

Juho Kupsala

**KILPA-AJONEUVON JOUSITUSJÄRJESTELMÄN JA RUNGON
VÄLISEN ABSORBOIVAN ELEMENTIN ESISUUNNITTELU**

KILPA-AJONEUVON JOUSITUSJÄRJESTELMÄN JA RUNGON VÄLISEN ABSORBOIVAN ELEMENTIN ESISUUNNITTELU

Juho Kupsala
Opinnäytetyö
Syksy 2018
Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, auto- ja kuljetustekniikka

Tekijä: Juho Kupsala
Opinnäytetyön nimi: Kilpa-ajoneuvon jousitusjärjestelmän ja rungon välisen absorboivan elementin esisuunnittelu
Työn ohjaaja: Esa Kontio
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: syksy 2018
Sivumäärä: 77 + 1 liite

Työssä tarkasteltiin kilpa-ajoneuvon jousitusjärjestelmän ja rungon välistä rakennetta ja kehitettiin väliin elementti, joka ehkäisee runkovaurioita heilahduksenvaimentimen pohjaustilanteissa. Tavoitteena oli tutkia kilpa-ajoneuvon jousitusjärjestelmän läpi tulevia voimia ja määrittää tutkimukseen perustuen normaalin kilpa-ajotilanteen maksimivoimat heilahduksenvaimentimen yläpään kiinnityspisteessä. Voimien määrittämisen pohjalta tavoitteena oli suunnitella energiaa absorboiva elementti, joka toimii runkoon kohdistuvien normaalin kilpa-ajotilanteen maksimivoimien ylittävällä alueella.

Absorboiva elementti suunniteltiin absorboimaan ääritilanteissa syntyvien rungon lujuuden ylittävien voimien energiat. Elementin absorboiva materiaali suunniteltiin vaihdettavaksi nopeasti kilpailutilanteiden jälkeisissä huolloissa. Absorboivaksi materiaaliksi valittiin alumiinivahto, jolla on erittäin hyvä energian absorbointikyky. Työssä perehdyttiin alumiinivahtojen rakennelajeihin, solurakenteisiin ja valmistustapoihin. Työssä laskettiin avoimen ja suljetun solun alumiinivahtojen tasaantumisjännitykset ja energian absorbointikyvyt suunnitellussa absorboivassa elementissä. Työssä myös suoritettiin lujuustarkastelua elementin rungolle sekä avoimen ja suljetun solun alumiinivaahdoille.

Lopputuloksena saatiin monipuolinen peruskäsitys alumiinivahtojen käyttäytymisestä kynnysvoimalla aktivoituvana materiaalina ja niiden soveltamisesta energiaa absorboivaan elementtiin. Alumiinivahtojen energian absorbointikyvyt todettiin käyttötarkoitukseen riittäviksi etenkin Alporas-vaahdolla ja myös avoimen solun alumiinivaahdolla, mikäli käytetään 6061-T6-alumiinia raaka-aineena. Toteutettavissa oleva absorboiva elementti suunniteltiin, mutta absorbointimateriaalin vaikean saatavuuden vuoksi fyysistä mallia ei valmistettu. Absorboivan elementin jatkokehitykselle ja tuotteistamiselle tämä työ toimii hyvänä pohjana. Työn teoriapohjaa alumiinivaahdoista voidaan myös pitää hyvänä lähtöaineistona mahdollisiin syventäviin tutkimuksiin ja perustana uusien innovaatioiden syntymiselle.

Asiasanat: alumiinivahto, solurakenne, energian absorbointi, absorboiva elementti, kilpa-ajoneuvo.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Mechanical engineering, Automotive engineering

Author: Juho Kupsala

Title of thesis: Pre-Design of Absorbing Element for Suspension's Top Mount in Racing Car

Supervisor: Esa Kontio

Term and year when the thesis was submitted: Fall 2018

Pages: 77 + 1 appendix

One of the most common causes of an in-event retirement in rallying is the failure of suspension's top mount. Top mounting of the suspensions strut is damaged by an impulse when driven to a harsh road surface. The failure of the top mounting can cause severe damage and danger to the drivers if the incident happens at high speeds or in incorrect situation of the drive. To avoid breathtaking rollovers like Jari-Matti Latvala had in Argentina 2016 due to a top mount failure, an energy absorbing element was to be designed. The element as well as the absorbing material inside should be easy to replace.

In this thesis the conclusion was approached by defining the passing forces of suspension system in a regular drive of a rally stage. After the regular forces affecting the rally cars top mounting had been determined, an element was designed to absorb the energy of the exceeding forces.

Aluminium foam was defined as the absorbing material for the construction. Cell structures and manufacturing of different types of aluminium foam were presented. The needed theoretical plateau stress and plateau stresses by material were calculated to determine the relative densities of aluminium foams to collapse at a given force. Also, the absorbable energy by open and closed cell aluminium foams in the construction were calculated.

This thesis gives a good insight into designing energy absorbing constructions with aluminium foams as an edge force collapsing absorbing element. A manufacturable and working absorbing element was designed but due to problems with material procurement, a physical model was not manufactured. Due to the procurement problems with aluminium foam, a second option was discovered. An open cell aluminium foam structure was 3D designed using the Solidworks program, and it was meant to be produced by the DMLS-method. Within the framework of this thesis there was not enough time to test the processability of the method, and it was reassigned for further studies.

This thesis can be seen as a base study for developing and manufacturing of the designed element and as well for further studies of aluminium foams in industrial applications in Finland.

Keywords: Energy absorption, absorbing element, aluminium foam, rallying, motorsport.

ALKULAUSE

Haluan kiittää Oulun ammattikorkeakoulun konetekniikan osaston opettajia erinomaisesta opetuksesta ja mahdollisuuksista osallistua opintojen aikana mielenkiintoisiin ja motivoiviin projekteihin, joiden pohjalta tämä opinnäytetyökin sai alkunsa. Kiitokset kaikille niille opettajille, jotka ovat auttaneet opinnäytetyöni eri osa-alueilla matkan varrella.

Kiitos lehtori Janne Ilomäelle työn mahdollistamisesta, haastamisesta sen kehityksessä ja avustamisesta ajoneuvoteknisillä osa-alueilla.

Erityiskiitos työni ohjaajalle lehtori Esa Kontiolle pyyteettömästä avustamisesta ja arvokkaista neuvoista työn aikana. Ilman hänen kannustustaan ja selkeälinjaista ohjaustaan työ ei olisi onnistunut näin hyvin.

Kiitos kuuluu myös läheisilleni jokapäiväisestä auttamisesta, motivoimisesta ja rohkaisusta haastaa itseni.

Oulussa 14.12.2018

Juho Kupsala

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	9
2 DYNAMIIKKA JA ENERGIA	11
2.1 Kinetiikka	11
2.1.1 Impulssimomentti	11
2.1.2 Impulsiivinen voima	12
2.2 Energian absorbointi	12
2.2.1 Kineettinen energia	12
2.2.2 Energiaa absorboivat materiaalit ja rakenteet	13
3 ALUMIINIVAHDOT	15
3.1 Avoimen solun alumiinivahto	15
3.1.1 Avoimen solun alumiinivaahdon valmistusmenetelmät	15
3.1.2 Esimerkki avoimen solun alumiinivaahdosta	17
3.2 Suljetun solun alumiinivahto	19
3.2.1 Suljetun solun alumiinivaahdon valmistusmenetelmät	20
3.2.2 Esimerkki suljetun solun alumiinivaahdosta	20
3.3 Alumiinivaahtojen valmistettavuus suurella materiaalivahvuudella	24
3.4 Alumiinivaahdot soluina	25
3.5 Alumiinivaahdot dynaamisen voiman absorboivana materiaalina	26
3.6 Laskentaa alumiinivaahdoista	27
3.6.1 Kimmokerroin ja liukumoduuli	28
3.6.2 Tasaantumisjännitys	30
3.6.3 Leikkausjännitys	32
4 AJONEUVOTEKNIIKAN TEORIA JA SOVELLUTUS	34
4.1 Yhden vapausasteen vaimennetun värähtelijän malli	34
4.2 Heilahduksenvaimentimet	35
5 ABSORBOIVAN ELEMENTIN TOIMIALUEEN MÄÄRITTÄMINEN	37

5.1	Datan käsittely	38
5.2	Vaurioittavan iskun voiman määrittäminen	42
6	ABSORBOIVAN ELEMENTIN RAKENNESUUNNITTELU	46
6.1	Äärimittojen määrittäminen	47
6.2	Elementin prototyypimalli	47
6.3	Anturointi	50
6.4	Elementin lujuustarkastelu	51
7	ABSORBOIVAN MATERIAALIN VALINTA	56
7.1	Absorboivan materiaalin lujuuslaskenta prototyypimalliin	57
7.2	Absorboitava energia	60
7.3	Absorboituneen energian vaikutus iskutapahtumassa	66
8	AVOIMEN SOLUN ALUMIINIVAHDON 3D-MALLINNUS	68
9	YHTEENVETO	72
	LÄHTEET	75
	LIITTEET	
	Liite 1 Lineaaripotentiometrin kytkentäkaavio	

SANASTO

anodisointi	epäjälomman metallin pinnoitus kemiallisesti jalommalla metallilla
isoterminen	lämpötila on vakio
isotrooppinen	tilavuus on vakio
kavitointi	nesteen kiehumisen paineenlaskun seurauksena
korrelaatiokerroin	muuttujien riippuvuus lineaariseen tai polynomikuvaajaan
PPI	partikkelia tuumaa kohden
suhteellinen tiheys	materiaalin massan suhde kiinteäraaka-aineeseen massaan

1 JOHDANTO

Työssä suunnitellaan jousitusjärjestelmän ja rungon väliin elementti, joka pystyy ehkäisemään jousitusjärjestelmän läpi tulevia vaurioita aiheuttavia voimia. Elementillä ehkäistään kalliita runkovaurioita kilpa-ajoneuvoissa ja lisätään turvallisuutta ehkäisemällä vaurioista aiheutuvia kaatotilanteita. Tuotteen tulee olla kohtuuhintainen ja helposti vaihdettavissa sen rikkouduttua. Työn toimeksiantaja on Oulun Ammattikorkeakoulu Oy.

Työ kohdentuu jousitusjärjestelmän läpi-iskeviin voimiin tilanteissa, joissa kilpaajoneuvon normaalin ajotilanteen maksimivoimat ylittyvät. Tässä työssä pyritään ensisijaisesti etsimään keinoja näiden vaurioiden minimoimiseen ja voimaa absorboivan elementin suunnittelemiseen oikeaan paikkaan. Absorboiva elementti ei saa vaikuttaa negatiivisesti ajoneuvon käyttäytymiseen ajotilanteessa.

Ääritilanteen voiman absorboiduttua elementin absorboivan materiaalin tulee olla helposti vaihdettavissa kilpailutilanteen jälkeen huollossa. Toissijaisena tavoitteena on tuottaa vähintäänkin havainnollistava prototyyppi suunnitellusta tuotteesta. Havainnollistava prototyyppi voi olla 3D-malli tai siitä pikamallilaitteella valmistettu prototyyppi.

Tässä työssä keskitytään kilpa-ajoneuvoihin, eritoten rallicross- ja ralliautoihin, joista tässä työssä käytetään termiä ralliajoneuvo. Tuote pyritään suunnittelemaan siten, että se toimisi mahdollisimman monipuolisesti myös muissa kilpaajoneuvolajeissa.

Työ rajataan kattamaan heilahduksenvaimentimen kiinnitystapaa ajoneuvon runkoon ja siihen mahdollisen absorboivan elementin suunnittelua. Opinnäytetyössä ei pyritä tarkkaan lujuustarkasteluun, mutta suuntaa antavia laskelmia tehdään. Elementin tarkoitus ei ole kestää kaikkia läpi-iskeviä voimia. Tavoitteena on eliminoida vaurioittavien iskujen voimahuippujen energiat elementtiin hallitulla lysähdyksellä, joka ei tuota tarpeetonta riskitilannetta kilpa-ajotilanteessa.

Useat suuria materiaalisia ja henkilövahinkoja aiheuttavat kolarit johtuvat renkaan kautta jousitusjärjestelmään kohdistuvista kovista iskumaisista voimista,

jotka rikkovat heilahduksenvaimentimen tai sen kiinnityksen runkoon. Kansallisessa rallisarjassa kilpailijoiden budjetit ovat rajalliset ja aiheutuneita runkovaurioita joudutaan korjaamaan epäedullisin keinoin. Merkittäviä säästöjä saataisiin aikaan, mikäli toimiva sulake-elementti jousitusjärjestelmään saadaan suunniteltua.

Vuonna 2016 Jari-Matti Latvala ajoi Argentiinan rallissa tien oikeassa laidassa sijaitsevaan terävään tieherätteeseen, minkä seurauksena heilahduksenvaimentimen yläpäähän kiinnitysrakenne vaurioitui. Heilahduksenvaimentimen yläpäähän ollessa irti kiinnityksistä vääntyivät pyörän ripustukset ottaessaan kaiken pyörältä tulevan voiman vastaan. Kiinnitysten rikkouduttua oikean puolen eturengas jumitui pyöränkaaren sisään tehden ajoneuvon hallinnasta mahdotonta. Linkistä 1 voidaan tarkastella videomateriaalia tilanteesta, jossa Jari-Matti menettää ajoneuvonsa hallinnan heilahduksenvaimentimen vaurioitumisen seurauksena.

<https://www.youtube.com/watch?v=tsrAmcDvVVQ>

LINKKI 1

Tässä työssä kartoitetaan vaurioittavan iskun todennäköisin tilanne, heilahduksenvaimentimen nopeus normaali- sekä ääritilanteissa sekä heilahduksenvaimentimen läpi kulkeutuvan voiman suuruus. Pääkohtana on tutkia ongelmaa ja kehittää siihen mahdollisimman toimiva ajoneuvon rakenteiden vaurioitumisen eliminoiva elementti.

2 DYNAMIIKKA JA ENERGIA

2.1 Kinetiikka

Kinetiikan peruslakina käytetään Newtonin II lakia, joka on dynamiikan peruslaki. Newtonin II lain mukaan voima F antaa m massaiselle partikkelille kiihtyvyyden a . Suureet F ja a ovat vektoreita, eli niillä on suunta. (1, s. 361.)

$$F = m \cdot a$$

KAAVA 1

F = voima (N)

m = massa (kg)

a = kiihtyvyys (m/s^2)

2.1.1 Impulssimomentti

Impulssimomentti on lyhytaikaisen sykäyksenomaisen voiman tuottama kiihtyvyys partikkelille. Esimerkiksi tennismailalla lyötäessä tennispalloa voiman aika on erittäin lyhyt, kun voima siirtyy mailasta palloon. Samalla tapaa impulssivoimaa voidaan soveltaa heilahduksenvaimentimen pohjaamiseen, läpilyövä voima on kestoaltaan lyhyt, impulssimainen. (2.) Impulssilauseetta käytetään, kun halutaan selvittää partikkelin nopeus ja aika eri tiloissa. Impulssilauseen ensimmäinen määritelmä on kaavassa 2 (1, s. 362).

$$I^F = \int_{T_1}^{T_2} F \cdot dt$$

KAAVA 2

I^F = impulssimomentti (Ns)

t = aika (s)

Mikäli massa on vakio, voidaan käyttää Salmen johtamaa kaavaa dynamiikan peruslaista (1, s. 362.). Kaavasta 2 saadaan johdettua kaava 3.

$$I^F = \Delta p$$

KAAVA 3

Δp = liikemäärän muutos (kgm/s)

2.1.2 Impulsiivinen voima

Voimaa, joka vaikuttaa lyhyen aikaa kappaleeseen muuttuen suureksi, kutsutaan impulsiiviseksi voimaksi. Impulsiivinen voima muuttaa kappaleen liikemäärän niin lyhyessä ajassa, että muut partikkeliin vaikuttavat epäimpulssimaiset voimat ovat suhteessa merkityksettömän pieniä. (1, s. 362 - 363.)

Epäimpulsiivisiksi voimiksi voidaan todeta sellaiset voimat, joiden suuruus tunnetaan etukäteen, kuten kappaleeseen kohdistuva painovoima. Kun kappaleen massa tunnetaan, voidaan laskea siihen kohdistuva painovoima kertomalla kappaleen massa m maan vetovoimalla g . (1, s. 363.)

Oletetaan tilanne, jossa henkilö lyö pesäpallomailalla pesäpalloa sen pudotessa ilmassa maata kohden. Iskun hetkellä pesäpalloon vaikuttavia voimia on useita, kuten palloon syötöstä muodostunut kierimisliikkeen hitausvoima sekä putoamisliikkeen aiheuttanut maan vetovoima. Suurimman vaikutuksen pesäpallon liikkeelle tuo pesäpallomailan osumasta muodostuva impulsiivinen voima.

Oletetaan vastaava tilanne ajoneuvon jousitusjärjestelmässä. Esimerkiksi ajoneuvon oikea eturengas osuu 100 mm korkeaan teräväreunaiseen kiveen 80 km/h nopeudella. Iskun hetkellä ajoneuvon jousitusjärjestelmään vaikuttavista voimista tieherätteen aiheuttama impulsiivinen voima on selvästi vallitseva. Tässä työssä kohdennutaan tarkastelemaan vastaavanlaisia tilanteita ja niiden aiheuttamien vaurioiden minimoimisen mahdollisuutta.

2.2 Energian absorbointi

2.2.1 Kineettinen energia

Kun voima F liikuttaa kappaletta S matkan, tehdään työtä W , joka varastoituu kappaleeseen. Energia on siis varastoitunutta työtä. Käänteisesti ajatellen energia E pystyy tekemään työn W . Mekaniikassa eritellään energia kineettiseksi energiaksi ja potentiaalienergiaksi. Kineettinen energia on työtä W_{KE} , joka liikuttaa m massaista kappaletta nopeudella v tai J pyörivä massaista kappaletta kulmanopeudella ω . Potentiaalienergia on työtä W_{PE} , jonka täytyy nostaa kappale korkeuteen h . (3, s. 37.)

Energia voi muuttaa muotoaan, mutta ei kadota. Tätä kutsutaan energian säilymislainksi. Energian säilymislaki tarkoittaa, että energia suljetussa järjestelmässä on vakio. Energia voi kuitenkin muuttaa muotoaan esimerkiksi lämpöenergiaksi tai kineettiseksi energiaksi jollakin hyötysuhteella tai välittyä toiseen kappaleeseen. (3, s. 39.)

2.2.2 Energiaa absorboivat materiaalit ja rakenteet

On olemassa erilaisia energiaa absorboivia materiaaleja. Energiaa absorboiva materiaali yleisesti absorboi kineettistä energiaa tasaisella jännityksellä jonkin matkaa palautumatta. Jouset toimivat joissain määrin samalla tapaa, sillä poikkeuksella, että ne palautuvat. Koska jouset palautuvat, ne eivät ole energian absorboijia vaan energiavarastoja. (4.)

Energian absorbointi perustuu absorboivan materiaalin muotoon sekä myötö- ja murtolujuuteen. Kun kappaleeseen kohdistuva jännitys ylittää myötörajan, energia kuluu muodonmuutokseen. Hallitusti lysähtämään suunniteltu kappale soveltuu hyvin käytettäväksi energian absorbointiin.

Yleisimpiä energiaa absorboivia rakenteita ovat erilaiset kennorakenteet, kuten hunajakennot, pyörökennot tai kolmiorakenteet. (4, linkki Advantages over other energy absorbers.) Pyörökennoista tavanomaisimpia lienee erilaiset solumuovit, kuten solupolystyreeni. Solumuoveilla on hyvä pakata helposti rikkoutuvia tuotteita kuljetuksen ajaksi, sillä ne kykenevät absorboimaan kohtuullisia iskuja ja ovat halpoja tuottaa. Solumuovien lujuusominaisuudet ovat kuitenkin hyvin rajalliset, jonka vuoksi niitä käytetäänkin yleensä kertakäyttöisinä suojina pakkauksissa.

Hunaja- ja kolmiokennorakenteisia materiaaleja valmistetaan alumiinista, teräksestä tai muoveista. Hunaja- ja kolmiokennoja käytetään esimerkiksi alumiiniovien vahvikkeina pintalevyjen välissä. Hunaja- ja kolmiokennorakenteet ovat hyviä absorboimaan iskuja, mutta ovat tarkkoja iskusuunnasta ja monimutkaisia tuottaa.

Yhteistä näillä kaikilla on materiaalin tai rakenteen huokoisuus. Materiaalissa pitää olla riittävästi tilaa kokoon painuvalle materiaalin osalle, jotta absorptiomatka

on riittävä. Materiaalin myötörajan tulee olla sovellutukseen sopiva, jotta absorbointia tapahtuu toivotulla tavalla.

3 ALUMIINIVAAHDOT

Alumiinivaahto on alumiinista ja mahdollisista seosaineista sulatettu massa, joka saadaan erilaisilla valmistusmenetelmillä erittäin huokoiseen muotoon. Alumiinivaahtojen tilavuus on yleisesti 5 - 45 % suhteellista tilavuutta, riippuen alumiinivaahtolajista. Tilavuus ilmoitetaan yleensä joko suhteellisena tilavuusprosenttina tai PPI-yksikkönä.

On olemassa useita erilaisia tapoja tuottaa alumiinivaahtoa, ja vain muutamaa niistä käytetään teollisuudessa tällä hetkellä. Päävalmistustapoja on yhteensä yhdeksän, ja niiden variaatioita ja muunnoksia on viimeisten vuosikymmenien aikana ilmaantunut muutamia. Kuitenkin valmistettavuuden haasteellisuuden vuoksi aktiivisessa käytössä eripuolilla maailmaa on vain puolenkymmentä valmistustapaa. Loput tavat vaativat erittäin tarkasti määritellyt valmistusolosuhteet, jotka onnistuvat lähinnä erikoisvarustelluissa laboratorioissa. (5, s. 6 - 8.)

Alumiinivaahton tyyppi määritellään sen solurakenteen mukaan kahteen kategoriaan, avoimen solun ja suljetun solun alumiinivaahtoihin (5, s. 24). Seuraavassa käsitteellään yleisimpiä alumiinivaahtoja, jotka ovat tämän opinnäytetyön kannalta merkittävimpiä alumiinivaahtolajeja.

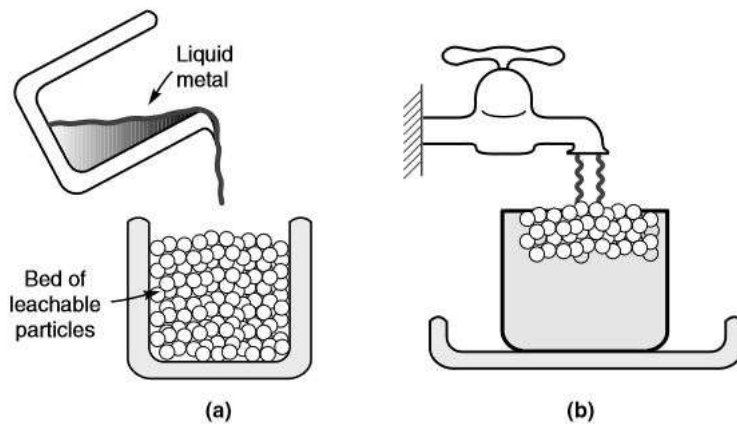
3.1 Avoimen solun alumiinivaahto

Avoimen solun alumiinivaahto on laajasti käytetty materiaali keveytensä, ainutlaatuisen rakenteensa ja lujuutensa vuoksi. Se johtaa huonosti sähkö ja lämpöä, mutta voidaan anodisoimalla pinnoittaa esimerkiksi kuparilla, hopealla tai kullalla, jolloin sähkönjohtavuutta saadaan parannettua. Sitä käytetään esimerkiksi virtauksenrajoitukseen, iskuenergian absorbointiin ja äänen vaimennukseen. (5, s. 189 – 192.)

3.1.1 Avoimen solun alumiinivaahton valmistusmenetelmät

Avoimen solun alumiinivaahtoa voidaan valmistaa esimerkiksi ns. kahden materiaalin valulla. Kahden materiaalin valussa sula metalliseos kaadetaan valmiiseen muottiin, joka on esitäytetty täysin tai osittain liukenevilla partikkeleilla, kuten

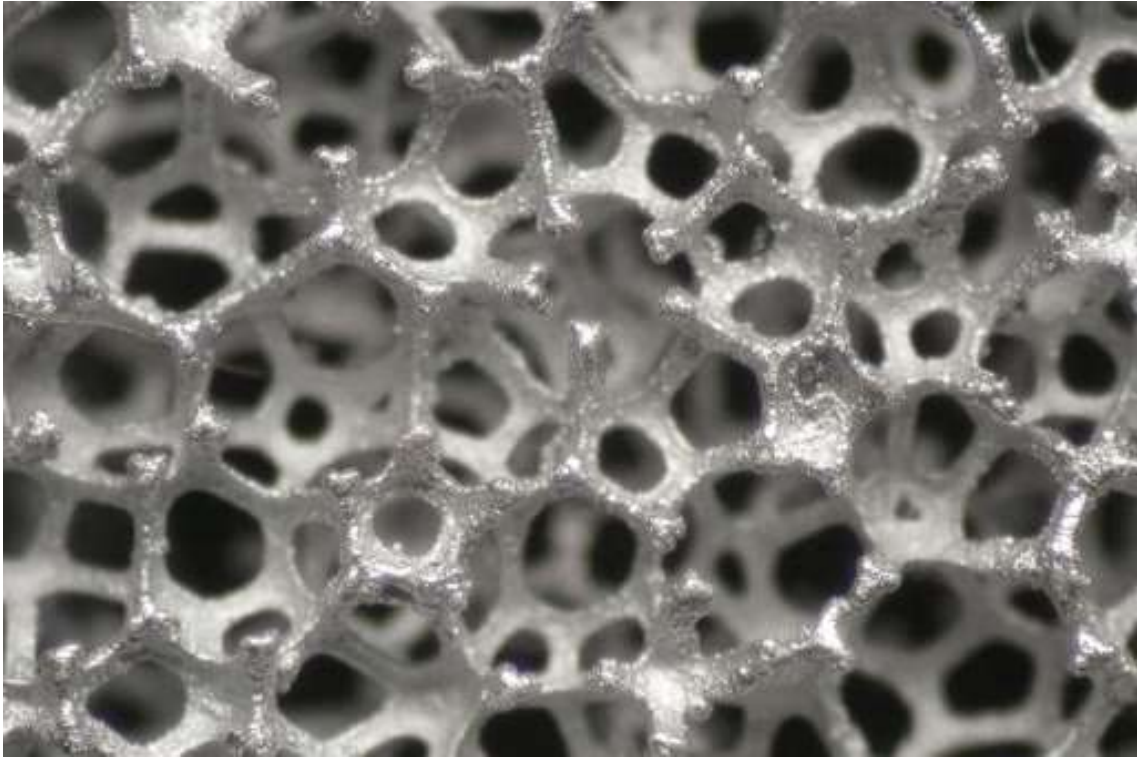
suolalla tai pehmeillä keraamisilla kuulilla. Muotti voidaan tämän jälkeen jäähdyttää tai ensin paineistaa ja sen jälkeen jäähdyttää. Jäähdytyksen jälkeen ylimääräinen materiaali solukosta liotetaan tai paineistetaan pois esimerkiksi vedellä, muulla liotainaineella tai ilmalla. (5, s. 19 - 20.) Valmistusprosessia voidaan tarkastella tarkemmin kuvasta 1.



KUVA 1. Kahden materiaalin valun valmistusprosessi (5, s. 19)

Kuvan 1 kohdassa (a) muottiin kaadetaan sula metalliseos, joka tunkeutuu liukenevien partikkeleiden lävitse tasaisesti. Tämän jälkeen muotti voidaan paineistaa. Kohdassa (b) havainnoidaan vaihetta, jossa muotin jäähdyttyä liukenevat partikkelit liotetaan valumuotista liottavalla nesteellä, esimerkiksi vedellä, jolloin saadaan avoimen solun alumiinivaahtoa. (5, s. 19.)

Kuvasta 2 voidaan tarkastella avoimen solun alumiinivaahdon rakennetta. Kuva 2 on otettu poikkileikatusta avoimen solun alumiinivaahdosta.



KUVA 2. Lähikuva poikkileikatusta avoimen solun alumiinivaahdosta (6)

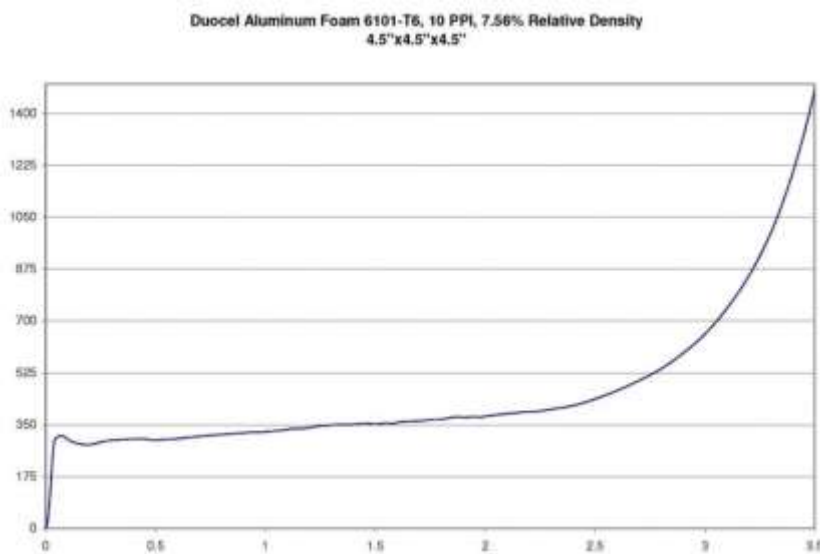
3.1.2 Esimerkki avoimen solun alumiinivaahdosta

Yksi edistyneimmistä avoimen solun alumiinivaahdoista on ERG Aerospace valmistama Duocel®-vaahto. Heidän valmistama avoimen solun alumiinivaaho on erittäin yhdenmukaista sekä täysin läpäisevää. ERG Aerospace lupaa materiaalille ilmoittamansa suhteellisen tiheyden kauttaaltaan, eli materiaali ei ole tiheämpää reunoilta ja harvempaa keskustasta. Duocel®-vaahto on tiheydeltään 3 - 12 %, mutta myös tiheämpää solukkoa pystytään valmistamaan valun jälkeisellä puristuksella, jälkivaluilla tai pinnoittamalla, esimerkiksi anodisoimalla. (7.)

Duocel®-vaahdon valmistus on liikesalaisuus, jonka vuoksi spesifimpää valmistusmenetelmää ei ole esitelty missään tieteellisissä julkaisuissa, mutta päättelemällä valmistusmenetelmien ominaisuuksista, voidaan olettaa heidän valmistavan vaahdot kahden materiaalin valulla osittain liukenevien partikkeleiden avulla, esimerkiksi pehmeitä keraamisia kuulia käyttämällä. Suolaa ja siihen seostamalla lisäaineita saavutetaan parhaimmillaan 30 %:n suhteellinen tiheys alumiinivaahdovalussa. Kahden materiaalin valussa keraamisten kuulien käyttäminen on tällä

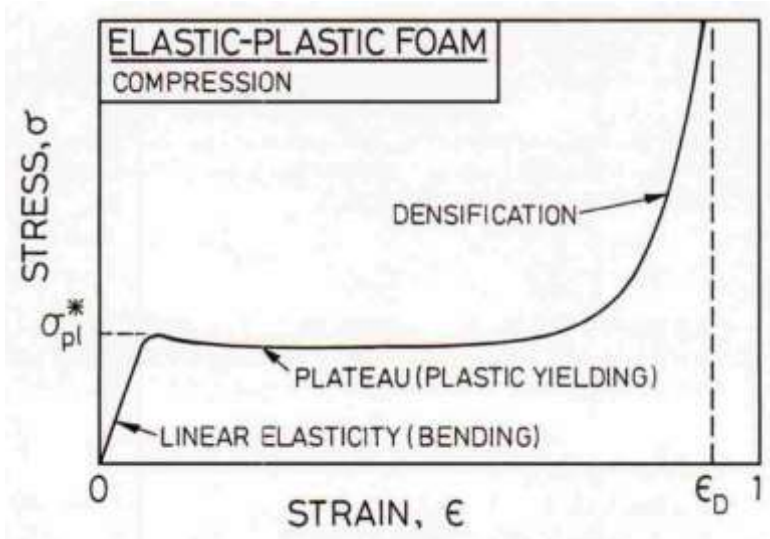
hetkellä käytännöllisin ja tehokkain tapa valmistaa avoimen solun alumiinivaah-
toa, jonka suhteellinen tiheys on alle 10 %. (8, s. 379.)

Kuvan 3 vasemmalla sivulla on jännityksen arvot PSI yksikköinä ja alhaalla sijait-
sevat venymän arvot tuumina. Kuten kuvasta 3 voidaan todeta, Duocel®-vaah-
don lysähtäminen on lähes lineaarista aina 60 - 70 % asti, jonka jälkeen lineaari-
nen lysähtäminen muuttuu progressiiviseksi. Tätä viimeisellä 30 - 40 % alueella
tapahtuvaa vaihetta kutsutaan tihentymisvaiheeksi, eli englanniksi densification
phase. (4.)



*KUVA 3. Duocel® 10PPI, 7,56 % suhteelliselta tiheydeltään olevan alumiinivaah-
don jännitys-venymäkuvaaja (4)*

Kuvasta 4 voidaan havaita, että alumiinivaahdoilla on perusmateriaalia vastaava
elastinen alue ennen niiden myötörajaa. Elastisen alueen suhteellinen venymä
on yleisesti 4 - 6 % riippuen kappaleen koosta (4). Jännityskuvaajan elastisen
alueen kulmakerroin on vastaava kuin raaka-aineena toimineella metallilla, sa-
moin kuin myötölujuus.



KUVA 4. Havainnollistava jännitys-venymäkuvaaja yleisesti avoimen sekä suljetun solun alumiinivaahdoista (9, s. 197)

Varsinaisella lysähdyksen ”tasaantumisalueella” tapahtuvassa plastisessa muodonmuutoksessa näkyy eroavaisuus kiinteän perusmateriaalin jännitys-venymäkuvaajan suhteen. Kiinteän perusmateriaalisen kappaleen jännitys-venymäkuvaajasta poiketen lysähdys tapahtuu lineaarisesti koko 5 - 70 % alueella. (4, kahdeksas kappale.) Tämä laskettavissa oleva lineaarinen hallittu muodonmuutos on tärkeä tekijä ja syy, miksi alumiinivaahdot ovat hyviä energian absorboinnissa. Kyseisellä alueella tapahtuvaa jännitystä kutsutaan englannin kielellä nimellä Plateau stress ja tässä työssä sitä kutsutaan tasaantumisjännitykseksi.

3.2 Suljetun solun alumiinivaahdot

Suljetun solun alumiinivaahdot on myös materiaalina kevyttä ja erityisen lujaa. Se johtaa huonosti sähköä ja lämpöä, eikä sitä voi avoimen solun alumiinivaahdon tapaan anodisoida solujen ollessa suljettuja solurakenteiden seinämillä. (5, s. 189 - 192.) Sitä käytetään esimerkiksi törmäysenergian absorbointiin ajoneuvojen keulan ja perän runkoputkissa. Törmäysenergiaa absorboivissa putkissa on havaittu niiden täyttämisen suljetun solun alumiinivaahdolla lisäävän absorbointikykyä 40%. (10, s. 7.)

3.2.1 Suljetun solun alumiinivaahdon valmistusmenetelmät

Suljetun solun alumiinivaahtoa voidaan valmistaa esimerkiksi sulaan tai puolisulaan metalliin seostamalla erilaisia vaahtoamisreaktion laukaisevia lisäaineita, jotka lämmitettynä kaasuuntuvat. Vaihtoehtoisesti kaasu voidaan tuottaa suorasyöttönä, jolloin metallisula saadaan vaahtoutumaan. Suljetun solun alumiinivaahdon tuottamiseen on lukuisia eri vaihtoehtoja, joista useimmat valmistusmenetelmät ovat nimetty niitä käyttävän yrityksen mukaan omalla erillisellä tuotenimikkeellään, esimerkiksi Metcomb, Cymat, Alulight ja Alporas. (11, s. 111.)

Yksi käytetyistä vaahtoamisen laukaisevista kemiallisista yhdisteistä on titaanihydridi, eli TiH_2 , joka jakaantuu titaaniksi ja kaasumaiseksi vedyksi, kun seosta lämmitetään yli 465° celsiusasteen. Kun TiH_2 lisätään sulaan alumiiniin, vapautuu kemiallisessa reaktiossa nopeasti suurin määrä kaasua, joka saa alumiinin vaahtoutumaan. Alumiinin vaahtoutumisessa muodostuu suljettu soluinen solurakenne. Kuplimisreaktion päätyttyä seos jäädytetään hallitusti, jolloin saadaan huokoista alumiiniseosta halutussa muodossa. (5, s. 9.)

3.2.2 Esimerkki suljetun solun alumiinivaahdosta

Suljetun solun alumiinivaahdon tuottaminen lisäaineilla ja kaasua vapauttamalla metallisulaan on valmistusmenetelmä, jonka on tuoteistanut Shinko Wire Company lanseeraamalla tuotantomenetelmästä tuotenimikkeen Alporas vuonna 1986. (5, s. 9 sekä 12, s. 6.) Valmistusmenetelmä on levinnyt laajalti maailmassa ja Alporas-vaahdosta puhutaankin nykyään monen suljetun solun alumiinivaahdon yhteydessä.

Alporas-menetelmällä alumiinivaahdon valmistus jaetaan kolmeen vaiheeseen: suurustukseen, sekoitukseen, sekä vaahtoutukseen.

Suurustus

Ensimmäisessä vaiheessa suurustetaan alumiinisula kalsiumin avulla. Alumiini sulatetaan lämmittämällä se ensin 700 celsiusasteeseen. Sulaa alumiinia sekoitetaan esimerkiksi alumiinioksidilla (Al_2O_3) pinnoitetulla teräksisellä siipipyörällä, jotta estetään teräksen reagointi alumiiniseoksen kanssa. (11, s. 112.) Raa'an

alumiinisulan sekaan seostetaan ensin kalsiumia 1 - 2 % prosenttia muuttamaan alumiiniseoksen viskositeettiä paksummaksi (11, s. 113). Metallisulan sekoitusta jatketaan n. 20 minuuttia ja valmis suurstettu alumiiniseos voidaan välijäähdyttää ennen sekoitusvaihetta, mikäli niin halutaan. (11, s. 112.)

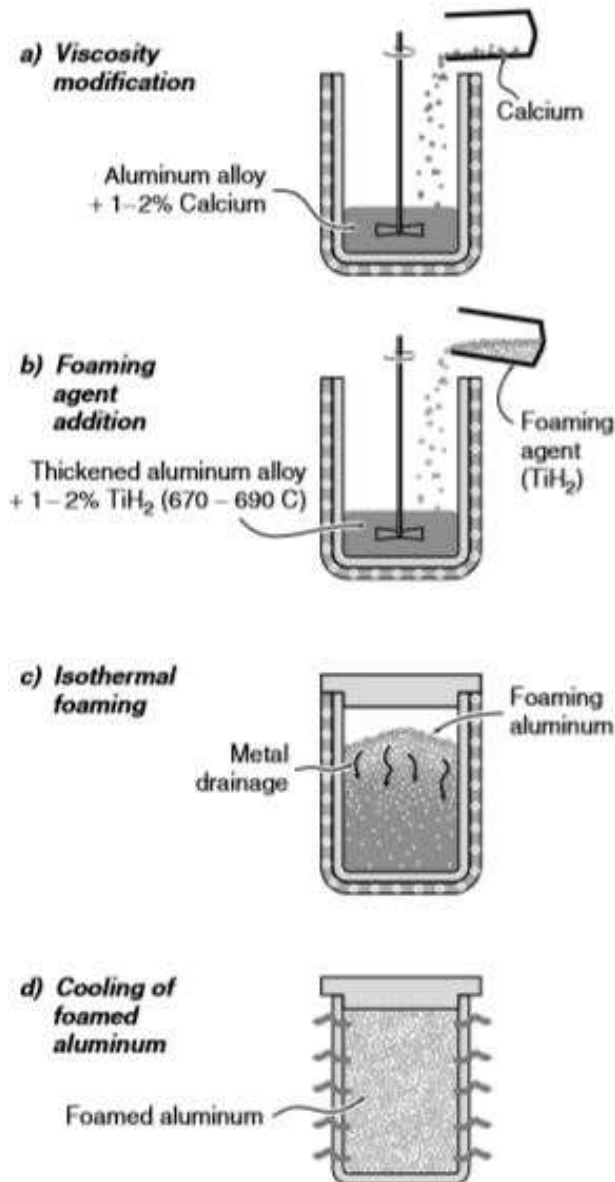
Sekoitus ja vaahtoutus

Sekoitus vaiheessa lisätään 1 - 2 % vaahtoamisreaktion laukaisevaa titaanihydridijauhetta, jolloin seos alkaa isotermisesti vaahtoutumaan. On havaittu alumiinivaahdon myötölujuuden paraneva, mikäli titaanihydridijauhe kuivatetaan uunissa esimerkiksi 150 celsiusasteessa ennen sekoitusta alumiinisulaan. (11, s. 112.)

Tämän jälkeen sulaa sekoitetaan optimaalisen vaahtoutumisen ajan alumiinioksidilla pinnoitetulla sekoittimella kuten aikaisemmassakin vaiheessa. Optimaalinen sekoitusaika on tutkimuksittain vaihdellut ainesmäärien ja seossuhteiden mukaan, mutta n. 80 s – 110 s todennetaan kokeellisen tutkimusvalutyön artikkelissa toimivaksi ajaksi röntgenkuvilla. (11, s. 111.)

Kun vaahtoutuminen on saavuttanut optimaalisen pisteen, jäähdytetään se mahdollisimman nopeasti, jotta vaahdon rakenne saadaan pysymään halutunlaisena, sekä kappale tulee karkaistua. Alumiinivaaho voidaan myös jälkikarkaista, mikäli sille koetaan tarvetta. Kokeellisen tutkimusvalutyön artikkelissa jäähdytys suoritettiin tyypellä jäähdytetyllä terästangolla, joka upotettiin alumiinivaahtoon. (11, s. 112.) Valmistusmenetelmän hahmottamiseksi tarkastellaan suljetun solun alumiinivaahdon valmistusta kuvasta 5.

**PARTICLE DECOMPOSITION
IN LIQUID**



KUVA 5. Alporas-alumiinivaahdon valmistus (5, s. 10)

Kuvan 5 kohdassa a) tuotetaan viskositeetin muutos alumiinisulaan lisäämällä siihen kalsiumia. Kohdassa b) isoterminen vaahoutuminen käynnistetään lisäämällä metallisulaan TiH₂. Kohdassa c) metallisula vaahoutuu isotermisesti ja muotti suljetaan. Kuvan 5 kohdassa d) metallivaahdo jähdytetään, jotta muottiin jää toivotunlainen huokoinen rakenne. (5, s. 10.)

Kuvassa 6 näkyy 10 mm kokoisen koekappaleen vaahoutuminen sekoituksen eri vaiheissa: a) alkutilanteessa, b) 70 sekunnin kohdalla, c) 80 sekunnin

kohdalla, d) 90 sekunnin kohdalla, e) 100 sekunnin kohdalla, f) 150 sekunnin kohdalla, g) 200 sekunnin kohdalla sekä h) 400 sekunnin kohdalla. (11, s. 113.)

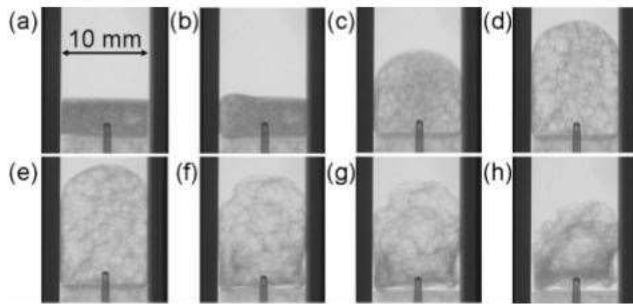


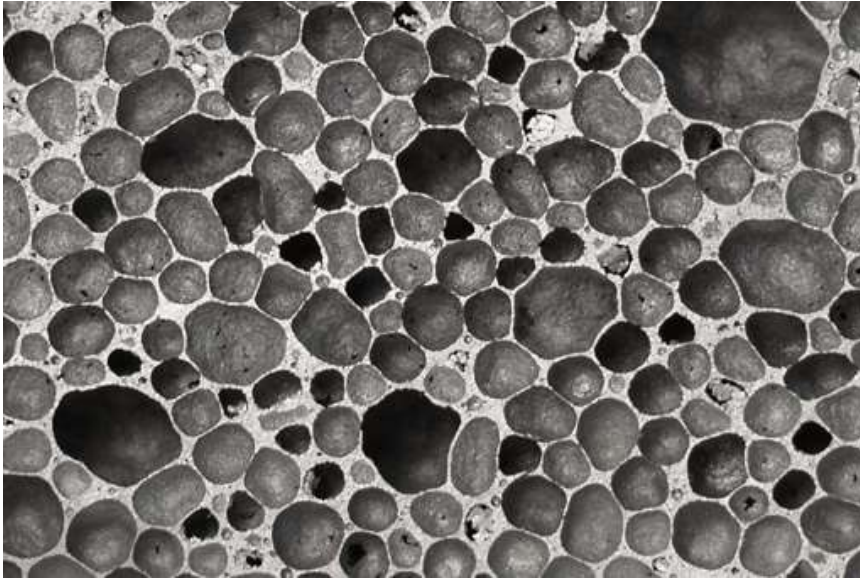
Figure 4. Typical foam evolution. Images show states, (a) 0 s, (b) 70 s, (c) 80 s, (d) 90 s, (e) 100 s, (f) 150 s, (g) 200 s and (h) 400 s.

KUVA 6. Alporas-vaahdon vaahtoutuminen TiH₂ lisäaineella (11, s. 113)

Tarkastelemalla kuvaa 6 voidaan todeta, että optimaalinen vaahtoutuminen tapahtuu kyseisessä tilanteessa 90 - 100 sekunnin välillä, riippuen toivotunlaisesta lopputuloksesta. Alporas-menetelmällä saadaan aikaan alumiiniharkko, jonka sisälle on muodostunut huokoisia solurakenteita, jolloin suhteellinen tiheys on paljon normaalia kiinteää harkkoa pienempi.

Alporas-vaahtoa voidaan myös valmistaa suoraan muottiin, jolloin saadaan suoraan halutunlainen muoto kappaleelle. Solurakenteiden koko vaihtelee selkeämmin monimutkaisissa rakenteissa pienempien solurakenteiden jäädessä reunoille, jolloin kappale voi alkaa lysähtämään ei toivotulla tavalla tai jännityksellä.

Kuvasta 7 voidaan tarkastella poikkileikkausnäkyä valmiista suljetun solun alumiinivaahdosta. Kuvasta 7 voidaan myös havaita suljetun solun alumiinivaahdon solurakenteen epäsäännöllisyys koon ja muodon suhteen.

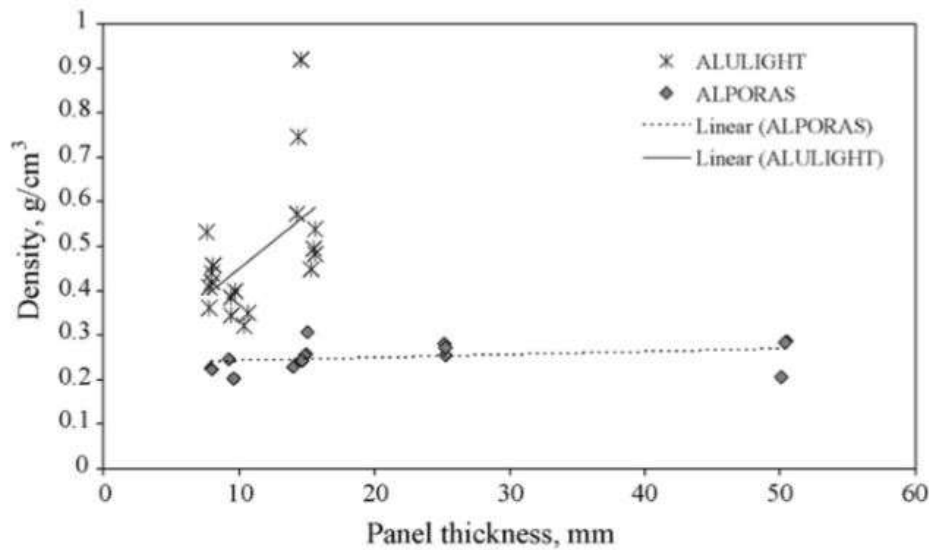


KUVA 7. Leikkauskuva Alporas-alumiinivaahdosta (6)

3.3 Alumiinivaahtojen valmistettavuus suurella materiaalivahvuudella

Suurena materiaalivahvuutena voidaan alumiinivaahdoissa pitää > 50 mm. Avoimen solun alumiinivaahdon valmistettavuus materiaalivahvuuden suhteen riippuu ainoastaan kahden materiaalin valussa käytettävän muotin koosta ja paineistuksesta. Avoimen solun alumiinivaahtoa voidaan kuitenkin valmistaa < 100 mm materiaalivahvuudella, kun rakenteen muodostavia kappaleita ei pakata liian tiiviisti muottiin ja metallisula pääsee kulkeutumaan koko muottiin ilman paineistusta. Suljetun solun alumiinivaahdoissa materiaalivahvuus tulee aikaisemmin vastaan, kun vaahtoutus tapahtuu lisäaineella ja kemiallisen reaktion ollessa rajallinen.

Kuvasta 8 voidaan havaita, että Alporas-vaahtoja voidaan myös valmistaa kohtuullisen pienillä suhteellisilla tiheyksillä paksuillakin materiaalivahvuuksilla. Esimerkiksi Havel Metal Foam GmbH voi valmistaa Alporas-vaahtoa ainakin 75 mm vahvana levynä (6). Toisaalta esimerkiksi Alulight-vaahtoja ei pystytä valmistamaan > 20 mm materiaalivahvuuksilla, tämä käy ilmi myös kuvasta 8.



KUVA 8. Suhteellisen tiheyden suhde materiaalivahvuuteen (12, s. 41)

3.4 Alumiinivaahdot soluina

Alumiinivaahdon solut muodostuvat joko syötetyn tai käymisreaktion avulla syntyvän kaasun avulla tai muottiin esitäytettyjen pyöreiden kappaleiden avulla. Solurakenteen ymmärtäminen kolmiulotteisena avaruudellisena mallina on haastanut tiedemiehiä jo usean vuosikymmenen ajan. Yleisimmin laskennassa ja mallinnuksessa käytetty solutyyppeä on Kelvinin solu, joka vastaa etenkin avoimen solun alumiinivaahdon tapauksissa pääosin hyvin varsinaisen solun muodostumista.

Tetrakaidecahedron

Kelvinin solu, tieteellisemmällä nimityksellä tetrakaidecahedron, on polyhedroni, joka on erilaisten vaahtojen pohjalta tutkittu avaruudellinen solurakenne. Tetrakaidecahedron kattaa tila-avaruuden mahdollisimman täydellisesti jättäen minimaalisen määrän ylijäävää tilavuutta ja hyödyntäen mahdollisimman pieniä tasopinta-aloja. (13.)

Lord Kelvin, joka oli tunnettu matemaatikko, fyysikko sekä insinööri, tutki 1870-luvulla saippuakuplien syntymistä ja niiden tila-avaruudellista hahmottamista. Hän esitti kysymyksen, että miten avaruus voidaan jakaa osiin saman kokoisilla soluilla, jotta jää mahdollisimman vähän ylimääräistä käyttämättömää tilavuutta tila-

avaruuteen käyttämällä mahdollisimman pieniä tasopintoja soluissa. Tätä ongelmaa nimitetään Kelvinin ongelmaksi. (aka. Kelvin problem tai Kelvin conjecture) (13.)

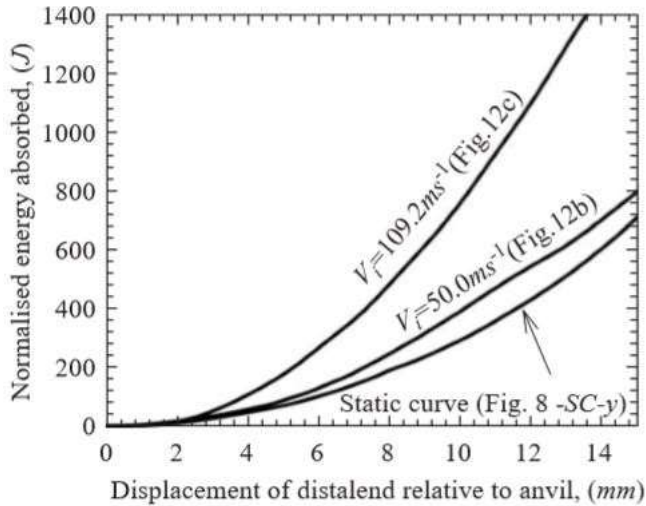
Tämän seurauksena hän esitteli tetrakaidekahetronin, solurakenteen, jolla on neljätoista tasopintaa, kuusi nelikulmiota ja kahdeksan kuusikulmiota. Kolmiulotteisena kokonaisuutena Lord Kelvin totesi solurakenteen olevan vielä hieman tarkempi, mikäli kuusikulmioiden pinta on myös hieman ulospäin kaareva, Plateau:n lain (14) mukaisesti. Kaarevuus ei ole välttämätöntä, mikäli likimääräinen tarkkuus jäljittelyyn riittää. (13.)

Tätä kutsutaan nykyään Kelvinin soluksi. Havainnelmaa pidettiin kumoamattomana, millaisena se pysyikin yli sata vuotta, kunnes 1990-luvulla löydettiin Weiare-Phalen solu. Weiare-Phalen solurakenteen tasopinta-ala on 0,3 % pienempi suhteessa Kelvinin soluun (15, Abstract). Nykyään Weiare-Phalen solu on edistyneisin avaruudellinen solurakenne, joka kattaa tila-avaruuden soluina käyttämällä minimaalisen määrän tasopinta-alaa ja sitä pidetään kumoamattomana.

3.5 Alumiinivaahdot dynaamisen voiman absorboivana materiaalina

Useiden lähteiden mukaan alumiinivaahdot käyttäytyvät lysähdyksessä staattisen puristuksen tavoin, kun kappaleeseen kohdistuvan iskun nopeus on alle 20 m/s. Tämä pätee niin avoimen solun alumiinivaahdoihin (16), kuin suljetun solun alumiinivaahdoihin (17, s. 2194). Merkittäviä havaittavia eroavaisuuksia materiaalien lysähtämisessä voidaan havaita solurakenteen koosta riippuen vasta keski-kriittisellä nopeusalueella, 40 - 50 m/s. (16.)

Kuvasta 9 voidaan tarkastella iskunopeuden vaikutusta absorboidun energian määrään. Iskut, joiden iskunopeus on > 40 m/s tulee tarkastella dynaamisen puristuksen näkökulmasta.



KUVA 9. Staattinen sekä dynaamiset 50 m/s ja 100 m/s kuvaajat energian absorboinnin (J) ja muodonmuutospituuden (mm) suhteen (17, s. 2200)

Alumiinivahtolajien välillä ei nähdä niinkään selkeitä eroavaisuuksia dynaamisessa lysähtämisessä, mutta solurakenteen koon mukaan tarkasteltaessa havaitaan, että suuremmista soluista koostuva alumiinivahto kestää iskuvärähtelyitä paremmin, kuin tiheämpi solurakenteinen alumiinivahto. (17, s. 2199.) Kuitenkin pienemmistä solurakenteista koostuvan alumiinivaahdonkin kriittinen nopeus on n. 40 m/s. (17, s. 2200.) Tällöin solujen koolla ei ole suurta merkitystä tässä työssä, kun materiaalia käytetään < 20 m/s nopeuksissa.

Ajoneuvon jousitusjärjestelmään kohdistuvien iskujen nopeuksien ollessa alle kriittisen nopeusalueen, voidaan todeta, että sovellutukseen sopivan alumiinivaahdon tarkasteluun riittää tarkastelu staattisesta näkökulmasta.

3.6 Laskentaa alumiinivaahdoista

Alumiinivaahdon hyödyntämistä mekaanisissa käyttötarkoituksissa voidaan soveltaa erittäin monella tapaa. Tässä työssä alumiinivaahdolta vaaditaan kuitenkin mahdollisimman täydellistä ja hallittua kokoonpuristumista, jossa energiaa saadaan maksimaalinen määrä absorboitua solurakenteiden muodonmuutokseen.

Suhteellinen tiheys

Vaahdon suhteellinen tiheys saadaan laskettua materiaalissa käytetyn raaka-aineen ominaispainon mukaan. Esimerkiksi tuottaja X valmistaa alumiinivaahtoa, joka on 30 mm vahvaa (t) ja kappale on leveydeltään (w) ja pituudeltaan (l) 250 mm. Tuottaja ilmoittaa kappaleen massaksi 200 g (m). Materiaali on valmistettu 6061-T6-alumiiniseoksesta, jonka ominaispaino eli tiheys on 2 700 kg/m³.

$$\frac{m_{al\ vaahdo}}{(t*w*l)*\rho_{6061-T6}} * 100 = \rho^*$$

KAAVA 4

ρ^* = alumiinivaahdon ominaispaino

$m_{al\ vaahdo}$ = valmiin alumiinivaahdon massa

$\rho_{6061-T6}$ = raaka-aineen ominaispaino (kg/m³)

t = tuotteen paksuus (m)

l = tuotteen pituus (m)

w = tuotteen leveys (m)

Jotta tulos saadaan prosentteina, tulee tulos kertoa sadalla. Sijoittamalla tunnetut tekijät kaavaan 4 saadaan alumiinivaahdon ominaispainoksi 3,95 %.

$$\frac{0,2\ kg}{(0,03m*0,25m*0,25m)*2700\ kg/m^3} * 100 = 3,95\ \%$$

Lujuuslaskenta

Kun alumiinivaahtoon kohdistuu jännitystä, on sillä materiaalille ominaisesti 4 - 6 % elastinen alue, kuten kohdassa 3.1.2 todettiin. Kun elastinen alue loppuu, alkaa solujen rakenteet taipumaan tasaantumisjännityksen alla ja lysähtäminen alkaa. (7, Crush Strength.)

3.6.1 Kimmokerroin ja liukumoduuli

Avoimen solun alumiinivaahdon kimmokerroin ja liukumoduuli

Avoimen solun alumiinivaahdon kimmoisessa muodonmuutoksessa solun kulmat taipuvat. Gibson laskee avoimen solun alumiinivaahdon kimmokertoimen moniulotteisella analyysillä, joka käsittelee kulmien taipumia. (9, s. 198.) Analyysin

perusteella hän määrittelee avoimen solun alumiinivaahdon kimmokertoimen kaavaksi kaavan 5 (9, s. 198).

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 ,$$

KAAVA 5

E^* = vaahdon kimmokerroin (N/m²)

E_s = käytetyn kiinteän materiaalin kimmokerroin (N/m²)

C_1 = solukon rakenteen mukaan määräytyvä vakio

ρ^* = vaahdon suhteellinen tiheys (kg/m³)

ρ_s = käytetyn raaka-aineen suhteellinen tiheys (kg/m³)

Tetrakaidekahedron-solun poikkileikkauksessa on analysoitu, että vakio $C_1 = 0,98$. Tämä arvo on todennettu datasta, joka on laajasta polymeerisien vaahtojen mittauskokoelmasta, joissa se yleisesti on todettu olevan ~ 1 . (9, s. 198.)

Leikkausjännityksessä avoimen solun alumiinivaahdo käyttäytyy myös samankaltaisesti taipumalla. Avoimen solun alumiinivaahdon liukumoduuli saadaan lasketua kaavalla 6 (9, s. 198).

$$\frac{G^*}{G_s} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 ,$$

KAAVA 6

G^* = alumiinivaahdon liukumoduuli (kg/m²)

G_s = käytetyn kiinteän materiaalin liukumoduuli (kg/m²)

$C_2 = \sim 3/8$

Poissonin vakio saadaan laskettua kahden venymän suhteesta ja se ei ole suhteessa suhteelliseen tiheyteen. Gibson toteaa Poissonin vakion olevan avoimen solun alumiinivaahdoista mitattujen tuloksien perusteella yleisesti $\sim 1/3$. (9, s. 198.)

Suljetun solun alumiinivaahdon kimmokerroin ja liukumoduuli

Suljetun solun alumiinivaahdot ovat hieman monimutkaisempia. Suljetun solun alumiinivaahdoissa on myös solurakenteiden kehyksien välillä myös seinämät, jotka vaikuttavat laskentaan. Kun suljetun solun alumiinivaahdossa alkaa tapahtumaan muodonmuutosta nämä seinämät venyvät solurakenteiden mukana.

Kaavalla 7 voidaan laskea suljetun solun alumiinivaahdon kimmokerroin. (9, s. 198.)

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + C_1' \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right), \quad \text{KAAVA 7}$$

E^* = alumiinivaahdon kimmokerroin (N/m²)

E_s = käytetyn kiinteän materiaalin kimmokerroin (N/m²)

Käytetyiden vakioiden arvot $C_1 = C_1' = \sim 0,32$.

Suljetun solun alumiinivaahdoissa, joissa suhteellinen tiheys on erittäin pieni, hallitsee seinien venymä ensisijaisesti laskennassa ja tällöin käytetään kaavaa 8 (9, s. 198).

$$\frac{E^*}{E_s} \approx 0,32 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) \quad \text{KAAVA 8}$$

Gibson toteaa artikkelissaan (9, s. 198), että isotrooppisilla suljetun solun alumiinivaahdoilla liukumoduulin oletetaan olevan yleensä $\sim 3/8$ kimmomoduulista, sekä Poissonin vakion on yleisesti todettu olevan $\sim 1/3$ suljetun solun alumiinivaahdojen mittauksien perusteella.

3.6.2 Tasaantumisjännitys

Tasaantumisjännitys saavutetaan, kun alumiinivaahdon elastisuus loppuu ja materiaali alkaa lysähtämään plastisesti. Tasaantumisjännitys pysyy suhteellisen tasaisena koko plastisen alueen, kunnes lysähdyksen loppupuolella se muuttuu tihentymisvaiheeksi, jossa jännitys muuttuu progressiiviseksi suhteessa lysähdysmatkaan. Tasaantumisjännityksen ja tihentymisvaiheen alueita voidaan tarkastella esimerkiksi kuvassa 4 sivulla 19.

Lysähdyksen tihentymisvaihe alkaa eri alumiinivaahdoluokilla eri aikoina. Esimerkiksi Alporas-vaahdolla tihentymisvaihe alkaa tyypillisesti ~ 70 % vaiheessa lysähdystä, kun Alulight-vaahdoilla se tapahtuu jo ~ 40 % vaiheessa lysähdystä. Duocel-vaahdoilla tihentymisvaiheeseen siirrytään yleensä ~ 80 % vaiheessa lysähdystä. (5, s. 43.)

Avoimen solun tasaantumisjännitys

Avoimen solun alumiinivaahdon solurakenteen lysähtäminen voidaan ajatella tapahtuvan sen kaarevilta reunoilta plastisten saranoiden tavoin. (9, s. 199.)

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2}$$

KAAVA 9

σ_{pl}^* = tasaantumisjännitys (N/m²)

σ_{ys} = käytetyn kiinteän materiaalin myötölujuus (N/m²)

C_3 = solurakenteen mukaan määräytyvä vakio

Laajalti kerätty data erilaisista alumiinivaahdoista todentaa, että yleensä $C_3 = \sim 0,3$. (9, s. 199.) Vakion C_3 arvoa voidaan täsmentää puristuskoestamalla koekappaleita, jolloin laskenta saadaan varmasti kohtaamaan todellisten tulosten kanssa. Esimerkiksi ERG Aerospace ilmoittaa Duocel-vaahtojen laskennassa käytettäväksi $C_3 = \sim 0,58$. Vakion arvoon vaikuttaa selvästi alumiinivaahdon käytetty raaka-aine. ERG valmistaa Duocel-vaahtoa 6061-T6-alumiiniseoksesta, jonka myötölujuus on 275 MPa. (4.)

Suljetun solun tasaantumisjännitys

Suljetun solun alumiinivaahdon tasaantumisjännityksen laskennassa tulee lisäksi ottaa huomioon solurakenteen seinämien taipumisessa tapahtuva myötääminen. (9, s. 199.) Solurakenteen ollessa epäjohdonmukainen suljetun solun alumiinivaahdon tasaantumisjännitys saadaan laskemalla kaavalla 10 (9, s. 199).

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2} + C'_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$$

KAAVA 10

$$C_3 = 0,33$$

$$C'_3 = 0,44$$

Analysoituaan elementtimenetelmällä tetrakaidekahedron-soluisia suljetun solun alumiinivaahtoja Gibson toteaa (9, s.199), että vakioiden C_3 ja C'_3 arvot olivat yleensä samat, kuin kaavassa 10. Tetrakaidekahedron-soluisen suljetun solun alumiinivaahdon tasaantumisjännitys saadaan laskettua kaavalla 11 (9, s. 199).

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0,33\left(\frac{\rho_s^*}{\rho_s}\right)^2 + 0,44\left(\frac{\rho_s^*}{\rho_s}\right)$$

KAAVA 11

Suljetun solun alumiinivaahdoilla, joiden suhteellinen tiheys on pieni, tulee solurakenteiden seinämien taipumisesta dominoiva, jolloin käytetään kaavaa 12. (9, s. 199.)

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0,44\left(\frac{\rho_s^*}{\rho_s}\right)$$

KAAVA 12

Raaka-ainemateriaalin myötölujuus suljetun solun alumiinivaahdoilla on tutkittu olevan Alporas-vaahdoilla käytetyssä alumiiniseoksessa 99,7 MPa ja Alulight-vaahdolla 179,3 MPa. (18, s. 40.)

3.6.3 Leikkausjännitys

Alumiinivaahtojen leikkausjännitys voidaan määrittää taipumisen kriteereillä. Gibson toteaa artikkelissaan (9, s. 199), että Deshpande-Fleck taipuma-analyysiä käyttämällä voidaan määrittää leikkausjännityksen suhde tasaantumisjännitykseen. Taipuma-analyysin mukaan alumiinivaahdon leikkausjännitys saadaan kertomalla yksidimensionaalinen normaalijännitys arvolla 0,69, kuten kaavassa 13 (9, s. 199) esitetään.

$$\tau_{pl}^* = 0,69 * \sigma_{pl}^*$$

KAAVA 13

$$\tau_{pl}^* = \text{Leikkausjännitys (N/m}^2\text{)}$$

Avoimen solun alumiinivaahdolle leikkausjännitys voidaan laskea myös soveltamalla kaavasta 9 kaavan 14 (9, s. 199).

$$\frac{\tau_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0,21\left(\frac{\rho_s^*}{\rho_s}\right)^{3/2}$$

KAAVA 14

Kaavan 14 vakion arvoksi Gibson määrittää $C_3 = 0,21$. Suljetun solun alumiinivaahdon leikkausjännityksen voi laskea myös soveltamalla kaavasta 11 kaavan 15 (9, s. 199).

$$\frac{\tau_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0,23\left(\frac{\rho_s^*}{\rho_s}\right)^2 + 0,3\left(\frac{\rho_s^*}{\rho_s}\right)$$

KAAVA 15

Kaavaan 15 Gibson määrittää vakioiden arvoiksi $C_3 = 0,23$ ja $C'_3 = 0,30$ (9, s. 199). Kaavassa 15 tulee ottaa huomioon, että se on sovellettu tetrakaidekahedron-soluisen suljetun solun alumiinivaahdon kaavasta.

4 AJONEUVOTEKNIIKAN TEORIA JA SOVELLUTUS

Ajoneuvoissa jousitusjärjestelmä ehkäisee koriin kohdistuvia vaurioittavia tai muutoin haitallisia värähtelyjä. Henkilö-ajoneuvon jousitusjärjestelmä koostuu kahdesta tekijästä; heilahduksenvaimentimista ja jousista sekä mahdollisista apujousista. Molempien päätoimintatapa on pidentää ajoneuvoon kohdistuvan iskun aikaa, jolloin iskun voima pienenee. Samalla pyritään saamaan ajoneuvoon kohdistuvat värähtelyt sellaiselle tasolle, joka ei ole haitallinen ajoneuville eikä sillä matkaaville henkilöille.

Ihmisen sietokyvyn ominaistajuus on 1 - 1,5 Hz ja ajoneuvon jousitusjärjestelmä lasketaan tälle ominaistajuudelle. Ajoneuvojen tieherätteiden amplitudi vaihtelee yleisesti 0 - 100 mm, jolloin jousitusjärjestelmä rakennetaan näiden raja-arvojen puitteissa. Rallissa tieherätteiden amplitudi vaihtelee huomattavasti enemmän, jolloin joustoliikkeen tulee olla huomattavasti suurempi. (2, luentoaineisto, auton jousituksen yleiset ja ergonomiset vaatimukset.)

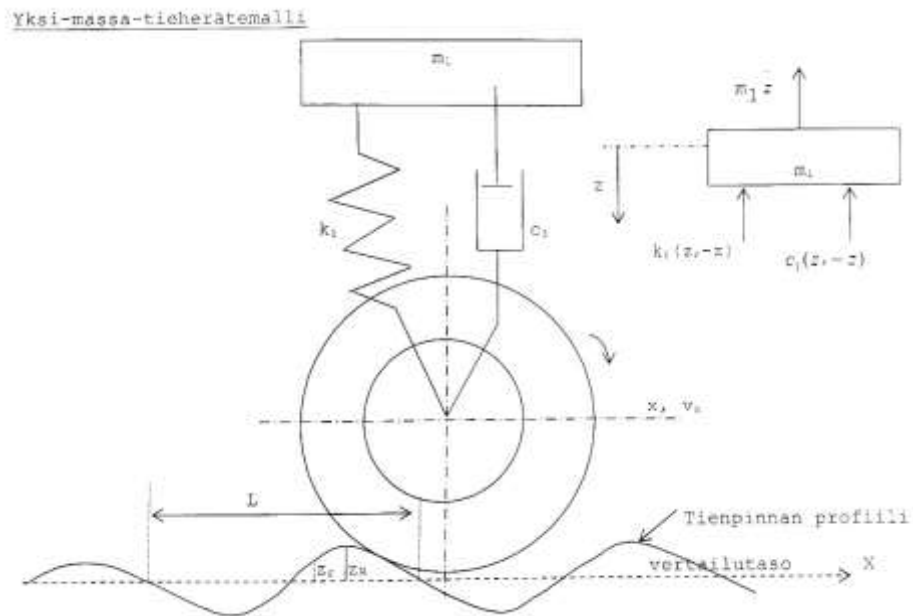
Jousi vastaa varsinaisesta joustoliikkeestä suurempien herätteiden osalta ja lyhyemmät impulssimaiset iskut hoitaa heilahduksenvaimennin. Jousen päätehtävä on pitää ajoneuvo ajokorkeudessa suurempien tieherätteiden osalta. (2, luentoaineisto, auton jousituksen yleiset ja ergonomiset vaatimukset.)

Tässä työssä ei syvennyttä varsinaisen jousitusjärjestelmän toimintaan, vaan todetaan yleisesti ralliajoneuvoissa käytettävien heilahduksenvaimentimien läpikulkeutuvien voimien suuruusluokka heilahduksenvaimentimen sisäänjouston tilanteessa. Työssä käsitellään jousitusjärjestelmää ns. yksi-massamallin, eli yhden vapausasteen vaimennetun värähtelijän mallin kautta. Yksi-massamallissa jousitusjärjestelmä jaetaan komponentteihin. Jousi ja heilahduksenvaimennus käsitellään omina komponentteina ja lisäksi huomioon otetaan ainoastaan korin massa. (2, luentoaineisto, yksimassa malli.)

4.1 Yhden vapausasteen vaimennetun värähtelijän malli

Yhden vapausasteen vaimennetun värähtelijän mallissa oletetaan, että sillä voidaan kuvata riittävällä tarkkuudella koko ajoneuvon, yksittäisen akselin tai yhden

renkaan ns. yhden vapausasteen värähtelysystemiä. Ajoneuvon kokonaismassa lepää kokonaisuudessaan pääjousien varassa. Jousi, apujousi sekä heilahduksenvaimennin on kytketty korin ja akseliston väliin. (2, luentoaineisto, Ajoneuvon jousitusmallit.) Yhden vapausasteen vaimennetun värähtelijän mallia voidaan tarkastella kuvasta 10.



KUVA 10. Yhden vapausasteen vaimennetun värähtelijän malli tieherätteellä havainnoituna (2.)

4.2 Heilahduksenvaimentimet

Heilahduksenvaimentimia, tavanomaisemmalla nimityksellä iskunvaimentimia, tarvitaan vaimentamaan tieherätteiden aiheuttamat värähtelyt ajoneuvossa. Nykyään ajoneuvoissa käytetään edelleen pääasiassa paineistamatonta kaksiputkista heilahduksenvaimenninta, eli ns. öljyiskunvaimenninta. (3, s. 848.) Lisäksi nykyään on myös saatavilla paineistettuja yksi ja kaksiputkisia iskunvaimentimia, joissa paineistus tehdään yleensä typpellä, joissain tapauksissa myös ilmalla. Heilahduksenvaimennin paineistetaan typpellä, jotta sen sisältämä öljy ei alkaisi kuplimaan ja vaimentimen mäntä kavitoimaan suurilla liikenopeuksilla (19, s. 4). Ralli ajoneuvoissa käytetään yleisesti yksiputkisia paineistettuja heilahduksenvaimentimia (19, s. 3).

Heilahduksenvaimentimet kilpa-ajoneuvoissa ovat yleensä säädettäviä. Säädoillä pyritään vaikuttamaan heilahduksenvaimentimen sisäänjouston (Bump) sekä ulosjouston (Rebound) nopeuksiin, hitaaseen (Low shaft speed) ja nopeaan alueeseen (High shaft speed). (19, s. 5.)

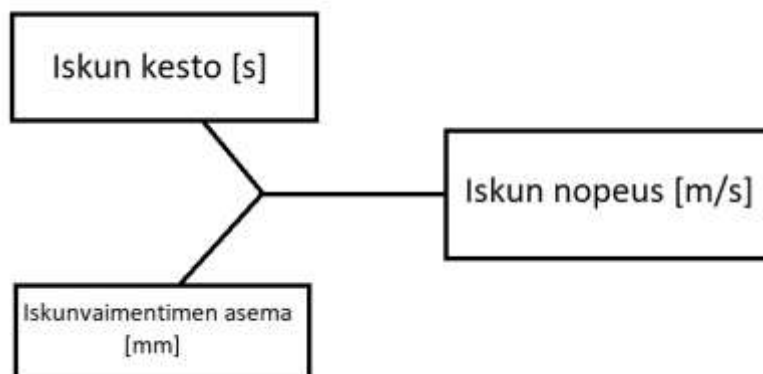
Hidas liikealue on heilahduksenvaimentimen päätoiminta-alue. Hitaalla liikealueella ajoneuvon kori reagoi pyörän liikkeisiin, josta seuraa painonsiirtymää. Painonsiirtymä vaikuttaa merkittävästi ajoneuvon käyttäytymiseen ajotilanteissa. (19, s. 5.)

Nopealla liikealueella kori ei reagoi pyörän liikkeeseen, jolloin iskunvaimentimen toiminnalla on vähemmän merkitystä. Tällaisia tilanteita aiheuttavat terävät tieherätteet, eli herätteet, jotka ovat impulssimaisia. Mitä suurempi nopeus vaimentimen männällä on, sitä suurempi voima tarvitaan männän liikkeen aikaansaamiseksi (19, s. 5). Heilahduksenvaimentimen kapasiteetti on rajallinen, jolloin suuret impulssimaiset voimat aiheuttavat ajoneuvoon vaurioita heilahduksenvaimentimen pohjatessa.

5 ABSORBOIVAN ELEMENTIN TOIMIALUEEN MÄÄRITTÄMINEN

Määritettäessä absorboivalle elementille raja-arvoja, täytyy tietää millä alueella jousitusjärjestelmä toimii normaalisti. Tämän seurauksena täytyy määrittää ralliajoneuvon jousitusjärjestelmän normaalin ajotilanteen voimat. Absorboivan elementin tulee toimia alueella, jossa heilahduksenvaimennin on pohjannut sisäänjouston liikevaran loputtua. (20.) Tällaisessa tilanteessa kilpa-ajoneuvoon voidaan olettaa tulevan rakenteita vaurioittavia voimia.

Elementin tarkoitus ei ole absorboida iskuja täydellisesti. Elementin tehtävänä on jatkaa iskun aikaa, jolloin runkorakenteisiin kohdistuvan voiman huipun energia absorboituu elementtiin. Absorboivan elementin läpi tulevan voiman suuruus tulee jäädä alle rungon teoreettisen lujuuden. Rakennelmia rikkovan iskun tekijöitä voidaan tarkastella kuvasta 11.



KUVA 11. Ajoneuvon rakenteita rikkovan voiman tekijät

Kuvassa 11 havaittava iskun nopeus on tekijä, joka määrittää jousitusjärjestelmään kohdistuvan voiman suuruuden. Kuten kohdassa 2.7.2 todettiin, mitä suurempi nopeus heilahduksenvaimentimen männällä, sitä suurempi voima tarvitaan sen liikkeeseen. Eli mitä suurempi on iskun nopeus, sitä suurempi on iskun tuottama voimakin.

Renkaaseen kohdistuvan tieherätteen aiheuttama heilahduksenvaimentimen nopeus ei itsessään vielä aiheuta vaurioita ajoneuvoon. Kuten kuvasta 11 voidaan

havaita, tarvitaan joko riittävästi liikematkaa heilahduksenvaimentimelle, ettei iskun nopeudesta johtuva voima aiheuta vaurioita tai tarpeeksi lyhyt iskun kesto, ettei heilahduksenvaimennin ehdi pohjata. Kuitenkin kuten kappaleessa 2.1.2 todetaan, mitä lyhyemmän aikaa impulsiivinen voima kohdistuu kappaleeseen, sitä suurempi se on.

Mikäli iskunvaimentimella on riittävästi liikematkaa, on heilahduksenvaimentimen liikkeellä mahdollista jatkaa iskun aikaa, jolloin voima ei pääse kasvamaan suureksi.

Ralliajoneuvoissa heilahduksenvaimennus säädetään usein melko löysäksi, jotta ajoneuvon renkaille saadaan optimaalinen kitka ja mahdollisimman pitkä kosketus tienpintaan ennen ja jälkeen tieherätteitä. Tämä aiheuttaa sen, että heilahduksenvaimentimen on mahdollista pohjata suuremmissa herätteissä liikevaran loputtua. Joissain tapauksissa jousitusjärjestelmä joudutaan säätämään varotoimenpiteenä toivottua jäykemmäksi, jotta vältetään heilahduksenvaimennin vaurioilta.

5.1 Datan käsittely

Työssä käytettävä heilahduksenvaimentimen potentiometridata kerättiin ralliautosta metsäerikoiskokeilla Australiassa vuonna 2016. Potentiometridatan keräykseen käytetty kilpa-ajoneuvo oli luokituksestaan NR4. Testeissä ajoneuvon heilahduksenvaimentimiin kiinnitettiin lineaariset heilahduksenvaimentimille tarkoitettut potentiometrit, joista saatu data kerättiin Motec tiedonkeruujärjestelmään.

Potentiometridata

Datan keräyksessä käytetyn potentiometrin tyyppi on kolminapainen lineaarinen potentiometri. Kolminapainen potentiometri tarvitsee käyttöjännitteen (5V) sekä maadoituksen. Kolmannesta ulostulosta saadaan signaalijännite, jonka suuruus riippuu potentiometrin asennosta. (Liite 1.)

Signaalijännite tuodaan Motec tiedonkeruujärjestelmään, tässä tapauksessa käytettiin Motec C185 tiedonkeruujärjestelmää, jossa jännite muutetaan ja kalibroidaan millimetreiksi raja-arvojen mukaan. Potentiometrin lähetystaajuus on 500

Hz. Tämän jälkeen dataa voidaan analysoida potentiometrin asennon suhteen eri tilanteissa Motec i2 Standard -sovelluksessa.

Koska tiedonkeruu oli suoritettu Standard muodossa, pystyi dataa analysoimaan ainoastaan i2 Standard -sovelluksella. Tämä hankaloitti työtä, sillä i2 Standard -sovelluksessa laskennallisten kanavien tuottaminen on paljon rajoitetumpaa verrattuna edistyneempään Pro-versioon. Tästä syystä heilahduksenvaimentimen nopeutta ei pystynyt suoraan sovelluksessa laskemaan ja muodostamaan vertailukanavia. Tällöin vertailu rinnakkain muiden saatavilla olevien datojen kanssa ei ollut mahdollista. Data pakattiin 500 Hz:n taajuudella i2 Standard -sovelluksessa ja tallennettiin CSV-tekstitiedostoksi, josta laskenta suoritettiin Microsoft Excel -sovelluksella. 500 Hz:n taajuutta käytettiin pakkaamisessakin, jotta pakkaamisvaiheessa dataa ei tarpeettomasti keskiarvoisteta ennen analysointia.

Excelissä heilahduksenvaimentimen asennon avulla määritettiin heilahduksenvaimentimen nopeus. Nopeus v (m/s) voidaan laskea kaavalla 16.

$$\frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = v$$

KAAVA 16

s = kuljettu matka (m), eli heilahduksenvaimentimen aseman muutos

t = kulunut aika (s)

Valitulla otannalla 500Hz taajuudella soluja Excelissä oli yli 600 000, joten huippuarvon etsiminen manuaalisesti olisi ollut lähes mahdotonta. Huippuarvojen hakemiseen käytettiin sovelluksen ”suuri” toimintoa, joka ilmoittaa valittujen solujen suurimman tai halutuksi suurimman arvon.

Huippunopeuksien paikantamiseksi käytettiin Excelin ”vastine” toimintoa. Vastine toiminnossa etsitään soluista vastinesolua vastaavaa lukua, jonka jälkeen määritetään, etsitäänkö yhtä suurta, suurempaa vai pienempää arvoa (”0”, ”1”tai”-1”.) sekä sen ulostulon sijaintia.

Taulukosta 1 voidaan tarkastella tutkitun datan suurimpia sisään- ja ulosjouston nopeuksia, niiden sijaintia Excelissä sekä käytettyjä esimerkkilauseita. Taulukossa 1 ensimmäisenä kirjaimena F merkitsee etupyörää ja R takapyörää. Toisena kirjaimena L merkitsee vasenta ja R oikeaa.

TAULUKKO 1. Heilahduksenvaimentimien suurimmat sisään- ja ulosjouston nopeudet sekä esimerkkilauseet

Damper Speeds (m/s)				
	FL	FR	RL	RR
Max (bump)	1,99	2,65	1,21	1,815
Min (rebound)	-1,03	-2,655	-0,605	-0,66
Max location (bump)	395549	244372	437227	244422
Max location (rebound)	155318	175244	175311	158615

Esimerkiksi: SUURI(I20:I603018;3)/1000

Esimerkiksi: VASTINE(I4;I20:I603018;0)+19

Excelissä datan ollessa 500 Hz muodossa jokainen ilmoitettu nopeuden arvo on heilahduksenvaimentimen aseman muutos 2 ms aikana. Kuitenkaan 2 ms kestäneestä nopeudesta aiheutunutta voimaa ei voida pitää ajoneuvoa vahingoittavana, jolloin nopeuden huippuja käytiin läpi manuaalisesti suurimmasta pienempään, kunnes löytyisi arvo, jossa nopeus oli selvän iskumaisen liikkeen aiheuttama.

Vaurioita aiheuttavan iskutapahtuman minimikestoksi oletettiin 10 ms. Vaurioita aiheuttavan iskutapahtuman kesto voi olla myös alle 10 ms, mikäli heilahduksenvaimentimen männän nopeus on > 4 m/s. Iskutapahtuman aikana sisäänjouston täytyy olla jatkuvaa.

Taulukossa 2 on esitelty esimerkkitapaus mahdollisesti vaurioita aiheuttavasta iskutapahtumasta. Esimerkin iskutapahtumassa heilahduksenvaimentimessa tapahtuu ~ 90 mm sisäänjoustoa ja sen maksiminopeus on 2,65 m/s.

TAULUKKO 2. Oikean eturenkaan sisäänjoustossa tapahtuva iskutapahtuma

Aika	Heilahduksenvaimentimen asema FR	FR Nopeus
s	mm	[mm/s]
0	-5,01	0
0,002	-4,42	295
0,004	-3,68	370
0,006	-2,94	370
0,008	-1,76	590
0,01	-0,58	590
0,012	1,76	1170
0,014	3,97	1105
0,016	7,07	1550
0,018	10,16	1545
0,02	14	1920
0,022	18,12	2060
0,024	22,54	2210
0,026	26,97	2215
0,028	32,27	2650
0,03	37,28	2505
0,032	42,29	2505
0,034	47,31	2510
0,036	52,02	2355
0,038	56,59	2285
0,04	60,86	2135
0,042	64,7	1920
0,044	68,38	1840
0,046	71,62	1620
0,048	74,42	1400
0,05	77,08	1330
0,052	79,14	1030
0,054	81,06	960
0,056	82,68	810
0,058	83,86	590
0,06	84,74	440
0,062	85,04	150
0,064	85,33	145

Kuvassa 12 voidaan tarkastella taulukossa 2 täsmennettyä oikean eturenkaan iskutapahtumaa. Kuvassa 12 vihreä viiva ilmentää oikean takarenkaan liikettä,

kun punainen viiva ilmentää oikean eturenkaan liikettä (josta esimerkkitapaus taulukossa 2), purppuran viivan ilmentäessä ajonopeutta.



KUVA 12. Iskutapahtuma Motec i2 Standard sovelluksessa, oikean etu- ja takapyörän liike

Vastaavia iskutapahtumia löytyi muutamia yhden kierroksen kestäneeltä tarkastelu jaksolta. Keskimäärin heilahduksenvaimentimien huippunopeudet vaihtelivat välillä 2,0 - 2,65 m/s iskutapahtumissa. Myös suurempia hetkellisiä 2 - 4 ms kestäneitä värähtelyitä havaittiin, suurimman heilahduksenvaimentimen liikenopeuden ollessa 3,835 m/s.

Itse mitatun datan lisäksi tutkittiin muutamia kolmannen osapuolen ajotilanteiden dataa, joissa heilahduksenvaimentimien maksiminopeudet olivat ~ 4 m/s. Tutkitut datat ovat linjassa toisiinsa, sillä nopeudet riippuvat heilahduksenvaimentimien säädöistä ja rakenteesta. Tärkeää olisi tietää kunkin datan mittauksessa käytetyn heilahduksenvaimentimen dynamometritulokset. Dynamometrituloksesta saadun voima-nopeuskuvaajan perusteella pystytään analysoimaan ajotilanteen dataa tarkemmin, kun tiedetään käytetyn heilahduksenvaimentimen koonpano ja säädöt.

Voitaneen olettaa, että ralliajoneuvon normaaliajon tilanteessa heilahduksenvaimentimen maksiminopeus on välillä 2,0 - 4,0 m/s.

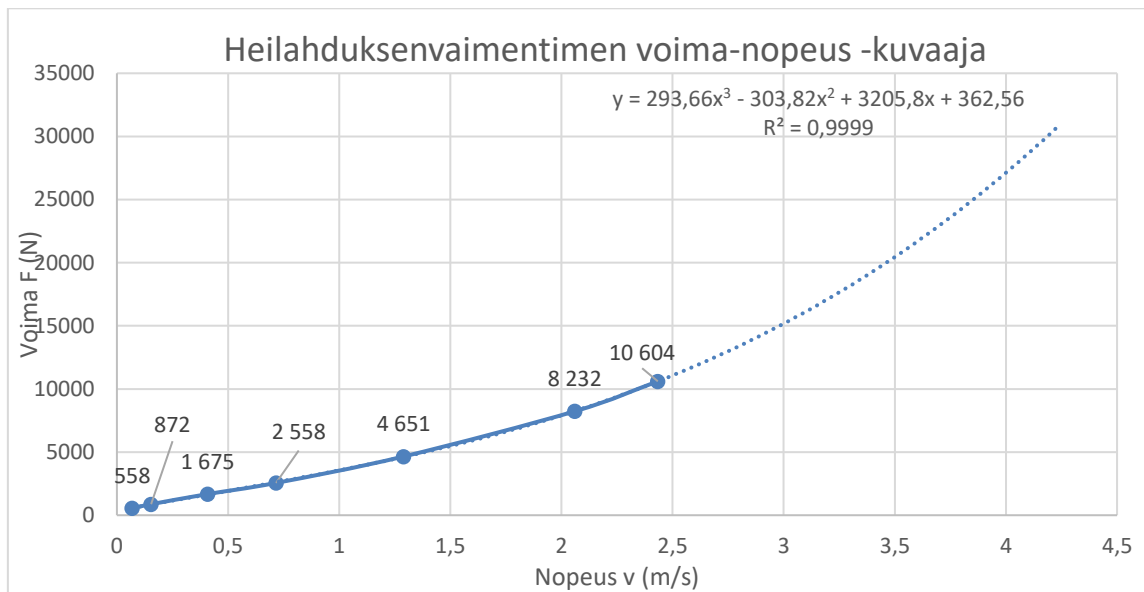
5.2 Vaurioittavan iskun voiman määrittäminen

Kun tiedetään, että vaurioita aiheuttavan iskun nopeus on todennäköisesti yli 4 m/s, täytyy tutkia, mikä on elementin rikkoutumisen aiheuttava minimivoima.

Vaurioittavan iskun voima saadaan laskemalla heilahduksenvaimentimen ja jousen kautta runkoon kohdistuva voima, kun heilahduksenvaimentimen männän nopeus on 4 m/s.

Heilahduksenvaimentimiin ja jousiin kohdistuvien voimien määrittäminen

Jotta nopeuksista saadaan voimia, tulee nopeus kertoa heilahduksenvaimentimen dynamometritestistä saadun voima-nopeuskuvaajan polynomikaavalla. Voima-nopeuskuvaajaa voidaan tarkastella kuvassa 13.



KUVA 13. Heilahduksenvaimentimen voima-nopeuskuvaaja, laskennallinen polynomikaava ja polynomien korrelaatiokerroin

Kuvassa 13 yhtenäinen trendiviiva merkitsee dynamometritä saatuja tuloksia katkoviivan merkityksessä ennustetta. Ennustukseen käytettiin Excel-ohjelmiston omaa trendiviivan ennustetoimintoa. Ennustuksen määritettiin kulkevan kolmannen asteen polynomien mukaisesti. Korrelaatiokerroin ollessa 0,9999 voidaan olettaa, että ennuste on riittävän tarkka.

Sijoittamalla nopeus polynomikaavaan (kaava 17) saadaan laskettua heilahduksenvaimentimeen vaikuttava voima kyseisellä nopeudella.

$$F_d = 293,66x^3 - 303,82x^2 + 3205,8x + 362,56$$

KAAVA 17

F_d = heilahduksenvaimentimeen kohdistuva voima

Sijoittamalla nopeus kaavaan 17 saadaan heilahduksenvaimentimeen kohdistuva voima 4 m/s nopeudella, joka on ~ 27 kN.

$$F_d = 293,66(4,0)^3 - 303,82(4,0)^2 + 3205,8(4,0) + 362,56 = 27\,118,88\,N$$

Heilahduksenvaimentimen lisäksi runkoon vaikuttaa jousivoima. Jousivoima saadaan kertomalla jousivakiolla k sisäänjouston matka z , kuten kaavasta 18 (4) voidaan havaita. Oletetaan, että sisäänjouston matka on 243 mm sekä jousivakion olevan 22 000 N/m.

$$F_j = k * z$$

KAAVA 18

F_j = jousivoimaksi (N)

k = jousivakio (N/m)

z = sisäänjouston matka (m)

Sijoittamalla arvot kaavaan 18 saadaan jousivoimaksi 5346 N.

$$F_j = 22000 \frac{N}{m} * 0,243\,m = 5346\,N$$

Kun kaavat yhdistetään ja lisätään varmuuskerroin, voidaan yhdistetyt voimat laskea kaavalla 19.

$$F_{kok} = (F_d + F_j) * 1,22$$

KAAVA 19

F_{kok} = jousen ja heilahduksenvaimentimen yhdistetty voima (N)

Varmuuskerroin lisätään kaavaan 19, jotta opinnäytetyön heilahduksenvaimentimien nopeuksien otannassa ilmenneiden 2–4 ms kestäneiden värähtelyiden maksimivoimat jäävät asetetun minimivoiman alapuolelle.

Sijoittamalla lasketut arvot kaavaan 19 saadaan laskettua yhdistetyt voimat varmuuskertoimella.

$$F_{kok} = (27\,118,88\,N + 5346\,N) * 1,22 = 39\,607\,N$$

Tuloksien perusteella voidaan todeta, että absorboivan elementin toimialueen tulee alkaa ~ 40 kN kohdalta. Tulos vastaa ~ 4,45 m/s heilahduksenvaimentimen

nopeudella yhdistettyjä voimia ilman varmuuskerrointa. Absorboivan elementin toimialueen raja-arvoksi valitaan tässä työssä 40 kN.

Rakenteellinen kestävyys

Tuntemattomiksi tekijöiksi jää heilahduksenvaimentimen ja sen kiinnityksen rakenteellinen kesto. Vaurioita aiheuttavassa tilanteessa toivotaan, että kaikki ajoneuvon komponentit säilyisivät ehjinä, tällöin tulee tietää myös rakenteiden kestävyys. Heilahduksenvaimentimen pohjatessa isku johtuu suoraan runkoon, jolloin rungon ja heilahduksenvaimentimen kestävyys tulisi testata. Heilahduksenvaimentimen sekä ajoneuvon rungon kiinnityksen rakenteellisen keston pystyisi määrittämään puristuskoestamalla. Puristuskoestuksen tuloksista saataisiin raja-arvo, jonka alle absorboivan elementin toimialue tulisi määrittää.

Työssä ei kuitenkaan ollut mahdollisuuksia puristuskoestaa ralliajoneuvon runkoa heilahduksenvaimentimen kiinnityspisteestä tai heilahduksenvaimentimia ja niiden rakenteita, jolloin näiden komponenttien vaurioittavan voiman raja-arvoksi oletettiin 60 kN rungon lujuuslaskennan kokemuspohjaiseen tietoon perustuen. Myös asiantuntijalausunnossa todetaan, että ”heilahduksenvaimentimien nopeuksia on mitattu jopa 10 m/s ilman rikkoontumisia”, sekä ”heilahduksenvaimentimet kestävät iskut rikkoontumatta, mikäli ne ovat huollettu asianmukaisesti ja ajallaan”. (21.) Voidaan olettaa, että 60 kN voima on riittävän matala raja-arvo komponenttien säilyttämiseksi ehjänä.

6 ABSORBOIVAN ELEMENTIN RAKENNESUUNNITTELU

Absorboivalle elementille suoritettiin vaatimusmäärittely. Vaatimusmäärittelyssä rajattiin prototyypille kiinteät vaatimukset (KV), vähimmäisvaatimukset (VV), sekä toiveet (T), joita voidaan tarkastella taulukosta 3.

TAULUKKO 3. Absorboivan elementin vaatimusmäärittely

	Absorboivan elementin vaatimusmäärittely
Vaatimustaso KV T VV	Geometria Elementin ollessa ehjä ajoneuvon ajogeometria ei saa muuttua Elementti ei vaikuta korin ulkomuotoon Elementin rikkouduttua ajoneuvon ajogeometrian tulee pysyä ajettavana
KV KV	Voimat Elementin absorboivan materiaalin tulee kestää 40 kN normaalivoima ilman muodonmuutosta Elementin rakenteen tulee kestää 60 kN normaalivoima ilman pysyviä muodonmuutoksia
KV T KV	Turvallisuus Elementti ei saa tuottaa ulkoisia turvallisuusriskejä kolaritilanteissa Ei teräviä osia rikkoutuessa Ei sisällä helposti palavia materiaaleja
KV T	Valmistus Tuotettavissa oleva suunnittelu Mahdollisimman kevyt rakenne
KV KV	Asennus Elementin tulee olla helppo ja nopea vaihtaa uuteen Elementin asennus ei vaadi erikoistyökaluja
VV T	Käyttö Elementin tila tulee pystyä tarkastamaan visuaalisesti Elementin tila tulee pystyä tarkastamaan sähköisesti
VV KV	Kunnossapito Ei vaadi huoltotoimenpiteitä elementin ollessa ehjä Elementin absorboivan materiaalin tulee olla helposti vaihdettavissa
T T	Kustannukset Valmiin tuotteen hinta piensarjatuotannossa alle 1 500€ Valmiin prototyypin valmistushinta alle 2 000€

Elementin malli valittiin kolmesta esisuunnittelusta mallista. Valittu malli on muodoltaan sylinterimäinen ja se kiinnitetään pulttiliitoksilla ajoneuvon runkoon. Elementin rungossa materiaalina käytetään 6061-T6-alumiinia.

6.1 Äärimittojen määrittäminen

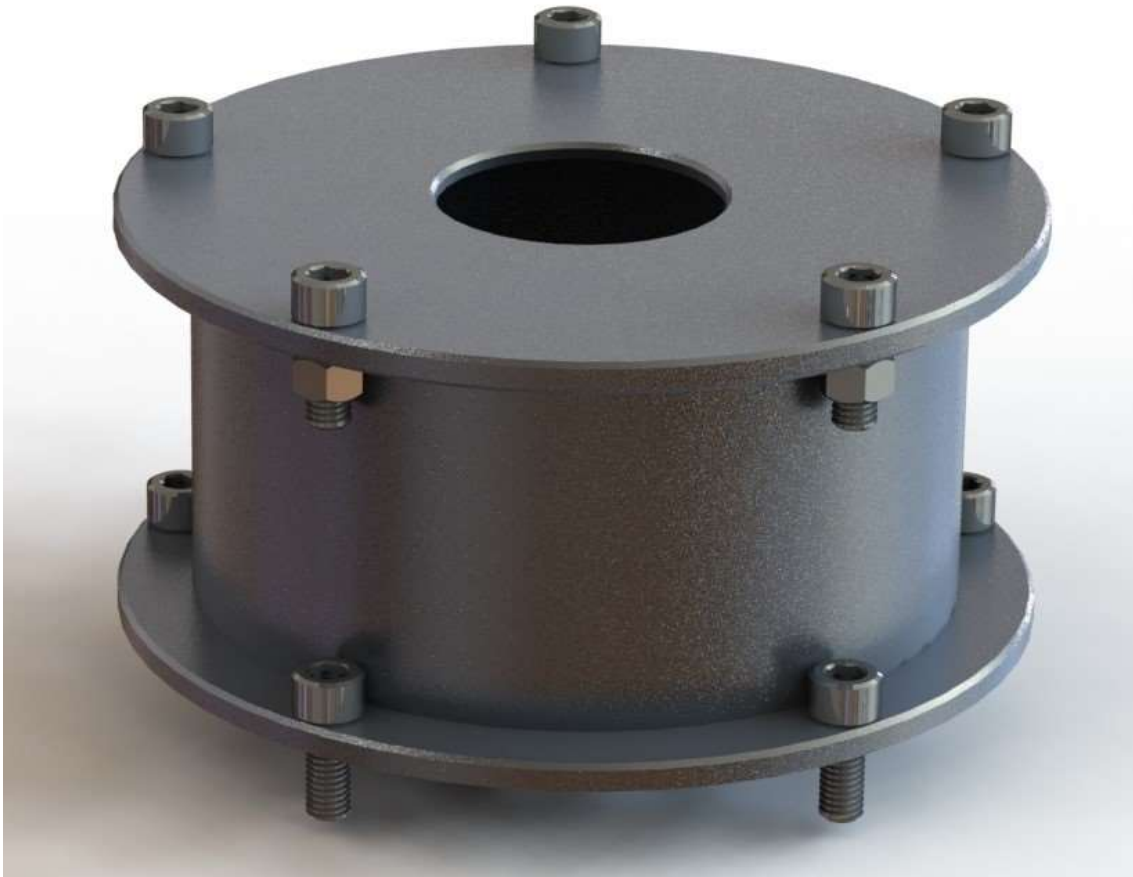
Rakenteelle sallitut äärimitat saatiin tarkastelemalla ralli- sekä rallicross-auton heilahduksenvaimentimen yläpään kiinnityksen alueella käytettävissä olevaa tilaa. Äärimitat määritettiin mittaamalla etäisyys heilahduksenvaimentimen yläpään kiinnityksestä konepellin saranoihin, leveyden rajoittavaksi tekijäksi osoittautui konepellin saranointi. Lisää tilavuuskapasiteettia leveyden ja korkeuden suhteen saataisiin, mikäli elementti sisällytettäisiin kilpa-ajoneuvon rungon suunnitteluun. Tällöin konepellin saranointia ja tuentaa voitaisiin muuttaa elementin tilan tarpeen mukaan.

Elementille määritettiin 170 mm maksimihalkaisija, mikä vastaa heilahduksenvaimentimen yläpään tavanomaisen kiinnityksen halkaisijaa. Konepellin saranointiin jää vielä etäisyyttä korimallista riippuen n. 40 mm, joka voitaisiin hyödyntää suurentamalla elementin halkaisijaa, mikäli elementti otettaisiin jo kilpa-ajoneuvon rungon suunnittelussa huomioon. Korkeussuunnassa tilaa elementille tutkittiin olevan n. 75 mm nykyisissä kilpa-ajoneuvoissa ja mahdollisesti +30 mm lisää korimallista riippuen, mikäli konepellin tukia muokattaisiin kilpa-ajoneuvon suunnitteluvaiheessa. Jälkikäteen tapahtuvalla kevyellä konepellin tuennan muokkauksella saataisiin 10 - 15 mm lisää tilaa korkeussuunnassa, jonka perusteella valittiin elementin maksimikorkeudeksi 90 mm.

6.2 Elementin prototyypimalli

Elementin prototyyppi mallinnettiin Solidworks 2017 -3D-suunnitteluohjelmalla.

Kuvasta 14 voidaan tarkastella absorboivan elementin ensimmäisen prototyypin 3D-mallia. Prototyypin materiaalina käytetään 6061-T6-alumiinia



KUVA 14. Absorboivan elementin prototyyppi yläviistosta tarkasteltuna

Elementin rungolle ja absorboivalle materiaalille määritettiin 55 mm halkaisijalla oleva reikä, jotta absorboivan materiaalin lysähdyksessä heilahduksenvaimentimen yläpää ei osu absorboivaan materiaalin tai kanteen. Reiän kautta on myös mahdollista säätää yläpäästä säädettäviä heilahduksenvaimentimia ja vetää mahdolliset yläpuoliset lisäsäiliöt absorboivan elementin ulkopuolelle.



KUVA 15. Absorboivan elementin prototyyppi alaviistosta tarkasteltuna

Kuvasta 15 voidaan tarkastella absorboivan elementin prototyyppiä alaviistosta. Heilahduksenvaimentimen yläpää kiinnitetään kiinnityslevyystään alhaaltapäin kelluvaan lautaselementtiin viidellä ISO 4762 - 12,9 M8 ruuvilla. Myös itse elementti kiinnitetään ajoneuvon runkoon vastaavilla ruuveilla, samoin kansi elementin runkoon.



KUVA 16. Absorboivan elementin prototyypin leikkauskuva sivusta tarkasteltuna

Kuvasta 16 voidaan tarkastella absorboivan elementin rakennetta poikkileikkausnäkymästä. Absorboivan materiaalin halkaisijaksi määritettiin 136 mm (D_1), läpireiän halkaisijaksi (D_2) 55 mm ja korkeudeksi (h) 72 mm.

6.3 Anturointi

Anturointi olisi mahdollista sisällyttää elementtiin. Anturointi voisi sijaita elementin alimmaisen lautaselementin alapuolella, kiinnitettynä ajoneuvon runkopeltiin. Yksinkertainen rajakytkin olisi riittävä. Rajakytkimen kytkinelementti voitaisiin tuoda reiästä kelluvaa lautaselementtiä vasten.

Rajakytkin tulisi säätää kytkeytymään kelluvan lautaselementin noustessa 3 mm. Kytkin voitaisiin yhdistää kilpa-ajoneuvon tiedonkeruujärjestelmään ja sieltä saatava signaalijännite voitaisiin ohjata esimerkiksi led-valolle, joka voitaisiin sijoittaa koelautaan ilmoittamaan kuljettajalle absorboivan elementin vaurioitumisesta.

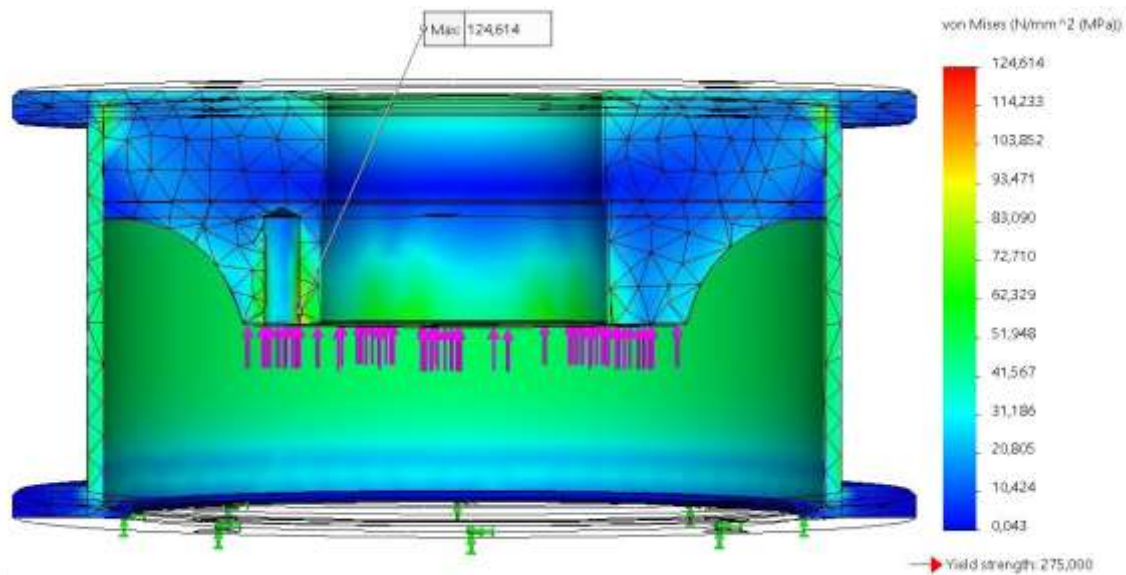
6.4 Elementin lujuustarkastelu

Absorboivan elementin 3D-mallin lujuustarkastelu suoritettiin Solidworks Simulation lisäosalla. Kaikissa lujuustarkasteluissa elementtiverkkona (eng. Mesh) käytettiin yhdistettyä verkkotyyppiä, joissa on sekä kaarevia, että suoria kolmion sivuja. Lujuustarkastelussa elementin osien hitsattavat saumat määritettiin liitosmäärittelyssä yhteensidotuksi, "bonded". Elementissä liikkuvien kappaleiden suhde yhteensidottuihin kappaleisiin liitosmäärittelyssä valittiin ei läpäiseväksi, "no penetration".

Veto- ja puristuslujuuden lujuustarkastelussa käytettiin 60 kN voimaa, joka aikaisemmin määritettiin elementin rungon lujuuden raja-arvoksi. Puristuslujuuden tarkastelu kuvastaa sisäänjouston tilannetta, vetolujuuden tarkastelu puolestaan ulosjouston tilannetta. Ulosjouston tilanteessa odottamattomia suuria voimia ei oleteta havaittavan, mutta elementin tulee kestää heilahduksenvaimentimen sekä jousen aiheuttama ulosjouston voima. Tässäkin tarkastelussa käytettiin elementin rungolle määrättyä 60 kN voimaa, vaikka todellisuudessa ulosjouston maksimivoimat liikkuvat lähempänä ~ 20 kN.

Puristuslujuus

Kuvasta 17 voidaan tarkastella elementin puristustilanteessa vallitsevaa von Mises -vertailujännitysjakautumaa oletetussa ajoneuvon runkoa rikkovassa tilanteessa, jossa absorboiva materiaali on painunut 75 % kasaan. Absorboivaa materiaalia jäljittelee kiinteä 6061-T6-alumiinikomponentti, jonka korkeus on 18 mm (72 mm x 0,25). Tarkastelussa kiinnityspinnaksi määriteltiin elementin alimmaisena lautaselementin alapuolinen pinta-ala. (Kuva 17, vihreät nuolet.) Elementtiin kohdistuva voima määritettiin kohdistuvan iskunvaimentimen kiinnitysalueelle kelluvan lautaselementin tasopintaan. (Kuva 17, violetit nuolet.)



KUVA 17. Elementin vertailujännityksien tarkastelu puristustilanteessa absorboivan materiaalin tihentymisvaiheessa, kun absorboiva materiaali 75 % lysähtäneenä

Laskentamallin vertailujännityksien maksimiarvoksi saatiin ~125 MPa, joka jää komponenteissa käytetyn materiaalin 6061-T6-alumiinin ($\sigma_{6061-T6} = 275 \text{ MPa}$) myötölujuudesta selvästi. Laskentamallissa vertailujännityksen maksimiarvojen havaittiin sijaitsevan kelluvan lautaselementin ruuvien reikien laidoilla.

Oletetaan, että absorboiva materiaali käyttäytyy kiinteän alumiinin tavoin 75 % vaiheessa lysähdystä. Laskemalla kaavalla 20 voidaan havaita elementin rungon puristuslujuuden varmuuskertoimeksi tulevan ~ 2,2. Kaavalla 20 voidaan laskea puristusjännityksen varmuuskerroin.

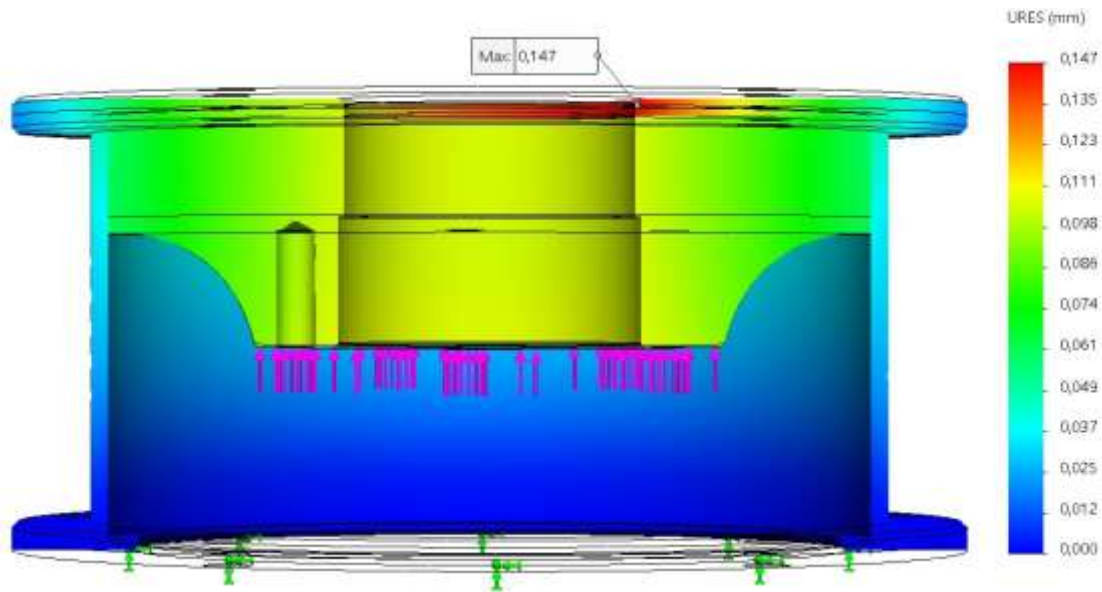
$$\frac{\sigma_{6061-T6}}{\sigma_{Elementti}} = 2.2068$$

KAAVA 20

$\sigma_{6061-T6}$ = käytetyn materiaalin myötölujuuus (N/m²)

$\sigma_{Elementti}$ = puristuslujuuden tarkastelussa havaittu maksimijännitys (N/m²)

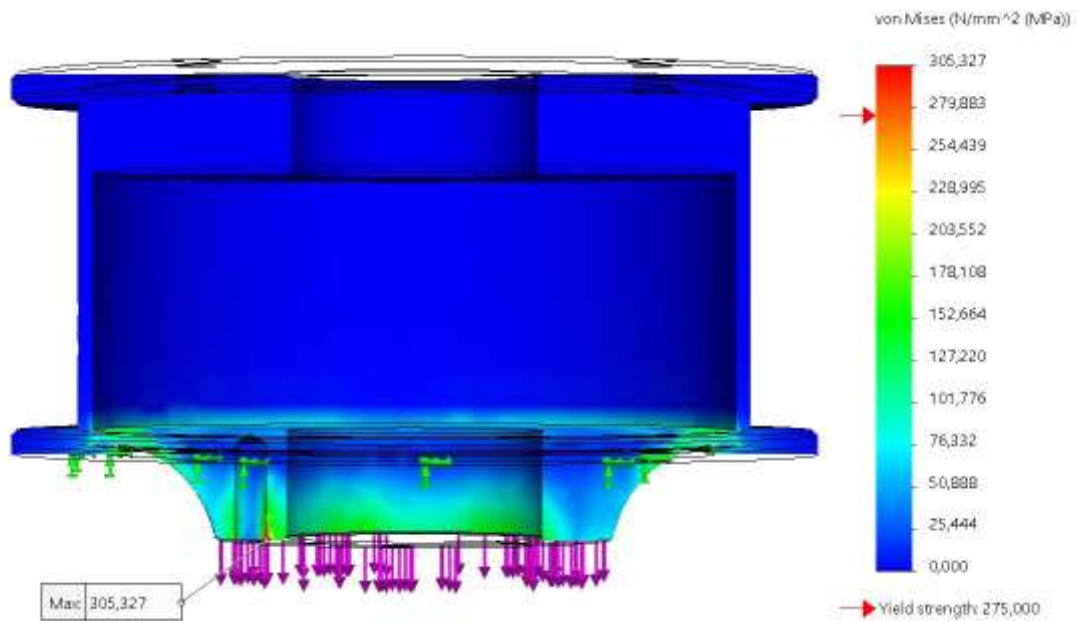
Kuvasta 18 voidaan tarkastella laskentamallin puristustilanteessa tapahtuvaa muodonmuutosjakaumaa. Muodonmuutosjakauman maksimiarvon havaittiin sijaitsevan elementin kannen reiän reunoilla. Puristuslujuuden tarkastelussa maksimimuodonmuutos oli 0,147 mm.



KUVA 18. Sisäänjoustossa tapahtuvan puristustilanteen muodonmuutosjakauman tarkastelu elementissä

Vetolujuus

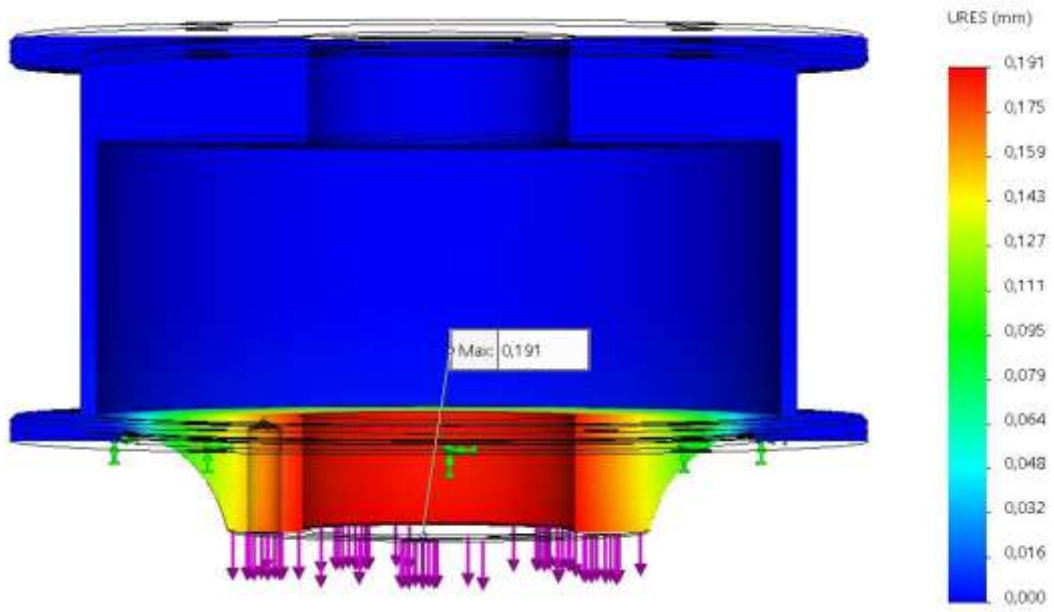
Elementin runkoon kohdistuvan vetotilanteen von Mises -vertailujännitysjakamaa voidaan tarkastella kuvasta 19. Vetotilanteen tarkastelussa elementin runkoon kohdistuvan vertailujännityksen maksimiarvo oli ~ 305 MPa. Elementin lujuutta vetotilanteessa voidaan kuitenkin pitää riittävänä, vaikka materiaalin myötölujuus ylittyikin kelluvan lautaselementin ruuvien reikien reunoilta vertailujännitys jakauman tarkastelussa. Todellisuudessa 60 kN voimaa ei oleteta missään tilanteessa kohdistuvan elementin runkoon jousitusjärjestelmän ulosjousitossa. Myöskään tarkastelussa ei oteta huomioon ruuvien tuottamaa tukeaa rei'issäan kelluvassa lautaselementissä. Voitaneen olettaa, että maksimijännitys rei'issä jakaantuisi tasaisemmin ruuvien ollessa paikoillaan.



KUVA 19. Ulosjoustossa tapahtuvan vetotilanteen vertailujännityksien tarkastelu elementissä

Työssä tutkittujen ajodatojen perusteella voidaan todeta, että ulosjouston maksiminopeudet ovat korkeintaan ~ 3 m/s, joka vastaa jousituskomponenteista ja niiden säädöistä riippuen noin 20 kN voimaa.

Kuvassa 20 voidaan tarkastella laskentamallin muodonmuutosjakaumaa ulosjouston tilanteessa. Elementin runkoon kohdistuvan muodonmuutoksen maksimiarvon havaittiin sijaitsevan kelluvassa lautaselementissä ja sen suuruus oli 0,191 mm.



KUVA 20. Ulosjoustossa tapahtuvan vetotilanteen muodonmuutosjakauman tarkastelu elementissä

7 ABSORBOIVAN MATERIAALIN VALINTA

Absorboivan elementin absorboivana materiaalina päätettiin käyttää alumiinivaahtoa. Vaihtoehtoiksi jäi käyttää suljetun solun alumiinivaahtoa tai avoimen solun alumiinivaahtoa.

Suljetun solun alumiinivaahdoista paras vaihtoehto on Alporas. Alporas-vaahtoa pystytään valmistamaan riittävällä materiaalivahvuudella absorboivaan elementtiin, sekä sillä on hyvät energian absorbointiominaisuudet.

Alporas-vaahtoa tilattiin kaksi 500 x 1 000 x 75 mm:n kokoista Havel Lite® 75 mm -levyä Havel Metal Foam GmbH:n tehtaalta Saksasta. Havel Lite® 75 mm -materiaalin suhteellinen tiheys on 18 %. Havel Metal Foam GmbH:lla on erittäin hyvä tietotaito valmistamista materiaaleista ja he pystyvät tuottamaan alumiinivaahtoja erittäin kilpailukykyiseen hintaan. Kuitenkin materiaalin toimitusajan kohdan lähestyessä kävi ilmi, että raaka-aine toimittajan viivytyksestä johtuen he eivät voineet valmistaa tuotetta toivotuilla mitoilla. He olisivat pystyneet valmistamaan parhaimmillaan 35 mm vahvaa materiaalia, minkä todettiin monimutkaistavan työn kulkua niin merkittävästi, että materiaalityö peruutettiin.

Avoimen solun alumiinivaahdoista paras valinta olisi ERG Aerospacen valmistama Duocel. Avoimen solun alumiinivaahtoa ei tuntunut kuitenkaan saavan tilatua suoraan heiltä, tai miltään muultakaan taholta, jolloin päädyttiin suunnittelemaan avoimen solun alumiinivaahtoa itse. Tarkoituksena oli valmistaa avoimen solun alumiinivaahdorakennetta Oulun yliopiston Kerttu Saalastin Instituutissa DMLS-menetelmällä alumiinijauheesta. DMLS-menetelmällä alumiinijauhetta sulatetaan tietokoneohjatusti laserilla kerroksittain, jolloin päädytään fyysiseen kolmiulotteiseen alumiiniseen kappaleeseen. Heidän aikatauluunsa ei kuitenkaan lopulta mahtunut avoimen solun alumiinivaahdon valmistus DMLS-menetelmällä tämän opinnäytetyön aikataulun puitteissa, jolloin alumiinivaahtoja käytännön testaamiseen ja fyysiseen prototyyppiin ei saatu hankittua lainkaan.

Absorboivan materiaalin hankinnassa kohdattujen haasteiden vuoksi työ päätettiin suorittaa loppuun teoreettisena pohjana jatkotutkimuksia varten.

7.1 Absorboivan materiaalin lujuuslaskenta prototyypimalliin

Tilattaessa materiaaleja elementtiin, tulee tietää tilattavan materiaalin ominaisuudet, jotta ne ovat sovellutukseen sopivat.

Elastisen alueen laskenta

Alumiinivaahdoilla on valmistusmateriaalille ominaisesti ~ 4 % elastinen alue. Sitä voidaan osittain vähentää valmistamalla absorboiva materiaali lievään ylikokoon ja esijännittää se kannen pulttikiristyksen avulla. Jos esijännitystä päädytään käyttämään varsinaisessa tuotteessa, tulee esijännitys laskea ja lisätä absorboivan elementin raja-arvoon, jotta lysähdys alkaa suunnitellusti 40 kN voimalla. Ensimmäisessä absorboivan elementin prototyypissä esijännitystä ei kuitenkaan käytetä.

Liikevarana elastinen alue saadaan kertomalla se absorboivan materiaalin korkeudella (72 mm).

$$S_{el} = h_{elmnt} * \frac{4}{100} \quad \text{KAAVA 21}$$

S_{el} = elastisen alueen liikevara (mm)

Sijoittamalla materiaalin korkeuden arvo kaavaan 21 saadaan laskettua elastisen alueen liikevaraksi 2,88 mm.

$$S_{el} = 72 \text{ mm} * \frac{4}{100} = 2,88 \text{ mm}$$

Elastisen alueen liikevaran ollessa alle 3 mm voidaan sitä pitää merkityksettömän pienenä ajoneuvon ajogeometrian kannalta.

Teoreettisen tasaantumisjännityksen ja suhteellisen tiheyden laskenta alumiinivaahdoille

Tasaantumisjännitys on esiarvoisen tärkeä ominaisuus materiaalille, jonka tehtävänä on alkaa lysähtämään määrätyllä voimalla. Täytyy siis laskea sovellutukseen sopiva tasaantumisjännitys. Teoreettisen tasaantumisjännityksen kaavaan

tarvitaan absorboivan materiaalin käyttöpinta-ala, joka saadaan laskemalla kaavalla 22.

$$(\pi * r_{ulko}^2) - (\pi * r_{sisä}^2) = A_1 \quad \text{KAAVA 22}$$

A_1 = absorboivan materiaalin käyttöpinta-ala (mm²).

r_{ulko} = absorboivan materiaalin säde keskipisteestä ulkokehälle (mm)

$r_{sisä}$ = absorboivan materiaalin säde keskipisteestä keskireiän kehälle (mm)

Sijoittamalla arvot kaavaan 22 saadaan käyttöpinta-alaksi $A_1 = 12\,150,9 \text{ mm}^2$.

$$(\pi * 68^2 \text{ mm}) - (\pi * 27,5^2 \text{ mm}) = 12\,150,895 \text{ mm}^2$$

Teorettinen tasaantumisjännitys alumiinivaahdoille

Teorettinen tasaantumisjännitys alumiinivaahdoille saadaan laskettua kaavalla 23.

$$\sigma_{Teor} = \frac{F_{max}}{A_1} \quad \text{KAAVA 23}$$

Sijoittamalla arvot kaavaan 23 saadaan teoreettiseksi tasaantumisjännitykseksi 3,29 MPa.

$$\sigma_{Teor} = \frac{40\,000 \text{ N}}{12\,150,9 \text{ mm}^2} = 3,292 \text{ MPa}$$

Teorettinen suhteellinen tiheys avoimen solun alumiinivaahdoille

Teorettinen suhteellinen tiheys avoimen solun alumiinivaahdolle saadaan laskemalla teoria osiossa esitellyn kaavan 9 sovelletulla versiolla kaavalla 24.

$$\sigma_{pl}^* = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} * \sigma_{ys} \quad \text{KAAVA 24}$$

Sijoittamalla arvot avoimen solun alumiinivaahdon tasaantumisjännityksen sovellettuun kaavaan voidaan havaita, että suhteellisen tiheyden arvolla ~ 23 % saavutetaan toivottu tasaantumisjännitys avoimen solun alumiinivaahdolle.

$$\sigma_{pl}^* = 0,3 \left(\frac{23}{100} \right)^{3/2} * 99,7 \text{ MPa} = 3,299 \text{ MPa}$$

Laskennassa täytyy ottaa huomioon, että käytetyn raaka-aine materiaalin myötölujuus vaikuttaa laskentaan oleellisesti. Mikäli raaka-aineena käytettäisiin avoimen solun alumiinivaahdoille suosittua 6061-T6-alumiinijauhetta, jonka myötölujuus on 275 MPa, päästäisiin teoreettiseen tasaantumisjännitykseen suhteellisen tiheyden arvolla 11,68 %. 6061-T6-alumiinin käyttö etenkin kahden materiaalin valussa on mahdollista, kun seosaineita ei tarvita suurustukseen, jolloin alumiinijauheen valinta ei ole yhtä rajoitettua, kuin suljetun solun alumiinivaahdon raaka-aine materiaalin valinnassa.

Teoreettinen suhteellinen tiheys suljetun solun alumiinivaahdolle

Teoreettinen suhteellinen tiheys suljetun solun alumiinivaahdolle saadaan laske-
malla kaavalla 25, joka on teoria osiossa esitellyn kaavan 10 sovellettu versio. Laskennassa oletetaan, ettei suljetun solun alumiinivaahdo ole tetrakaidekahedron-solurakenteinen, vaan enemmän epäjohdonmukainen solujen koon ja niiden jakauman suhteen.

$$\sigma_{pl}^* = C_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C'_3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) * \sigma_{ys} \quad \text{KAAVA 25}$$

Sijoittamalla arvot suljetun solun alumiinivaahdon tasaantumisjännityksen sovellettuun kaavaan 25 voidaan havaita, että 7,5 % suhteellisen tiheyden arvolla saavutetaan toivottu tasaantumisjännitys suljetun solun alumiinivaahdolle.

$$\sigma_{pl}^* = 0,33 * \left(\frac{7,5 \%}{100 \%} \right)^{3/2} + 0,44 * \left(\frac{7,5 \%}{100 \%} \right) * 99,7 = 3,297 \text{ MPa}$$

Suljetun solun alumiinivaahdo 7,5 % suhteellisella tiheydellä on erittäin haastava valmistaa vaaditulla materiaalivahvuudella. Alporas-vaahdoilla päästään vaadittuun materiaalivahvuuteen, mutta niillä yleisesti pienin suhteellisen tiheyden arvo on 8 %. (5, s. 43.)

Gibson-Ashby -teoreettiseksi malliksi kutsutaan tetrakaidekahedron-soluisen alumiinivaahdon solumallia, jonka ominaisuuksia Gibson ja Ashby ovat tutkineet elementtimenetelmän avulla. Suurin osa alumiinivaahdoilla käytetyistä kaavoista on tuotettu Gibson-Ashby -teoreettisen mallin pohjalta. Useissa tutkituissa alan artikkeleissa todetaankin, että Gibson-Ashby -teoreettinen malli liioittelee

tasaantumisjännityksen suuruutta ainakin suljetun solun alumiinivaahdoilla. Useiden testitulosten mukaan todellinen mitattu tasaantumisjännitys on ollut n. 33 % laskennallisesta, kuten esimerkiksi Idris toteaa artikkelissaan (18, s. 44). Hän kuitenkin toteaa vielä artikkelissaan, että tasaantumisjännityksen laskenta ko. kaavalla on mahdollista, kun käytetään Alporas-vaahdoille arvoina $C_3 = 0,44$ sekä $C'_3 = 0,1835$. Myös muissa artikkeleissa, joissa puristuskoestuksen perusteella laskennan vakioita on muutettu, on linja ollut vastaava. Tämän perusteella käytetään Idris'n määrittämiä vakioiden arvoja, jotka ovat puristuskoestamalla todennettu. Kun nämä arvot sijoitetaan suljetun solun alumiinivaahdon tasaantumisjännityksen kaavasta 10 sovellettuun kaavaan 25 voidaan havaita, että suhteellisen tiheyden arvolla 17,8 % saavutetaan toivottu tasaantumisjännitys suljetun solun alumiinivaahdolle.

$$\sigma_{pl}^* = 0,44 * \left(\frac{17,8\%}{100\%}\right)^{3/2} + 0,1835 * \left(\frac{17,8\%}{100\%}\right) * 99,7 = 3,2895 \text{ MPa}$$

Suuruusluokaltaan 17,8 % suhteellinen tiheys vaikuttaa oikealta. Puristuskoestamalla koekappaleita materiaalista saataisiin todennettu tulos, jota voitaisiin vertailla laskettuihin arvoihin. Tuloksen perusteella kertoimet voitaisiin säätää kyseisen materiaalin kaavaan, jotta laskennallinen tasaantumisjännitys saataisiin vastaamaan todellista tasaantumisjännitystä.

Usealla Alporas-valmistajalla huokoisimmat vaihtoehdot ovat ilmoitettu olevan ~18 % suhteelliselta tiheydeltään. Esimerkiksi Havel Metal Foam GmbH:n valmistaman Alporas-vaahdon Havel Lite® 75mm suhteellinen tiheys on 18 % ja tasaantumisjännitykseksi on ilmoitettu vain ~1 MPa. (6.) Toki tasaantumisjännitykseen vaikuttaa suljetun solun alumiinivaahdoillakin raaka-aine materiaalin valinta.

7.2 Absorboitava energia

Absorboitava energia voidaan laskea ottamalla huomioon tasaantumisjännityksen lisäksi suhteellinen venymä. Suhteellinen venymä ε saadaan laskettua Gibsonin ja Ashbyn esittelemällä kaavalla 26 (12, s. 43).

$$\varepsilon_{cd}^I = 1 - \frac{1}{0,5} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$$

KAAVA 26

ε = suhteellinen venymä

Kaavalla 26 voidaan laskea molempien, avoimen sekä suljetun solun alumiinivaahtojen venymä juuri ennen tihentymisvaihetta. Idris kuitenkin toteaa kaavalla 26 saatavat tulokset suuriksi suhteessa mitattuihin tuloksiin. Tulokset jäljittelevät monissa tapauksissa jo tihentymisvaiheen energian absorbointia. Hän kehottaakin käyttämään tasaantumisjännityksen alueen energian absorboinnin laskentaan testauksen perusteella tarkennettua kaavaa 27 (12, s. 44) ja käyttämään eri alumiinivaahdoille omia A:n ja B:n arvoja (12, s. 43).

$$\varepsilon_{cd}^{II} = A - B\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$$

KAAVA 27

Alporas-vaahdoilla A = 0,495

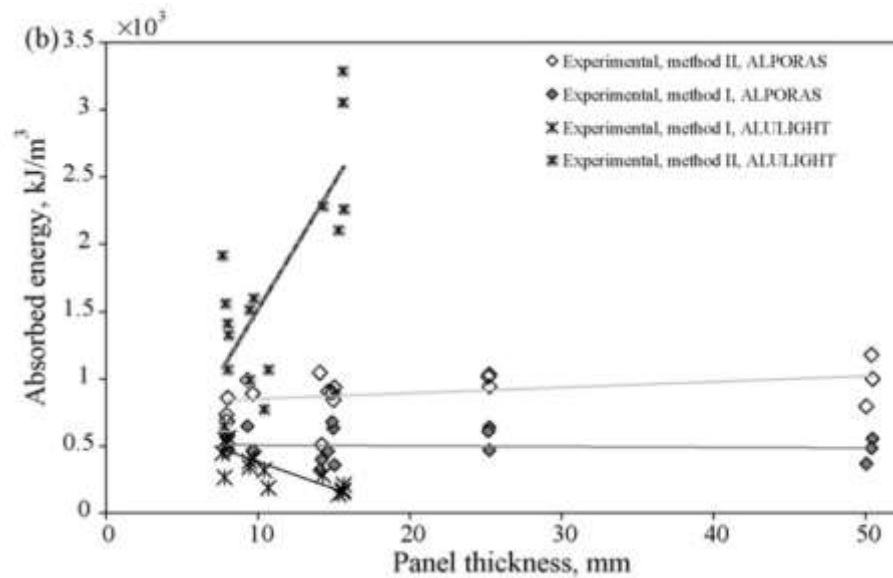
Alulight-vaahdoilla A = 0,407

Alporas-vaahdoilla B = 1.8

Alulight-vaahdoilla B = 1,44

Oletetaan, että Alporas-vaahdon arvoja voidaan käyttää myös avoimen solun alumiinivaahdon suhteellisen venymän laskennassa niiden käyttäytyen monin osa-aluein samalla tapaa.

Esimerkiksi Alporas-vaahdoilla vaaditun materiaalivahvuuden ei katsota vaikuttavan merkittävästi energian absorbointikykyyn, kuten kuvasta 21 voidaan todeta. Avoimen solun alumiinivaahdo käyttäytyy samalla tapaa, energian absorbointikyvyn pysyessä vakiona eri materiaalivahvuuksilla.



KUVA 21. Energian absorbointikyvyyn suhde materiaalivahvuksiin Alulight- ja Alporas-vaahdoilla (12, s. 44)

Absorboitu energia lasketaan kaavalla 28 (12, s. 44).

$$W_{ab} \left[\frac{KJ}{m^3} \right] = \varepsilon_{cd}^{II} * \sigma_{pl}^* * 10^3 \text{ tai } \varepsilon_{cd}^I * \sigma_{pl}^* * 10^3, \quad \text{KAAVA 28}$$

jossa W_{ab} = työ (KJ/m³), mikä vaaditaan kappaleen kasaan puristamiseen, eli absorboitavan energian suhde tilavuuteen.

Avoimen solun alumiinivaahdolla absorboitava energia

Avoimen solun alumiinivaahdon absorboitava energia saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 28.

$$W_{ab\ oc} = \left(0,495 - 1,8 \left(\frac{23\%}{100} \right) \right) * 3,29 \text{ MPa} * 10^3 = 266,49 \text{ KJ/m}^3$$

Kaavalla 28 voidaan laskea avoimen solun alumiinivaahdon energian absorbointikyky $W_{ab\ oc}$ (KJ/m³). Avoimen solun alumiinivaahdo, jonka suhteellinen tiheys on 23 % pystyy absorboimaan 266,5 KJ/m³.

Kuten aikaisemmin todettiin, että mikäli raaka-aineena käytetäänkin 6061-T6-alumiinia saadaan suhteelliseksi tiheydeksi 11,68 % tasaantumisjännityksen vastassa teoreettista tasaantumisjännitystä. Käyttämällä 6061-T6-alumiiniseoksen

suhteellisen tiheyden arvoa kaavassa 28 saadaan energian absorbointikyvyksi 936,9 KJ/m³.

Kun absorbointikyky kerrotaan suunnitellun absorboivan materiaalin tilavuudella, saadaan varsinainen absorboitavissa oleva energia. Huomioon täytyy ottaa absorboinnin matka. Alporas-alumiinivaahdoilla sekä avoimen solun alumiinivaahdoilla energian absorboinnissa huomioidaan 5 - 75 % suhteellinen pituuden muutos puristussuunnassa, jonka jälkeen tihentymisvaiheessa tapahtuvaa absorptiota ei huomioida.

Alumiinivaahdoilla energian absorboinnissa käytettävissä olevan tilavuus saadaan laskemalla kaavalla 29.

$$V_{ab} = ((\pi * r_{ulko}^2) - (\pi * r_{sisä}^2)) * \left(h * \frac{70}{100}\right) * 10^{-9} \quad \text{KAAVA 29}$$

V_{ab} = energian absorboinnissa käytettävissä olevan tilavuus (m³)

h = absorboivan elementin korkeus (mm)

Sijoittamalla arvot kaavaan 29 saadaan käytettävissä olevaksi tilavuudeksi 0,0006124051 m³.

$$V_{ab} = ((\pi * 68^2 \text{ mm}) - (\pi * 27,5^2 \text{ mm})) * \left(72 \text{ mm} * \frac{70}{100}\right) * 10^{-9} = 0,0006124051 \text{ m}^3$$

Kun työ W_{ab} kerrotaan käytettävissä olevalla tilavuudella V_{ab} , saadaan tulokseksi lysähdykseen tarvittava energia E_{ab} . Varsinainen absorboitavissa oleva energia saadaan laskettua kaavalla 30.

$$E_{ab} = W_{ab} * V_{ab} \quad \text{KAAVA 30}$$

E_{ab} = lysähdykseen tarvittava energia (J)

Lisäämällä arvot kaavaan 30 saadaan tulokseksi 163 J.

$$E_{ab \text{ oc}} = 266,5 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3} * 0,0006124051 \text{ m}^3 = 0,163 \text{ KJ}$$

Mikäli absorboivassa elementissä käytettäisiin siis avoimen solun alumiinivaahtoa, saataisiin vaurioittavan iskun voimasta absorboitua ~ 163 J absorboivan

materiaalin rakenteisiin. Mikäli materiaalina käytetäänkin 6061-T6-alumiinia, saadaan absorboitua 574 J.

Suljetun solun alumiinivaahdolla absorboitava energia

Sijoittamalla suljetun solun alumiinivaahdon arvot kaavaan 28 voidaan todeta suljetun solun alumiinivaahdon 17,8 %:n suhteellisella tiheydellä pystyvän absorboimaan 574 KJ/m³.

$$W_{ab\ cc} = \left(0,495 - 1,8 \left(\frac{17,8}{100}\right)\right) * 3,29\ MPa * 10^3 = 574\ KJ/m^3$$

Suljetun solun alumiinivaahdolla absorboitavissa oleva energia $E_{ab\ cc}$ voidaan laskea käyttämällä myös kaavaa 30, kuten käytettiin avoimen solun alumiinivaahdollekin. Kun suljetun solun alumiinivaahdon arvot lisätään kaavaan saadaan tulokseksi 351,5 J.

$$E_{ab\ cc} = 574 \frac{KJ}{m^3} * 0,0006124051m^3 = 0,3515\ KJ$$

Mikäli absorboivassa elementissä käytettäisiin siis suljetun solun alumiinivaahdtoa, saataisiin vaurioittavan iskun voimasta absorboitua ~ 352 J absorboivan materiaalin rakenteisiin.

Jotta tuloksista saa jotain todellisuuden kuvaa, suunniteltu absorboiva elementti suljetun solun alumiinivaahdolla pystyy absorboimaan 4 m/s liikkuvan 44 kg massaisen kappaleen energian kokonaan, alumiinivaahdon menemättä edes tihtymisvaiheeseen. Tämän voidaan todentaa sijoittamalla arvot kaavaan 31.

$$E_k = \frac{m*v^2}{2}$$

KAAVA 31

E_k = Kappaleen kineettinen energia (J)

Tulokseksi kaavalla 31 saadaan kineettistä energiaa, eli energiaa joka m massaisella kappaleella on liikkeessa nopeudella v .

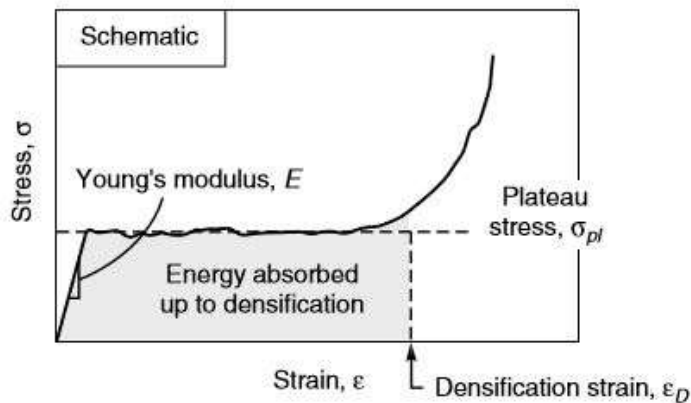
$$E_k = \frac{44\ kg * 4,0^2\ m/s}{2} = 352\ J$$

Kokonaisuutena tuloksia voidaan pitää suuruusluokaltaan oikeina, sillä suljetun solun alumiinivaahdon tulisikin teoriassa absorboida enemmän energiaa, sillä energiaa sen muodonmuutoksessa kuluu solukehikon sauvojen taipumisen lisäksi myös seinämien venymään. Tulokset ovat myöskin linjassa eri valmistajien ilmoittamien energian absorbointikyvyn arvojen kanssa, sekä Idriksen suorittaman tutkimuksen tulosten kanssa, jotka näkyvät kuvassa 21. Myös valmistuksessa käytettävän materiaalin voidaan havaita vaikuttavan merkittävästi energian absorbointikykyyn.

Suoria kaavoja avoimen solun alumiinivaahdon energian absorboinnin laskentaan ei ole saatavilla. Kuitenkin saman kaavan käyttöä molempien alumiinivaahdotyyppien absorboitavan energian laskennassa voidaan pitää perusteltuna. Todennäköisesti suljetun ja avoimen alumiinivaahdon absorboitavan energian suhde pitää paikkaansa.

Mikäli avoimen solun alumiinivaahdon energian absorboinnin laskentaa halutaan jatkotutkimuksissa viedä pidemmälle, tulee A:n ja B:n vakioiden arvot määrittää kokeellisesti tai tutkimalla jo tehtyjä tutkimuksia avoimen solun alumiinivaahdon energian absorbointikäyttäytymisestä ja jättää tässä työssä todetut avoimen solun alumiinivaahdon energian absorboinnin laskennan tulokset viitteellisiksi.

Mikäli jatkotutkimuksissa absorboitavissa oleva energia halutaan laskea, eikä taroitukseen sopivaa kaavaa löydetä, voi absorboitavan energian laskea myös jännitys-venymäkuvaajan pinta-alasta. Tämä voidaan todeta tarkastelemalla kuvaa 22.



KUVA 22. Absorboitavissa olevan energian laskenta jännitys-venymäkuvaajasta (5, s. 45)

Jännitys-venymäkuvaajan pinta-alan mukaan saadaan laskettua absorboitavissa oleva energia. Absorboitavissa oleva energia, eli työ W , saadaan kertomalla kapaleeseen kohdistuva jännitys σ_{pl}^* lysähdyksessä tapahtuvalla suhteellisella venymällä ε , kuten kaavassa 28 ja kuvassa 22 todetaan.

7.3 Absorboidun energian vaikutus iskutapahtumassa

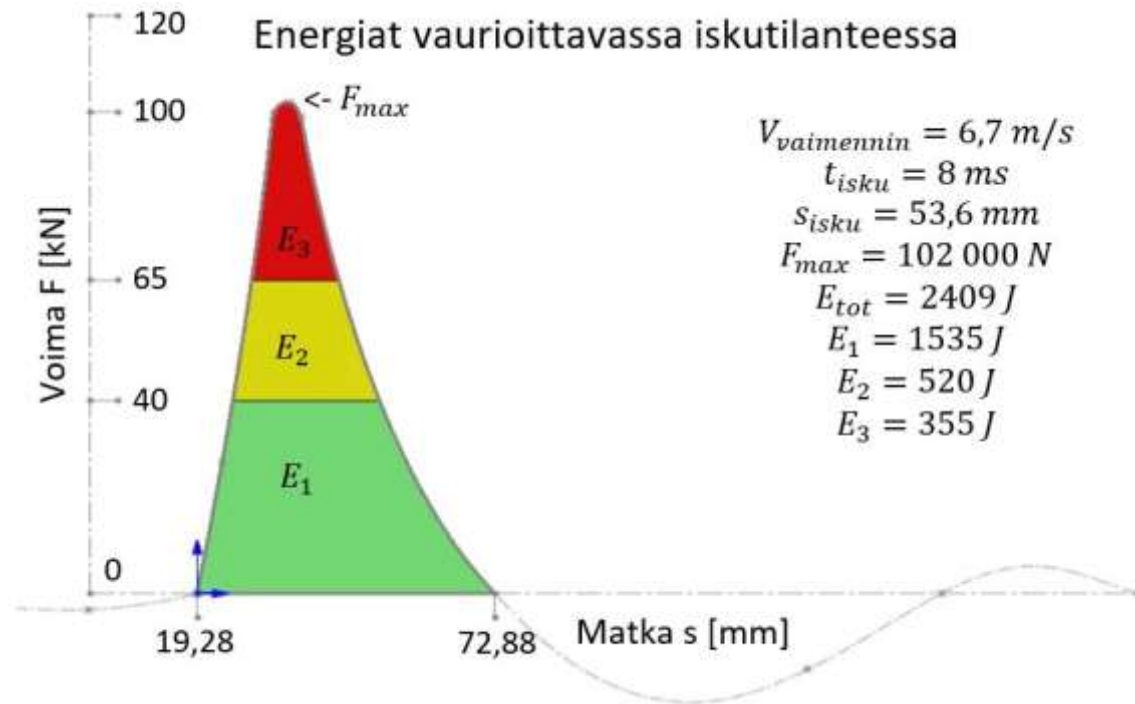
Oletetaan, että absorboivan elementin materiaalina on käytetty suljetun solun alumiinivaahtoa, jolla pystytään absorboimaan aikaisemmin todettu ~ 352 J lysähdyksen 5 - 75 % välillä. Tarkoituksena on, että iskuilanteessa alumiinivaaho absorboi riittävän määrän energiaa, jotta iskutapahtuman huippuvoima ei nouse runkoa vaurioittaviin lukemiin.

Esimerkkitapaus

Esimerkkitapauksessa oletetaan ralliajoneuvon renkaan osuvan tieherätteen, josta heilahduksenvaimentimen männän nopeudeksi muodostuu 6,7 m/s. Vaurioittavan iskun keston oletetaan jatkuvan 8 ms vielä heilahduksenvaimentimen pohjattua.

Soveltamalla nopeuden kaavaa (kaava 16), saadaan liikkeen matkaksi 53,6 mm kertomalla nopeus iskun ajalla. Sijoittamalla nopeuden arvo aikaisemmin käytettyyn kaavaan 18 saadaan laskettua heilahduksenvaimentimen kautta vaikuttava

voima. Lisäämällä voiman arvo kaavaan 19 saadaan laskettua yhdistetty voima, joka on ilman varmuuskerrointa (1,22) ~ 102 kN. Esimerkkitapauksen arvoja voidaan myös tarkastella kuvasta 23.



KUVA 23. Esimerkki vaurioittavasta iskutapahtumasta, jossa heilahduksen-vaimentimen pohjattua läpi-iskevän voiman suuruus on ~ 102 kN

Laskemalla kuvan 23 pinta-alat saadaan laskettua iskutapahtuman energiat eri sektoreissa. Pinta-alojen laskeminen suoritettiin Solidworks-ohjelmalla, jossa mallinnettiin iskutapahtuman kuvaaja kolmiulotteisena kappaleena ja eri pinta-alat analysoitiin "Measure"-työkalulla. Kuvasta 23 voidaan havaita, että 65 kN ylittävällä sektorilla E_3 energia on 355 J. Tämä käytännössä tarkoittaisi sitä, että absorboidun elementin ollessa asennettuna vastaavassa tilanteessa, voima ei nousisi yli 65 kN. Tämä riittäisi elementtiin tehdyn puristuslujuustarkastelun perusteella säilyttämään absorboivan elementin runkorakenteen ehjänä puristuslujuuden varmuuskertoimen ollessa ~ 2,2.

8 AVOIMEN SOLUN ALUMIINIVAHDON 3D-MALLINNUS

Alumiinivaahdon tilaamisen osoittautuessa mahdottomaksi heräsi idea mallintaa avoimen solun alumiinivaahtoa kolmiulotteiseksi malliksi, jonka valmistusta voitaisiin kokeilla DMLS-menetelmällä.

Avoimen solun alumiinivaahtojen rakennetta tutkittiin ja havaittiin tetrakaidecahedron-solun mukailevan rakennetta riittävällä tarkkuudella. Weiare-Phalen solukon todettiin olevan turhan monimutkainen suhteessa saatuihin etuihin tarkemmin jäljittelevästä tila-avaruudellisesta mallista. Tarkoituksena kun ei ollut mallintaa jotain jo olemassa olevaa metallivaahdosolurakennetta lujuustarkastelua varten, vaan suunnitella absorboivaan elementtiin spesifioitu tuotettavissa oleva solurakenne. Lujudellista eroavaisuutta näiden kahden avoimen solun alumiinivaahdon solurakennetta ilmentävien solumallien väliltä ei löytynyt, jolloin päätettiin mallintamaan kolmiulotteinen solurakenne yksinkertaisemman tetrakaidecahedron-solun mukaisesti.

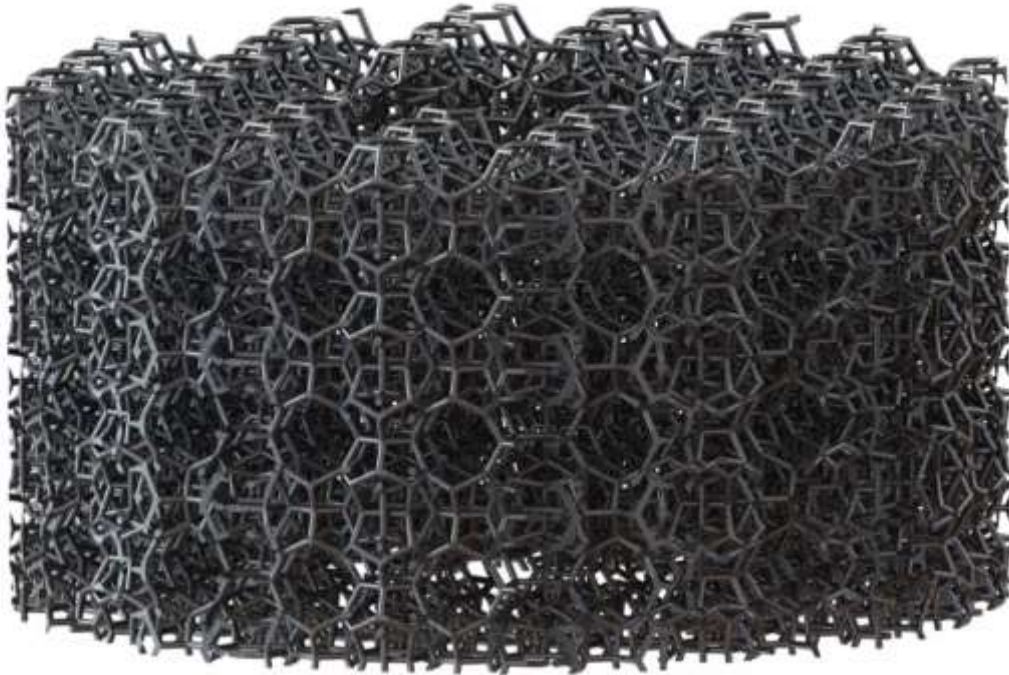
Tetrakaidecahedron-solurakenne mallinnettiin aluksi ns. "wireframe"-mallina, eli kolmiulotteisena viivamallina. Viivamallista malli muutettiin yksinkertaiseksi solidimalliksi. Solidimalli mallinnettiin siten, että solurakenteen sauvakomponenttien vahvuutta voidaan muuttaa, jotta toivottu suhteellinen tiheys saavutetaan absorboivalle materiaalille.

Mallinnettua avoimen solun alumiinivaahdon solurakennetta voidaan tarkastella kuvasta 24, jossa solurakenteessa on kuusi tetrakaidecahedron-solua yhdistettynä toisiinsa.



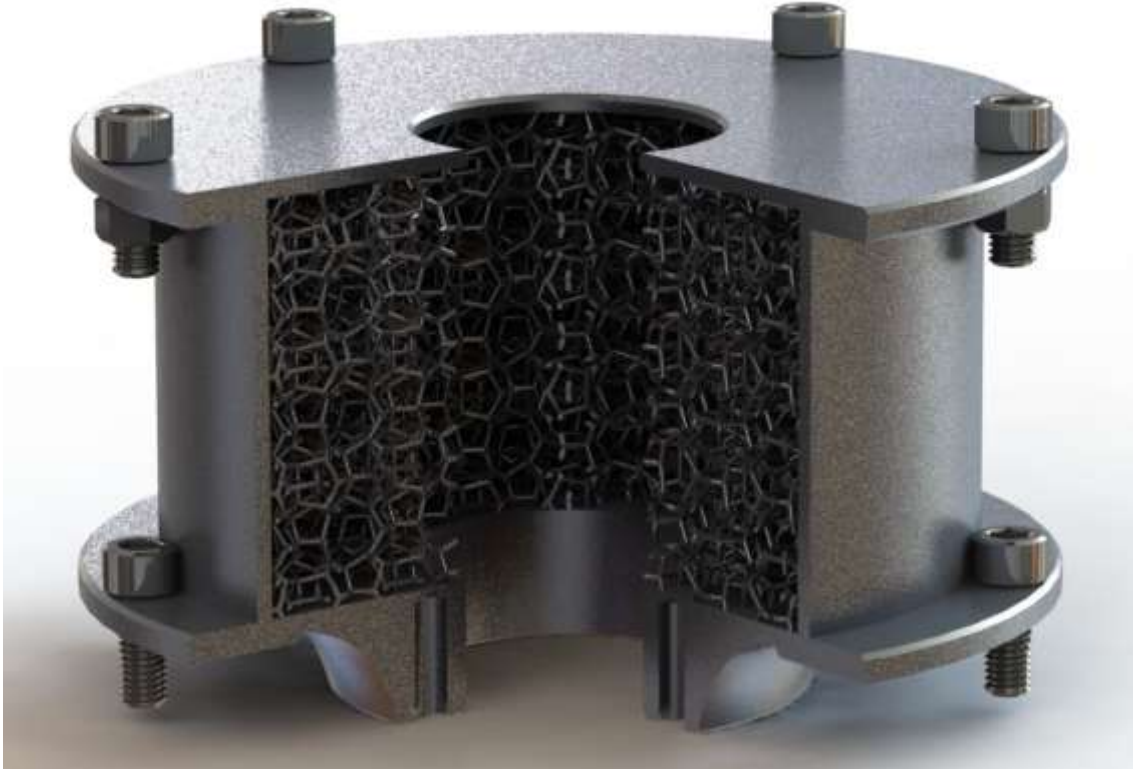
KUVA 24. Solidimalli, jossa kuusi tetrakaidecahedron-solua yhdistettynä toisiinsa

Kuvasta 25 voidaan tarkastella absorboivalle materiaalille määritettyihin mittoihin mallinnettua tetrakaidekahedron-solurakenteista kappaletta.



KUVA 25. Mitoiltaan absorboivan elementin absorboivaksi materiaaliksi spesifisti suunniteltu tetrakaidekahedron-solurakenteinen kappale

Kuvasta 26 voidaan tarkastella valmista absorboivaa elementtiä, jossa tetra-kaidecahedron-solurakenteinen kappale on asennettuna paikoilleen.



KUVA 26. Tetraikaidecahedron-solurakenteinen kappale absorboivassa elementissä paikoillaan

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aiheena oli kilpa-ajoneuvon jousitusjärjestelmän ja rungon välisen absorboivan elementin esisuunnittelu. Lähtökohtana oli tutkia runkoon jousitusjärjestelmän kautta kohdistuvia voimia ja etsiä ratkaisuja vaurioita aiheuttavien voimien eliminoimiseksi. Rallissa kilpa-ajoneuvot vaurioituvat suurien tieherätteidensä aiheuttamien voimien vuoksi heilahduksenvaimentimen yläpään runkokiinnityksen alueelta ja joissain tapauksissa myös konetilan paloseinän juuresta. Kun vaurioituminen tapahtuu suurissa nopeuksissa, voidaan pitää ajoneuvon hallinnan menetystä jopa todennäköisenä.

Idea absorboivasta elementistä kehittyi vuonna 2015, kun olin työryhmässä, joka suunnitteli runkorakennetta NRC-kilpa-autoon. Runkosuunnittelun vaiheessa tutkittiin ralliajoneuvojen yleisimpiä vaurioituvia paikkoja haastattelemalla entisiä ja nykyisiä rallialan toimijoita. Mieleeni painui erään entisen kilpakuljettajan sanat, ettei monessakaan käytetyssä ralliajoneuvossa ole ehyttä tai alkuperäistä heilahduksenvaimentimen yläpään runkokiinnitystä tai sitten runko on ratkennut yläpään runkokiinnityksen ja paloseinän väliltä. Yhden palaverin lopputulemana oli, ettei kilpa-ajoneuvoa voi rakentaa kestäväksi kaikkia tilanteita ja voimia, vaan todennäköisimmin vaurioituviin kohtiin pitää suunnitella mahdollisimman helposti vaihdettavissa oleva halpa sulakkeenomainen komponentti tai elementti.

Kilpailutilanteissa pyritään menestymään mahdollisimman hyvin ja rallissa kestävyys ja tasaisuus ovat ehkä tärkeimmät mestaruuksiin johtavat tekijät. Kilpailuissa keskeyttäminen hyviltä sijoituksilta maksaa kilpaileville rahaa ja aikaa, erityisesti, jos ajoneuvon hallinta menetetään epäsuotuisassa tilanteessa ja ajoneuvo vaurioituu muutoinkin sen seurauksena. Pahimmassa tapauksessa kilpaajoneuvon voi joutua uusimaan kokonaan, minkä jälkeen on valtava työ saada suorituskyky ja säädöt entiselle tasolle.

Etua absorboivan elementin käytöstä on myös muutoin. Kilpa-ajoneuvon alustan kestävyyttä ei tarvitse enää ottaa huomioon samalla tavalla heilahduksenvaimentimia säädettäessä. Kilpa-ajoneuvo voidaan säätää optimaalisille säädöille huolehtimatta mahdollisista pohjaustilanteista ja vaurion tapahtuessa ajoneuvo

saadaan ajettua kilpailutilanteen loppuun, jonka jälkeen absorboiva materiaali voidaan vaihtaa ehjään. Absorboivalla elementillä saavutetaan siis lisää kilpailukykyä kestävyden ja rahallisen säästämisen lisäksi.

Absorboivan materiaalin valinnassa päädyttiin tässä työssä alumiinivaahtoon. Kokemuksia alumiinivaahdon käytöstä monimutkaisissa energian absorbointielementeissä on niukalti maailmalla eikä Suomessa lainkaan. Yleisimmin alumiinivaahdon energian absorbointikykyä käytetään yksinkertaisemmissa sovellutuksissa, kuten ajoneuvojen keula- ja sivutörmäyssuojina. Materiaaliin syventäviä tutkimuksia julkaistiin vasta 1990-luvulla, ja 2000-luvulla tutkimukset ovat edenneet myös varsinaisiin sovellutuksiin.

Kuitenkin monilta osin alumiinivaahdon laskenta ja valmistusmenetelmät ovat vielä kehitysvaiheessa. Toivottavasti tämä opinnäytetyö toimii myös peruskatsauksena suomenkielisessä alumiinivaahdojen tutkimuksessa, jonka pohjalta voidaan syventää ja laajentaa tutkimusta alumiinivaahdoihin. Esimerkiksi raskasteollisuudesta löytyy varmasti alumiinivaahdoille paljon käyttökohteita, jotka jäävät vielä toteuttamatta materiaalin tuntemattomuuden vuoksi. Myös suomalaisilla korkeakouluilla olisi mahdollisuuksia viedä jo tutkittua teoriaa alumiinivaahdoista eteenpäin esimerkiksi teräsvaahdojen puolelle yhteistyössä suomalaisten terästehtaiden ja raskasteollisuuden toimijoiden kanssa.

Alumiinivaahdon tilaaminen ulkomailta osoittautui haasteellisemmaksi kuin olisi osannut odottaa. Moni valmistaja ei edes vastannut yksityishenkilön lähettämiin yhteydenottopyyntöihin, ja suurin osa vastanneista ei pystynyt valmistamaan materiaalia toivotuilla materiaalivahvuuksilla. Lopulta Havel Metal Foam GmbH:n tehtaalta löytyi vaihtoehdoksi soveltuvaa materiaalia, jota tilattiin. Kuitenkin kävi ilmi, että yritykseltä puuttui materiaalivahvuuteen tarvittavaa raaka-ainetta, minkä vuoksi tilaus jouduttiin peruuttamaan. Tämä oli harmillista, sillä yhdeksi mahdollisuudeksi todettiin testata materiaalista puristuskoestamalla useita eri koekappaleita, joiden perusteella elementin absorboivan materiaalin halkaisija olisi voitu määrittää, jotta tasaantumisjännitys vastaisi teoreettisesti laskettua tarvetta. Myös puristuskoestamalla olisi saatu määritettyä kaavoihin vakioarvot kohdalleen, jolloin laskenta olisi todennetusti kohdannut todellisen tilanteen kanssa.

Opinnäytetyötä voidaan pitää onnistuneena ja laskennallisesti tuotettuja arvoja perusteltuina. Harmillista on, että prototyypin valmistuksesta tuli mahdotonta opinnäytetyöhön riippumattomista tekijöistä. Kuitenkin työn teoriapohjaa voidaan pitää jatkokehitystä hyvin tukevana.

Jatkokehityksessä tulisi pyrkiä hankkimaan materiaalia, esimerkiksi molempia avoimen ja suljetun solun alumiinivaahoja, ja puristuskoestaa niistä leikattuja koekappaleita. Kun laskenta saadaan kohtaamaan todelliset mitatut arvot, voidaan absorboiva elementti valmistaa ja siirtyä testausvaiheeseen. Myös alumiinivaahdon valmistus DMLS-menetelmällä alumiinijauheesta olisi mielenkiintoinen jatkokehityksen tutkimuskohde.

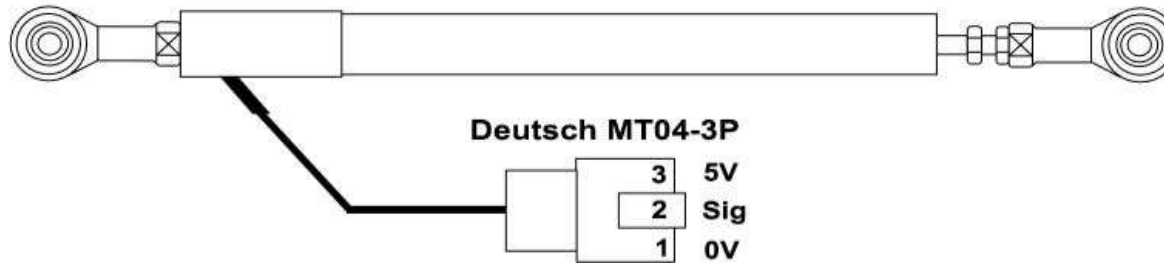
LÄHTEET

1. Salmi, Tapio 2006. Teknillisen mekaniikan perusteet. Tampere: Pressus Oy.
2. Haataja, Mauri 2016. T331206 Autotekniikka 2 6 op. Kurssimateriaali. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
3. Automotive handbook 8th edition. 2014. Robert Bosch GmbH. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.
4. Duocel® Foam Energy Absorption. 2018. ERG Aerospace corp. Saatavissa: <http://ergaerospace.com/technical-data/duocel-foam-energy-absorption/>. Hakupäivä 11.10.2018.
5. Ashby, M.F. – Evans, A.G. – Fleck, N.A. – Gibson, L.J. – Hutchinson J.W. – Wadley, H.N.G. 2000. Metal Foams: A Design Guide. Woburn, MA, USA: Butterworth-Heinemann.
6. Kilian, Enrico 2018. Tekninen myyjä, Havel Metal Foams GmbH. Sähköpostikeskustelu. Kevät 2018.
7. Why is Duocel® aluminum foam so special? 2018. ERG Aerospace Corp. Saatavissa: <https://ergaerospace.com/materials/duocel-aluminum-foam/>. Hakupäivä 3.12.2018.
8. Chou, Kan-Sen – Song, Ming-An 2002. A novel method for making open-cell aluminum foams with soft ceramic balls. Scripta Materialia 46 S. 379–382.
9. Gibson L.J. 2000. Mechanical Behaviour of Metallic Foams. Cambridge, massachusetts: Massachusetts Institute of Technology 2000.
10. Claar, T.D. - Vu, C.J. Fraunhofer USA Center. Hall, I. University of Delaware. Banhart, J. - Baumeister, J. Fraunhofer Institute for Applied Materials

Research. Seeliger, W. Karmann GmbH. Ultra-lightweight Aluminum Foam Materials for Automotive Applications. Society of Automotive Engineers Inc 2000.

11. Kadoi, Kota - Babcsan, Norbert - Nakae, Hideo - García-Moreno, Francisco - Banhart, John 2008. Methodology for the in situ observation of Alporas foams using X ray radioscopy. MetFoam 2007 - Proceedings of the 5th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams. Saatavissa: <https://books.google.fi/books?id=yeUM3eEF4jMC&lpg=PA111&ots=iRUswSznFK&dq=Methodology%20for%20the%20In-situ%20Observation%20of%20Alporas%20Foams%20Using%20X-ray%20Radioscopy&hl=fi&pg=PA111#v=twopage&q&f=false>. Hakupäivä: 16.10.2018.
12. Idris, M.I. – Vodenitcharova, T. – Hoffman, M. 2009. Mechanical behaviour and energy absorption of closed-cell aluminium foam panels in uniaxial compression. Materials Science & Engineering A 517, S. 37-45.
13. Tetrakaidekahedron (Kelvin Cell). Oppimateriaali. Soft Matter. Harvard Education program 2018. Saatavissa: [http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Tetrakaidekahedron_\(Kelvin_Cell\)](http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Tetrakaidekahedron_(Kelvin_Cell)). Hakupäivä: 11.10.2018.
14. Plateau's laws. Oppimateriaali. Soft Matter. Harvard Education program 2018. Saatavissa: http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Plateau%27s_laws. Hakupäivä 11.10.2018.
15. Weaire, D. – Phelan, R. 1994. A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. Philosophical Magazine Letters 69:2, S. 107-110.
16. Gaitanaros, S. – Kyriakides, S. 2014. International Journal of Solids and Structures 51 2014. Dynamic crushing of aluminium foams: Part II – Analysis.

17. Tan, P.J. - Reid, S.R. – Harrigan, J.J. – Zou, Z. – Li, S. 2005. Journal of Mechanics and Physics of Solids 53. Dynamic compressive strength properties of aluminium foams. Part I-experimental data and observations.
18. Idris, M.I. – Vodenitcharova, T. – Hoffman, M. 2009. Mechanical behaviour and energy absorption of closed-cell aluminium foam panels in uniaxial compression. Materials Science & Engineering A 517, S. 37-45.
19. Alusta ja iskunvaimennus -mitä, miksi ja mitä sitten? M-Pro Racing AST-Suomi 2018. Saatavissa: <https://docplayer.fi/11562918-Miksi-alusta-ja-iskunvaimennus-mita-miksi-ja-mita-sitten-m-pro-racing-ast-suomi-copyright.html>. Hakupäivä 30.10.2018.
20. Ilomäki, Janne 2017. Autotekniikan lehtori, OAMK Oy. Opinnäytetyöstä käyty keskustelut 14.10.2018.
21. Räikkönen, Eero 2018. Printsport Oy. Asiantuntijalausunto, Sähköpostikeskustelu. 5.11.2018.



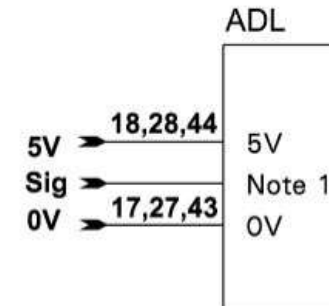
ADL Setup (to measure distance)

Channel Assignments
Assign a distance channel ie: Brake Pedal position

Sensor Calibration

1. In Calibration, select change.
2. Select Ratiometric(5V).
3. In calibration table enter the distance the pedal has moved and press "Read Value". You will end up with a table like the example.

V	mm
1.23	0
1.99	5
2.34	10
2.89	15
3.04	20



Note 1
Analog Voltage (Pins 1,2,3,4,5,19,20,21,22,23,24,25,26,45,46,47,48,49,50) or Analog Temp (Pins 34,35,36,37,38,39,41,42) input may be used.