

LAPPEENRANNAN TEKNILINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

HAKEPERÄVAUNUN TAKAOSAN AERODYNAMIIKAN KEHITTÄMINEN

IMPROVING THE AERODYNAMICS OF A CHIP-TRAILER'S TAIL

Lappeenranta 4.5.2015

Ossi Aaltonen

Työn tarkastajat

TkT Kimmo Kerkkänen

TkT Mika Lohtander

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	5
1.1	Työn taustat ja tavoitteet.....	5
1.2	Työn rajaus	6
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	6
2	KIRJALLISUUSKATSAUS	7
2.1	Aerodynaamisten lisäosien lainsäädäntö kuorma-autoissa.....	7
2.2	Raskaan ajoneuvon aerodynamiikka	8
2.2.1	Aerodynamiikan perusteet ajoneuvoihin liittyen	8
2.2.2	Ilmanvastusvoima ajoneuvon aerodynamiikassa.....	8
2.2.3	Sivutuulen huomioiminen ajoneuvon aerodynamiikassa	10
2.3	Ilmanvastuksen vaikutus raskaiden ajoneuvojen polttoaineen kulutukseen.....	13
2.4	Yleiset aerodynamiikan tutkimuskohteet kuorma-autoissa	13
2.5	Tutkitut ratkaisut perävaunun perän ilmanvastuksen pienentämiseksi.....	14
2.5.1	Ilmanvastuksen pienentäminen passiivisesti	15
2.5.2	Ilmanvastuksen pienentäminen aktiivisesti	20
2.6	Aerodynaamisten ratkaisujen vaikutus raskaan ajoneuvon ajettavuuteen.....	22
3	HAKEPERÄVAUNUN PERÄN AERODYNAMIIKAN KEHITTÄMINEN	23
3.1	Kirjallisuuden ratkaisut hakeperävaunussa.....	23
3.1.1	Vino boat-tail	23
3.1.2	Sisennetty boat-tail	24
3.1.3	Perän suorat levyt.....	24
3.1.4	Ilmatäytteinen umpinainen boat-tail	24
3.1.5	Ilmatäytteinen avonainen boat-tail.....	25

3.1.6	Aktiivinen virtauksen hallinta.....	25
3.2	Uudet mahdollisuudet	25
4	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	28
4.1	Toimivuus ja tehokkuus.....	28
4.2	Ratkaisujen taloudellisuus	29
4.3	Käytettävyys	30
4.4	Turvallisuus	30
4.5	Lainsäädännön huomioiminen.....	31
4.6	Jatkokehitys	31
5	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	34
	LIITE	

LIITE I: Perän ilmanvastuksen pienentämisen keinoja.

SYMBOLILUETTELO

A	Otsapinta-ala [m ²]
A_b	Perävaunun peräosan pinta-ala [m ²]
c_D	Ilmanvastuskerroin
D	Ilmanvastusvoima [N]
P_D	Ilmanvastusteho [kW]
V, V_T	Ajonopeus [m/s]
V_R	Suhteellinen ilmavirtaus [m/s]
v	Tuulen nopeus [m/s]
x	Pituus [m]
ρ	Ilman tiheys [kg/m ³]
φ	Tuulen suuntakulma [°]
ψ	Liukukulma [°]

1 JOHDANTO

Raskaan kaluston tämän hetkinen muotoilu aerodynamiikan osalta on hyvin puutteellinen nykyisten lainsäädösten vuoksi. Lait säätelevät kuorma-autojen kokonaismitat, minkä vuoksi perävaunut ovat hyvin kulmikkaita ja niiden ilmanvastus on suuri. Kuljetusyhtiöt vaativat mahdollisimman suurta kuljetuskapasiteettia, mikä johtaa epäsuotuisiin aerodynaamisiin muotoiluihin. Vaikka tekniikka on kehittynyt, ei kuorma-autojen aerodynaaminen muotoilu ole parantunut merkittävästi. (Kytö, Erkkilä & Nylund, 2009, s. 46.)

1.1 Työn taustat ja tavoitteet

Kuorma-autojen suuria päästöjä pyritään pienentämään vähentämällä polttoaineenkulutusta. Tähän pyrkii EU-direktiivin 96/53/EY muutos, jonka odotetaan astuvan voimaan vuonna 2017 (Puurunen, 2015a). Tässä direktiivissä sallittaisiin aerodynamiikkaa parantavien osien sijoittaminen perävaunun takaosaan, jolloin ne saisivat ylittää kuljetuksen maksimimitan. Kyseessä oleva direktiivi on vasta luonnosvaiheessa kandidaatintyön kirjoitushetkellä. (ICCT, 2013.)

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi on teettänyt Helsingin yliopistolla tutkimuksen, Raskaan liikenteen sisällyttäminen päästöoikeuskauppaan, jossa tavoitellaan tieliikenteen kasvavien CO₂-päästöjen rajoittamista. Tutkimuksen perusteella on odotettavissa, että raskas liikenne liitetään tulevaisuudessa päästökauppaan, mikä tulee aiheuttamaan kustannuksia kuljetusyrityksille. Näin ollen perävaunuvalmistajat voivat aikaansaada merkittäviä säästöjä yrittäjille kehittämällä aerodynaamisempia ratkaisuja. (Antturi, Puroila & Ollikainen, 2015.)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia ratkaisuja hakeperävaunun aerodynamiikan parantamiseksi. Tutkimusongelmana on perävaunun aerodynaamisen vastuksen pienentäminen polttoaineenkulutuksen laskemiseksi. Tutkimuksessa tulee huomioida Suomen olosuhteet ja hakeperävaunun käyttöalueet sekä nykyiset konstruktiot. Miten kehittää nykyisten hakeperävaunurakenteiden aerodynamiikkaa siihen asennettavien lisäosien avulla?

1.2 Työn rajaus

Kirjallisuuskatsauksessa tutkitaan yleisiä perävaunun peräosaan kehitettyjä ratkaisuja. Työn lopulliset tulokset keskittyvät ainoastaan hakkeen kuljetukseen tarkoitettuun täysperävaunun takaosaan. Takaosa määriteltiin alkamaan perävaunun takaseinästä taaksepäin. Ratkaisun pitää olla valmistettavissa nykyiseen perävaunun rakenteeseen mahdollisimman pienillä muutoksilla siten, ettei perävaunun käyttö vaikeudu. Lisäksi ratkaisun lisäämä massa ei saa ylittää 300 kiloa.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Työssä suoritettiin kirjallisuuskatsaus, jossa keskityttiin jo olemassa oleviin ratkaisuihin aerodynamiikan osalta. Aineistoa etsittiin sekä suomeksi että englanniksi käyttäen apuna Scopus-hakua sekä Google Scholar-hakua. Haku toteutettiin käyttämällä hakusanoja tutkimusongelmasta. Lähteet rajattiin niiden tieteellisyyden perusteella ja määritettiin, ettei ennen vuotta 2000 julkaistuja artikkeleja huomioida tässä tutkimuksessa. Kuitenkin vanhempia aerodynamiikan perusteoksia, joiden sisältö ei ole muuttunut, sisällytettiin lähteisiin. Suomenkieliset lähteet olivat pääosin VTT:n (Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy) tekemiä tutkimuksia sekä niiden lähteitä. Lainsäädäntöä tutkittaessa tukeuduttiin Liikenteen turvallisuusvirasto Trafiin.

Lähteiden pohjalta tutkittiin eri vaihtoehtojen tehokkuutta sekä toimivuutta Suomen olosuhteissa. Kirjallisuuden avulla ideoitiin uusia ratkaisumahdollisuuksia. Luonnostellun ratkaisun toimivuutta ja tehokkuutta arvioitiin kirjallisuuslähteiden avulla.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Kirjallisuuskatsauksessa käytetty lähdemateriaali etsittiin luvussa 1.3 kuvatulla tavalla. Tämän materiaalin tärkeimmät suuntaviivat saatiin VTT:n tutkimuksista sekä raskaan kaluston aerodynamiikasta kertovista laajemmista teoksista. Tietoutta laajennettiin yksityiskohtaisimmilla tutkimusraporteilla. Katsauksen alussa perehdyttiin ajoneuvoja rajoittaviin lakeihin ja tulevaan EU-direktiiviin. Tämän jälkeen keskityttiin ajoneuvojen aerodynamiikkaan. Vierintävastus, moottorinhäviöt ja muut vastukset jätettiin katsauksessa tutkimatta, sillä työn tarkoituksena on kehittää vain perävaunun aerodynamiikkaa.

2.1 Aerodynaamisten lisäosien lainsäädäntö kuorma-autoissa

N₃ luokan ajoneuvo on suunniteltu tavaroiden kuljettamista varten ja sen suurin massa on yli 12 tonnia (Parlamentin ja neuvoston direktiivi 2007/46/EY). N₃-luokkien ajoneuvojen suurin sallittu korkeus on 4,0 m ja leveys 2,55 m. Kuitenkin, jos ajoneuvon kori on lämpöeristetty siten, että seinämän paksuus on vähintään 45 mm, on suurin sallittu leveys 2,60 m. Lisäksi ilmanvastuksen pienentämiseen tarkoitettujen sisään vedettävien laitteiden sallitaan ylittää ajoneuvon suurin pituus takana enintään 500 mm ja sivuilla enintään 50 mm. Sivun ylitys on sallittu kuitenkin siten, että maksimi leveys on 2,65 m. Nämä laitteet eivät saa lisätä kuormattavuutta eivätkä ne saa ylittää pituutta tai leveyttä, kun ne ovat sisäänvedettynä. (1230/2012) Takaosan siivekkeet eivät ole EU:n alueella yleistyneet, sillä toistaiseksi ne eivät kokoontaitettuna saa lisätä määriteltyä kokonaispituutta. Tämän vuoksi niiden vaatima tila vähentäisi kuormaustilavuutta.

Tämän työn kirjoitushetkellä EU:n neuvoston direktiiviin 96/53/EY suunnitellaan muutosta, joka saisi aikaan peräilmanohjaimien yleistymisen. Parlamentti on hyväksynyt muutoksen 10.3.2015 ja se odottaa hyväksyntää neuvostolta. Tässä muutoksessa siivekkeet saisivat sisäänvedettynä ylittää maksimi pituuden 200 mm:llä. Kun ajoneuvolla ajetaan alueella, jossa nopeusrajoitus on 50 km/h tai sitä vähemmän, täytyy ko. aerodynaamiset lisäosat poistaa tai taittaa kokoon. Lisäksi tämä täytyy toteuttaa, jos niistä on vaaraa muille tienkäyttäjille tai kuljettajalle. (Puurunen, 2015a; Euroopan parlamentti, 2015.) Kun direktiivi julkaistaan, se täytyy implementoida, eli panna täytäntöön, kansalliseen lainsäädäntöön. On arvioitu, että direktiivi julkaistaan keväällä 2015, mutta implementointi

Suomen lainsäädäntöön tapahtuisi joskus seuraavien kahden vuoden kuluessa. (Puurunen, 2015b.)

Jos perään liitettävät lisäosat ovat alle 500 mm pitkiä, ne eivät vaadi omaa tyyppihyväksyntää, sillä ne kuuluvat jo direktiivin 2007/46/EY sisältöön. Jos ko. osat ylittävät 500 mm pituuden ne vaativat oman tyyppihyväksynnän, jonka säännöksiä ei ole vielä tehty. Tyyppihyväksynnässä tullaan määrittelemään turvallinen kiinnitys ajoneuvoon ja muiden tienkäyttäjien turvallisuuteen vaikuttavat asiat liittyen perän osien muotoon ja peräänajon riskiin. (Euroopan parlamentti, 2015.) Tällaisissa tyyppihyväksyntäsäädöksissä menee yleensä useita vuosia (Puurunen, 2015b).

2.2 Raskaan ajoneuvon aerodynamiikka

Raskaiden ajoneuvojen aerodynaamiset ominaisuudet määritellään, kuten henkilöautojenkin vastaavat ominaisuudet. Raskaiden ajoneuvojen suuri koko ja massa sekä hyvin huono virtaviivaisuus kasvattavat vastustavia voimia. Aerodynamiikka on virtausmekaniikan osa-alue, joten se pohjimmiltaan perustuu virtausmekaniikan kaavoihin. Käytännössä nopeampi ilmanvirtaus aiheuttaa alemman paineen, mikä aiheuttaa vetoa alemman paineen suuntaan. (Nyholm, 2006, s.9-16.)

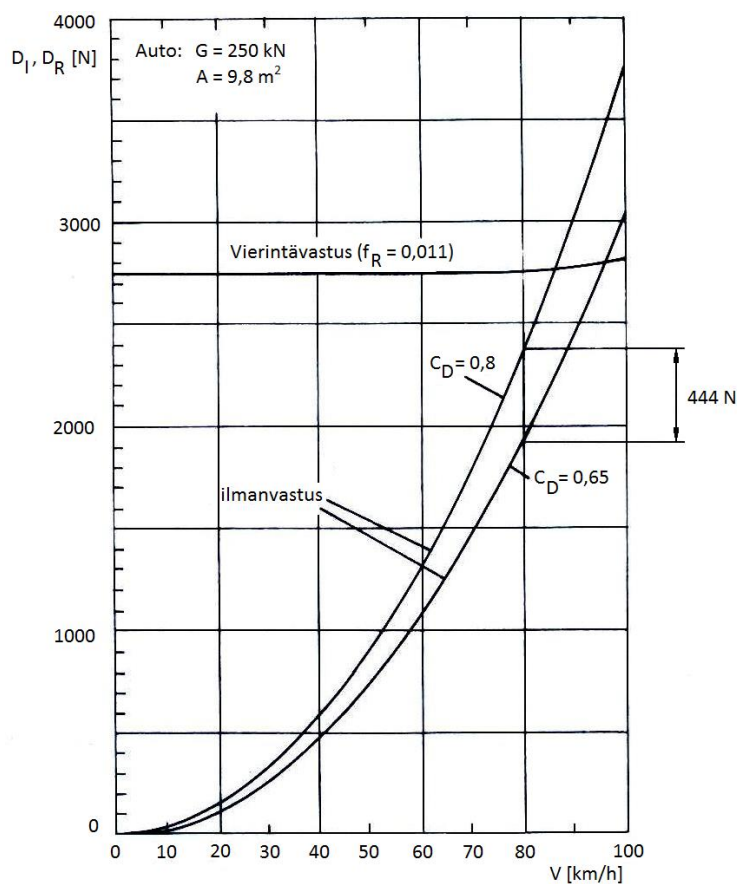
2.2.1 Aerodynamiikan perusteet ajoneuvoihin liittyen

Ajoneuvot kohtaavat liikkuessaan useita vastustavia voimia. Ilmanvastus on yksi näistä ja se johtuu aerodynaamisesta vastustavasta voimasta. Liikkuessaan ajoneuvo aiheuttaa ilmapirran paikallaan olevassa ilmamassassa. Ilmavirta osuu ensin keulaan, josta se ohjautuu ajoneuvon katolle, kyljille sekä alapuolelle. Ilmanvastus aiheutuu pääosin paine-eroista mutta osin myös ilman ja siihen osuvan pinnan kitkasta. Ilmanvastusta kuvattaessa tärkeä arvo on ilmanvastuskerroin c_D , joka raskailla ajoneuvoilla on noin 0,65–0,9. (Englar, 2001, s.1; Nyholm, 2006, s.14.)

2.2.2 Ilmanvastusvoima ajoneuvon aerodynamiikassa

Ajoneuvo pyrkii pitämään liiketilansa, jolloin sitä vastustaa ilmanvastusvoima, vierintävastus ja muut pienemmät vastukset, kuten laakerien kitka. Ilmanvastus kasvaa merkittävimmäksi vastustavaksi voimaksi korkeissa nopeuksissa. Kuorma-autoilla tämä tapahtuu 80–100 km/h vauhdissa, riippuen ajoneuvon ilmanvastuskertoimesta, c_D . Kuvassa

1 näkyy vierintävastuksen sekä ilmanvastuksen suhde eri ilmanvastuskertoimien arvoilla. (Hucho, 1998, s. 416–417; Nyholm, 2006, s. 14–15).



Kuva 1. Kuorma-auton vierintävastuksen ja ilmanvastuksen suhde nopeuden funktiona (mukaiillen Nyholm, 2006, s.15).

Ilmanvastusvoima, D lasketaan seuraavasti (Hucho, 1998, s. 3):

$$D = \frac{\rho}{2} * c_D * A * V^2 \quad (1)$$

Yhtälössä ρ on ympäristössä vallitseva ilman tiheys, A on ajoneuvon otsapinta-ala ja V on ajoneuvon liikenopeus. Kuten edellä olevasta yhtälöstäkin voidaan havaita, nopeudella on suuri vaikutus, sillä D kasvaa suhteessa nopeuden toiseen potenssiin. Ajoneuvolta ilmanvastuksen vuoksi vaadittava lisääntyvä teho, P_D lasketaan seuraavasti (Hucho, 1998, s. 502):

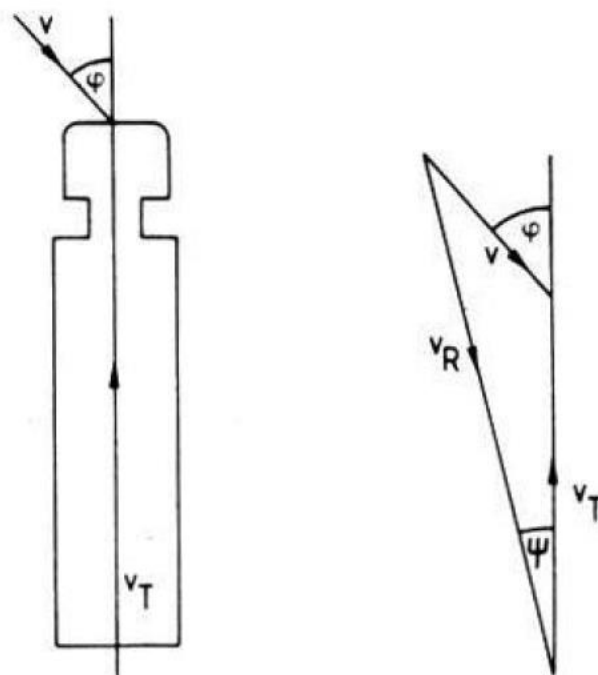
$$P_D = \frac{\rho}{2} * V^3 * c_D * A \quad (2)$$

Tästä yhtälöstä havaitaan, että vaadittava teho nousee kolmanteen potenssiin suhteessa nopeuteen. Edeltävien yhtälöiden avulla voidaan havaita, että pienennyksiä pitää tehdä otsapinta-alaan tai ilmanvastuskertoimeen, koska ympäröivälle ilmantiheydelle tai ajonopeudelle ei niitä voida tehdä. (Hucho, 1998, s. 3; Englar, 2001, s. 2.)

Kuorma-autossa ilmanvastusvoima jakautuu tasaisesti koko ajoneuvon matkalle. Ajoneuvon etuosan ilmanvastus on kokonaisvastuksesta 25 %, kun vetoauton ja perävaunun välissä olevan raon ilmanvastus on 20 %. Perävaunun peräosa aiheuttaa 25 % ja yhdistelmän alla kulkeva ilmavirta loput 30 % kokonaisilmanvastuksesta. (Choi, Lee & Park, 2014, s. 453–459.)

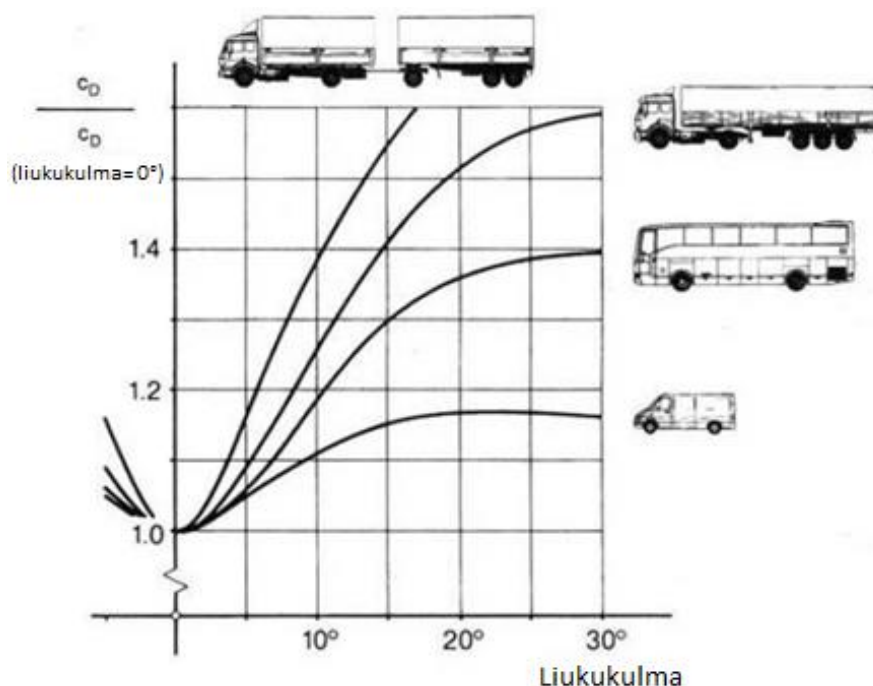
2.2.3 Sivutuulen huomioiminen ajoneuvon aerodynamiikassa

Koska ajoneuvot liikkuvat ulkona, vaikuttaa sen ilmanvastukseen tuulen voimakkuus ja sen suunta. Luonnossa esiintyvää tuulta on hyvin vaikea käsitellä, sillä sen suunta ja voimakkuus vaihtelee jatkuvasti. Tutkimuksia varten tilannetta yksinkertaistetaan, jotta laskenta olisi helpompi suorittaa. Tuulen ja ajoneuvon liikkeen aiheuttamaa virtausta kuvaamaan selvitetään liukukulma, ψ . Tämä muodostetaan kuvan 2 mukaisesti, hyödyntämällä tuulen kulmaa, φ . Kuvassa v on tuulen nopeus, V_T ajoneuvon liikenopeus ja V_R suhteellinen ilmavirtaus. (Hucho, 1998, s. 424; Nyholm, 2006, s.16–17.)



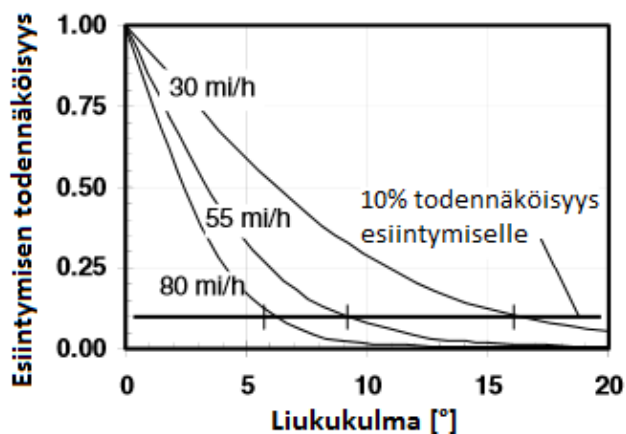
Kuva 2. Liukukulma vektorien avulla esitettyinä (Hucho, 1998, s. 424).

Ajoneuvon otsapinta-ala määrittyy siis liukukulman mukaan, jolloin se vaikuttaa ilmanvastusvoimaan merkittävästi, mikä nähdään yhtälöstä 1. Otsapinnalla tarkoitetaan ajoneuvon poikkipinta-alaa, joka on kohtisuorassa ilmavirtaa vasten. Sivutuuli vaikeuttaa ajoneuvon ohjausta ja se voi lisätä ilmanvastusvoimaa. (Nyholm, 2006, s.17–18.) Kuorma-autojen otsapinta-ala kasvaa liukukulman kasvaessa paljon ja siksi liukukulman muutos on suurilla ajoneuvoilla merkittävämpi asia kuin esim. henkilöautoilla. Kuvassa 3 näkyy erilaisien ajoneuvotyyppien ilmanvastuskertoimen muutos liukukulman muuttuessa. Kuvan käyrät kertovat ilmanvastuskertoimen suhteellisen muutoksen, joten kertoimen arvot eivät ole tarkkoja arvoja. (Hucho, 1998, s. 422.)



Kuva 3. Ilmanvastuskertoimien suhde liukukulmaan (Yaw angle) eri ajoneuvotyypeillä (mukaillen Hucho, 1998, s. 422).

On hyödyllistä tietää, minkälaisia liukukulmia luonnossa esiintyy, jotta voidaan saavuttaa parempia tuloksia ilmanvastuksen pienentämisessä. Eri liukukulmien esiintymisen todennäköisyys riippuu ajonopeudesta. Kuvassa 4 on esitetty liukukulmien todennäköinen jakauma eri ajonopeuksilla. Kuvassa vaaka-akselilla näkyy liukukulma asteina ja pystyakselilla näiden esiintymisen todennäköisyys. Käyrät ovat kolmella eri nopeudella; 30 mi/h (n. 48 km/h), 55 mi/h (n. 89 km/h) ja 80 mi/h (n. 129 km/h). (Cooper, 2003, s. 10–11).



Kuva 4. Liukukulmien esiintymisen todennäköisyys eri ajonopeuksilla (mukaillen Cooper, 2003, s. 11).

2.3 Ilmanvastuksen vaikutus raskaiden ajoneuvojen polttoaineen kulutukseen

Ilmanvastusvoiman pienentäminen raskaiden ajoneuvojen polttoaineenkulutuksen vähentämiseksi on hyvin tärkeää. Kuorma-auton ajaessa 105 km/h ja sen painaessa 35 tonnia, aiheuttaisi 20 % ilmanvastuksen pienennys 4 % vähennyksen polttoaineenkulutuksessa. Tällä nopeudella polttoaineen kulutus jakautuu seuraavasti (Choi, Lee & Park, 2014, s. 442):

- Moottorin hukkatehoon 60 %
- Ilmanvastus 21 %
- Vierintävastus 13 %
- Muut häviöt 6 %.

Kuten edellisestä huomataan, olisi moottorin hyötysuhteen parantamisen jälkeen suurin parannuksen kohde aerodynamiikassa. (Choi, Lee & Park, 2014, s. 442.)

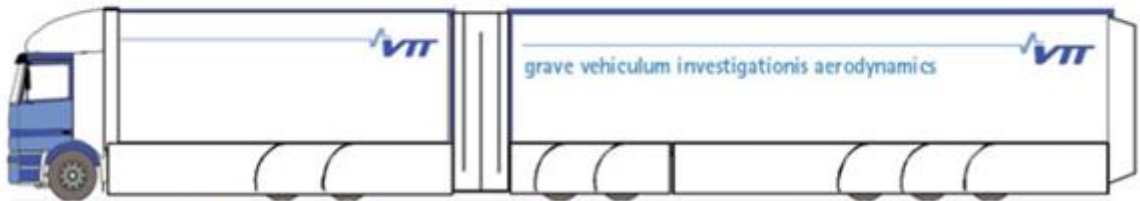
Jos ilmanvastuskerrointa kyettäisiin vähentämään, pienentäisi se aiheutuvaa ilmanvastusvoimaa, minkä vuoksi polttoaineen kulutus vähenisi. Tämä aiheuttaisi suuria säästöjä kuljetusyrittäjille. EU:n arvioiden mukaan 100 000 km vuodessa ajavan kuorma-auton polttoainekustannukset pienenisivät 5000 euroa ehdotetuilla aerodynamiikan parannuksilla (ICCT, 2013). Jos ajoneuvoyhdistelmään asennetaan nykyisin tarjolla olevia aerodynamiikkaosasarjoja, ovat mahdolliset säästöt polttoaineenkulutuksessa pitkän matkan ajossa n. 1,5–6,5 %. (Mohamed-Kassim & Filippone, 2010, s. 278–283.)

2.4 Yleiset aerodynamiikan tutkimuskohteet kuorma-autoissa

Kuorma-autojen aerodynamiikkaa on tutkittu jo pitkään, mutta vasta öljyn kallistuttua ja ilmastomuutoksen tietoisuuden lisääntyessä, ovat valmistajat ja kuljetusyrietykset kiinnostuneet ilmanvastuksen huomattavasta pienentämisestä. Yleisimmät tutkimuskohteet ovat olleet vetoauton muotoilu ja siihen kiinnitettävät tuuliohjaimet, vetoauton ja perävaunun välin kehittäminen, perävaunun etuseinän muotoilu ja sivuhelmat sekä perän muotoilu tai siihen kiinnitettävät lisäosat. Perän muotoiluun kuuluu erilaisia ohjaavia levyjä, joista monia kutsutaan ns. boat-tail-periksi. Perinteisen boat-tail-perän reunat kapenevat kohti takaosan keskipistettä. (Cooper, 2003, s.9-10; Hucho, 1998, s. 164.) Kuva 5 havainnollistaa VTT:n tutkimia lisäosia aerodynamiikan parantamiseksi. Nykyään nämä kohteet ovat tärkeimpiä tutkimuksien alueita. (Laurikko et. al., 2012, s. 60–61.)



Kuorma-auto ja perävaunu lähtötilanteessa



Aerodynaamiset parannusosat asennettuna

Kuva 5. Mahdolliset aerodynaamikkaosat tavalliseen ajoneuvoyhdistelmään lisättynä (mukaillen Laurikko et. al., 2012, s. 61).

Erillisten ilmanohjaimien lisäksi on tutkittu myös innovatiivisempia ratkaisuja. Yksi tällainen on paineilman puhaltaminen peräosaan, jolloin alipaine ei pääse muodostumaan niin merkittäväksi. Tämä johtaa taaksepäin kohdistuvan imun pienenemiseen. Tällaista ratkaisua on tutkittu kuorma-autoille, mutta se on ristiriidassa kulutuksen vähentämisen kanssa, sillä paineilman tuottaminen vie myös energiaa. Tutkimuksissa on havaittu älykkään järjestelmän kykenevän tasapainottamaan sivutuulen vaikutuksia puhaltamalla paineilmaa eripuolille. Tämän pitäisi vaikuttaa positiivisesti ajettavuuteen. (Englar, 2001, s. 3-13.)

2.5 Tutkitut ratkaisut perävaunun perän ilmanvastuksen pienentämiseksi

Tutkimuksissa ilmenee, että perän alueella on perävaunun suurimmat ilmanvastuskertoimet. Erilaisia ratkaisuja on monenlaisia ja tähän lukuun on pyritty keräämään niistä kaikkein oleellisimmat, jotka sisältävät potentiaalia ilmanvastuksen pienentämiseksi. Perän ratkaisut ovat yleisesti jaoteltu kahteen luokkaan, passiiviset ja aktiiviset. Passiivisissa ratkaisuissa virtausta yritetään muokata geometrian avulla ja niitä suositaan niiden yksinkertaisuuden takia. Aktiivisissa ratkaisuissa pyritään muokkaamaan virtausta toimilaitteiden avulla, mikä yleisimmin tarkoittaa paineilman käyttöä. Tämän työn liitteessä I on taulukko, jossa on yhteenveto tutkituista potentiaalisista ratkaisuista. (Leuschen & Cooper, 2009, s. 457; Cattafesta, Tian & Mittal, 2009, s. 151.)

Aerodynamiikkaa parantavat lisäosat toimivat useimmiten parhaiten kokonaisuutena, eivätkä vain yhtenä osana. Usein kuljettajat eivät halua ratkaisuja, jossa peräosan taakse asennetaan ylimääräisiä osia, sillä ne voivat vaatia manuaalista asentamista perävaunua purettaessa ja lastattaessa. Jotkin valmistajat ovat kehittäneet ratkaisuja, jossa lisäosat liikkuvat itsestään pois tieltä ajoneuvon pysähtyessä. Tällaiset ratkaisut eivät välttämättä toimi olosuhteissa, joissa on lunta ja pakkasta. (Ortega et al., 2013, s. 2-5.)

Perän kulmikkaan muodon takia takaosaan muodostuu suuri pyörre. Tämä johtaa ilmanpaineen suureen laskuun, mikä aiheuttaa taaksepäin suuntautuvaa vetoa ajoneuvoon. Tästä johtuen ratkaisut ilmanvastuksen pienentämiseksi suoritetaan pienentämällä tätä pyörteen kokoa tai siirtämällä sitä kauemmas ajoneuvosta. (Choi, Lee & Park, 2014, s. 457.)

2.5.1 Ilmanvastuksen pienentäminen passiivisesti

National Research Council of Canada (NRC) tekemässä tutkimuksessa tuloksien perusteella oli kaksi toimivaa ratkaisua ilmanvastuksen pienentämiseksi perän alueella. Toinen ratkaisusta oli Transtexin kolmiosainen komposiittinen taittuva ilmanohjain ja toinen Aerovolutionin ilmatäytteinen rakenne. Molemmat ovat ns. boat-tail-periä ja toimivat parhaiten, jos perävaunuun on asennettu myös sivuhelmat. Perän ratkaisut tosin voivat heikentää pääsyä perävaunun takaoviin. Kun nopeus on 100km/h, Transtexin ratkaisu vähensi ilmanvastuskerrointa 0,0506:lla ja Aerovolutionin ratkaisu 0,0438:lla. Nämä ratkaisut ovat esillä kuvassa 6. (Leuschen & Cooper, 2009, s. 457-459.)



Kuva 6. Vasemmalla Transtexin taittuva perän komposiitti-ilmanohjain ja oikealla Aerovolutionin ilmalla täytettävä boat-tail-perä (Leuschen & Cooper, 2009, s. 459).

Ilmalla täytettäviä boat-tail-periä on myös avonaisia malleja. Ne ovat huomattavasti lyhyempiä verrattuna umpinaisiin, mutta sisältävät samat hyödyt. Tällaisen rakenteen on todettu aiheuttavan usean prosentin vähennyksen polttoaineen kulutuksessa. Esimerkki avonaisesta mallista on kuvassa 7. (Euroopan komissio, 2013, s.14; Aerodynamic Trailer Systems, 2015).



Kuva 7. Ilmalla täytettävä avonainen boat-tail (Aerodynamic Trailer Systems, 2015).

VTT:n tutkimukset ovat johtaneet myös käytännön testeihin, joissa ajoneuvoyhdistelmään asennettiin aerodynamiikkaa parantava osasarja. Kuva 5 havainnollistaa tätä. Tutkimukset olivat lupaavia ja aerodynaaminen vastuskerroin pieneni jopa 0,39. Valitettavasti tuloksissa ei eritelty peräosan vaikutusta kokonaispienennykseen. Tutkitun lisäosasarjan perä on nähtävillä kuvassa 8. (Laurikko et. al., 2012, s. 60–62.)



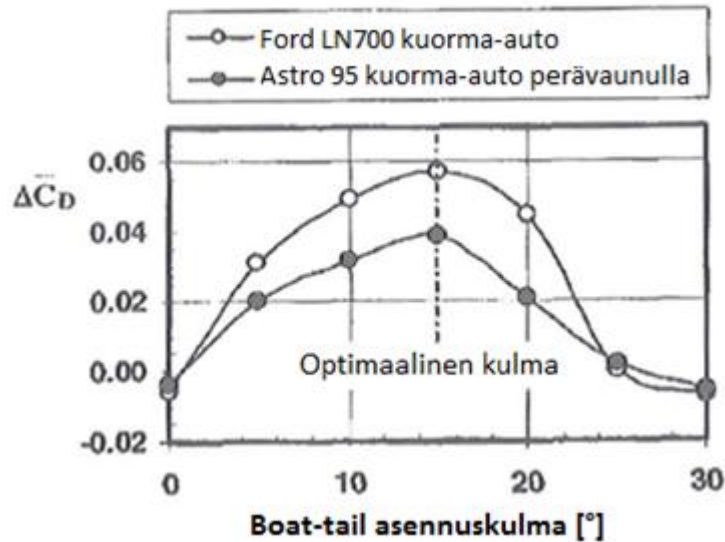
Kuva 8. VTT:n tutkiman aerodynamiikkaosasarjan peräosa (Laurikko et. al., 2012, s. 62).

Lyhyet suorat ilmanohjainläpät ovat käytännöllisiä, sillä kun perävaunun ovet avataan, voidaan läpät taittaa ovia vasten (vertaa umpinaiset ratkaisut). Tällaisten boat-tail-paneelien on havaittu pienentävän ilmanvastusta poikkeuksetta. Suunnittelun kannalta kyse on sopivasta pituudesta, asennuskulmasta sekä paneelien määrästä. Cooperin tutkimuksien optimaalisessa ratkaisussa käytettiin paneeleja kolmella sivulla ja niiden asetuskulma oli 15°. Tämä ratkaisu sai 100 km/h nopeudella aikaan 0,044:n pienennyksen ilmanvastuskertoimessa. (Cooper, 2003, s. 11–13.)

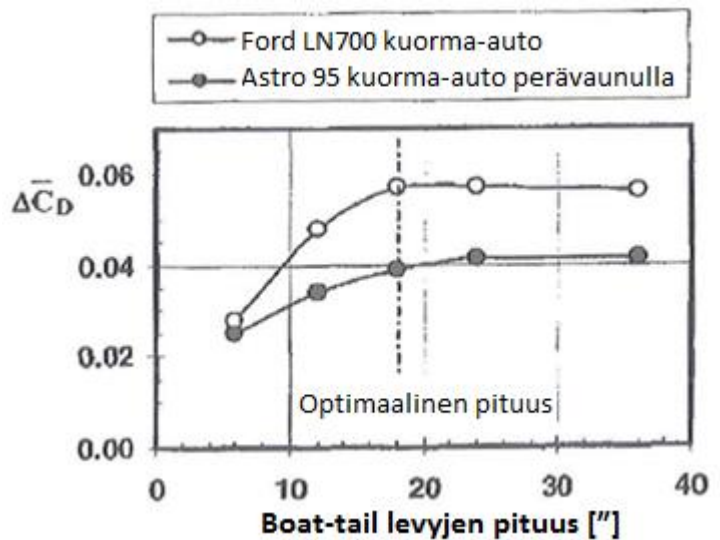
Tällaisen boat-tailin pituutta ja asennuskulmaa on optimoitu. Tämä selvitettiin erilaisilla ajoneuvoyhdistelmillä testaamalla. Tutkimuksissa havaittiin, että ilmanvastuskerroin pysyy muuttumattomana, kun asennuskulma on 0° tai 25°. Optimaalinen kulma testeissä oli 15°. Levyn pituuden, x havaittiin olevan optimaalinen, kun se noudattaa seuraavaa yhtälöä (Cooper, 2003, s. 17):

$$x = 0,18 * \sqrt{A_b}, \quad (3)$$

missä A_b on perävaunun takaosan pinta-ala. Optimointi on havaittavissa kuvissa 9 ja 10, joissa on esillä ilmanvastuskertoimen muutos suhteessa kulmaan ja pituuteen. (Cooper, 2003, s. 16–18.)



Kuva 9. Boat-tail-perän optimaalinen asennuskulma (mukaiillen Cooper, 2003, s. 17).



Kuva 10. Boat-tail-perän optimaalinen pituus (mukaiillen Cooper, 2003, s. 17).

Edellä kuvatun boat-tail-perän lisäksi on testattu vastaavanlaisia ratkaisuja sientämällä perän läpät pois perävaunun ulkoreunoista. Kun läpät on asetettu suoraan, havaittiin niitä optimoitaessa, että niiden olisi suotavaa olla vähintään 1,14 m pitkät ja sisennetty 76 – 200 mm.

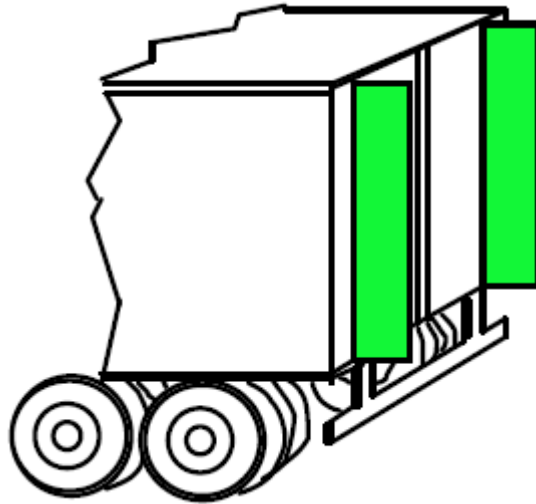
Kun näissä kokeissa tutkittiin sivutuulen vaikutusta liukukulmaa kasvattamalla, huomattiin että kulman kasvaessa vain 3 astetta, on perinteisempi vinoon asetettu boat-tail-perä tehokkaampi. Kuvassa 11 näkyy tutkittu suora, sisennetty boat-tail-perä. (Coon & Visser, 2004 s. 257–259)



Kuva 11. Sisennetty boat-tail-perä suorilla läpillä (Coon & Visser, 2004 s. 263).

Erilaisia pituussuuntaisen pyörteen kehittäviä ilmanohjaimia on myös tutkittu. Niiden ei ole kuitenkaan havaittu pienentävän ilmanvastusta merkittävästi. Leuschenin ja Cooperin (2009, s. 457) suorittamissa täyskokoisen perävaunun tuulitunnelikokeissa havaittiin tällaisten ilmanohjaimien itseasiassa lisäävän ilmanvastuskerrointa 0,0195:llä.

Yksi mahdollinen ratkaisu on kahden pystysuoran levyn asettaminen perään. Tämä havaittiin toimivaksi, sillä se aikaansai lähes yhtä hyvät tulokset, kuin suora avoin boat-tail-perä. Kokeet olivat pienoismallikokeita, joten arvot ovat suuntaa antavia, mutta riittävän tarkkoja, jotta rakenteen toimivuus voidaan todeta. Kuvassa 12 on havainnekuva tällaisesta ratkaisusta. (Wood, 2006, s. 10-12.)



Kuva 12. Perän suorat ilmanohjainlevyt (Wood, 2006, s. 11).

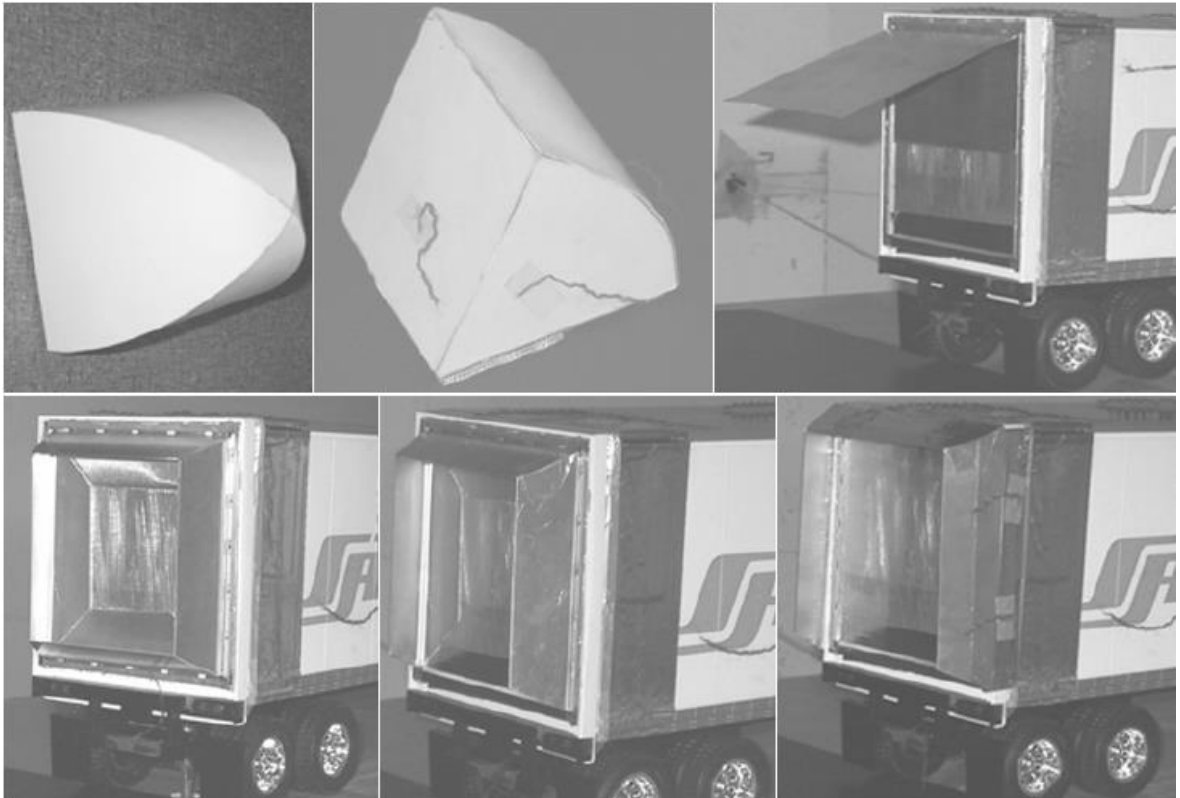
2.5.2 Ilmanvastuksen pienentäminen aktiivisesti

VTT:n tutkimuksissa on testattu peräpuhallusta, jolla yritettiin luoda ns. virtuaalinen boat-tail-perä. Tässä perän rakenne sisältäisi pienet aerodynaamiset osat. Kapealla paineilmapvirtauksella aiheutettaisiin virtauksen jatkuminen, kuten pidemmässä boat-tail rakenteessa. Tällöin estettäisiin pitkät ja mahdollisesti lain kieltämät rakenteet. Tutkimus suoritettiin käyttämällä pienoismalleja, joten tulokset eivät ole täysin luotettavia. Tulokset olivat lupaavia, sillä tuulitunnelikokeissa ilmanvastuskerrointa saatiin pienennettyä peräpuhalluksella parhaimmillaan 9-19 prosentilla. Jättöreunan puhallus on siis varteen otettava vaihtoehto. Valitettavasti tämä ratkaisu vaatisi kuitenkin paineilman tuottamisen perävaunussa. Virtual boat-tail voi olla tulevaisuuden ratkaisu, mutta tällä hetkellä se vaatii lisää tutkimusta. Kuvassa 13 näkyy kokeissa käytetyt pienoismallien peräosat. (Sainio, Killström & Juhala, 2010, s. 8-10; Kytö et. al., 2009, s. 48–49.)



Kuva 13. VTT:n tutkimuksissa käytetyt pienoismallit, joissa pieni boat-tail sekä peräpuhallus (Sainio et al., 2010, s. 8).

Arizonan yliopistossa on tehty tutkimus, josta tehdyt loppupäätelmät eivät vastaa yllä esitettyä VTT:n tutkimuksen tulosta. Tässä tutkimuksessa testattiin erilaisilla perärakenteilla ja paineilmalla tehdyllä peräpuhalluksella tehtyjä ratkaisuja ja verrattiin niitä alkuperäisen perävaunun ilmanvastukseen. Puhallintoimilaitteet oli asetettu perän jokaiselle reunalle tasaisin välein. Kaksi perärakenteista olivat umpinaisia: ellipsoidin mallinen ja kaaren sektorin mallinen. Kolmas rakenne oli pitkä suora ilmanohjain, joka oli kiinnitetty yläreunasta. Loput rakenteet olivat pienempiä ilmanohjaimia 20° kulmassa siten, että toimilaitteet olivat niiden ulko- tai sisäpuolella. Lisäksi tästä tehtiin kaksi variaatiota käyttäen ohjaimia ja toimilaitteita kaikilla sivuilla tai käyttäen niitä vain sivu- ja yläreunoilla. Käytetyt rakenteet ovat esillä kuvassa 14. (Taubert & Wagnanski, 2009, s. 105–108.)



Kuva 14. Arizonan yliopiston testaamat rakenteet. Ylärivillä vasemmasta reunasta lähtien: ellipsoidi, kaaren sektori ja pitkä ilmanohjain. Alarivillä vasemmalta lähtien: Ohjaimet kaikilla sivuilla ja toimilaitteet ulkopuolella, ohjaimet kolmella sivulla, ohjaimet kolmella sivulla ja toimilaitteet sisäpuolella. (Taubert & Wagnanski, 2009, s. 107–108.)

Tämän kokeen tuloksien mukaan eri ratkaisut pienensivät ilmanvastusta noin 2-4 %, lukuun ottamatta pitkää ilmanohjainta, joka lisäsi sitä n. 1-1,5 %. Peräpuhallus havaittiin heikoksi,

sillä se pienensi ilmanvastusta parhaimmillaan vain noin 1 %:lla, mikä ei riitä siihen, että ilmanpaineen tuoton kulutus voitaisiin hyväksyä. Parhaiten perärakenteista toimi lyhyet ohjaimet kolmella sivulla, huolimatta siitä oliko toimilaitteet asetettu sisä- vai ulkopuolelle. Nämä rakenteet saivat aikaan jopa 5,5 %:n ilmanvastuksen pienennyksiä. Umpinaiset ratkaisut tuottivat lähinnä marginaalisia vastuksen pienenemisiä. (Taubert & Wagnanski, 2009, s. 109–112.)

2.6 Aerodynaamisten ratkaisujen vaikutus raskaan ajoneuvon ajettavuuteen

Edellä kuvatuilla ilmanvastusta pienentävillä ratkaisuilla on myös vaikutus ajoneuvon hallittavuuteen. Sivutuuli aiheuttaa pitkään ajoneuvon momenttia, mikä voidaan tasata käyttämällä aktiivista virtauksen hallintaa. Kun tuulen vastakkaiselle puolelle ohjataan peräpuhallus, se vähentää sivutuulen vaikutusta ajoneuvoyhdistelmään. (Englar, 2001, s. 12–13.)

Myös passiivisten aerodynaamisten lisäosien on raportoitu parantavan ajoneuvon hallittavuutta, sillä niiden avulla sivutuuli ohjautuu tasaisemmin. Kun perään tehdään suuret ilmanohjaimet, lisäävät ne pinta-alaa mihin sivutuuli voi vaikuttaa. Pinta-alan kasvattamisella voi olla negatiivinen vaikutus aerodynamiikkaan. (Ortega et al., 2013, s. 20.) Ilmanvastuksen pienentäminen helpottaa ajoneuvojen kiihtyvyyttä huomattavasti, sillä vaadittava teho pienenee (Hucho, 1998, s. 502).

3 HAKEPERÄVAUNUN PERÄN AERODYNAMIIKAN KEHITTÄMINEN

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli pienentää hakeperävaunun perän ilmanvastusta. Tässä luvussa käsitellään kirjallisuuskatsauksessa käsiteltyjä ratkaisuja ja niiden soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin ja hakeperävaunujen vaatimuksiin. Lisäksi lopuksi pohdittiin uusia mahdollisia ratkaisuja.

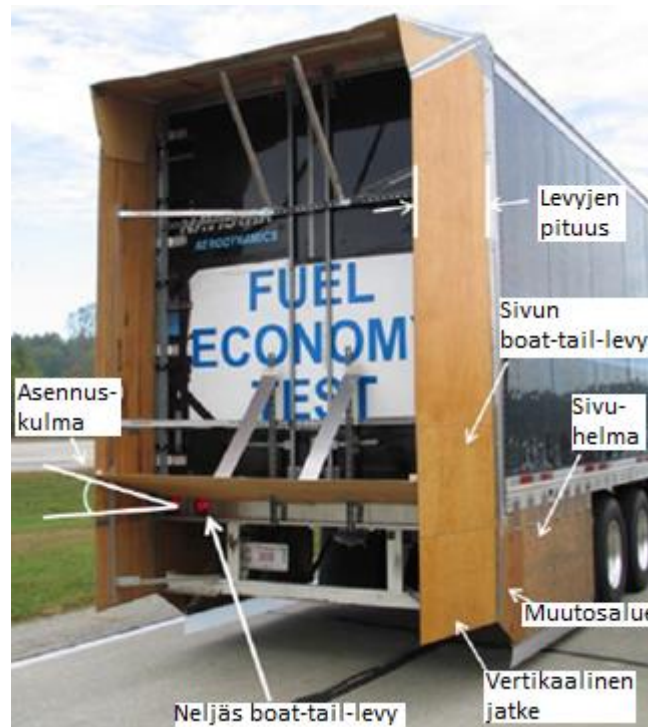
3.1 Kirjallisuuden ratkaisut hakeperävaunussa

Luvuissa 2.5.1 ja 2.5.2 kuvattiin lyhyesti tutkittuja ratkaisuja, joita perävaunujen perään on asennettu. Liitteestä I löytyy yhteenveto näistä. Seuraavaksi kuvataan niiden soveltuvuutta tässä kohteessa. Käsiteltäviin ratkaisuihin valittiin ainoastaan ne, jotka ovat mahdollisia toteuttaa.

3.1.1 Vino boat-tail

Vino boat-tail-perä on mahdollisesti yleisin ratkaisumalli. Siinä perävaunun takareunoihin on kiinnitetty suorat tai pyöristetyt ilmaa ohjaavat levyt. Levyjä on yleensä sivuilla ja yläreunassa. Lisäksi alareunaan voidaan asettaa neljäs levy, mutta se ei monien tutkimuksien mukaan aiheuta suurta muutosta. Näin ollen, neljättä alareunan levyä hakeperävaunuun ei kannata asentaa, sillä se olisi tiellä lastauksessa. Rakenne on kiinnitysreunoistaan nivelöity, jotta levyt voidaan taittaa ovia vasten. Koska levyt ovat reunoissa kiinni, on niiden taittamisen suunnittelu helpompaa. (Salari & Ortega, 2010, s. 1–3.)

Tällainen rakenne ei toisi liikaa lisäpainoa, kunhan materiaalivalinnat tehdään oikein. Kuvassa 15 näkyy testikäytössä oleva boat-tail, mihin on merkitty suunnitteluun vaikuttavia asioita. Lisäksi, kuten kuvasta nähdään, tällä ratkaisulla on helppo lisätä sivuhelmojen yhteys. Tämä aikaan saa lisääntyneen positiivisen kokonaisvaikutuksen. (Salari & Ortega, 2010, s. 1.)



Kuva 15. Vino boat-tail testikäytössä. Kuvaan on merkitty suunnittelussa tärkeitä tekijöitä. (mukaillen Salari & Ortega, 2010, s. 1.)

3.1.2 Sisennetty boat-tail

Sisennetty boat-tail on hyvin samanlainen, kuin vino boat-tail, mutta siinä levyt ovat suorassa ja ne ovat sisennetty perävaunun reunoista. Kuva 11 havainnollistaa tämän. Rakenne on hyvin yksinkertainen ja se olisi mahdollista kiinnittää hakeperävaunuun. Taittaminen muodostuu hankalaksi, sillä levyjen pitää olla pitkät, jotta laite toimii tehokkaasti. (Coon & Visser, 2004, s. 257–259)

3.1.3 Perän suorat levyt

Yksi vaihtoehto on asettaa kaksi pystysuoraa levyä perävaunun perään. Tämä on esillä kuvassa 12. Tutkimustietoa tämän ratkaisun toimivuudesta ei ole paljoa, joten se vaatisi lisää testausta. Rakenne on kohtalaisen tehokas pienillä liukukulmilla. Laitteen suuri etu on sen yksinkertaisuus. (Wood, 2006, s. 10–12.)

3.1.4 Ilmatäytteinen umpinainen boat-tail

Umpinainen ilmatäytteinen perä on helppokäyttöinen ja turvallinen muille tienkäyttäjille, sillä siinä ei ole teräviä eikä kovia kulmia. Kun ilma imetään pois rakenteen sisältä, laite jää ovia vasten, eikä ole lastaamisen tiellä. Umpinaisen rakenteen vuoksi laite on suhteellisen

pitkä. Lisäksi rakenne vaatii toimilaitteet täyttöön ja tyhjennykseen. Tällaisten ilmatäytteisten ratkaisujen toimivuutta Suomen olosuhteissa ei ole testattu. Esimerkkimalli on esillä kuvassa 6.

3.1.5 Ilmatäytteinen avonainen boat-tail

Avoimella ilmatäytteisellä boat-tail-perällä on samanlaiset edut, kuin umpinaisella, mutta se on umpinaista mallia huomattavasti lyhempi. Lyhyys auttaa lainsäädännön ja turvallisuuden huomioimisessa. Tämäkin ratkaisu vaatii toimilaitteet täyttöön sekä tyhjennykseen ja on altis rikkoutumiselle. Kaupallisia sovelluksia tällaisista löytyy jo, joten oletettavasti tämä toimisi myös hakevaunussa.

3.1.6 Aktiivinen virtauksen hallinta

Aktiivisella virtauksen hallinnalla tarkoitetaan ilmavirran ohjaamista paineilman avulla. Ilmavirta ohjataan lyhyitä ilmanohjaimia pitkin oikeaan suuntaan, jossa se pidetään toimilaitteiden tuottamalla ilmavirralla. Tällaiset ratkaisut ovat hyvin lyhyitä, mutta ne vaativat jatkuvan paineilman tuoton, mikä lisää kustannuksia. Hakeperävaunuun ne olisivat asennettavissa, mutta on mahdollista, että toimilaitteiden suuttimet voisivat tukkeutua kuljetuksen luonteen takia. Lisäksi Suomen olosuhteet eivät välttämättä ole optimaaliset tällaiselle ratkaisulle. (Sainio et al., 2010, s. 10.)

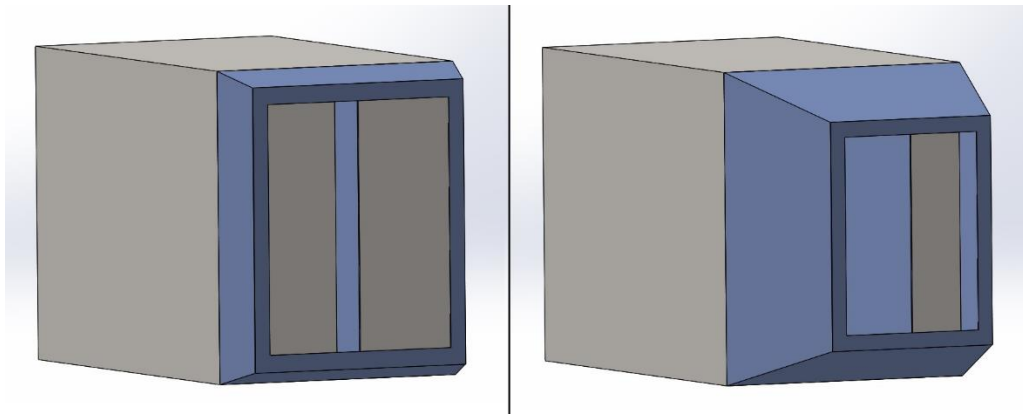
3.2 Uudet mahdollisuudet

Ongelmaan pyrittiin keksimään uusia ratkaisutapoja. Kirjallisuustutkimuksen jälkeen suoritettiin aivoriihi, johon osallistuivat mm. professorit Leonid Chechurin ja Mika Lohtander. Aivoriihessä pohdittiin innovaation lähteitä, joiksi keksittiin eläinmaailma, lentokoneet ja sukellusveneet. Eläinmaailman hyödyntäminen on yleinen keino koneensuunnittelussa. Perän aerodynamiikkaa pohtiessa voisi ottaa mallia esim. delfiinin evästä tai linnun siivestä. Useimmat nykyiset kirjallisuuden ratkaisut ovat jäykkiä, mutta mahdollisesti taipuva rakenne voisi pitää ilmavirtauksen paremmin laminaarisena, mikä on toivottavaa. Rakenne voisi olla myös itsestään muokkautuva, jolloin se pidentyisi nopeuden kasvaessa.

Lentokoneissa ja sukellusveneissä ratkaisut ovat tyypillisesti jäykkiä ratkaisuja, joten ne eivät juuri tuo uusia ideoita. Tällaiset rakenteet muistuttavat boat-tail-periä, joissa perän

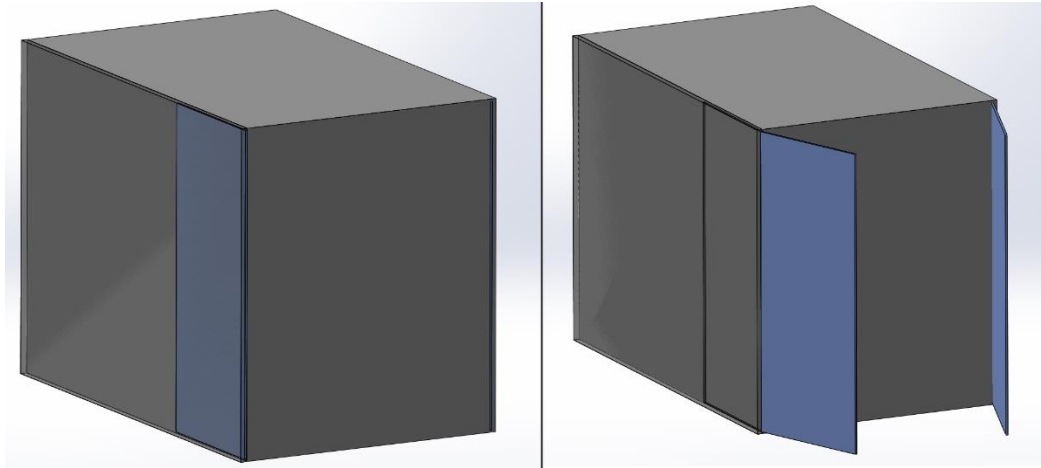
ohjaavat osat yhdistyy yhteen pisteeseen. Parhaimpana esimerkkinä tästä toimii siipi, jonka muoto on hyvin terävä.

Käytännön ratkaisuksi luonnosteltiin kolme ideaa. Ensimmäisen idean ajatus liittyi eläinmaailmaan, sillä se olisi muokkautuva ja taipuva. Tässä kangasta muistuttavalla materiaalilla tehtäisiin sivuilta suljettu alue, joka mahdollisesti venyisi tai muuten muokkautuisi pitemmäksi nopeuden kasvaessa. Kuvassa 16 näkyy luonnos tästä. Rakenne pitäisi jakaa kahteen osioon, jotta ovien avautuminen ei häiriytyisi.



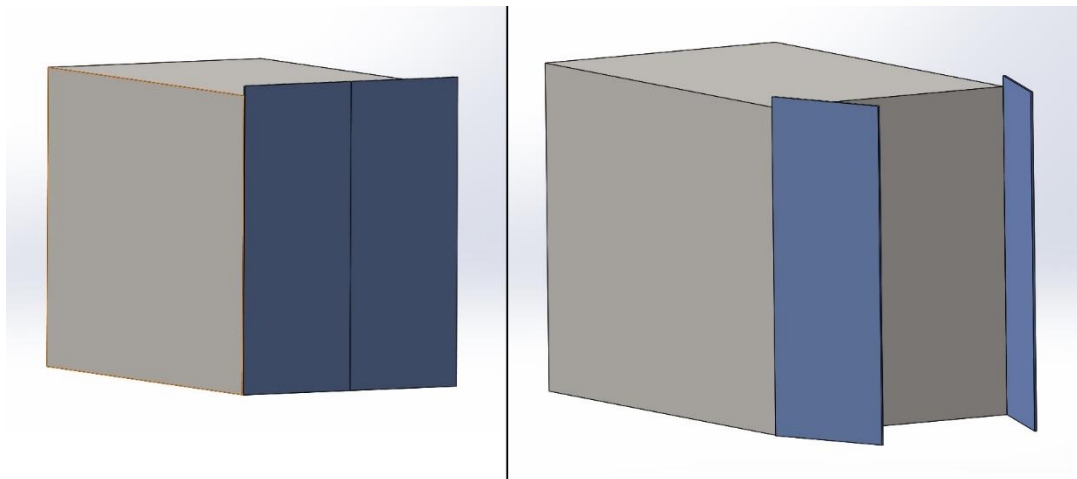
Kuva 16. Luonnos joustavasta ilmanohjaimesta. Vasemmalla puolella on rakenne pienemmässä vauhdissa ja oikealla rakenne venyneenä suuremmassa nopeudessa.

Kaksi muuta ideaa käyttäisi perinteisempiä, jäykkiä ilmanohjaimia. Toinen idea hyödyntäisi seinien paksuutta. Tässä ohjaavat levyt liukuisivat seinien sisältä. Tätä havainnollistaa kuva 17. Hyvä puoli ratkaisussa olisi rakenteen saaminen täysin pois tieltä. Ratkaisussa voitaisiin hyödyntää ajoneuvon liike-energiaa rakenteen avauksessa. Sulkeminen vaatisi esim. ajoneuvon oman paineilmajärjestelmän hyödyntämistä.



Kuva 17. Luonnos toisesta ideasta. Vasemmalla puolella ohjaimet ovat seinien sisällä ja oikealla ohjaimet avattuina. Mallin rungon vasen seinä on läpinäkyvä.

Kolmas idea hyödyntäisi perävaunun ovien rakennetta ja perävaunuun kiinnitettäisiin ”toiset ovet”. Tämä on nähtävillä kuvassa 18. Toiset ovet siis olisivat takaovien päällä, jolloin ne eivät häiritse lastaamista, mutta sarakoituisivat reunoista, jolloin ne saisivat aikaan omanlaisensa boat-tail-perän. Näiden levyjen avaaminen voisi tapahtua ilmavirran avulla, kun jokin lukitus vapautettaisiin ja ilmavirta vetäisi ovet auki. Tämä vaatisi sen, että suljettuina ollessaan ovet ottaisivat vastaan ilmavirtaa.



Kuva 18. Luonnos kolmannelta ilmanohjausideasta. Vasemmalla puolella lisäövet ovat suljettuina ja oikealla ne ovat käyttöasennossa.

4 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Edellisessä luvussa esiteltyjä kirjallisuuden vaihtoehtoja perävaunun kehittämiseksi arvioitiin eri tavoin. Niitä olivat toimivuus ja tehokkuus, taloudellisuus, käytettävyys, turvallisuus sekä lainsäädäntöön liittyvät asiat. Omien ideoiden toimivuutta ei tässä käsitelty, sillä tutkimustietoa niistä ei ole, minkä vuoksi niitä ei tässä analysoida. On kuitenkin oletettavaa, että joustavan rakenteen idean tulokset seuraavat ilmatäytteisten ratkaisujen tuloksia ja kahden muun idean arvot levyrakenteisten ratkaisujen arvoja. Lopuksi tässä luvussa käsiteltiin jatkokehityksen suuntaviivoja.

4.1 Toimivuus ja tehokkuus

Tutkimusten mukaisesti erilaiset boat-tail-ratkaisut ovat tehokkaita ilmanvastuksen pienentäjiä. Vino boat-tail toimii myös liukukulman kasvaessa sisennettyä paremmin. Lisäksi vino boat-tail pienentää tehokkaammin ilmanvastuskerrointa suhteessa laitteen pituuteen. Perän suorat levyt pienentävät ilmanvastuskerrointa vähän ja vaativat suhteellisen pienen ja yksinkertaisen konstruktion. Tosin tällaista rakennetta ei ole tutkittu paljon, joten ei ole täysin varmaa, kuinka paljon todellinen ilmanvastuskerroin pienenee sen avulla. Näiden ratkaisujen on oletettavaa toimia täysin Suomen olosuhteissa. Ainoastaan avaus/sulku-mekanismit vaativat tarkempaa olosuhteiden huomioimista.

Käyttämällä yhtälöä 1 havaitaan, että ilmanvastuskertoimen prosentuaalinen pienentäminen vaikuttaa suoraan ilmanvastusvoiman pienenemiseen. 0,05:n pienennys ilmanvastuskertoimessa aiheuttaisi yli prosentin pienennyksen polttoaineen kulutuksessa, jos oletetaan, että viidennes polttoaineen kulutuksesta menee ilmanvastuksen voittamiseen. Tämä tapahtuisi, kun alkuperäinen ilmanvastuskerroin on 0,65–0,9.

Ilmatäytteisten boat-tail-perien tehokkuus on varmaa, vaikkakaan tutkimusten mukaan ei yhtä tehokasta kuin levykonstruktioiden. Niiden toimivuus on varmaa yksinkertaisen toimintaperiaatteen vuoksi. Toisaalta rakenteen materiaalin valinta on kriittistä, jotta laite toimii myös talviolosuhteissa. Lisäksi materiaalin täytyy kestää jonkin verran iskuja, kivenhakkaamisia ja muita rasituksia, sillä rakenne menettää muotonsa, jos materiaali

rikkoutuu. Umpinainen on hieman tehokkaampi, mutta suhteessa pituuteen voi avonainen malli olla tehokkaampi.

Aktiivinen virtauksen hallinta on osoittautunut hyvin potentiaalisesti vaihtoehdoksi, mutta vielä tällä hetkellä se ei ole osoittautunut varmaksi vaihtoehdoksi. Riippuen tutkimuksista, kykenee aktiivinen virtauksen hallinta pienentämään ilmanvastuskerrointa 0,03-0,10, kun muut ratkaisut pienentävät kerrointa arvioidusti noin 0,05. Aktiivisella ratkaisulla siis on potentiaalia suuriin muutoksiin kuljetusalalla. Suomen olosuhteissa aktiivinen virtauksen hallinta voi olla haastavaa hallita ja suuttimien sekä muun paineilmajärjestelmän suunnittelussa talviolosuhteet on otettava huomioon. Jos suuttimet tukkeutuvat tai jäätyvät osittain, aiheuttavat ne vääränlaisen virtauksen, millä voi olla jopa negatiivisia vaikutuksia.

4.2 Ratkaisujen taloudellisuus

Ratkaisujen taloudellisuus määrittyy neljästä asiasta: valmistuskustannuksista, käytönaikaisista kustannuksista, huoltokustannuksista ja tehokkuudesta ilmanvastuksen pienennyksessä. Jokainen ratkaisu tuottaa lisäkustannuksia, joten ratkaisujen täytyy olla riittävän tehokkaita, jotta lisääntyneet kustannukset voidaan hyväksyä. Lisäksi ratkaisujen täytyy olla lähes täysin huoltovapaita, jotta kannattavuus säilyy. Käytönaikaiset kustannukset riippuvat mekanismien aiheuttamista kustannuksista ja paineilman tarpeesta.

Aktiivinen virtauksen hallinta on näistä kaikkein kallein, sillä se vaatii jatkuvan paineilman tuoton. Lisäksi paineilmakomponentit ja tarkat toleranssit valmistuksessa tehokkuuden aikaansaamiseksi tulevat kustantamaan enemmän, kuin perinteiset passiiviset ilmanohjaimet. Toisaalta tällä ratkaisulla on potentiaalia todella suureen polttoaineenkulutuksen vähennykseen, mikä kumoaisi edellä mainitut negatiiviset asiat.

Erilaiset levyrakenteista tehtyjen ratkaisujen valmistus aiheuttaisi niiden suurimmat kustannukset. Laitteet täytyy suunnitella siten, ettei huoltokustannuksia juurikaan tule. Valmistuskustannukset määrittyvät materiaalivalintojen ja mekanismien perusteella. Jos ratkaisut ovat automaattisia, tulee valmistuskustannuksiin myös lisäksi mekanismin toimilaitteen kustannukset. Kustannukset eivät oletettavasti ole kovinkaan suuria, joten käyttäjä tulee säästämään polttoainekustannuksissa pienellä alkuinvestoinnilla.

Ilmatäytteiset ratkaisut vaativat toimilaitteet sekä itse rakenteen materiaalin. Näistä muodostuvat pääkustannukset. Jos materiaali rakenteeseen valitaan oikein, ei huoltokustannuksia juuri pitäisi syntyä. Käyttökustannukset eivät pitäisi olla korkeat, sillä paineilmaa tarvitaan vain tyhjennys- ja täyttövaiheessa. Rakenteen tehokkuus oletettavasti säästää nämä kustannukset käyttäjältään.

4.3 Käytettävyys

Käytettävyyden määrittää ensisijaisesti perävaunun lastaus. Lisäksi lisäosat täytyy tarvittaessa olla helposti poistettavissa käytöstä, koska ne eivät voi olla tiellä ajaessa, eivätkä näin vaikuta käytettävyyteen. Kyseessä olevat hakeperävaunut lastataan yläkautta ja puretaan takaovien kautta kolakuljettimilla. Näin ollen tärkeintä on ovien helppo avattavuus.

Ilmatäytteiset ratkaisut toimivat tässä kaikkein parhaiten, sillä ne menevät kasaan, kun toimilaite asetetaan poistamaan sisällä oleva ilma. Tällöin ilmanohjainrakenteet asettuvat ovia vasten. Tyhjänä ollessaan ne eivät vaikuta ovien avaamiseen käytännössä lainkaan.

Levyrakenteiset ratkaisut ovat ongelmallisempia, sillä ne täytyy saada taitettua pois tieltä siten, etteivät ne peitä ovenavausmekanismeja. Mitä lyhyemmät ohjaavat levyt ovat, sitä helpompi taittaminen on suorittaa. Suurimmaksi ongelmaksi tämä muodostuu sisennetyissä boat-tail-levyissä, sillä ne ovat hyvin pitkiä. Perän suorat levyt taas eivät oletettavasti aiheuta ongelmia.

Aktiivisessa virtauksen hallinta ratkaisuihin ohjaavat levyt eivät todennäköisesti ole lainkaan tiellä. Rakenteet ovat niin lyhyitä, joten ne eivät vaikuta ovien avaamiseen tai kuorman purkuun. Käytettävyyteen vaikuttaa tosin niiden osalta jatkuva käyttö ja tasaisesta ilmavirrasta sekä puhtaista suuttimista huolehtiminen.

4.4 Turvallisuus

Turvallisuuteen on myös otettu kantaa tulevassa EU:n direktiivin muutoksessa. Laitteiden täytyy olla turvallisesti, standardien mukaisesti kiinnitetty, jotteivat ne voi irrota ajoneuvon liikkeessä. Lisäksi muut tienkäyttäjät täytyy huomioida siten, ettei perävaunun muotomerkintöjen näkyvyys heikkene. Myöskään peräänajotilanteessa peräänajajalle ei saa

muodostua vaaraa näiden aerodynaamisten laitteiden vuoksi. Takana olevien alleajosuojien täytyy siis toimia, vaikka näitä lisäosia käytettäisiin. (Euroopan parlamentti, 2015)

Muotomerkinnät täytyy selkeästi merkitä myös asennettaviin lisäosiin. Ilmatäytteiset ratkaisut menevät ymmärrettävästi kasaan törmäyksen sattuessa, joten ne ovat hyvin turvallisia. Aktiivinen virtauksen hallinta laitteisto on niin lyhyt, joten se ei aiheuta merkittävää vaaraa. Ainoastaan pitemmät boat-tailit ja perän suorat levyt voivat aiheuttaa vaaran peräänajossa, joten tämä täytyy huomioida niiden muotoilussa.

4.5 Lainsäädännön huomioiminen

Tehtävän rakenteen on noudatettava edellä luvussa 2.1 kuvattuja säännöksiä. Suurin rajoite on rakenteen lisäämä suurin sallittu pituus, kun lisälaite on poistettu käytöstä. Tällöin aerodynaaminen osa saa lisätä vain 20 cm perävaunun pituutta. Lisäksi näille osille tuleville tyyppihyväksynnälle on odotettavissa useita vaatimuksia. Asiantuntijaryhmän ehdotuksessa EU:lle lisäosien avaaminen ja taittaminen pitäisi pystyä suorittamaan automaattisesti ajoneuvon sisältä, mutta ei ilman kuljettajan fyysisistä toimintaa. Näin ollen täysin automaattiset laitteet tulisivat olemaan kiellettyjä. Koska ajoneuvon saapuessa alueelle, jossa nopeusrajoitus on korkeintaan 50 km/h pitää lisälaitteet poistaa käytöstä. Tämän vuoksi näiden laitteiden kuuluu olla sellaisia, jotka voidaan poistaa käytöstä ajoneuvon liikkua. (Euroopan parlamentti, 2015; Puurunen, 2015b).

Edellä olevat vaatimukset ovat helppo toteuttaa ilmatäytteisillä ratkaisuilla. Aktiivinen virtauksen hallinta vaatii yleensä enemmän tilaa, kuin annettu 20 cm, joten tämä voi muodostua ongelmaksi. Laitteisto todennäköisesti vaatisi suuttimien tarkan asennon vuoksi jäykän kiinnityksen. Levyillä tehdyt boat-tail-perät sekä perän suorat levyt ovat mahdollisia saada automaattisiksi toimilaitteiden avulla, mikä tosin lisää kustannuksia. Jos vinon boat-tailin levyt ovat käyristetty, se voi haitata niiden mahtumista sallittuun tilaan, kun laite on poistettu käytöstä.

4.6 Jatkokehitys

Tässä työssä kuvattuja ratkaisuja olisi hyvä testata Suomessa, jotta voidaan varmistaa, etteivät talviolosuhteet vaikuta niiden käytettävyyteen. Potentiaalisimmiksi ratkaisuiksi jatkokehitykseen voidaan todeta olevan vinot boat-tail-perät ja ilmatäytteiset ratkaisut.

Aktiiviset virtauksen hallinnan järjestelmät ovat myös tulevaisuuden ratkaisuja, mutta vaativat vielä paljon kehitystä.

Tässä työssä ideoidut ratkaisut pohjautuvat boat-tailiin ja ilmatäytteisiin ratkaisuihin, mutta niissä on pohdittu järkevää periaatetta ohjaimien avaamiseksi. Nämä ratkaisut vaativat prototyyppien kehittämisen ja testaamisen, jotta voidaan todeta niiden aiheuttama ilmanvastuksen pienennys ja käyttöperiaatteen toimivuus. Ideoilla on hyvät edellytykset toimivuudelle.

Kaikkien rakenteiden osalta jatkokehityksessä tärkeintä ovat Suomen olosuhteiden huomioiminen ja mekanismien automatisointi siten, että kuljettaja voi halutessaan avata tai sulkea ne ollessaan ohjaamossa. Lisäksi tulossa olevat tyyppihyväksyntäsäädökset määrittävät paljon jatkokehityksen tarpeita. Mekanismien käytön kehittäminen on tärkeää, jottei ylimääräisiä laitteita tarvittaisi, vaan hyödynnettäisiin ilmapvirtausta sekä ajoneuvosta saatavaa paineilmaa lisäosia avattaessa ja suljettaessa.

5 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin, miten hakeperävaunun aerodynaamista vastusta voitaisiin pienentää. Työn motiivina oli nykyaikaisten kuorma-autojen tehoton aerodynaaminen muotoilu ja siitä johtuvat suuret polttoainekustannukset, sillä ilmanvastus aiheuttaa noin viidenneksen polttoaineen kulutuksesta. Näiden lisäksi yksi syy työlle oli tulevat lakimuutokset, jotka sallivat aerodynaamiset lisäosat. Työn tavoitteena oli löytää useita ratkaisuja, miten ilmanvastusta voitaisiin pienentää. Työ rajattiin koskemaan perävaunun takaosaa.

Tutkimuksessa suoritettiin kirjallisuuskatsaus, jossa selvitettiin aerodynamiikan perusteet raskaille ajoneuvoille sekä tutkitut ratkaisut ilmanvastuksen pienentämiseksi perävaunun peräosassa. Tämän lisäksi selvitettiin nykyinen lainsäädäntö ja siihen tulossa olevat muutokset. Kirjallisuuskatsauksessa löydettyjen ratkaisujen toimivuutta hakeperävaunuun pohdittiin ja niiden tehokkuutta analysoitiin eri suunnittelukriteereillä. Näitä olivat toimivuus ja tehokkuus, taloudellisuus, käytettävyys, turvallisuus ja lainsäädännön huomioiminen.

Kirjallisuudesta löydettiin paljon tutkimuksia, joissa perään asetettavien aerodynaamisten lisäosien tehokkuus oli havaittu. Perävaunun taakse muodostuu suuri alipaine, joka aiheuttaa vastustavan voiman. Kirjallisuudessa olevat ratkaisut jakautuivat passiivisiin ja aktiivisiin ratkaisuihin. Passiiviset ratkaisut ohjaavat ilmaa mekaanisesti ja aktiiviset paineilman avulla. Tutkimukset osoittivat, että polttoaineen kulutusta on mahdollista pienentää useita prosenteja käyttämällä näitä laitteita. Näiden tuloksien lisäksi ideoitiin kolme uutta tapaa ohjata ilmaa perävaunun perässä.

Tällaisia lisäosia voidaan jo valmistaa ja oletettavasti lainsäädännön muuttuessa ne tulevat yleistymään. Etenkin passiiviset ilmanohjaimet ovat tehokkaita ja ne ovat suhteellisen pieniä investointeja. Yksinkertaisia ilmanohjaislaitteita on oletettavaa nähdä Suomen tieliikenteessä jo muutaman vuoden sisällä.

LÄHTEET

1230/2012. Euroopan unionin komission asetus 12.12.2012 Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EY) N:o 661/2009 täytäntöönpanosta moottoriajoneuvojen ja niiden perävaunujen massojen ja mittojen tyyppihyväksyntävaatimusten osalta sekä Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2007/46/EY muuttamisesta EVYL N:o L 353.

2007/46/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 5.9.2007 puitteiden luomisesta moottoriajoneuvojen ja niiden perävaunujen sekä tällaisiin ajoneuvoihin tarkoitettujen järjestelmien, osien ja erillisten teknisten yksiköiden hyväksymiselle EVYL N:o L 263.

Aerodynamic Trailer Systems. 2015. ATS Aerodynamic Trailer Systems - SmartTail and WindTamer products to reduce aerodynamic drag. [Viitattu 8.4.2015]. Saatavissa: <http://www.ats-green.com/products.htm>.

Antturi, J., Puroila, S. & Ollikainen, M. 2015. Raskaan liikenteen sisällyttäminen päästökauppaan.

Cattafesta, L., Tian, Y. & Mittal, R. 2009. Adaptive Control of Post-Stall Separated Flow Application to Heavy Vehicles. Teoksessa: Browand, F., McCallen, R. & Ross, J. The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Volume 41. s. 151-160.

Choi, H., Lee, J. & Park, H. 2014. Aerodynamics of Heavy Vehicles. Teoksessa: The Annual Review of Fluid Mechanics. 2014. Volume 46. s. 441–468.

Coon, J.D. & Visser, K.D. 2004. Drag Reduction of a Tractor-Trailer Using Planar Boat Tail Plates. Teoksessa: Browand, F., McCallen, R. & Ross, J. The Aerodynamics of Heavy Vehicles I: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Volume 19. s. 249-265.

Cooper, R., 2003. Truck Aerodynamics Reborn – Lessons from the Past. SAE Technical Paper. s. 8–19.

Englar, R. 2001. Advanced Aerodynamic Devices to Improve the Performance, Economics, Handling and Safety of Heavy Vehicles. SAE Technical Paper. s. 1-14.

Euroopan komissio. 2013. Commission Staff Working Document Impact Assessment [viitattu 1.4.2015]. 72 s. Saatavissa: <http://old.eu-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2013:0108:FIN:EN:PDF>.

Euroopan parlamentti. 2015. Directive of the European Parliament and of the Council. [Viitattu 1.4.2015]. 35 s. Saatavissa: http://www.parlament.gv.at/PAKT/EU/XXV/EU/06/01/EU_60101/imfname_10538879.pdf.

Hucho, W. 1998. Aerodynamics of Road Vehicles. Warrendale. Society of Automotive Engineers. 918 s.

ICCT. 2013. Proposed Amendments to EU Rules Affecting HDV. [1.4.2015] Saatavissa: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_EU_HDVconfigurations_Jun2013.pdf.

Kytö, M., Erkkilä, K. & Nylund, N.O. 2009. Raskas ajoneuvokalusto: Turvallisuus, ympäristöominaisuudet ja uusi tekniikka ”RASTU”. 121 s.

Laurikko, J., Erkkilä, K., Laine, P. & Nylund, N.O. 2012. Improving Energy Efficiency of Heavy-Duty Vehicles: A Systemic Perspective and Some Case Studies. Teoksessa: Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. 2012. Volume 195. s. 51-63.

Leuschen, J. & Cooper, K. 2009. Summary of Full-Scale Wind Tunnel Tests of Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers. Teoksessa: Browand, F., McCallen, R. & Ross, J. The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Volume 41. s. 451-462.

Mohamed-Kassim, Z. & Filippone, A. 2010. Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction. Teoksessa: Transportation Research. 2010. Volume 15. s. 275–284.

Nyholm, J., 2006. Raskaan kaluston aerodynamiikan kehittäminen. 83 s.

Ortega, J., Salari, K., Brown, A. & Schoon, R. 2013. Aerodynamic drag reduction of class 8 heavy vehicles: a full-scale wind tunnel study. Lawrence Livermore National Laboratory.

Puurunen, J. 2015a. VL: Vast: VS: Jatko: Palautelomake [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Ossi Aaltonen, Keijo Kuikka (cc), Otto Lahti (cc), Trafi Asiakaspalautteet (cc). Lähetetty 30.3.2015 klo 14.42 (GMT +0200). Liitetiedostot: ”PE-CONS 22015.pdf”

Puurunen, J. 2015b. VS: Vast: VS: Jatko: Palautelomake [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Ossi Aaltonen, Tomi Tolonen (cc). Lähetetty 30.3.2015 klo 16.58 (GMT +0200). Liitetiedostot: ”130913 aero arrière.pdf”

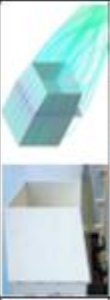

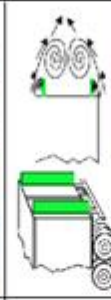
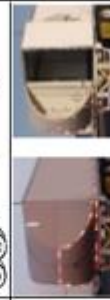
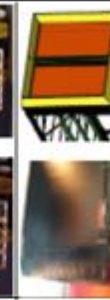
Sainio, P., Killström, K. & Juhala, M. 2010. Aerodynamic possibilities for heavy road vehicles – virtual boat tail. 11 s.

Salari, K. & Ortega, J. 2010. Aerodynamic Design Criteria for Class 8 Heavy Vehicles Trailer Base Devices to Attain Optimum Performance. 4 s.

Taubert, L. & Wagnanski, I. 2009. Preliminary Experiments Applying Active Flow Control to a 1/24th Scale Model of a Semi-Trailer Truck. Teoksessa: Browand, F., McCallen, R. & Ross, J. The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Volume 41. s. 105-114.

Wood, R. 2006. A Discussion of a Heavy Truck Advanced Aerodynamic Trailer System. 14 s.

Perän ilmanvastuksen pienentämisen keinoja (Euroopan komissio, 2013, s. 16; Leuschen & Cooper, 2009, s. 457-459; Cooper, 2003, s. 11-18; Coon & Visser, 2004, s. 257-259; Wood, 2006, s. 10-12; Aerodynamic Trailer Systems, 2015; Kytö et al., 2009, s. 48-49; Taybert & Wygnanski, 2009, s. 105-112).

Toteutustapa	Arvioitu lisäpituus	Arvioitu ΔC_d	Kustannukset	Suurimmat edut	Suurimmat haitat	Kuva/toimintaperiaate
Vino boat-tail	0,4-1,2 m	0,05	Vain pienet valmistuskustannukset	Tehokkuus, paljon tutkimuksia	Mahdollisesti tiellä kuormatessa	
Sisennetty boat-tail	0,6-1,5 m	0,05	Vain pienet valmistuskustannukset	Yksinkertainen rakenne	Tehokkuus laskee liukukulman kasvaessa, pitkä rakenne	
Perän suorat levyt	0,5-1,0 m	0,04	Vain pienet valmistuskustannukset	Taivuttaminen helppoa, hyvin yksinkertainen	Ei niin tehokas, varsinkaan liukukulman kasvaessa	
Ilmatäytteinen umpinainen boat-tail	1,0-1,5 m	0,045	Valmistuskustannukset, pienet käyttökustannukset	Turvallinen	Vaatii toimilaitteet täyttöön ja tyhjennykseen, pinnan täytyy olla tiivis	
Ilmatäytteinen avonainen boat-tail	0,4-0,8 m	0,04	Valmistuskustannukset, pienet käyttökustannukset	Turvallinen, lyhyt	Vaatii toimilaitteet täyttöön ja tyhjennykseen, pinnan täytyy olla tiivis	
Aktiivinen virtauksen hallinta	0,3-0,6 m	0,03-0,10	Kallein ratkaisu, jatkuvat käyttökustannukset	Hyvin lyhyt konstruktiio, suuri potentiaali	Vaatii jatkuvan paineimen tuoton, kalliimpi	