä vaihetta, jotka ovat kuplienmuodostus, paisutus ja jähmettyminen. Kuplat voidaan muodostaa muovimassaan usealla eri tavalla ja ne jaetaan fyysisiin, kemiallisiin ja mekaanisiin vaahdotustekniikoihin. Fyysisissä tekniikoissa muovimassaan sekoitetaan inerttikaasu tai neste, jolla on matala kiehumispiste. Tässä tekniikassa muovimassaa kuumennettaessa inerttikaasu tai kiehuva neste muodostaa kaasukuplat. Kemiallisissa tekniikoissa muovimassaan sekoitetaan paisuteaineita, jotka prosessin aikana kemiallisen reaktion kautta tai lämpötilan nostamisen takia muodostavat kaasukuplat. Mekaanisessa prosessissa sulamassaan sekoitetaan mekaanisesti ilmaa tai muuta inerttiä kaasua. (Liu & Chen 2014, 345–354.)

Polymeerien solurakenne voi muodostua kahdella eri rakenteella, jotka ovat umpisolurakenne ja avosolurakenne. Kun polymeerin sulaviskositeetti, sulaelastisuus ja sulakestävyys on matala, pääsee soluseinämät sortumaan ja kaasu pääsee karkuun massasta. Näin syntyy avosolukkinen vaahtomuovi, jonka rakenne on verkkomainen ja ilmava. Umpisoluihin vaahtomuovi syntyy, kun sulaominaisuudet ovat tarpeeksi korkeat tai sisäinen paine ja kuplien määrä alhainen. Tällöin polymeerin soluseinämät pysyvät ehjinä ja kaasu kuplat pysyvät polymeerin sisällä. Umpisoluihin solumuovi on jäykempi ja tiivispintainen. (Mills 2007, 2–17.)

Polypropeeni on vaikeasti vaahdotettava, sillä sen sulamassan vahvuus on heikko ja työstölämpötila alue erittäin kapea. Tämä johtaa suureen avosolupitoisuuteen vaahdoissa, mikä

ei välttämättä ole haluttu lopputulema. Avosoluinen rakenne ei mahdollista yhtä hyvää energian absorbointikykyä, eikä avosolurakenne tue materiaalin vahvuuksia yhtä hyvin kuin umpisoluinen rakenne. 90-luvun alkupuolella on kehitetty paremman sulaviskositeetin ja sulavahvuuden omaava haaroittunut polypropeeni. (Mills 2007, 46.)

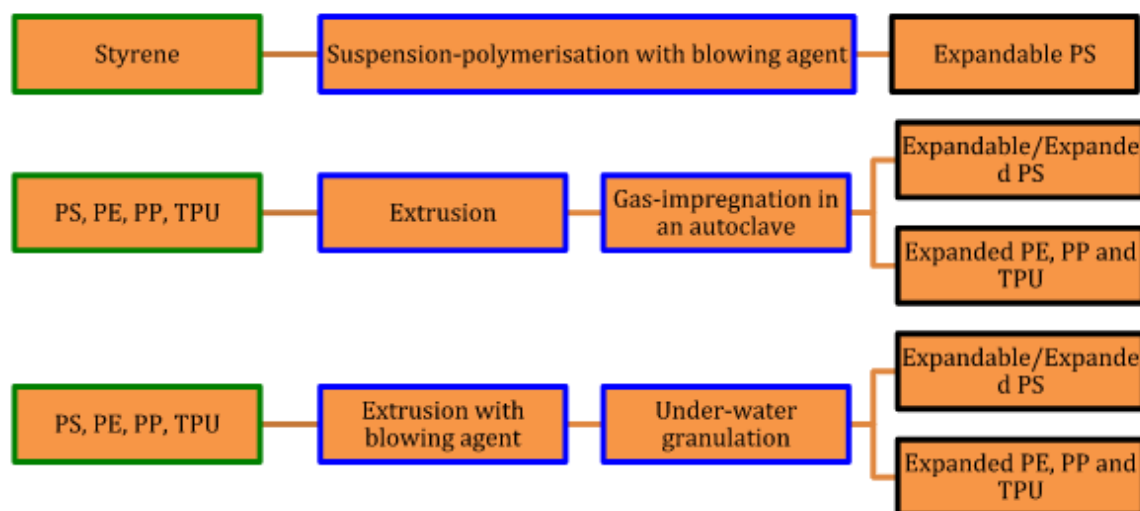
2.2 EPP tuotteiden valmistustekniikka ja ominaisuudet

Paisutetusta polypropeenista valmistetut tuotteet käyvät usean valmistusvaiheen läpi. Aluksi luodaan esipaisutetut helmiryynit. Tämän jälkeen helmiryynit valetaan höyrytysmuotovalulla lopulliseen muotoonsa. Lopuksi tuotteet voidaan viimeistellä mekaanisilla työstömenetelmillä.

Lopullisella tuotteella on erinomaiset mekaaniset ominaisuudet moneen käyttötarkoitukseen. EPP:n muunneltavuus mahdollistaa sen soveltamisen useaan kohteeseen.

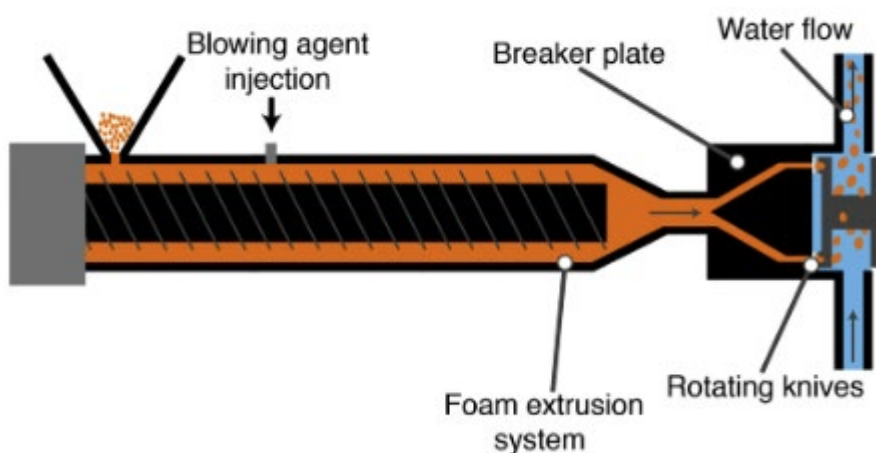
2.2.1 Helmiryynin paisutus

Polypropeenin lujuusominaisuudet saadaan solumuoveissa hyödynnettyä mahdollisimman hyvin silloin, kun siitä tehdään esipaisutettuja umpisoluisia ryynejä, eli paisutettuja polypropeeni helmiä (EPP). EPP helmistä valmistettaessa vaahtomuovin umpisolupitoisuus on 95–98 % (Raps ym. 2015, 14). Kuvassa 4 esitetään paisutettavien helmien valmistustavat eri materiaaleille. Paisutetut polypropeeni helmet voidaan valmistaa kahdella eri tavalla, jotka ovat autoklaavi paisutus tai ekstruusio paisutus. (Raps ym. 2015, 7.)



Kuva 4. Paisutettavien helmien valmistustavat eri materiaaleille (Raps ym. 2015, 7)

Autoklaavitekniikassa polypropeenista valmistetaan ensin ekstruusiolla pieniä ryynejä, jotka sitten siirretään paineastiaan erissä veden ja paisutteen kanssa. Paineastia kuumennetaan lähelle polypropeenin sulamispistettä, jolloin paisute pääsee kyllästämään ryyneitä. Tämän jälkeen paine vapautetaan paistutusastiasta, jolloin paisute synnyttää kuplat ja soluttaa ryyneitä. Tämän tekniikan huonot puolet ovat prosessin monivaiheisuus ja pitkät prosessiajat, sekä jaksoittain tuotettavat erät. Autoklaavitekniikka on kuitenkin yleisin polypropeenin paisutustekniikka. Ekstruusio paisutuksessa polypropeenin sekaan injektoidaan ekstruusio ruuvissa paisute. Ekstruusion päässä on terävä veitsi, joka leikkaa massan pieniksi ryyneiksi. Ryyneitä leikataan suoraan paineistetun vesivirtaan, jolloin paisute pääsee soluttaamaan ryyneitä. Jos ryyneitä jäisivät paineistamattomaan tilaan, hajoaisi kuplien soluseinämät ja kaasu pääsisi karkuun ryyneistä. Kuvassa 5 esitetään ekstruusio paisutustekniikka. (Raps ym. 2015, 6–7.)

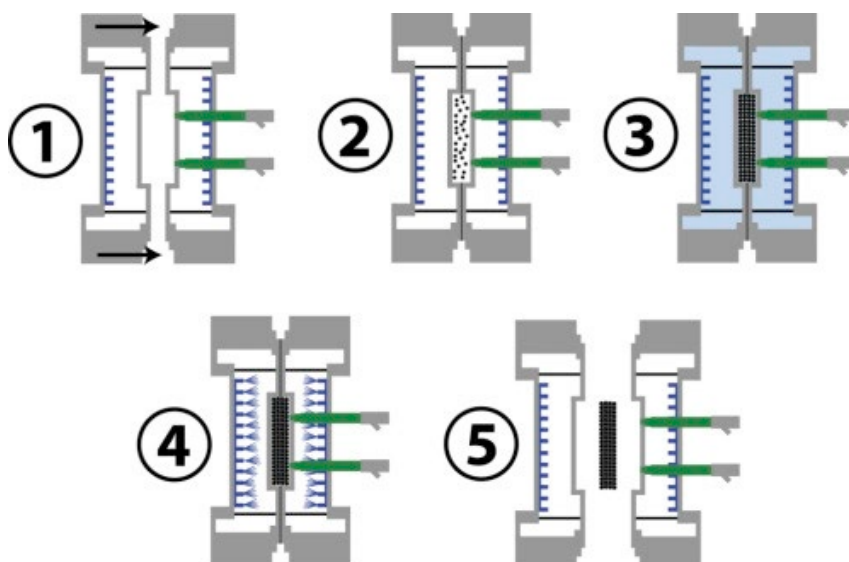


Kuva 5. EPP ryyneiden ekstruusio paisutusmenetelmä (Raps ym. 2015,7)

Ekstruusio teknologia mahdollistaa edullisemmän ja tehokkaamman EPP ryyneiden valmistuksen jatkuvana prosessina, mikä parantaa pienten valmistusyksiköiden kilpailukykyä. Kuitenkaan ekstruusio menetelmällä ei päästä yhtä hyvin solurakenteen ominaisuuksiin tai yhtä pieniin tiheyksiin kuin autoklaavitekniikalla. Tämän takia vieläkin yli 90 % EPP ryyneistä valmistetaan autoklaavitekniikalla. (Tammaro ym. 2022.)

2.2.2 Höyrytys muotovalu

Esipaisutetut helmet valetaan lopulliseen muotoonsa höyrytys valussa. Höyrytys valussa on viisi vaihetta, jotka on esitetty kuvassa 6. (Raps ym. 2015, 7.)



Kuva 6. Höyryvalun työstövaiheet. (Raps ym. 2015, 8)

Ensimmäinen vaihe on muotin sulkeminen. Toisessa vaiheessa paisutetut helmet puhalletaan muottiin ilmanpaineella. Helmet tulisi saada tässä vaiheessa erittäin tasaisesti muottiin. Tämä on koko prosessin tärkein asia. Täyttämisen jälkeen muottiin ajetaan noin 150 asteista vesihöyryä, joka saa helmet sintraantumaan. Höyryn syöttöpaine on noin 7 ja 8 bar välillä. Muotin sisällä paine pysyy noin 2,5–4 bar välissä. Höyrytys tapahtuu kolmessa eri vaiheessa, jotka ovat ilmanpoisto ja esilämmitys, ristihöyrytys ja lopuksi autoklaavihöyrytys. Tämän jälkeen muotti jäähdytetään noin 80 °C asteeseen. Lopuksi muotti aukaistaan ja kappale irrotetaan käyttäen mekaanista tai paineilmatyökälua. Tuote, joka vaatii tarkat mitatoleranssit, tulee vielä pitää valun jälkeen lämmityksessä noin 80 °C asteessa, jotta ei tapahdu helmien kutistumista. Kutistuminen on ongelma etenkin, kun tehdään matalan tiheyden tuotteita. Esimerkiksi EPP tiheydeltään 22 g/l voi kutistua valun jälkeen jopa 2,8 %. (Raps ym. 2015, 8–9.)

Muottitekniikoita höyrytysvalulle on myös kaksi. Ne ovat raon täyttö tekniikka ja painetäyttö tekniikka. Raon täyttö tekniikassa muotti pidetään aluksi osittain auki, jotta muotin täyttäminen onnistuu kokonaisuudessaan, vaikka muotissa olisikin kapeampia kohtia. Tässä tekniikassa lopullista tuotteen tiheyttä voidaan säätää muotin lopullisella sulkemispaineella ja helmien täyttöpaineella. Painetäytössä helmet puhalletaan korkeammalla paineella muottiin siten, että helmet puristuvat muottiin ja jättää pienen yli paineen. Ylipaine vapautetaan, kun

muotti on täynnä ja suljettu. Puristuneet helmet uudelleen paisuvat paineen vapautuessa. Painetäyttö tekniikassa lopullinen tuotteen tiheys säädetään puhalluspaineen, helmien esipaineistuksen ja helmien ensi paisutuksen avulla. Kun tavoitteena on erittäin pienen tiheyden kappale, tulee helmet ensi paisuttaa altistamalla ne useamman tunnin ajan kuumalle paineilmalle ensi paisutus astiassa, kunnes helmen sisäinen paine saavuttaa painetasapainon valuprosessissa käytettävän paineen kanssa. Helmeen absorboitunut ilma johtaa helmen jälleen paisumiseen. (Raps ym. 2015, 9.)

2.2.3 EPP tuotteiden ominaisuudet

EPP helmistä valmistetuilla tuotteilla on erittäin hyvä iskunkestävyys, energian absorbointikyky, lämmön eristys kapasiteetti, lämmön kesto ja kelluvuus. Lisäksi se on erittäin kevyttä ja polypropeenille yleiset kemialliset ominaisuudet pysyvät lähes ennallaan solutuksesta huolimatta. (Raps ym. 2015, 14.)

EPP helmiä voidaan valmistaa tiheyksillä 15–200 g/l ja valmiiden tuotteiden lopullinen tiheys voi olla 18–260 g/l. Mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat materiaalin tiheyden ja höyryvalun onnistumisen myötä. Vetolujuus on 270 kPa ja 1930 kPa välillä. Veto venymä on 7.5–21 %. Puristus lujuus mittauksissa EPP saa seuraavat arvot, 25 % puristus 80–2000 kPa, 50 % puristus 150–3000 kPa ja 75 % puristus 350–9300 kPa. (British plastics federation 2022.)

EPP vaahtomuovin vahvuuksia ovat sen laajan tiheys skaalan mahdollistama sovelletavuus, sekä paremmat elastisuus ominaisuudet verrattuna EPS tuotteisiin (Raps ym. 2015, 14). Ajoneuvoteollisuudessa EPP on levinnyt puskureista niin ulkopuolen iskun vaimentajiin kuin sisätilan komponentteihin, kuten kojelaudan osiin. Suosio johtuu iskuvoiman absorbointi kyvyn lisäksi materiaalin keveydestä ja pitkäikäisyydestä, sekä sen kyvystä pitää muotonsa usean iskun jälkeen. (Tammaro ym. 2022.)

2.3 EPP markkinat

EPP julkaistiin markkinoille 1980 luvun alkupuolella japanilaisen Japan styrene paper (JSP) yrityksen toimesta (Britton 2009, 53). Siitä lähtien sen hyödyntäminen on ollut suuressa kasvussa etenkin ajoneuvoteollisuudessa (Tammaro ym. 2022).

Markkinoiden suurimpia EPP materiaalintuottajia ovat JSP tuotenimellä ARPRO (Arpro 2022), BASF tuotenimellä Neopolen (BASF 2022), Hanwha Solutions tuotenimellä BuffLite (Hanwha 2017), Izoblok tuotenimellä FAWO CEL (Izoblok 2020) sekä Kaneka tuotenimellä EPERAN-PP (Kaneka).

EPP materiaalista tuotteita valmistavia yrityksiä Suomessa ovat Artekno oy sekä Jackon Finland oy. Suomeen maahantuontia tarjoaa esimerkiksi Fourer Group. (Nurmi 2022.)

2.3.1 Materiaalin hankintakustannukset

Yksi EPP:n heikkouksista on kuitenkin sen kuljetuskustannukset, sillä se pitää toimittaa paisutettuna ryyninä lopputuotantopaikalle. Ryynit vievät paisutettuna paljon tilaa ja sen takia rahtikustannukset nousevat. (Tammaro ym. 2022.)

Materiaalin hankintahinnasta noin 15 % on rahtikuluja. Myös valmiiden EPP tuotteiden rahti on hankalaa tilan käytön vuoksi. Maailman markkinahinta EPP:lle tällä hetkellä on noin 6–7 €/kg (Nurmi 2022.)

2.3.2 Materiaalin ekologisuus

Vaahtomuovien valmistuksessa on pyritty pääsemään irti ilmastolle haitallisista kaasuista ja kemikaaleista, joita on käytetty paisuteaineina. CFC- ja HCFC-yhdisteet ovat asetettu käyttökieltoon (Rapra Technology Limited 2013).

Aiemmin käytetyt ilmastolle haitalliset CFC- ja HCFC-yhdisteet olivat hyviä monin tavoin. Niiden alhainen kiehumispiste mahdollisti helpon lämpötilasäätelyn, sekä matala diffuusiokyky mahdollisti hyvän solurakenteen aikaan saamisen. Lisäksi CFC-kaasut eivät ole palavia kaasuja. Vaikka pentaani ja butaani ovat palavia kaasuja ja niillä on korkeampi diffuusiokyky, on niille onnistuttu kehittämään toimivat tavat käyttää niitä paisuteaineina. Ylikriittinen hiilidioksidi, isobutaani sekä isopentaani ovat nykyisin yleisimmät käytössä olevat paisutteet. (Milss 2007, 50.) EPP:n ekologisuutta parantaa kuitenkin sen 100 % kierrätys mahdollisuus (British plastics federation 2022).

2.3.3 Valmistuskustannukset

Vuoden 2021 keskiarvo hinta polypropeenin hartsille oli 1285 \$/1000 kg. Se on noussut noin 36 % vuodesta 2020. (Bloomberg 2022.)

Lisäksi jos verrataan tuotanto- ja valmistuskustannuksia sekä raaka-aine kustannuksia on EPP hieman paisutettua polystyreeniä kalliimpaa. Paisutetun polypropeenin tuotanto on sen vaatiman pidemmän prosessiajan, korkeamman lämpötilavaatimuksen sekä autoklaavin tai muun paineistus tavan takia kalliimpaa. (Tammaro ym. 2022.)

Valmiin tuotteen hinta koostuu raaka-aineesta 30–40 %, höyrytys valun vesihöyryn tuotosta 20–30 % sekä muun prosessikustannuksen ja työn osuudesta 20–30 %. Jälkilämmitys ja

pakkaamiskulut ovat noin 10 %. Viime vuosien aikana energian hinta on noussut ja aiheuttanut energiankulutus osuuden nousua merkittävästi. (Nurmi 2022.)

Sulzer Chemtech ja Borealis ovat kehittäneet uuden ekstruusio tuotantomenetelmän, jolla saadaan heidän mukaansa tuotantokustannuksia leikattua jopa 60 %. (Sulzer Chemtech & Borealis 2021)

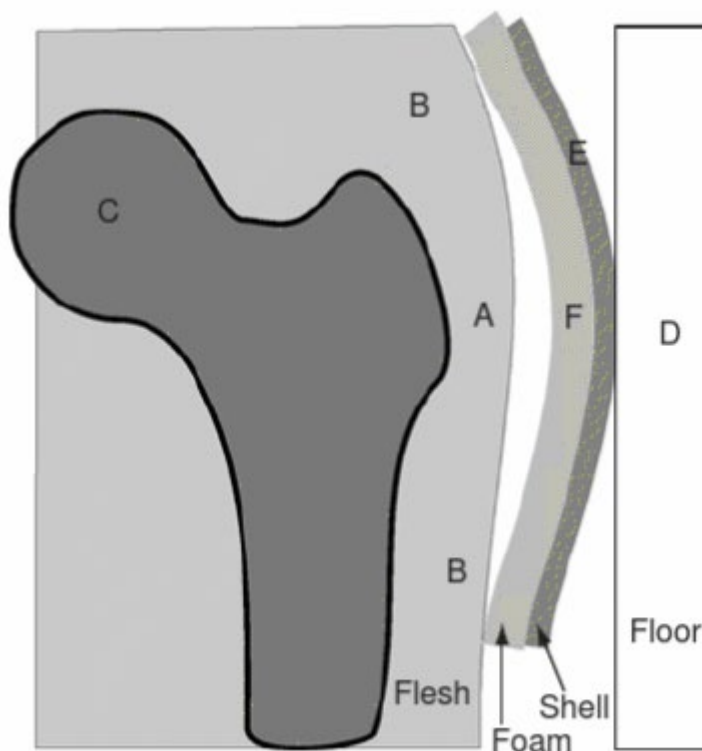
3 Kehon suojukseen kohdistuvat vaatimukset

3.1 Suojaus mekanismi

Tarvittava suojaus monissa urheilulajeissa tai arkipäivän toiminnassa on monin tavoin haasteellista toteuttaa. Ihmiskehon tulisi pystyä samaan aikaan toimimaan mahdollisimman vapaasti ja tehokkaasti, kun sitä suojataan ulkoisella suojuksella. Suojuksen tulisi olla mahdollisimman kevyt, ohut ja liikettä rajoittamaton, mutta samalla mahdollisimman suojaava ja iskuenergiaa absorboiva.

Parhaat kehoa suojaavat elementit ovat iskun jakautuminen, iskun vaimentaminen ja iskun siirtäminen. Kun suunnitellaan suojusta ja etsitään sopivaa materiaalia suojukseen, tulee nämä elementit ottaa huomioon. Urheilulajien ja arkipäiväisten tapahtumien luonne ja ympäristö ovat täysin omalaatuisia. Täten ei pystytä määrittämään kaikille suojuksille yhtä tiettyä iskun voimakkuutta ja luonnetta, jolta suojuksen tulisi kehoa suojata. Voi olla myös tilanteita, jossa suojukset eivät pysty kokonaisuudessaan estämään loukkaantumista. Esimerkiksi jalkapallossa pelaajan jalan ollessa kiinni maassa, voi taklauksen tai osuman voima sääressä ylittää murtumisrajan, vaikka jalkaa suojattaisiin säärisuojuksella (Mills 2007, 505).

Iskua vaimentavia elementtejä esimerkiksi lonkan suojatussa iskussa on kuusi. Nämä elementit on merkattu kuvaan 7, jossa A on lihaksen, ihon ja rasvakudoksen puristuminen iskukohdassa. B on suojuksen levittämän iskun välittämä puristus ympäröivien lihaksien, ihon ja rasvakudoksen kohdalla. C kohdassa nivelsiteet vaimentavat iskua. D on törmäyksen kohteen joustaminen ja materiaaliin absorboitunut energia. E on suojuksen kilpielementin venytys tai taivutus, etenkin, jos elementin keskikohdan ja kehon väliin jää vapaata tilaa. F elementti on vaimentavan pehmusteen absorboima voima. (Mills 2007, 406–407.)



Kuva 7. Lonkassa tapahtuvat vaimennus elementit (Mills 2007, 407)

Mikäli kuvan 7 vastaavassa tilanteessa ei olisi suojusta, toteutuisi vain A, B, C ja D elementit ja mikäli suojuksessa ei ole kilpeä, niin E ei toteutuisi ja B:n vaikutus olisi minimaalinen (Mills 2007, 407).

3.2 Suojuksien muotoilu ja suunnittelu

Suojuksien muotoilussa on tehtävä kompromissi suojaustason ja käytettävyyden välillä. Paksumpi pehmuste, sekä jäykempi ja isompi kilpi antaisivat paremman suojauskyvyn, mutta olisi epämukavampia käyttää (Mills 2007, 422). Suunniteltaessa suojusta tarvitaan mahdollisimman paljon tietoa siitä, minkälaisia iskuja sen tulisi suojata sekä kuinka iskuja voidaan sen sijainnissa jakaa. Koska ei ole tiettyä vakiota, jolla suojuksen suorituskyky voidaan mitoittaa, tulee tehdä laaja selvitys iskujen mahdollisista voimakkuuksista ja luonteista käyttötarkoitus ympäristössä, johon suojusta ollaan suunnittelemassa.

Suojavarusteiden tarkoitus on estää tai lieventää loukkaantumista. Suojuksien tulisi pystyä jakamaan iskut mahdollisimman suurelle alueelle aiheuttamatta käyttäjälle häiriötä. Huonosti suunniteltu ja heikosti toimiva varuste antaa käyttäjälle virheellistä turvallisuuden tuntoa ja voi aiheuttaa täten harmillisia seurauksia. (Peterson & Renström 2017, 41.)

Materiaalien vahvuuksien ja ominaisuuksien tulee olla juuri sopivat kuhunkin käyttötarkoitukseen. Kilpielementin paksuus ja joustavuus määräytyvät iskun voimakkuudesta ja tarvittavasta vaimennuksen määrästä. Muotoilemalla kilpi kuperaksi saadaan elementin vaimennuskykyä lisättyä (Mills 2007, 421). Pehmusteen jäykkyys ja paksuus määräytyvät myös tarvittavasta energian absorbointi määrästä. Pehmusteen ei kuitenkaan tulisi olla lihaskudosta kovempaa, koska tällöin se ei absorboisi energiaa ennen lihasta (Mills 2007, 420). Kun lihas absorboi energiaa ennen pehmustetta, se altistuu loukkaantumiselle.

3.3 EPP materiaalin hyödyntäminen suojuksissa

Useissa tieteellisissä artikkeleissa sekä kirjoissa kerrotaan EPP:n loistavasta energian absorbointikyvystä. Täten voidaan olettaa, että EPP olisi myös kehonsuojuksissa erittäin hyvä materiaali vaimentamaan iskuja. EPP:n toimintakyky on todettu olevan loistava erittäin kovissa törmäyksissä ja iskuissa, kuten ajoneuvojen törmäyksissä tai kuljetuspakkauksissa.

Huomioon otettavia asioita EPP:n käytössä suojuksissa on sen tiheys ja lämpötilan vaikutus materiaalin toimintakykyyn. EPP:n kovuuden on todettu vaihtuvan suuresti lämpötilan vaikutuksesta. Huoneen lämpötilaan verrattuna -30 °C asteessa kovuus lisääntyy jopa 110 % ja 60 °C asteen lämpötilassa sen kovuus on 50 % pienempi. (Morton ym. 2020.)

Ottaen huomioon EPP materiaalin kaikki ominaisuudet, voidaan todeta isoimmat hyödyt materiaalista olevan energian absorbointi, keveys ja vapaa muotoilukyky. Lisäksi nesteet esim. hiki ei imeydy ja tuote pysyy kuivana ja kevyenä. Luvussa 4 tutkitaan materiaalin mekaanista toimintaa tarkemmin. Muita EPP:n hyötyjä ovat lopullisen tuotteen valmistuksen yksinkertaisuus sekä 100 % kierrätys mahdollisuus.

4 Kokeellinen tutkimus prototyyppi komponentin toiminnasta

4.1 Tutkimus ja mittausmenetelmät

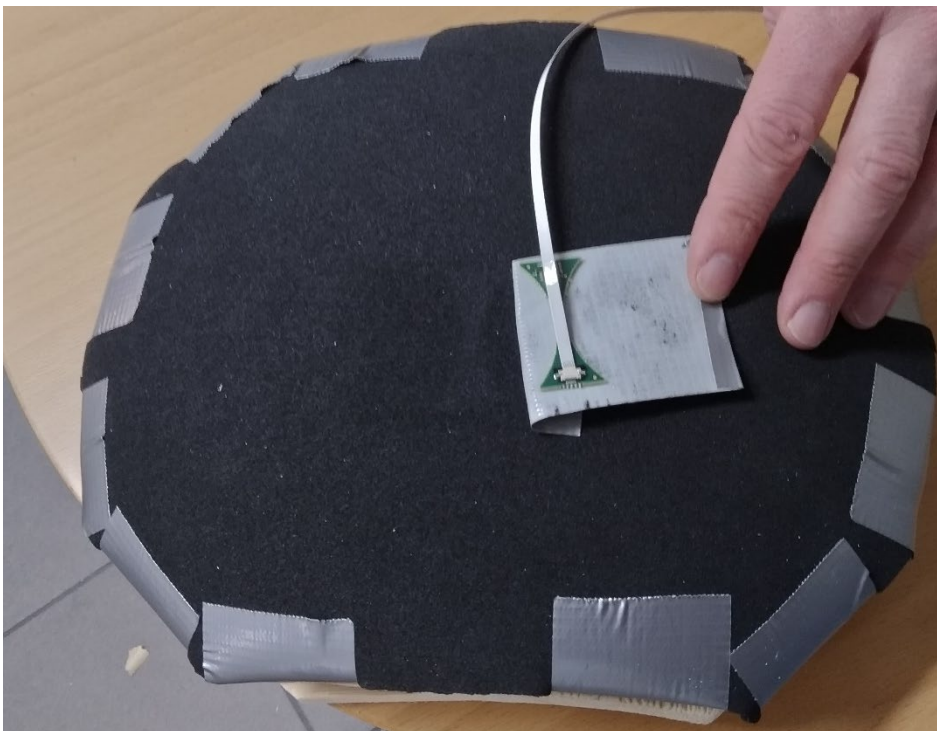
Prototyyppi suojuksen iskunvaimennuskykyä tutkitaan mittausjärjestelmällä, jonka Intelligent body protection tech oy (iBP) on kehittänyt. Mittauksen isku toteutetaan myös iBP:n teettämällä jääkiekkotykillä. Mittauskohteena on jääkiekkohousuissa käytettävä lonkan suojaus komponentti, minkä kautta lähemme materiaalien soveltuvuutta suojuksissa tutkiin. Lonkkasuojuksen jääkiekossa tulisi suojata ainakin kolmelta erityyppiseltä iskulta. Sen tulisi suojata kaatumisen aiheuttama isku, taklauksen tai törmäyksen aiheuttama isku kaukalon seinään ja toiseen pelaajaan sekä kiekon iskulta.

Mittausjärjestelmässä on kuusi kiihtyvyyssanturia, jotka sijoitetaan mittausvastineeseen riviin vierekkäin. Mittausvastine on rungoltaan vaneria ja sen pinta on koneistettu vastaamaan suojuksen kohdetta vastaavaa muotoa. Esimerkiksi lonkkasuojuksen mittausvastineen muoto on mahdollisimman paljon lonkkasuojuksen istuvuutta lonkassa mukaileva. Vastineen pintaan on kiinnitetty kohtalaisen jäykkä solumuovipehmuste, mikä simuloi lihaskudosta, josta anturit mittaavat iskun kiihtyvyydet. Anturit siis mittaavat suojuksen alla tapahtuvia liikkeitä. Kuvassa 8 on reisisuojuksen mittausvastine. Kuvasta voidaan huomata lihasta simuloiva solumuovi sekä teipillä kiinnitetyt anturit.



Kuva 8. Kiihtyvyyssanturit kiinnitettynä reisisuojusvastineeseen

Anturit ovat STMicroelectronics'n toimittamat kolmiakseliset kiihtyvyyssanturit tyypiltään H3LIS331DL. Anturin mittaustaajuus on 0,5 Hz–1 kHz. Kuvassa 9 esitellään lonkkavastine ja anturin piirikortti, jossa anturi on johtimen alla.



Kuva 9. Anturi, piirikortti ja johdin lonkkavastineessa.

Antureiden data käsitellään ja visualisoidaan Scilab-ohjelmistolla. Datasta saadaan selville suoraan kiihtyvyys ja kiihtyvyydestä pystytään laskemaan nopeus sekä liikemäärä. Nopeus ajanhetkellä t saadaan laskettua kaavalla 1 ja liikemäärä saadaan laskettua kaavasta 2.

$$v = a * t \quad (1)$$

$$s = v * t \quad (2)$$

Kaavoissa 1 ja 2 v on nopeus, a kiihtyvyys, t aika ja s matka.

Iskun toteutuksessa käytetään paineilmalla toimivaa kiekkotykkiä. Kiekko ammutaan metrin pituisesta piipusta lonkkasuojukseen, joka on kiinnitetty lonkkavastineeseen. Kuvassa 10 näkyy kiekkotykki laite. Laitteen piippu sijaitsee paineilmasäiliön alapuolella.



Kuva 10. Kiekkotykki laite.

Paineilma ladataan kompressorilla laitteen paineilmasäiliöön. Laitteessa on paineilmasäätimet, joilla voidaan säätää haluttu ilmanpaine säiliöön. Säiliössä on myös painemittari, jolla voidaan varmistaa säiliön sisäinen paine. Kiekko ladetaan piippuun manuaalisesti käyttäen apuna kovatettua huopapalaa, joka tiivistää piipun ennen kiekkoa. Huopapala ja kiekko työnnetään piipun juureen asti. Piipun halkaisumitat ovat hieman kiekkoa isommat, jotta

vältetään kiekon hankautuminen piipun seinämiin. Paine vapautetaan ladattuun piippuun magneettiventtiilillä. Kun venttiilille syötetään sähkövirta magneetti avaa venttiilin.

Kiekon nopeutta säädetään paineen määrällä säiliössä. Paine aiheuttaa kiekkoon työntövoiman piipussa, joka antaa liike-energian kiekolle. Liike-energian määrä E saadaan kaavasta 3. Kiekon teoreettinen nopeus v voidaan laskea kineettisen energian kaavasta johdettulla kaavalla 4. Kaavaan 3 lisätään kerroin k , joka muodostuu venttiilin ja paineilmaletkun aiheuttaman painehäviön sekä kiekon ja huopapalan kitkan aiheuttaman vastuksen vähentävästä voimasta. Kertoimen suuruus perustuu arvioon. Arvion mukaan noin 40 % teoreettisesta voimasta toteutuu, jolloin kertoimeksi saadaan 0,4.

$$E = (p * k) * A * s \quad (3)$$

$$v^2 = \frac{E}{\frac{1}{2} * m} \quad (4)$$

Kaavassa 3 säiliöön ladattu paine on p , k on kerroin voimahäviöstä, A on huopapalan pinta-ala johon paineen työntövoima vaikuttaa ja s on matka, jonka aikana työntövoima vaikuttaa. Kaavassa 4 E on liike-energian määrä ja m on kiekon ja huopapalan massan summa.

Huopapalan pinta-ala on 0,0024 m² ja kiekon ja huopapalan massojen summa on 0,175 kg. Näillä tiedoilla saadaan laskettua kiekon teoreettiset nopeudet, jotka ovat esitetty taulukossa 2. Kokeellisissa mittauksissa tavoitteena on mahdollisimman realistiset jääkiekkopeleissä mitattujen ranne- ja lyöntilaukauksien mukaiset nopeudet, jotka ovat noin 120–170 km/h. On havaittu, että painehäviöt laitteessa aiheuttavat toimintahäiriöitä alle 1.3 bar paineella, joten sitä matalammilla paineilla ei voida toteuttaa mittauksia.

Paine		Energia	Kiekon nopeus
bar	Pa	J	km/h
1,3	130000	124,8	136 ± 3
1,4	140000	134,4	141 ± 3
1,5	150000	144	146 ± 3
1,6	160000	153,6	151 ± 3
1,7	170000	163,2	155 ± 3
1,8	180000	172,8	160 ± 3

Taulukko 2. Tykin ampuman kiekon teoreettiset nopeudet

4.1.1 Kokeellisen tutkimuksen tavoite

Mittauksilla halutaan saada selville prototyyppi suojuksien rakenteen ja materiaalien toimintakyky verrattuna edeltäviin suojusten malleihin. Mittauksista tulisi selvittää kuinka hyvin suojusten jakaa iskuenergiaa ja kuinka hyvin se on vaimentanut iskua. Lisäksi halutaan tietää millä kiekon nopeudella suojusten päästää iskun lävitseen. Kiihtyvyyssantureista saadaan sekä kohdistuora että poikittaissuuntainen kiihtyvyys mitattua. Suojuksissa tapahtuvia liikkeitä halutaan tutkia mahdollisimman tarkasti.

4.1.2 Mittausjärjestely

Mittaukset aloitetaan ampumalla pienimmällä nopeudella eli 1.3 bar paineen asetuksella. Jokaisen laukaisun jälkeen painetta nostetaan 0.1 bar verran. Kaikille tutkimukseen valituille suojuksille tehdään ainakin 1.3, 1.4 ja 1.5 bar paineeseen asetetut kiekon iskut.

Suojusten, jotka on valittu mitattavaksi ovat iBP:n kehittämiä ja patentoimia lonkkasuojusten prototyyppijä. Lisäksi vertailuksi otetaan mittaustulokset aiemmista testeistä suojusten komponenteille, joita käytetään jääkiekkohousuissa tällä hetkellä. Nämä suojusten on mitattu 1.8 bar paineeseen asetetulla kiekon iskulla.

4.2 Mittaustulokset

Tuloksista on jätetty kaksi anturia huomioimatta niiden sattuessa prototyyppi komponentin ilma-aukon kohdalle. Anturi 1 on iskukohdassa ja siitä eteenpäin anturit on asetettu järjestykseen kohti suojusten reunaa siten, että anturi 4 on suojusten reunassa.

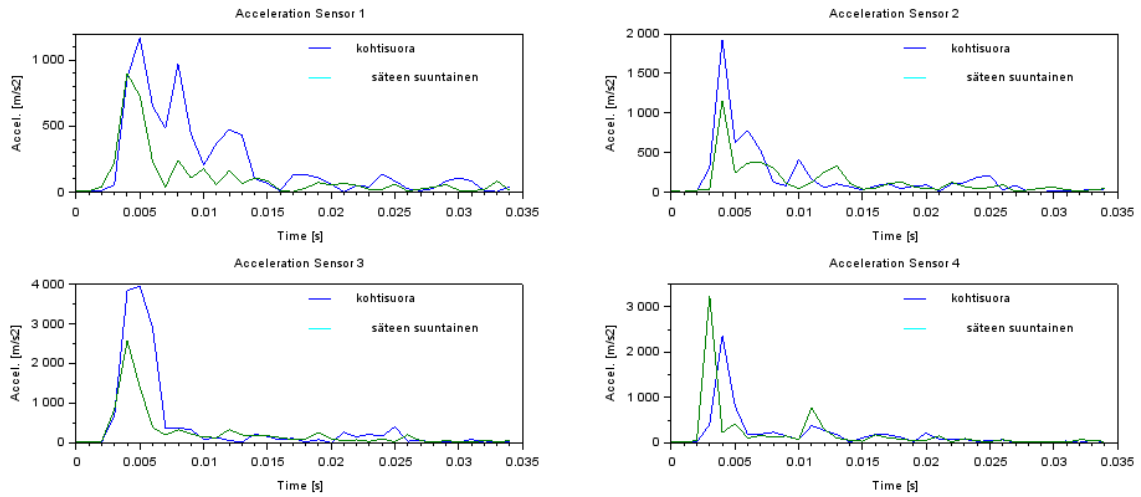
4.2.1 Suojusten prototyyppi 1

Kuvassa 11 näytetään lonkkasuojusten prototyyppi 1, jossa levennetty PP kilpielementin muotoilu ja 14 mm EPP solumuovia. Komponentin kokonaispaino on 48 g.

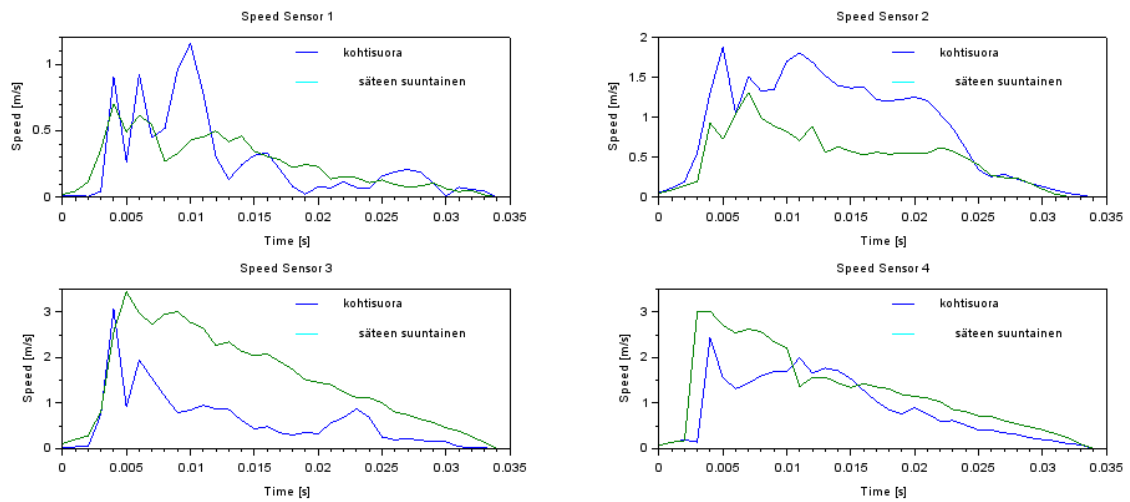


Kuva 11. Lonkkasuojus prototyyppi 1

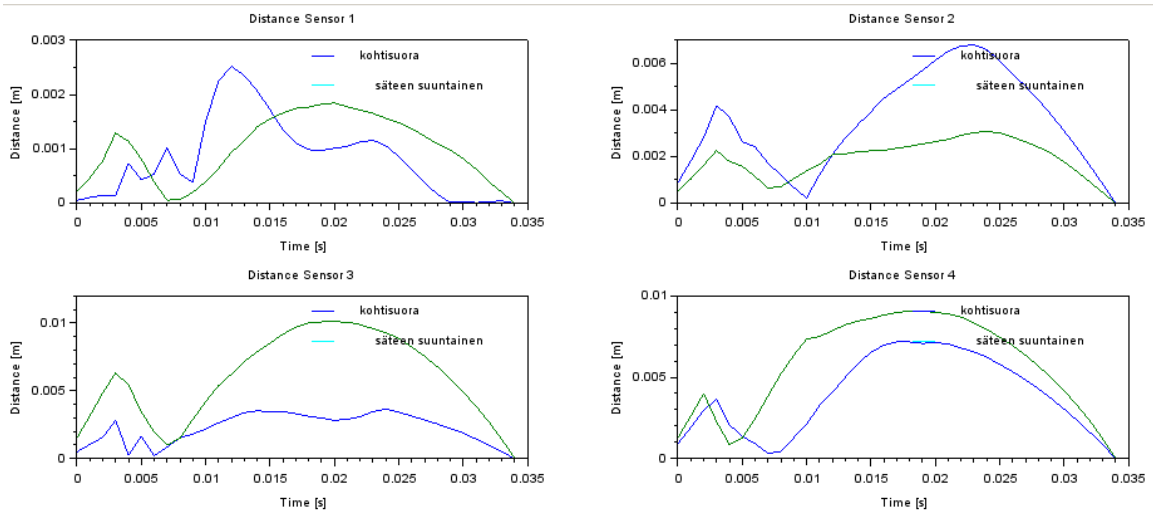
Suojus prototyyppi 1 mittaustulokset 1.3 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 12, nopeuksille kuvassa 13 ja liikemäärille kuvassa 14.



Kuva 12. Prototyyppi 1 kiihtyvyydet 1.3 bar kiekon iskulla

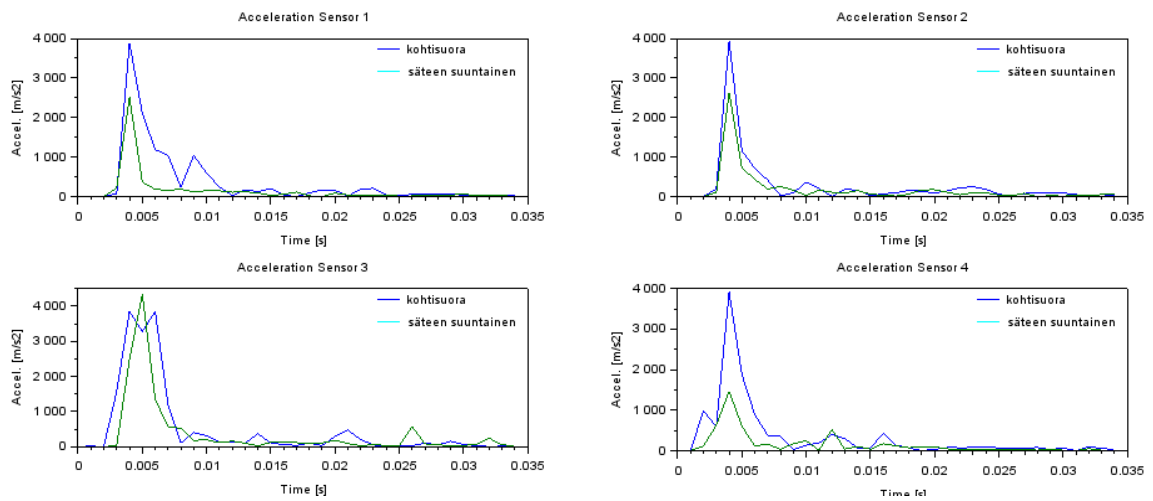


Kuva 13. Prototyyppi 1 nopeudet 1.3 bar kiekon iskulla

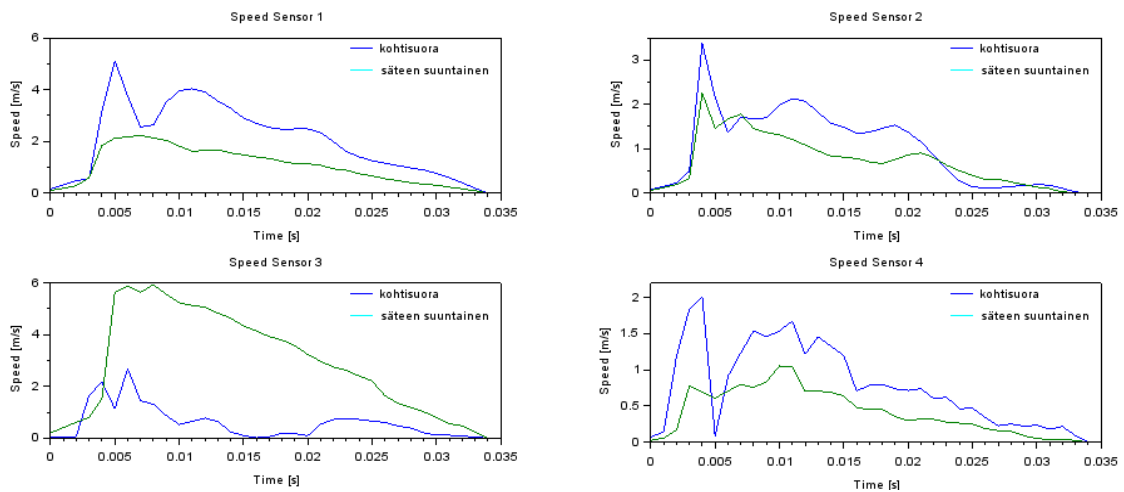


Kuva 14. Prototyyppi 1 Liikemäärät 1.3 bar kiekon iskulla

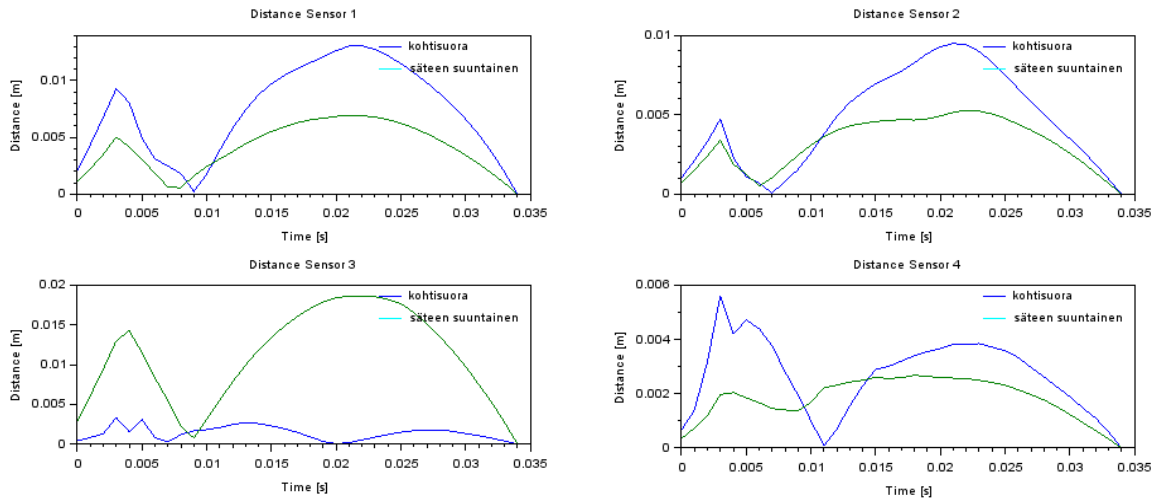
Suojus prototyyppi 1 mittaustulokset 1.4 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 15, nopeuksille kuvassa 16 ja liikemäärille kuvassa 17.



Kuva 15. Prototyyppi 1 kiihtyvyydet 1.4 bar kiekon iskulla

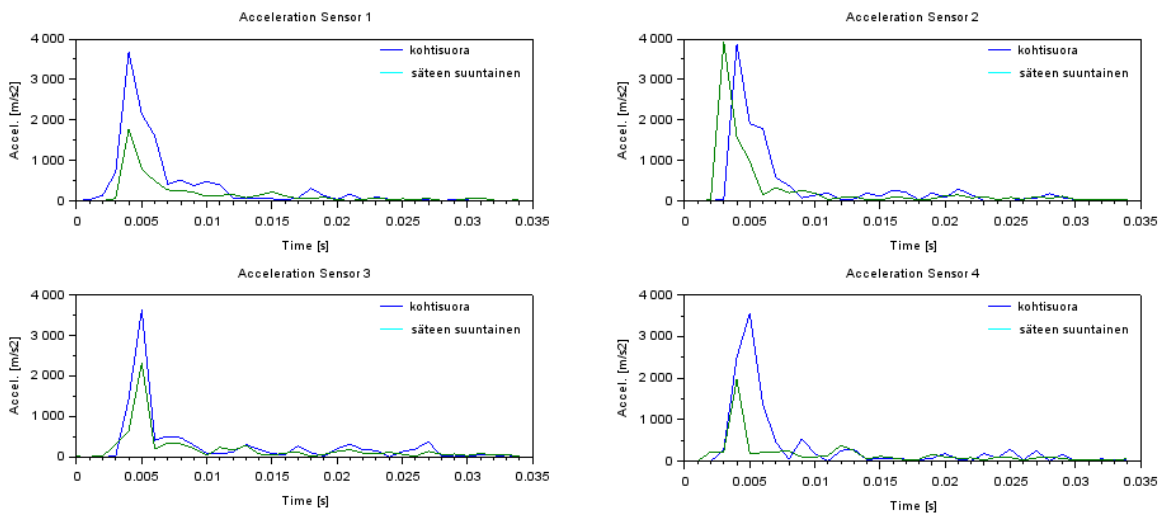


Kuva 16. Prototyyppi 1 nopeudet 1.4 bar kiekon iskulla

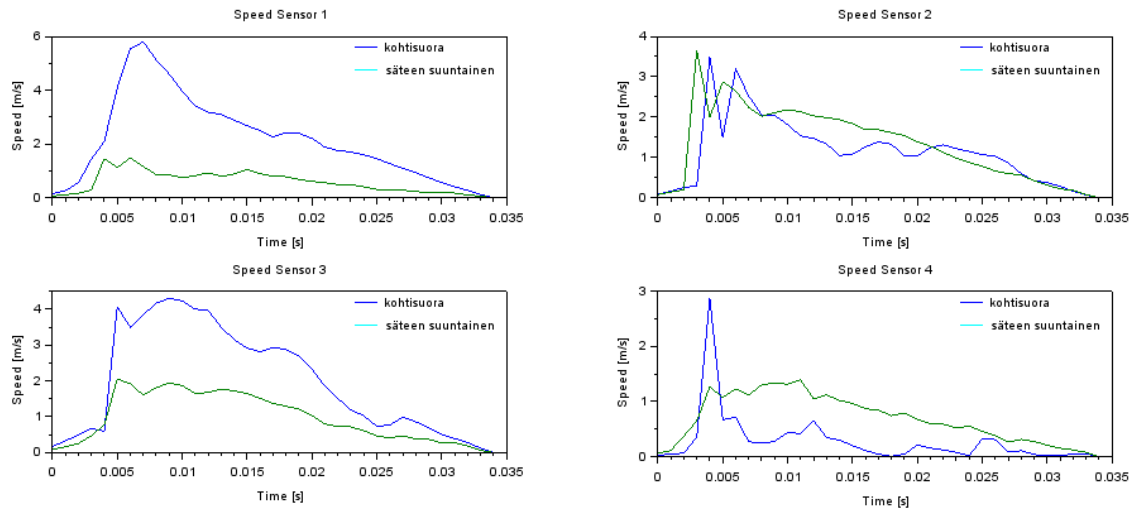


Kuva 17. Prototyyppi 1 liikemäärät 1.4 bar kiekon iskulla

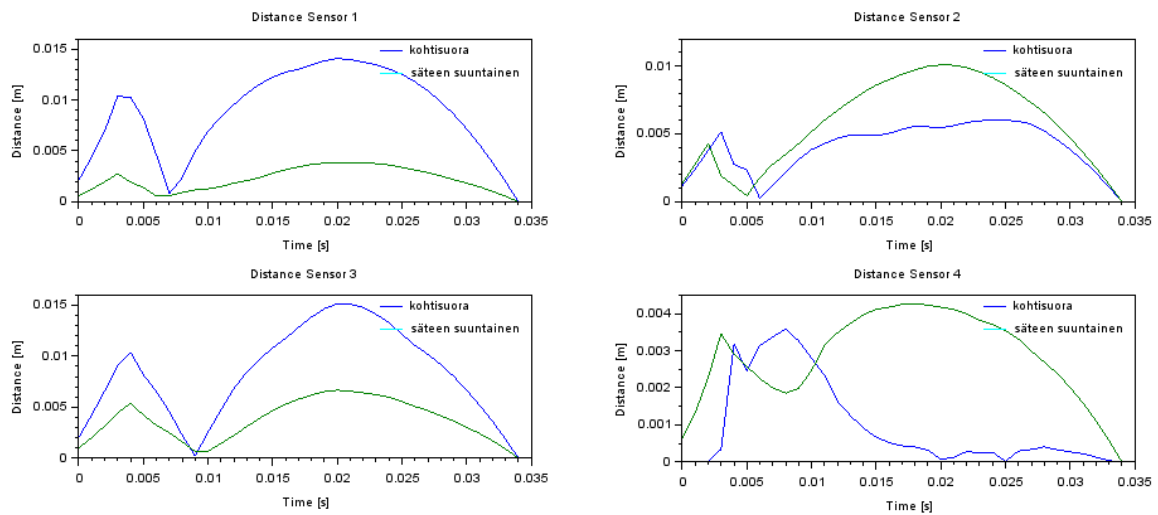
Suojus prototyyppi 1 mittaustulokset 1.5 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 18, nopeuksille kuvassa 19 ja liikemäärille kuvassa 20.



Kuva 18. Prototyyppi 1 kiihtyvyydet 1.5 bar kiekon iskulla



Kuva 19. Prototyyppi 1 nopeudet 1.5 bar kiekon iskulla



Kuva 20. Prototyyppi 1 liikemäärät 1.5 bar kiekon iskulla

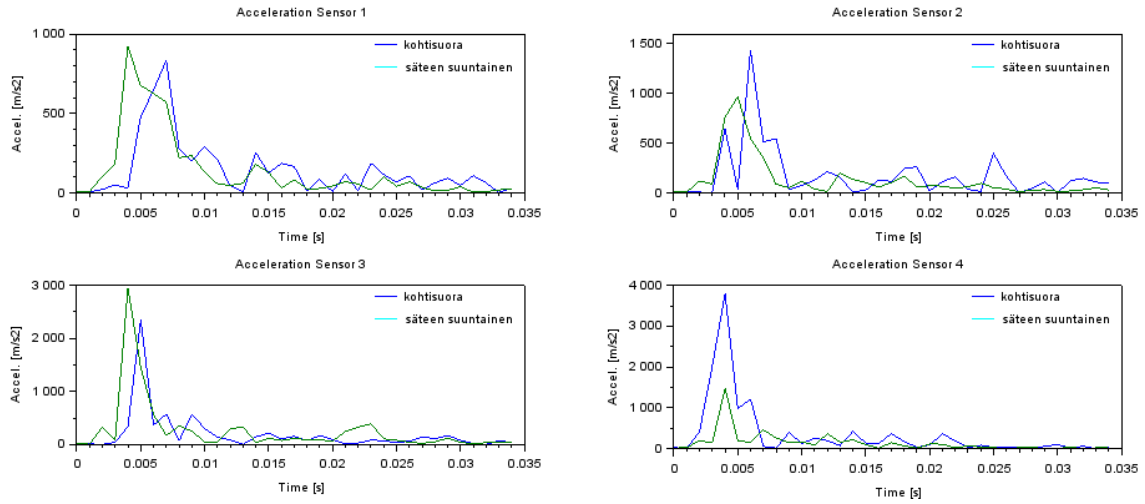
4.2.2 Suojus prototyyppi 2

Suojuksessa on kapea PP kilpielementin muotoilu ja 12 mm EPP solumuovia. Komponentin kokonaispaino 43 g. Prototyyppi 2 on esitetty kuvassa 21.

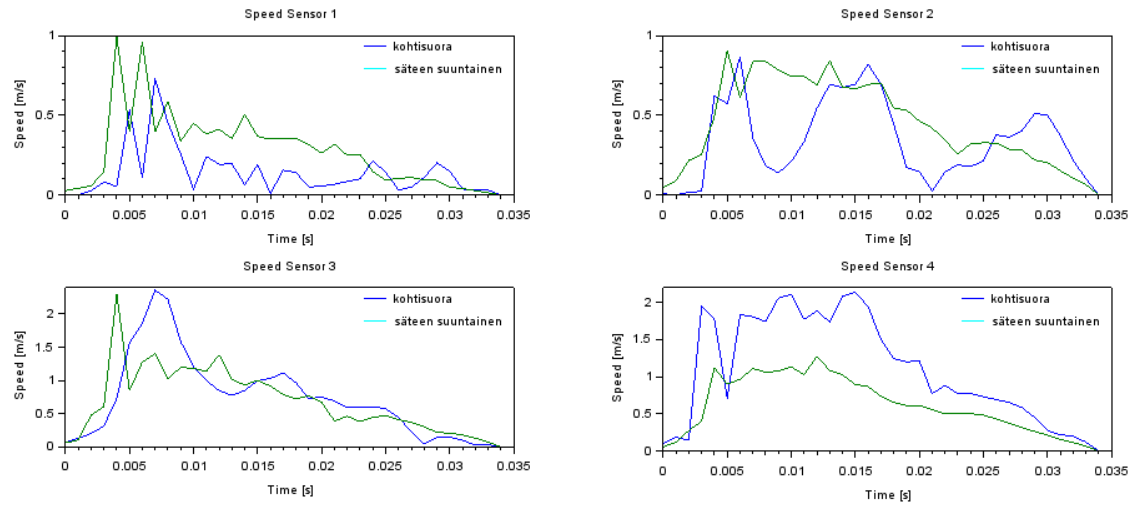


Kuva 21. Lonkkasuojus prototyyppi 2

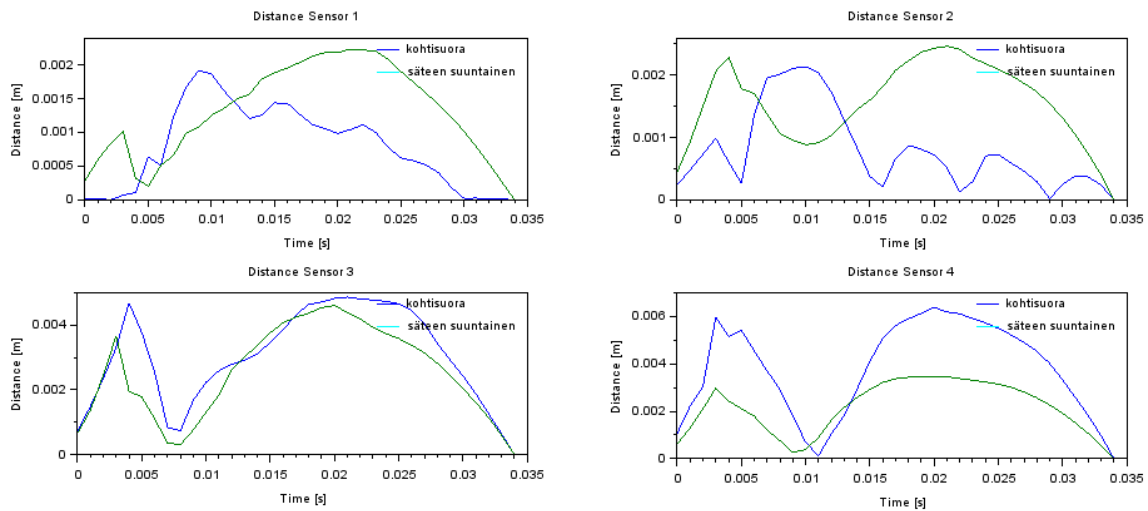
Suojus prototyyppi 2 mittaustulokset 1.3 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 22, nopeuksille kuvassa 23 ja liikemäärille kuvassa 24.



Kuva 22. Prototyyppi 2 kiihtyvyydet 1.3 bar kiekon iskulla

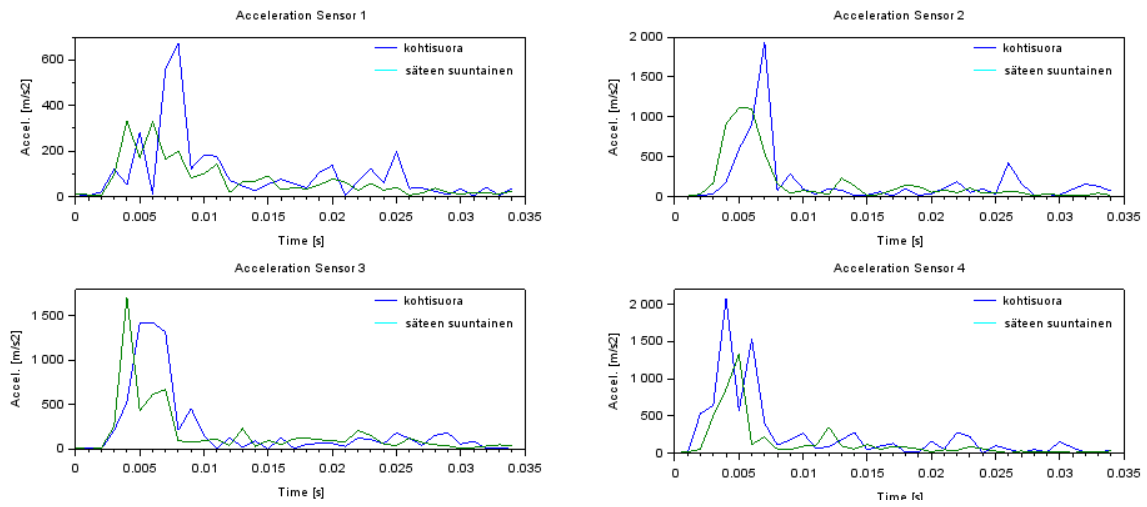


Kuva 23. Prototyyppi 2 nopeudet 1.3 bar kiekon iskulla

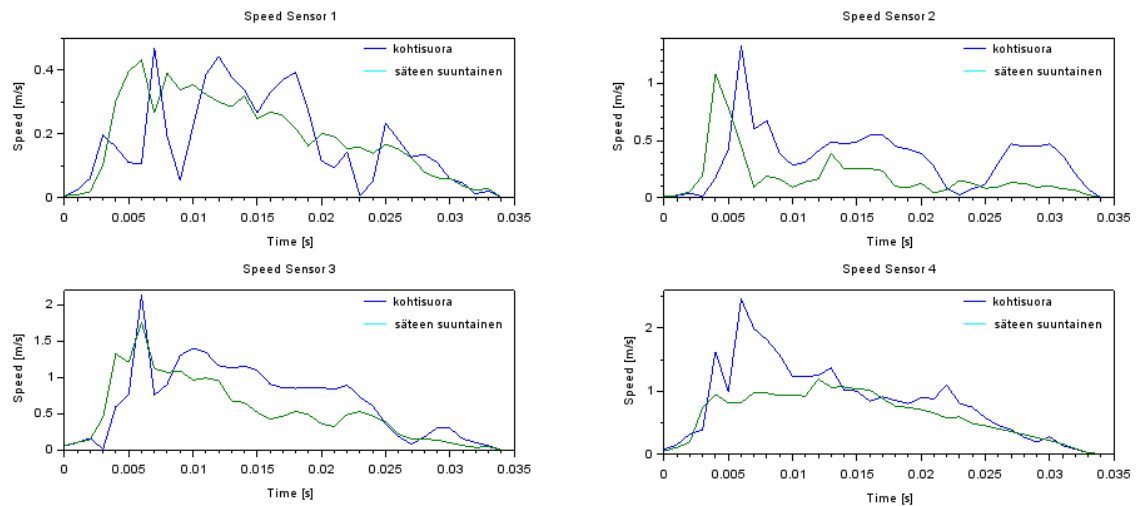


Kuva 24. Prototyyppi 2 liikemäärät 1.3 bar kiekon iskulla

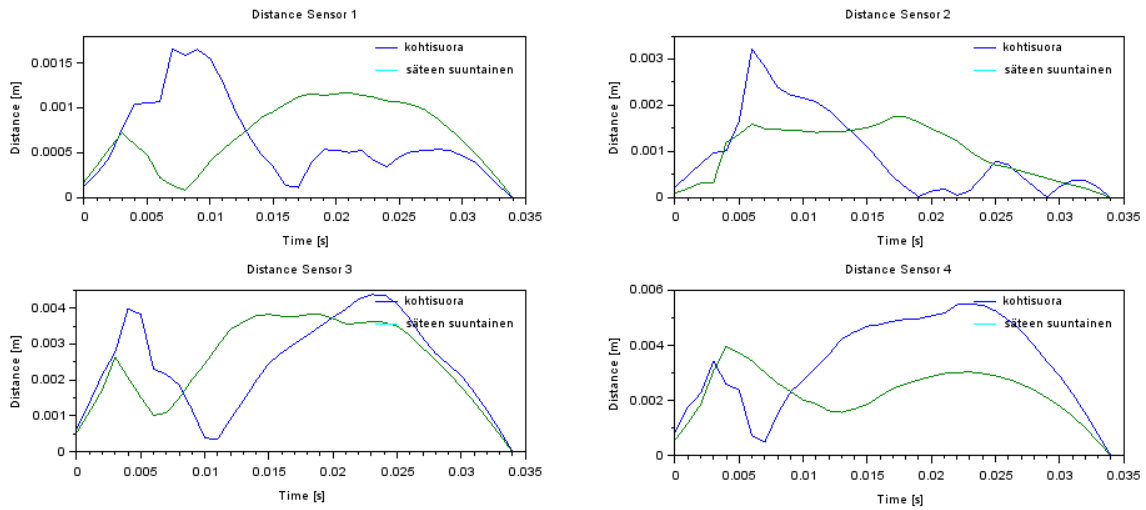
Suojus prototyyppi 2 mittaustulokset 1.4 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 25, nopeuksille kuvassa 26 ja liikemäärille kuvassa 27.



Kuva 25. Prototyyppi 2 kiihtyvyydet 1.4 bar kiekon iskulla

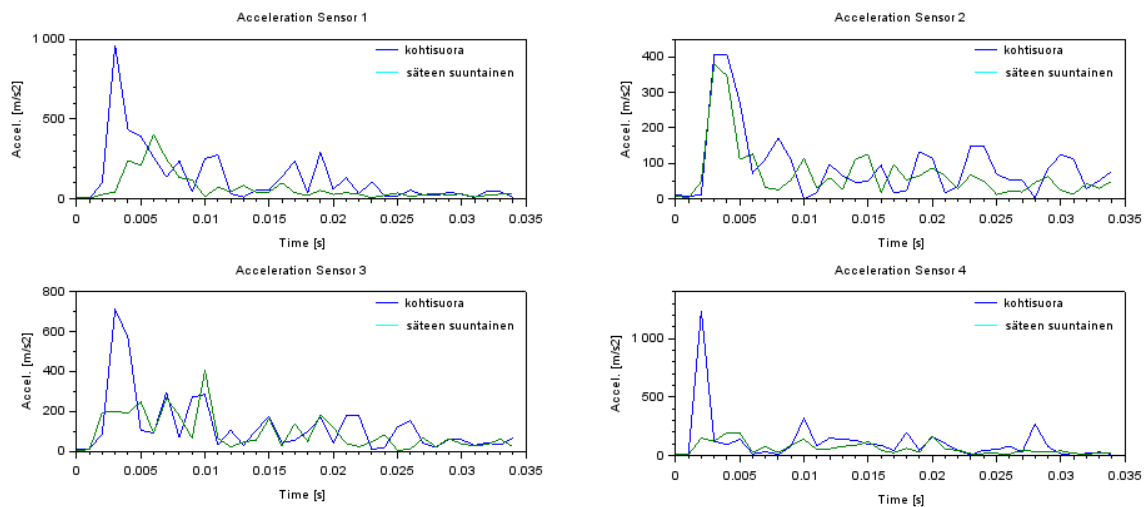


Kuva 26. Prototyyppi 2 nopeudet 1.4 bar kiekon iskulla

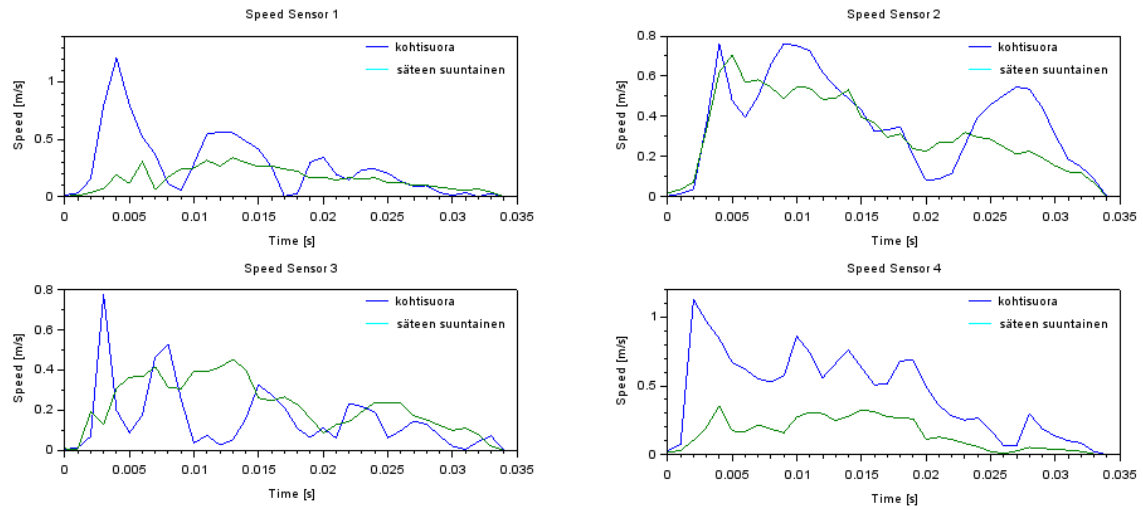


Kuva 27. Prototyyppi 2 liikemäärät 1.4 bar kiekon iskulla

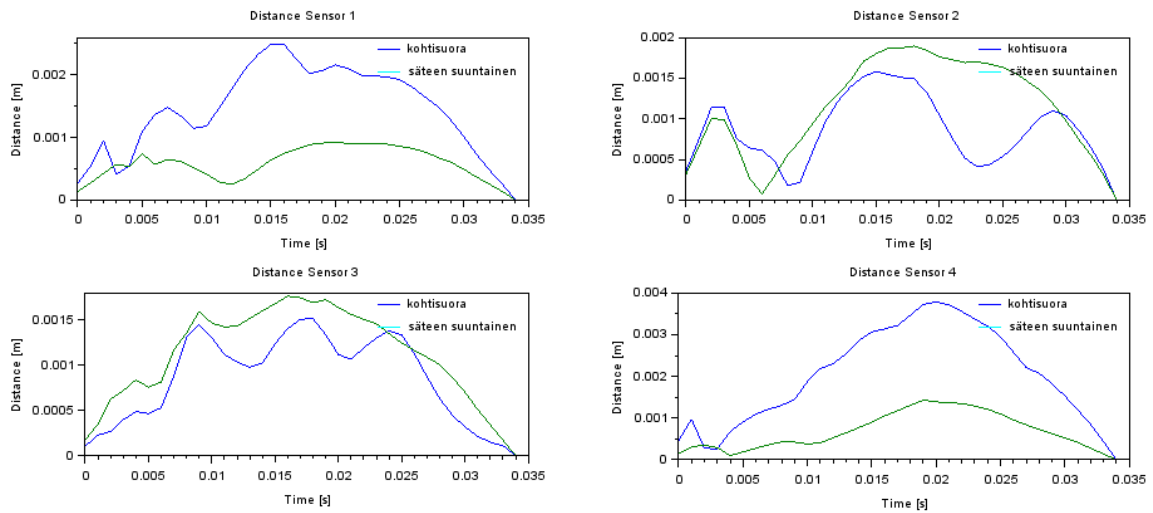
Suojus prototyyppi 2 mittaustulokset 1.5 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 28, nopeuksille kuvassa 29 ja liikemäärille kuvassa 30.



Kuva 28. Prototyyppi 2 kiihtyvyydet 1.5 bar kiekon iskulla



Kuva 29. Prototyyppi 2 nopeudet 1.5 bar kiekon iskulla



Kuva 30. Prototyyppi 2 liikemäärät 1.5 bar kiekon iskulla

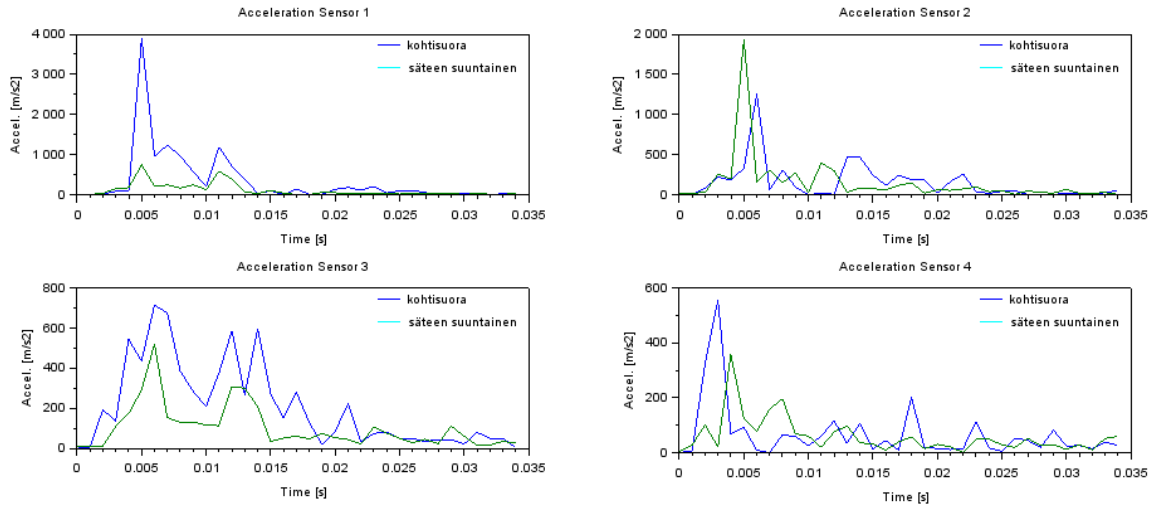
4.2.3 Suojus prototyyppi 3

Suojuksessa on pelkästään EPP solumuovi 12 mm. Komponentin kokonaispaino on 14 g. Prototyyppi 3 on esitetty kuvassa 31.

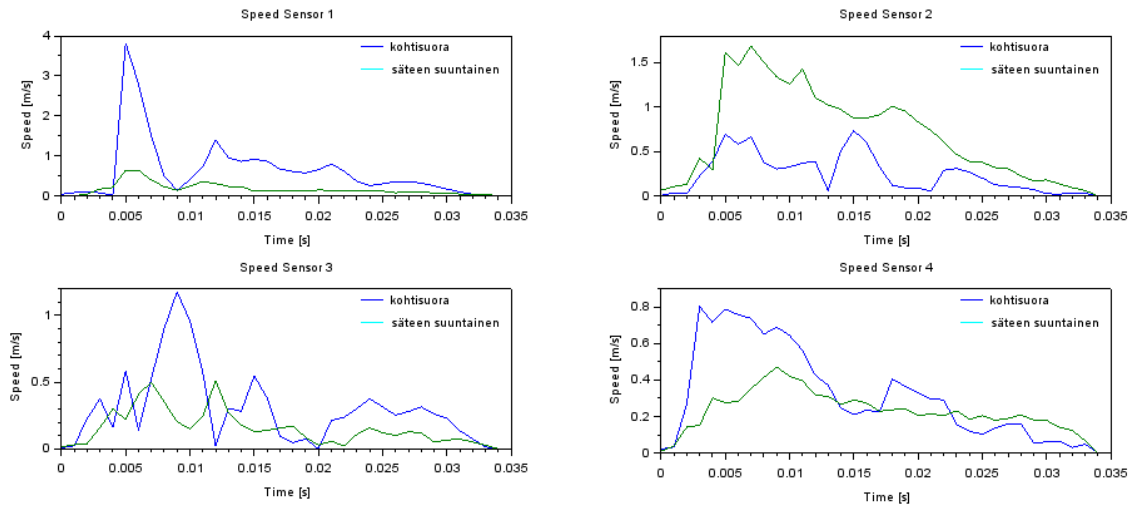


Kuva 31. Lonkkasuojus prototyyppi 3.

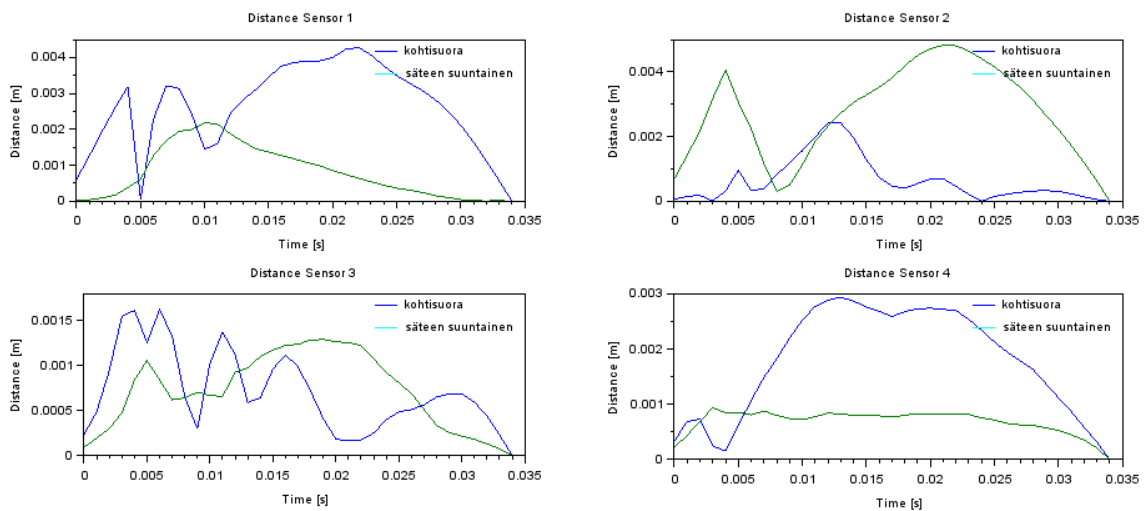
Suojus prototyyppi 3 mittaustulokset 1.3 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 32, nopeuksille kuvassa 33 ja liikemäärille kuvassa 34.



Kuva 32. Prototyyppi 3 kiihtyvyydet 1.3 bar kiekon iskulla

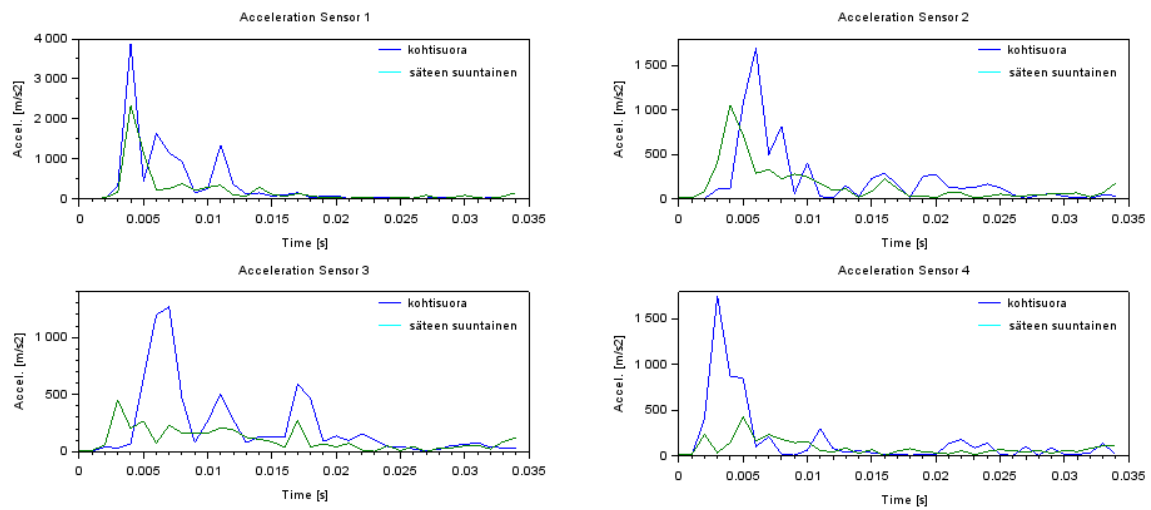


Kuva 33. Prototyyppi 3 nopeudet 1.3 bar kiekon iskulla

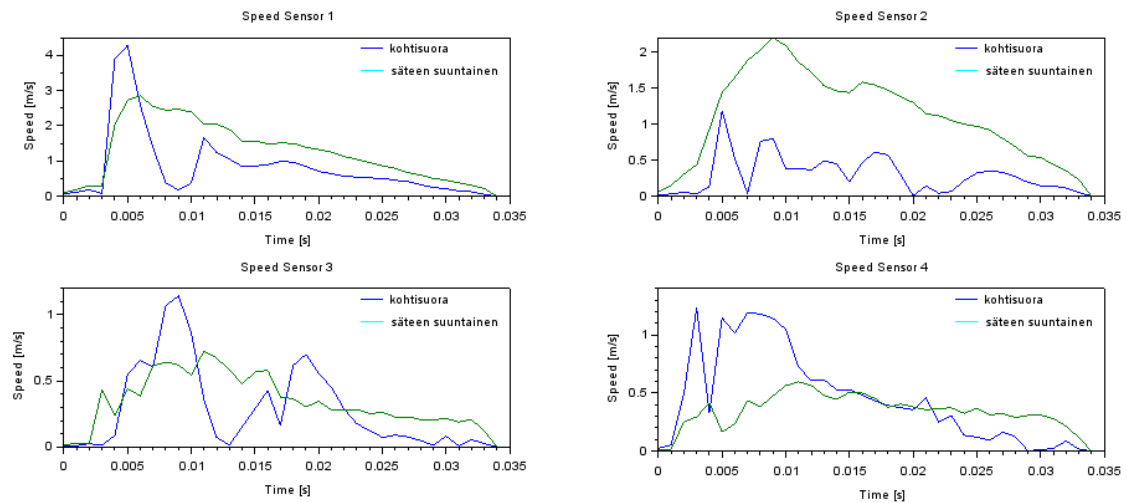


Kuva 34. Prototyyppi 3 liikemäärät 1.3 bar kiekon iskulla

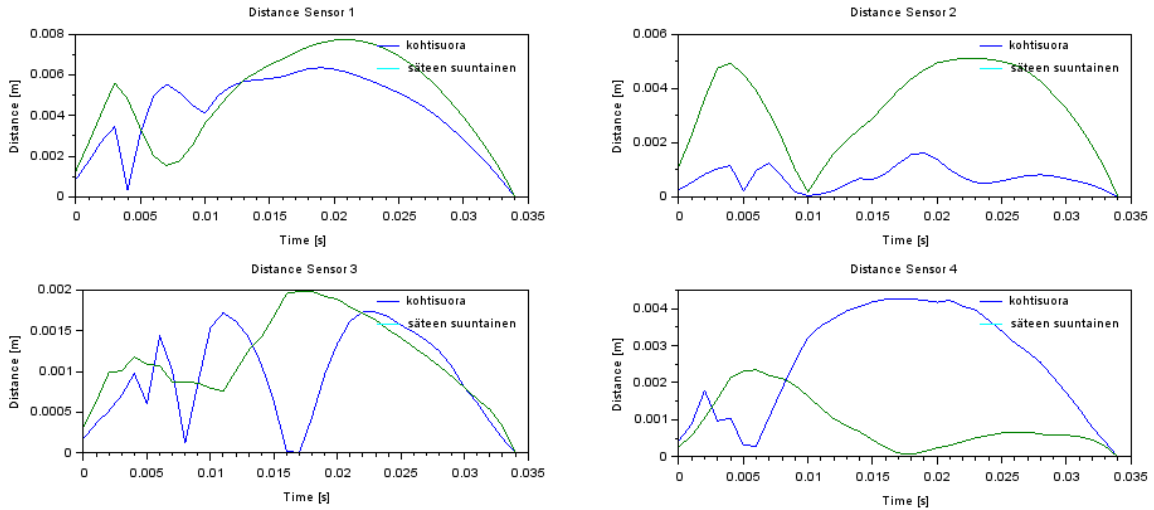
Suojus prototyyppi 3 mittaustulokset 1.4 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 35, nopeuksille kuvassa 36 ja liikemäärille kuvassa 37.



Kuva 35. Prototyyppi 3 kiihtyvyydet 1.4 bar kiekon iskulla

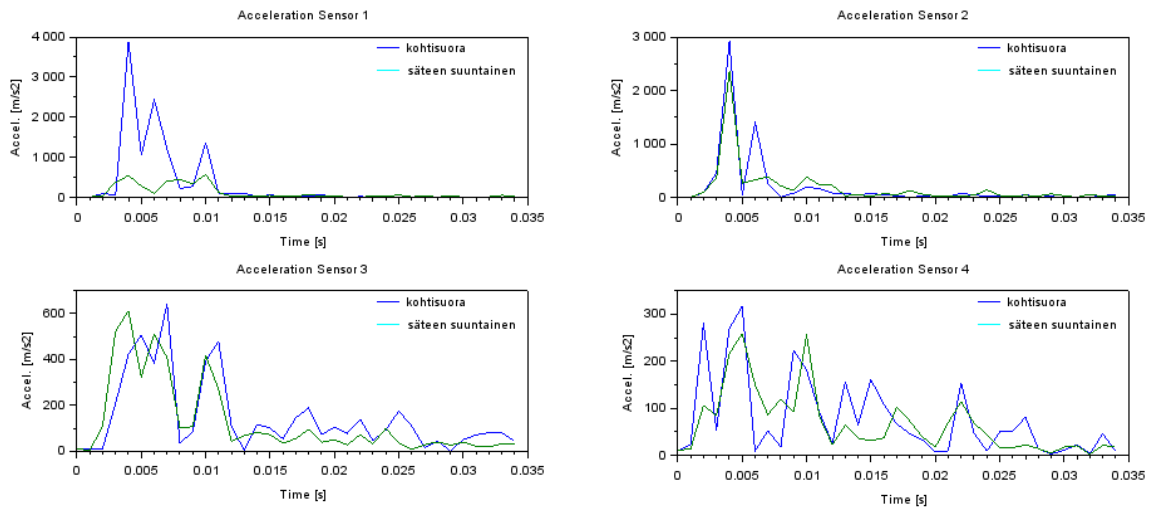


Kuva 36. Prototyyppi 3 nopeudet 1.4 bar kiekon iskulla

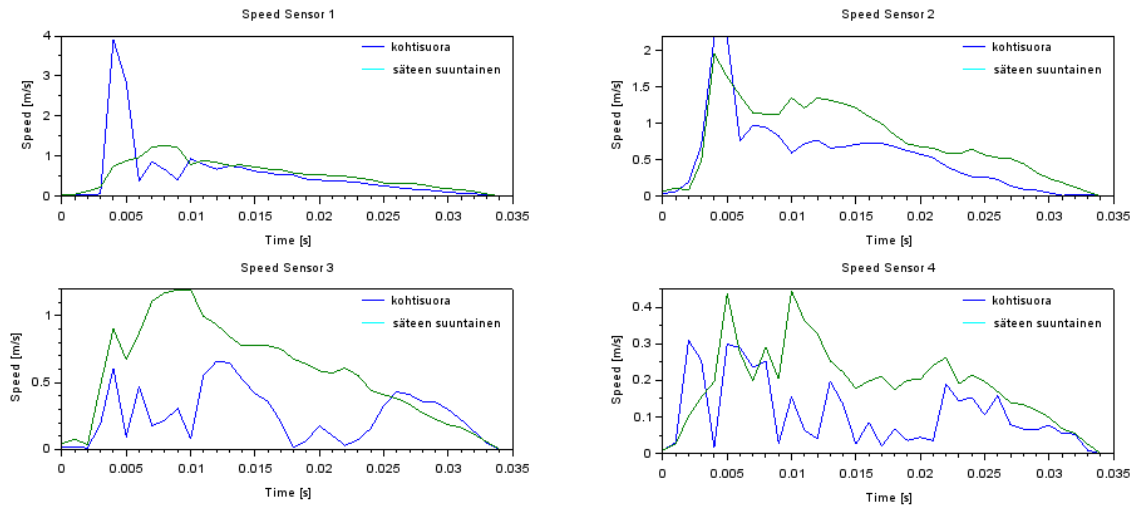


Kuva 37. Prototyyppi 3 liikemäärät 1.4 bar kiekon iskulla

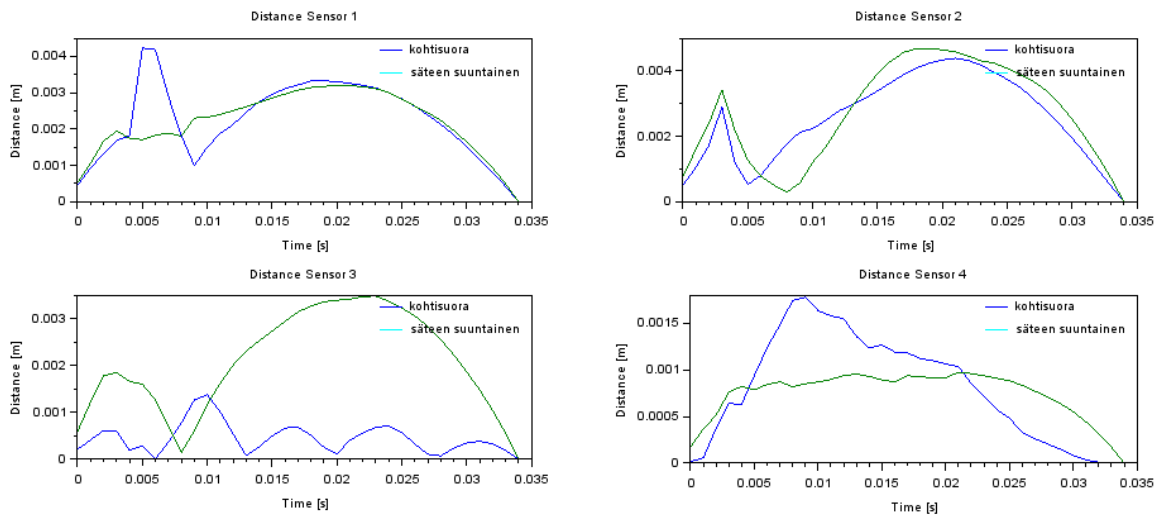
Suojus prototyyppi 3 mittaustulokset 1.5 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 38, nopeuksille kuvassa 39 ja liikemäärille kuvassa 40.



Kuva 38. Prototyyppi 3 kiihtyvyydet 1.5 bar kiekon iskulla



Kuva 39. Prototyyppi 3 nopeudet 1.5 bar kiekon iskulla



Kuva 40. Prototyyppi 3 liikemäärät 1.5 bar kiekon iskulla

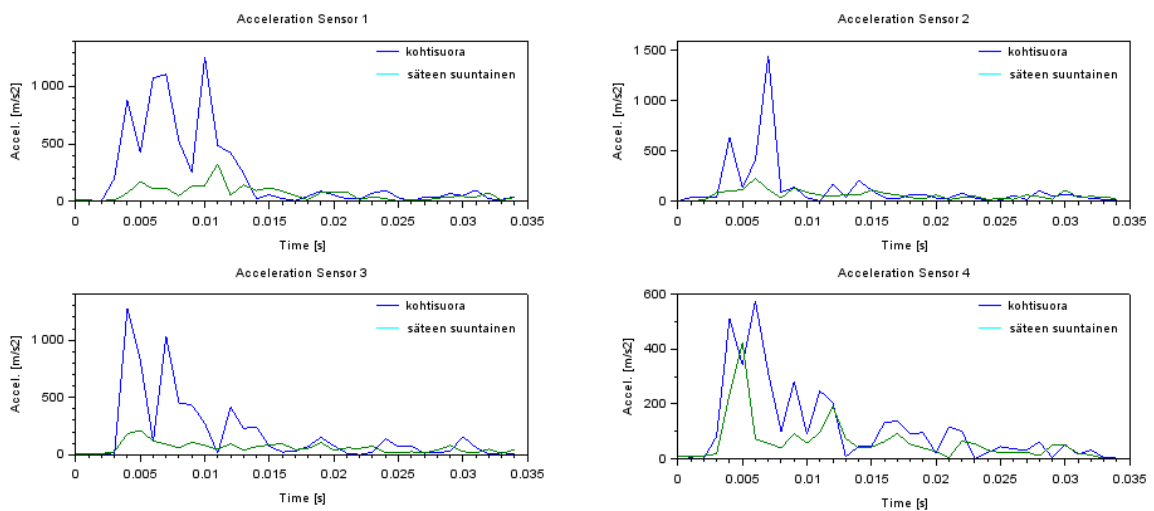
4.2.4 Suojus prototyyppi 4

Suojuksessa on levennetty PP kilpielementin muotoilu ja 12 mm IXPE solumuovia. Komponentin kokonaispaino on 56 g. Prototyyppi 4 on esitetty kuvassa 41.

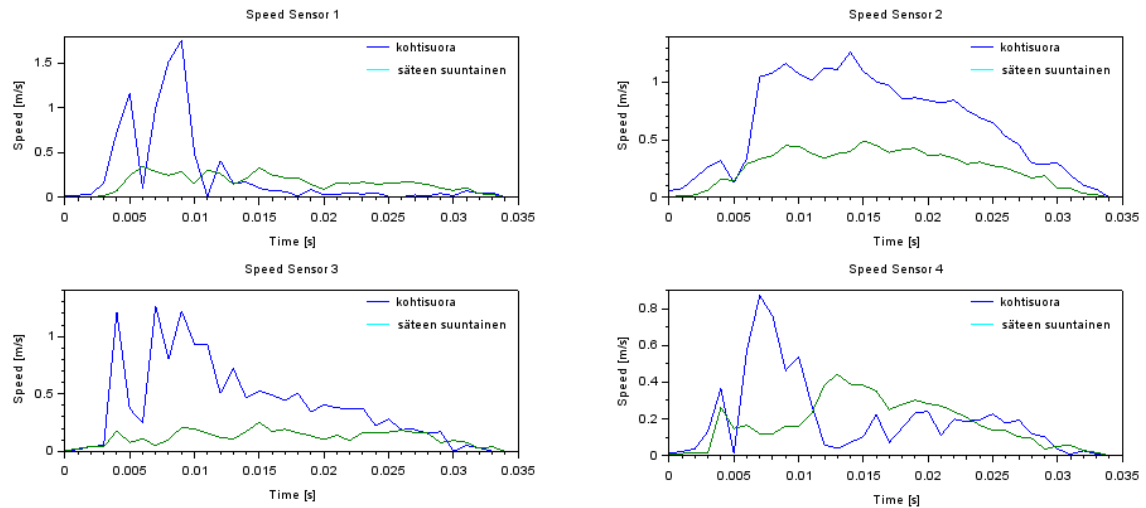


Kuva 41. Lonkkasuojus prototyyppi 4

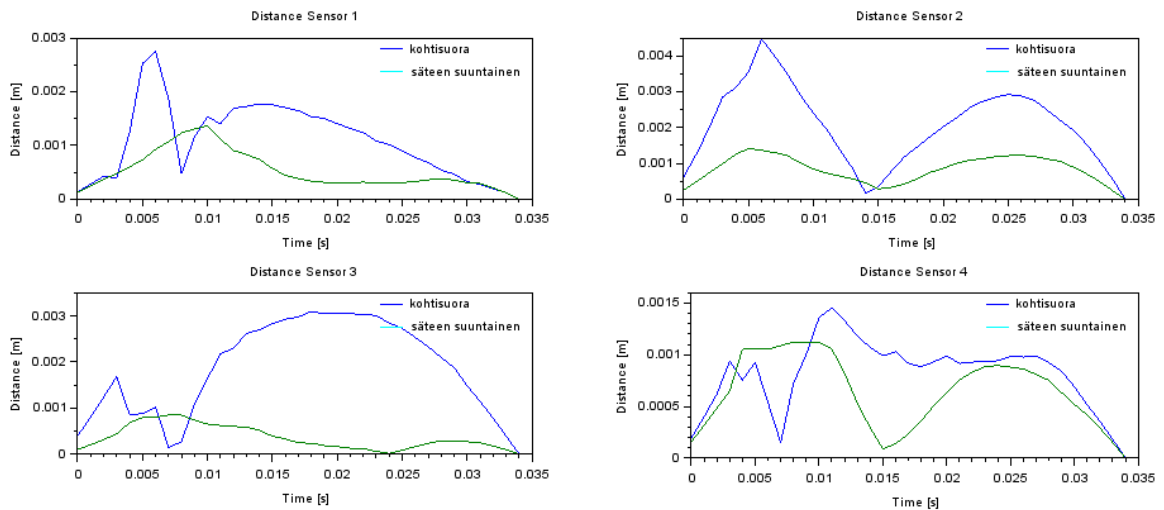
Suojus prototyyppi 4 mittaustulokset 1.3 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 42, nopeuksille kuvassa 43 ja liikemäärille kuvassa 44.



Kuva 42. Prototyyppi 4 kiihtyvyydet 1.3 bar kiekon iskulla

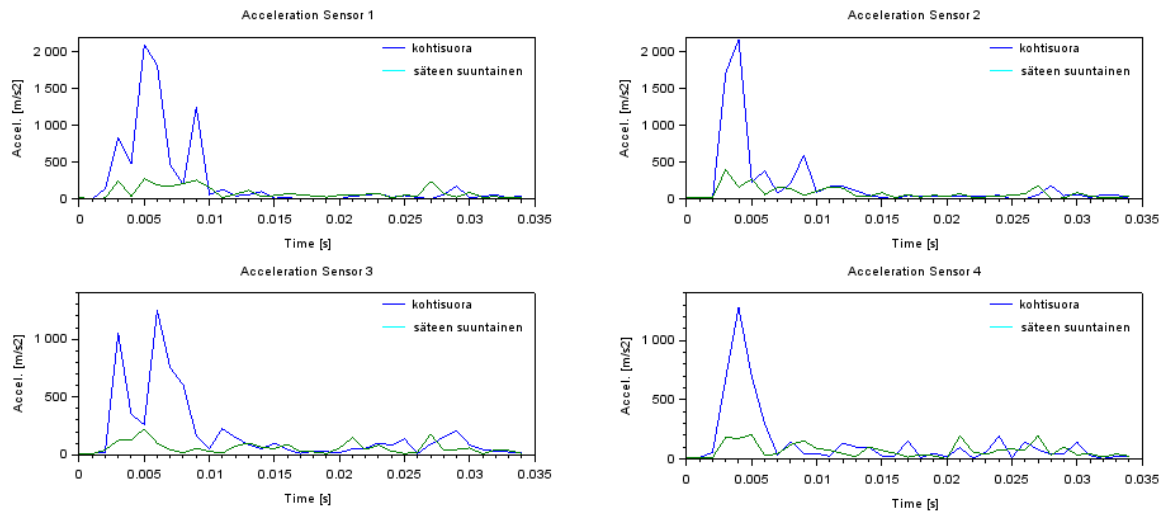


Kuva 43. Prototyyppi 4 nopeudet 1.3 bar kiekon iskulla

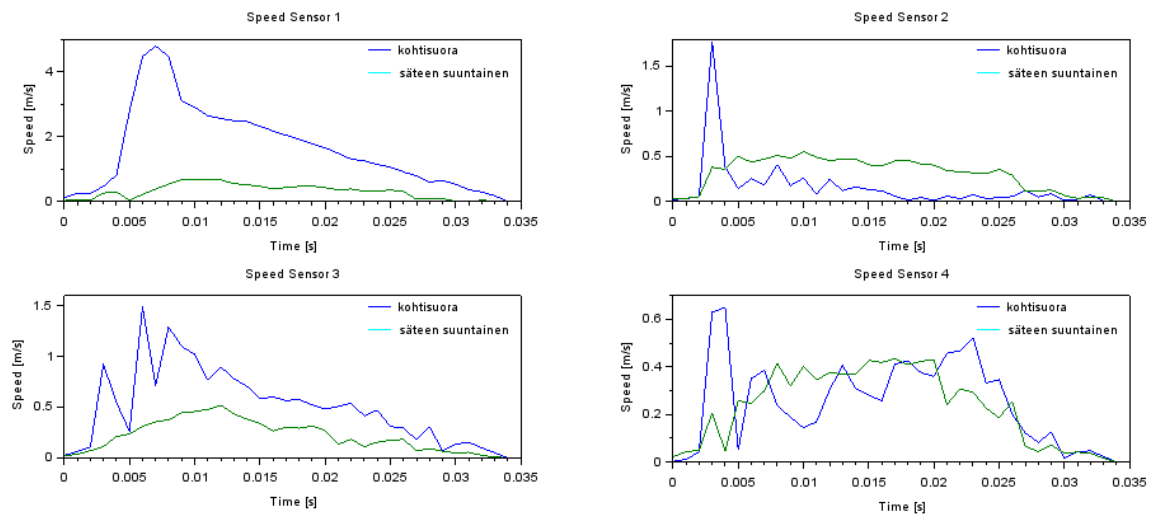


Kuva 44. Prototyyppi 4 liikemäärät 1.3 bar kiekon iskulla

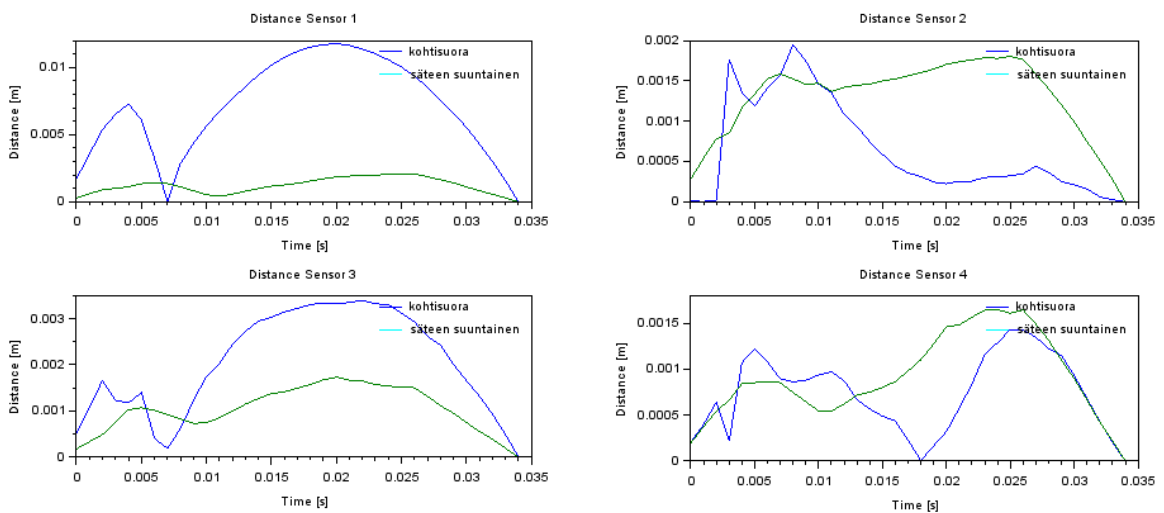
Suojus prototyyppi 4 mittaustulokset 1.4 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 45, nopeuksille kuvassa 46 ja liikemäärille kuvassa 47.



Kuva 45. Prototyyppi 4 kiihtyvyydet 1.4 bar kiekon iskulla

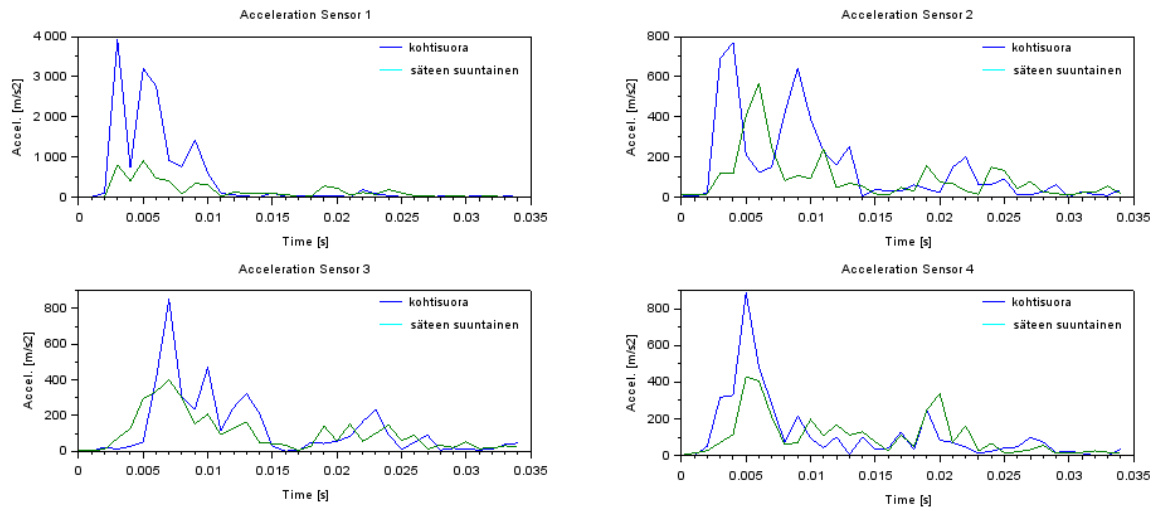


Kuva 46. Prototyyppi 4 nopeudet 1.4 bar kiekon iskulla

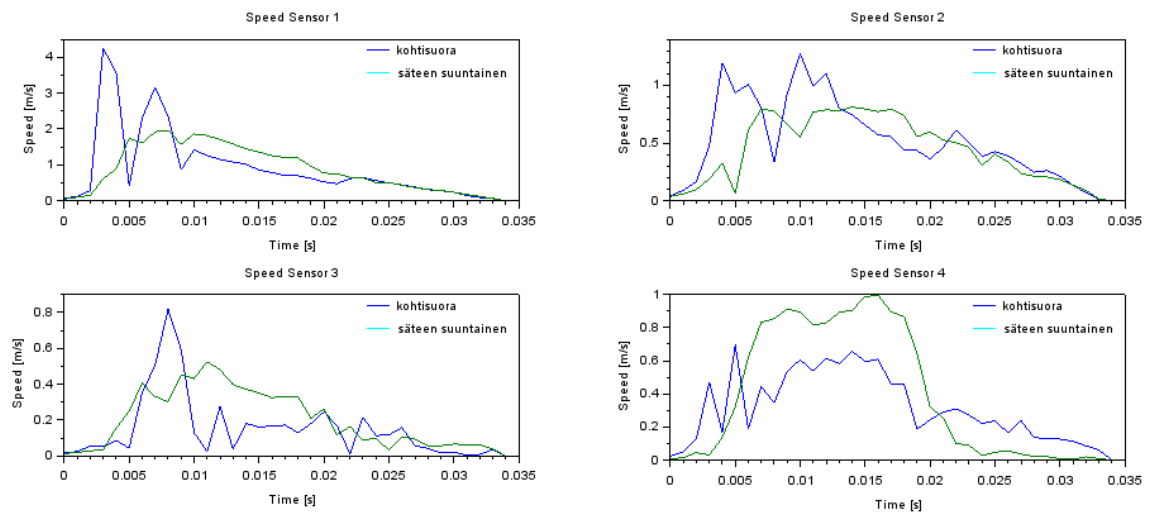


Kuva 47. Prototyyppi 4 liikemäärät 1.4 bar kiekon iskulla

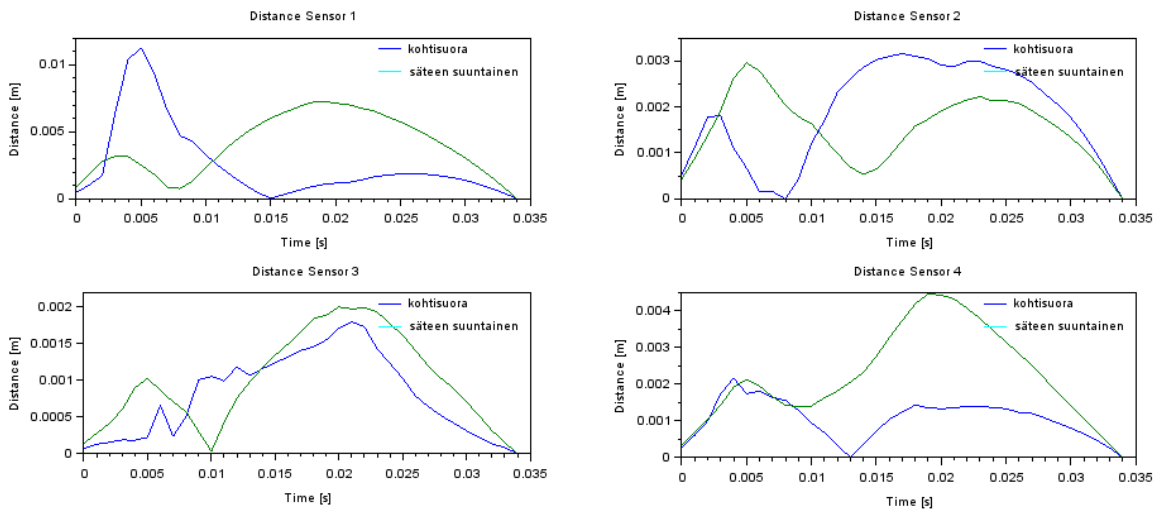
Suojus prototyyppi 4 mittaustulokset 1.5 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 48, nopeuksille kuvassa 49 ja liikemäärille kuvassa 50.



Kuva 48. Prototyyppi 4 kiihtyvyydet 1.5 bar kiekon iskulla



Kuva 49. Prototyyppi 4 nopeudet 1.5 bar kiekon iskulla



Kuva 50. Prototyypin 4 liikemäärät 1.5 bar kiekon iskulla

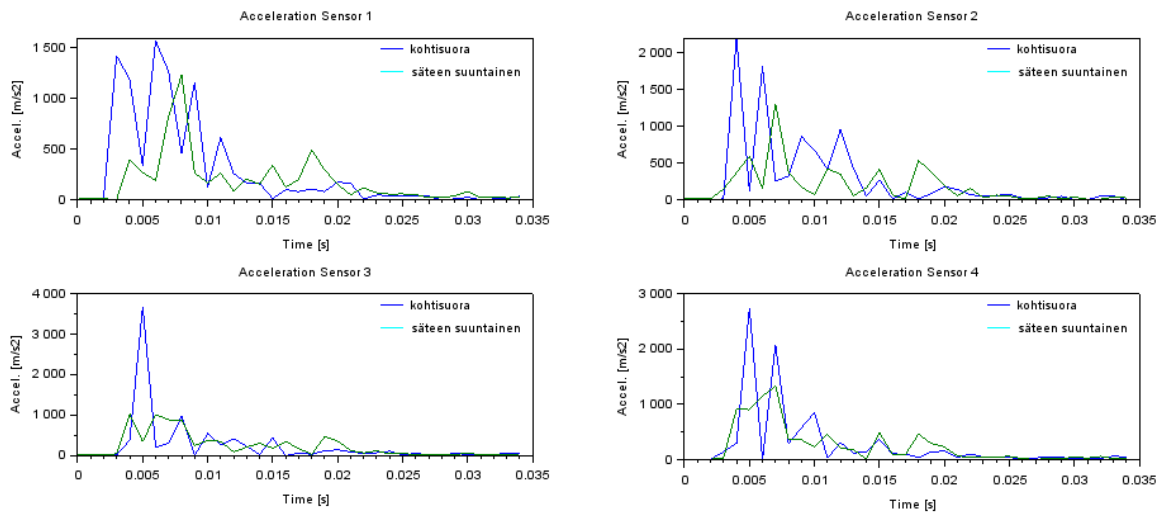
4.2.5 Lonkkasuojus TP 9000 jääkiekkohousuista

Suojuksessa on topattu kovike ja polyeetteri pehmuste. Suojuksen paksuus yhteensä 28 mm. Komponentin kokonaispaino on 134 g. TP 9000 suojuksen esitetty kuvassa 51.

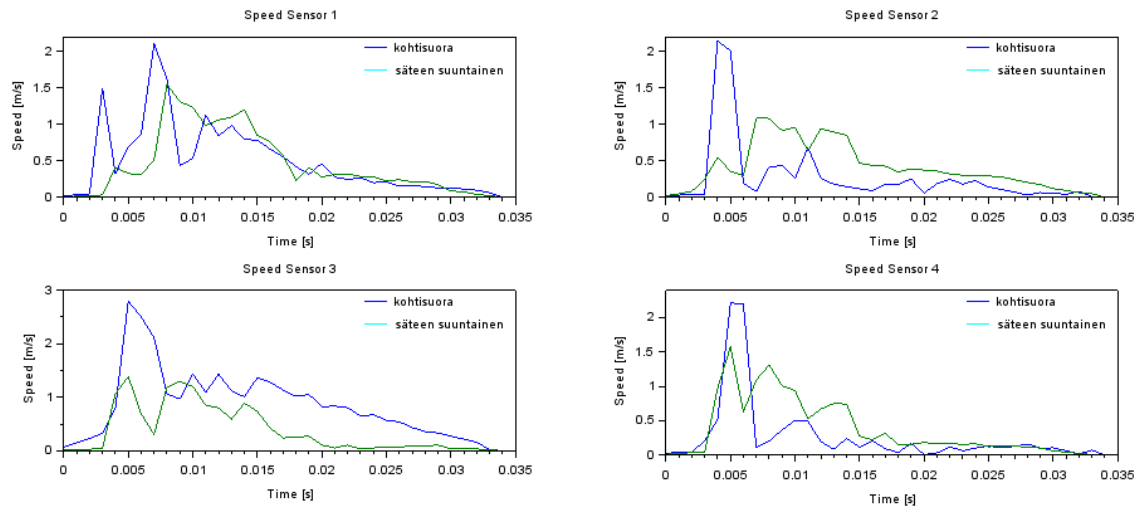


Kuva 51. Lonkkasuojus TP 9000

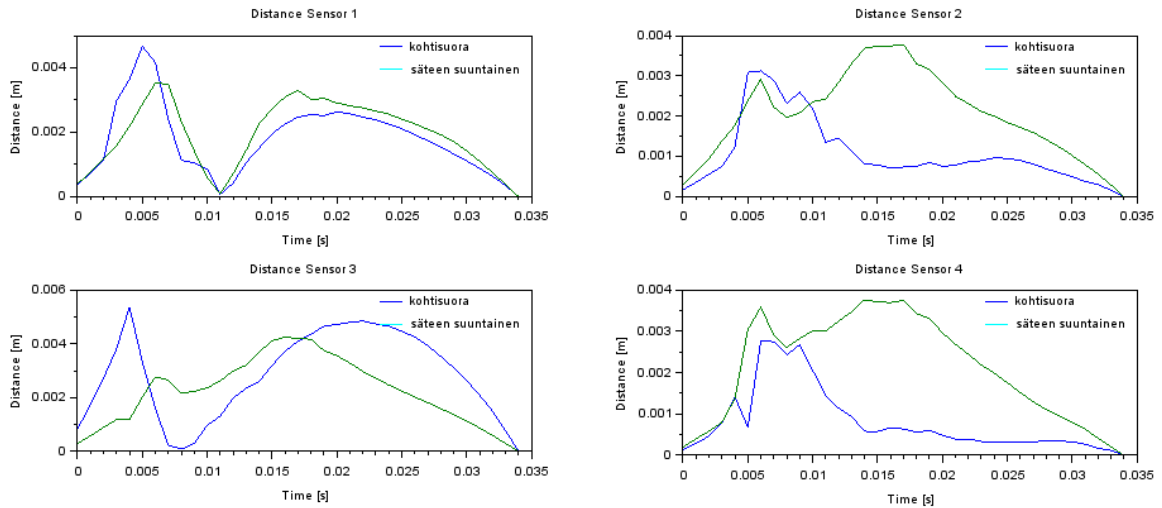
Suojus TP 9000 mittauks tulokset 1.8 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 52, nopeuksille kuvassa 53 ja liikemäärille kuvassa 54.



Kuva 52. TP 9000 kiihtyvyydet 1.8 bar kiekon iskulla



Kuva 53. TP 9000 nopeudet 1.8 bar kiekon iskulla



Kuva 54. TP 9000 liikemäärät 1.8 bar kiekon iskulla

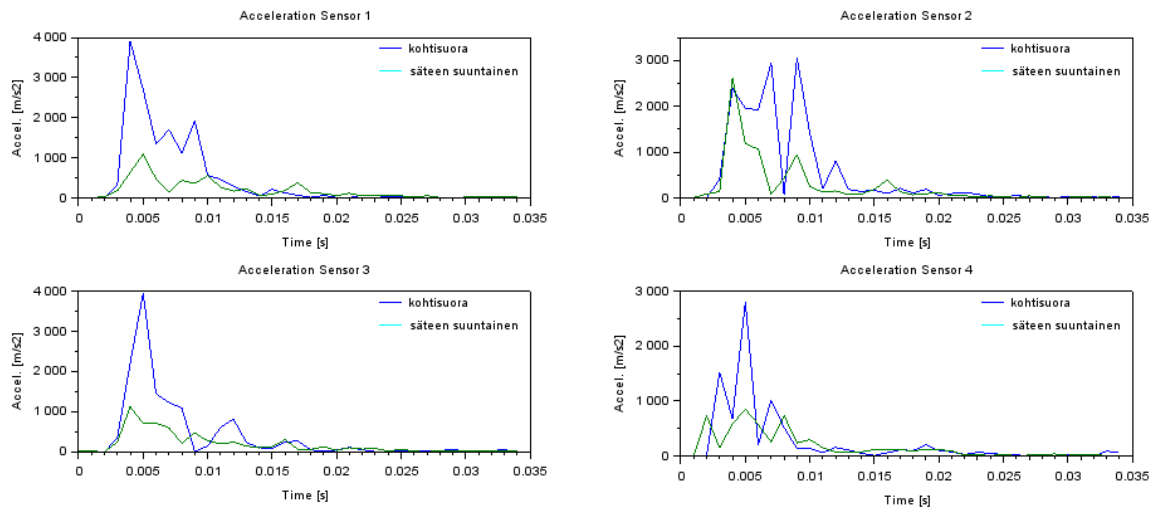
4.2.6 Lonkkasuojus elementti Kofo

Suojus, jossa on liimattu kaksi kovavaahto patjaa yhteen. Kokonaispaino on 70 g ja suojuksen paksuus on 28 mm. Kuvassa 55 on Kofo elementti.

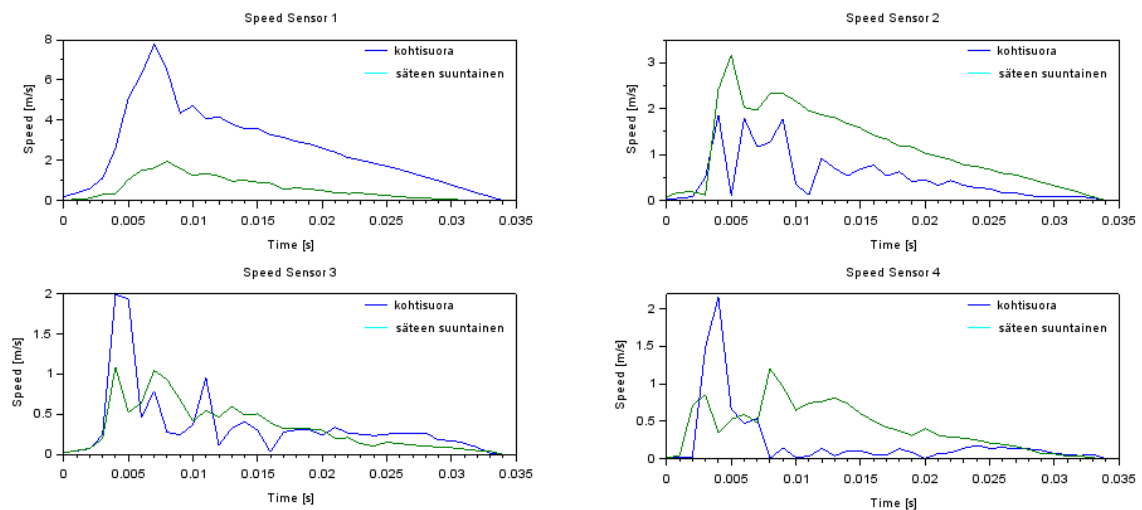


Kuva 55. Lonkkasuojus elementti Kofo

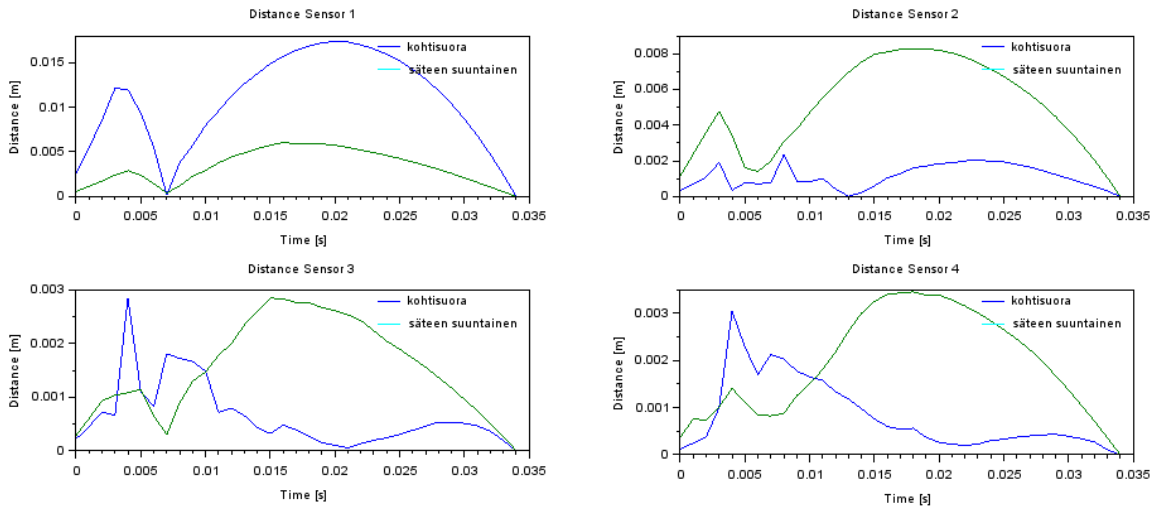
Kofo elementin mittaustulokset 1.8 bar asetuksella on esitetty kiihtyvyydelle kuvassa 56, nopeuksille kuvassa 57 ja liikemäärille kuvassa 58.



Kuva 56. Kofo kiihtyvyydet 1.8 bar kiekon iskulla



Kuva 57. Kofo nopeudet 1.8 bar kiekon iskulla



Kuva 58. Kofo liikemäärät 1.8 bar kiekon iskulla

4.3 Tuloksien analysointi

Tuloksia analysoidaan muutamalla eri tavalla. Tarkastellaan kunkin suojuksen mittausdataa sellaisenaan sekä vertaillaan niitä eri iskun nopeuksien välillä. Toinen tarkastelu tehdään vertailemalla suojuksien mittaustuloksia toisiinsa nähden. Lopuksi voidaan mittaustuloksista yrittää havaita vaimennusominaisuuksia. Kiihtyvyyksiä tulkitaan siten, että äkillinen ja suuri kohtisuora kiihtyvyys tarkoittaa huonoa vaimennusta. Mikäli kohtisuora kiihtyvyys on äkillinen mutta pieni, on vaimennus hyvä. Kiihtyvyyden ollessa maltillisempi ja vähäinen on vaimennus erinomainen. Nopeuksien ja liikemäärien käyriä voidaan käyttää apuna tulkitsemaan kiihtyvyyksiä ja havaitsemaan mahdollisia muuttujia. Iskun jakamisen ominaisuuksia voidaan tulkita vertaamalla kiihtyvyyden ajankohtaa ja suuruutta antureiden välillä.

Prototyyppi 1 ensimmäisestä 1.3 bar kiekon iskusta kuvassa 12, voidaan huomata suojuksen antavan korkeamman ja aikaisemman kiihtyvyyden reunoille. Tämä tarkoittaa että suojuksen jakaa iskun erittäin tehokkaasti koko pinta-alalleen. Samasta havainnosta voidaan myös todeta suojuksen mallinnuksen toimivan erittäin hyvin. Lantion ja suojuksen väliin jäävä tila pakottaa kilpielementin taipumaan ja venymään, joka parantaa iskun absorbointia. Kiihtyvyyden huippuarvot ovat kuitenkin hyvin korkeat. Tämä isolla todennäköisyydellä johtuu kilpielementin suuresta jäykkyydestä, sekä EPP:n jäykkyydestä verrattuna lihaskudosta simuloivaan solumuoviin. Tässä tapauksessa huomataan, että lihaskudosta simuloiva solumuovi väistyy tai painuu kasaan ennen EPP:tä. Tätä johtopäätöstä tukee myös hyvin suuret sivuttaiskiihtyvyydet antureissa 1 ja 2. Suuret sivuttaiskiihtyvyydet antureissa 3 ja 4 sen sijaan tukevat johtopäätöstä hyvän iskun jakamisen tuloksesta. 1.4 ja 1.5 bar asetuksen iskuilla huomataan kiihtyvyyksien olevan

erittäin tasaisia ja suuria. Tämä vahvistaa kilpielementin jäykkyyden olevan liian suuri. Elementissä ei tapahdu tarpeeksi tai juuri ollenkaan venymää tai taipumista. Tämän voidaan olettaa olevan tosi, sillä 1.3 bar asetuksen isku ei koskaan välity kokonaisuudessaan anturille 1, mikä pystytään näkemään myös 1.3 bar asetuksen liikemäärän vähäisyydestä anturissa 1.

Prototyyppi 2 kiihtyvyydet ovat paljon pienempiä mitä prototyyppi 1 tuloksissa. Eroja ovat myös anturin 1 myöhempi ja hieman vähäisempi kohtisuorainen kiihtyvyys sekä neljännen anturin suurempi kohtisuora kiihtyvyys. Nämä havainnot selittyvät kapeamman kilpielementin toiminnalla. Kapeampi kilpielementti joustaa enemmän ja geometrinen kilven mallinnus pakottaa reunuksen kiristymään, joka näkyy reunalla korkeampana kiihtyvyytenä. Suurempi joustaminen näkyy iskukohtaan pienempänä kiihtyvyytenä. Joustaminen ja taipuminen aiheuttaa energiahäviötä ja EPP pehmusteelle lisääntynyt kuormitus lisää vaimunnusta. Anturin 1 sivuttaiskiihtyvyys vahvistaa teoriaa liian pehmeästä lihaskudosta simuloivasta solumuovista. 1.4 ja 1.5 bar kiihtyvyyksistä nähdään kuinka suojuus kovemmissa iskuissa toimii tasaisemmin ja tehokkaasti vaimentaen. Kiihtyvyyksien äkillinen luonne selittyy pehmeämmästä lihasta simuloivan solumuovin ominaisuudesta kuin EPP:llä. Koska kiihtyvyydet ovat matalia, voidaan olettaa EPP:n toimivan vaimentimena hyvin.

Prototyyppi 3 kiihtyvyydet anturissa 1 vahvistavat viimeistään sen, että solumuovi tai lihas ottaa voiman vastaan ennen EPP pehmustetta sen ollessa kovempi, kuin pohjalla oleva solumuovi tai mahdollisesti lihaskudos. Kiihtyvyyksistä voidaan huomata myös pelkän EPP pehmusteen toimivan iskua jakavana elementtinä kohtalaisen hyvin, varsinkin iskujen nopeuden kasvaessa.

Prototyyppi 4 suojuksen voidaan 1.3 bar iskussa todeta vaimentavan iskua hyvin, sillä kiihtyvyydet ovat matalia ja monivaiheisia. 1.4 bar asetuksella suojuus jakaa ja vaimentaa vielä iskua hyvin, mutta 1.5 bar asetuksella isku pääsee lyömään kontaktikohdasta läpi. Tästä voidaan päätellä että pehmeämpi IXPE ei tue iskua jakavaa kilpielementtiä. Iskun ollessa tarpeeksi kova, ei suojuus enään kykene vaimentamaan törmäystä. Verrattaessa prototyypin 4 kiihtyvyyksiä prototyyppi 1 suojuksen kiihtyvyyksiin, jossa on käytössä sama kilpielementti, mutta EPP pehmuste, nähdään, että EPP tukee erinomaisesti suojuksen iskua jakavaa ominaisuutta.

TP 9000 suojuksen istuvuuden vastineeseen ollessa erillainen ja suojuksen rakenteessa olevan topatun kireän kankaan takia kiihtyvyytulokset ovat hieman korostuneet. Voidaan kuitenkin todeta suojuksen jakaneen tehokkaasti iskua. Ottaen huomioon, että isku on suoritettu 1.8 bar asetuksella, voidaan todeta vaimennuksen olevan hyvällä tasolla.

Kofo elementin iskussa 1.8 bar asetuksella havaitaan, että suojaustaso ja iskun jakaminen on kohtalaista. Ilman kunnollista iskua jakavaa kilpielementtiä, joudutaan valitsemaan erittäin kova pehmustemateriaali, joka jakaa ja vaimentaa iskua. Tuloksissa näkyy kompromissin tuottama ongelma, jossa kumpikin suojausmekanismin elementti toteutuu vain osittain. Pitää kuitenkin ottaa huomioon, että kiekon nopeus on ollut reilusti suurempi.

5 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyössä tehdyn selvityksen perusteella polypropeeni raaka-aineena on edullinen ja ominaisuuksiltaan hyvä kehon suojaus komponenttien valmistukseen. Polypropeenista paisutettu vaahtomuovi EPP osoittautui myös erittäin hyväksi iskunvaimennus materiaaliksi kirjallisuuden perusteella. Työn tavoite oli selvittää EPP:n soveltuvuus kehon suojaus komponentissa kokeellisten mittauksien avulla. Kirjallisuudesta ja markkina tutkimuksista saatiin selville, että EPP:tä voidaan valmistaa usealla eri tiheydellä ja että sen ominaisuuksia pystytään hieman muuttamaan. Myös selvitys EPP:n valmistustekniikasta ja valmistuskustannuksista onnistuttiin toteuttamaan. Selvitys suojauksen mekanismista toi tähän tutkimukseen lisätietoa, siitä minkälaisia mekaanisia ominaisuuksia suojaus komponenttien materiaaleilta vaaditaan. Varsinkin urheilulajeissa tarvitaan mahdollisimman kevyttä ja huomaa matonta suojausta, näihin kriteereihin EPP soveltuu erittäin hyvin. Haasteena EPP:n hyödyntämisessä suojuksissa on oikean tiheyden valitseminen ja saavuttaminen, liian kovalla pehmusteella ei saavuteta halutunlaista vaimennusta.

Mittaus järjestelyllä onnistuttiin selvittämään suojuksien iskua jakavat ominaisuudet hyvin ja luotettavasti. Antureiden mittausherkkyyks sekä mittausvastineen ominaisuudet sopivat hyvin kiihtyvyyksien tarkkailuun ajanhetkillä ja vertailuihin antureiden välisiin kiihtyvyyksiin. Jatkokehitystä ja selvitystä mittausjärjestelylle tulee tehdä lihasta simuloivan materiaalin jäykkyydelle ja ominaisuuksille. Nykyisessä järjestelyssä oleva solumuovi on EPP:tä pehmeämpi, joten EPP:n todellinen vaimennuskyky jää selvittämättä. Olisi tärkeä saada selville ihmisen lihaksen kimmokerroin, jotta onnistutaan valitsemaan sekä oikea mittausvastineen solumuovi, että EPP:n tarpeeksi pehmeä versio suojuksiin. Kiekkotykki laitteen teoreettinen ampuma nopeus sisältää arvioihin perustuvan kertoimen, joka vähentää todellisuuden varmuutta. Laitteella pitäisi tehdä kiekon nopeus mittaukset tutkalla ja suurnopeuskameralla, jotta voidaan saada selville todellinen kiekon nopeus. Kiekon todellisen nopeuden ja vastineessa olevan lihasta simuloivan materiaalin ominaisuus tietojen avulla voitaisiin selvittää tarkemmin iskussa tapahtuvat voimat ja energian määrät.

Loppu tuloksena voidaan todeta, että EPP:n ansiosta on voitu toteuttaa 91 g kevyempi suojuus, jonka vaimennusominaisuudet ovat vähintään yhtä hyvät, kuin TP9000 jääkiekkohousuissa olevan suojuksen.

Lähteet

Arpro. 2022. Viitattu 26.5.2022. Saatavissa <https://www.arpro.com/en-GB/>

Basf. 2022. Neopolen. Viitattu 26.5.2022. Saatavissa https://plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/industries/pp_automotive/products/neo_polen.html

Bloomberg. 2022. Price of polypropylene worldwide from 2017 to 2022. Krungsri research. Viitattu 16.5.2022. Saatavissa <https://www.statista.com/statistics/1171084/price-polypropylene-forecast-globally/>

Borealis & Sulzer Chemtech. 2021. Sulzer Chemtech and borealis launch new polypropylene foam extrusion technology enabling lower cost and increased efficiency across the value chain. Media release. Viitattu 16.5.2022. Saatavissa: <https://www.borealisgroup.com/news/sulzer-chemtech-and-borealis-launch-new-polypropylene-foam-extrusion-technology-enabling-lower-cost-and-increased-efficiency-across-the-value-chain>

British plastics federation. 2022. Expanded polypropylene. Viitattu 26.05.2022. Saatavissa https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Expanded_Polypropylene_EPP.aspx

Britton, R. 2009. Update on mouldable particle foam technology. E-kirja. Ismithers. Primo. Saatavissa rajoitetusti <http://primo.lut.fi/lab>

Hanwha solutions. 2017. Bufflite-epp. Viitattu 26.05.2022. Saatavissa <https://hwam.co.kr/en/products/automotive-materials/bufflite-epp.do>

Izoblok. 2020. Technology. Viitattu 26.05.2022. Saatavissa <https://en.izoblok.pl/technology/>

Liu, P S. & Chen, G F. 2014. Porous materials: Processing and applications. E-kirja. Burlington: Butterworth-Heinemann. Primo. Saatavissa rajoitetusti <http://primo.lut.fi/lab>

Kaneka. About Eperan. Viitattu 26.05.2022. Saatavissa <http://english.kaneka-foam.jp/eperan-pp.html>

Maier, C. & Calafut, T. 1998. The definitive user's guide and Databook. E-kirja. Norwich, NY. Primo. Saatavissa rajoitetusti <http://primo.lut.fi/lab>

Matar, S. & Hatch, L F. 2001. Chemistry of petrochemical processes. E-kirja. Elsevier Science & Technology. Primo. Saatavissa rajoitetusti <http://primo.lut.fi/lab>

Mills, N. 2007. Polymer foams handbook: Engineering and biomechanics applications and design guide. E-kirja. Elsevier Science & Technology. Primo. Saatavissa rajoitetusti <http://primo.lut.fi/lab>

Morton, D. Reyes, A. Clausen, A. Hopperstad, O S. 2020. Mechanical response of low density expanded polypropylene foams in compression and tension at different loading rates and temperatures. Materials today communications. Vol. 23. Viitattu 30.05.2020. Saatavissa DOI: [10.1016/j.mtcomm.2020.100917](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100917)

Nurmi, T. 2022. Myyntijohtaja. Artekno oy. Haastattelu 25.05.2022

Peterson, L & Renstrom, P. 2017. Sport injuries. E-kirja. Taylor & Francis Group. Primo. Saatavissa rajoitetusti. <http://primo.lut.fi/lab>

Rapra Technology Limited. 2013. Blowing Agents & Foaming Processes 2013: Mainz, Germany, 14-15 May 2013. E-kirja. Shawbury: Smithers Rapra. Primo. Saatavissa rajoitetusti <http://primo.lut.fi/lab>

Raps, D. Hossieny, N. Park, C B & Altstädt, V. 2015. Past and present developments in polymer bead foams and bead foaming technology. Polymer foams. Vol. 56, 5–19. Viitattu 13.5.2022. Saatavissa DOI: [10.1016/j.polymer.2014.10.078](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.10.078)

Tamaro, D. Ballesteros, A. Walker, C. Reichelt, N & Trommsdorff, U. 2022. Expanded beads of high melt strength polypropylene moldable at low steam pressure by foam extrusion. Polymers. Vol. 14(1). Viitattu 15.5.2022. Saatavissa DOI: [10.3390/polym14010](https://doi.org/10.3390/polym14010)

