

RASTU Raskas ajoneuvokalusto:  
Turvallisuus, ympäristöominaisuudet ja uusi  
tekniikka 2006 – 2008

Ajoneuvotekniikan keinot  
energiatehokkuuden parantamiseksi

*Tutkija Osku Kaijalainen, TKK*

*osku.kaijalainen@tkk.fi*



# 4 diplomityötä

- 2006: Juha Nyholm: Raskaan kaluston aerodynamiikan kehittäminen
- 2007: Henri Ritola: Raskaan kaluston perävaunujen kevytrakennetekniikka
- 2007: Mikko Lehessaari: Moduuliyhdistelmän stabiliteetin parantaminen renkaiden avulla
- 2009: Kimmo Killström: Keinot raskaankaluston ilmanvastuksen puolittamiseen / Kuorma-auton aerodynaamisen vastuksen pienentäminen



# Juha Nyholm: Raskaan kaluston aerodynamiikan kehittäminen

- Kirjallisuusseelvitys
  - Ilmanvastuksen suuruus saavuttaa vierintävastuksen n. 80-90 km/h nopeudella → huomattava parannuspotentiaali maantienopeuksilla
  - Linja-autoissa mahdollista 20-30 % parannus ilmanvastuskertoimeen, peräpäällä suurin merkitys
  - Kuorma-autoilla vielä suurempi parannuspotentiaali, rajoittavana tekijänä vähäiset muotoilumahdollisuudet ja auton toiminnallisuuden heikkeneminen
  - Vesisumun ehkäisemiseen on olemassa tehokkaita ratkaisuja

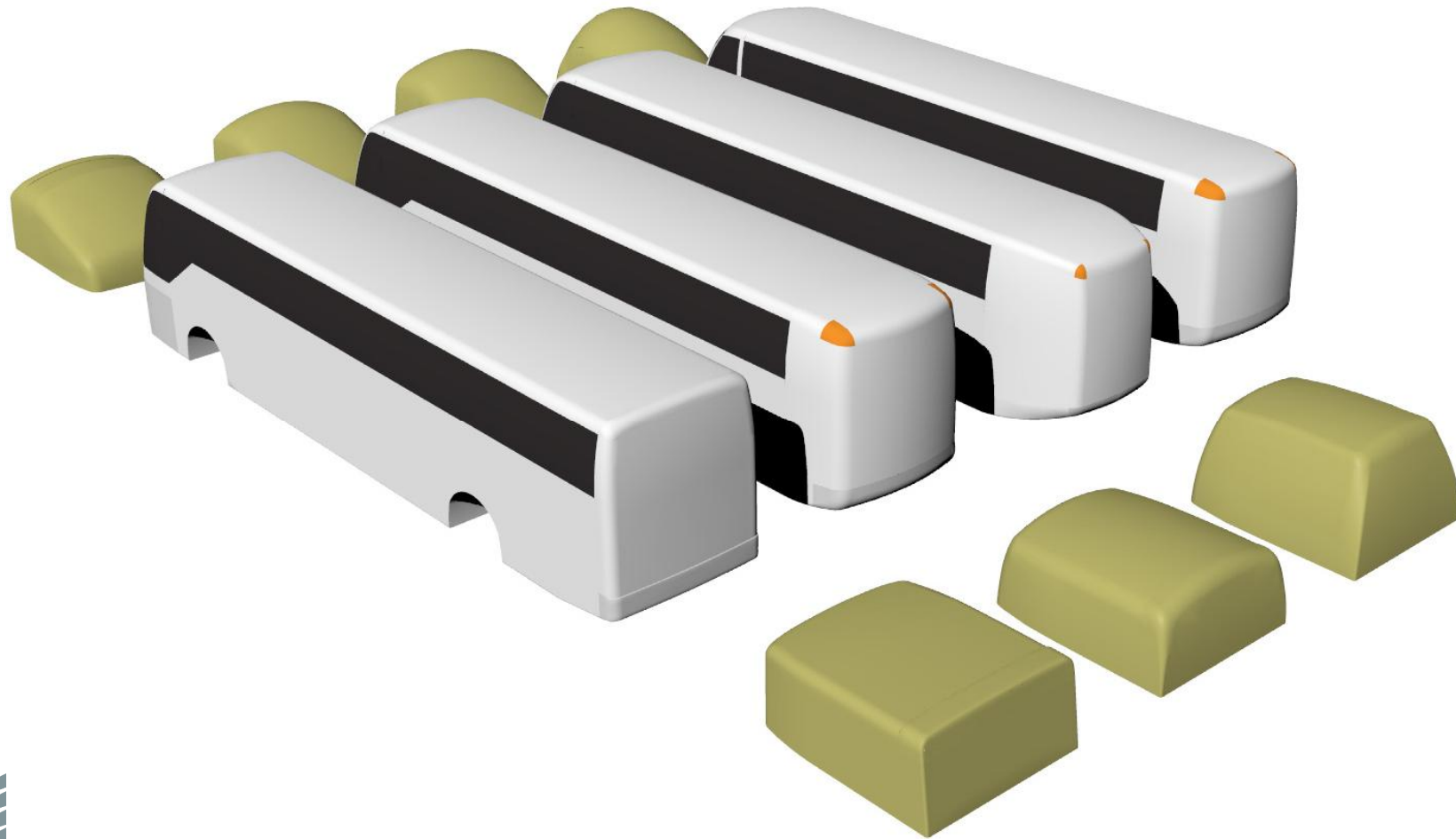


# Tuulitunnelimittaukset

- Mallin mittakaava 1:10
- Mitattiin 4 erilaista keulaa ja 3 erilaista perää
  - Yhteensä 10 yhdistelmää
- Käytetyt liukukulmat -25, -20, -10, 0, 10, 20 ja 25 astetta
- Virtausnopeus 61m/s, vastaa oikealla autolla nopeutta 22km/h
- Korjaukset
  - Virtausnopeus vakio → ajonopeus muuttuu liukukulman muuttuessa
  - Seinämien vaikutus poistettiin laskennallisesti

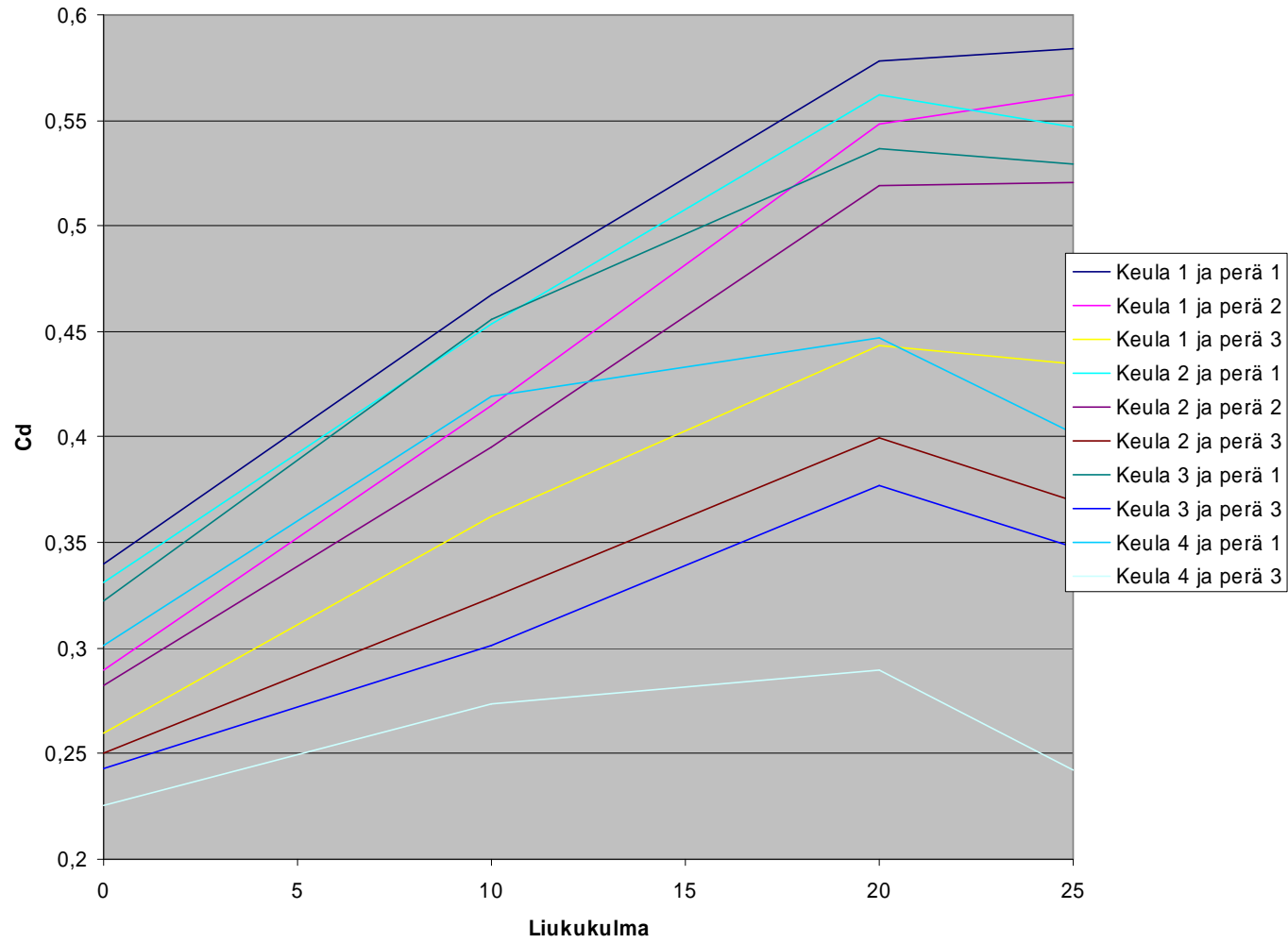


# Tuulitunnelimallit

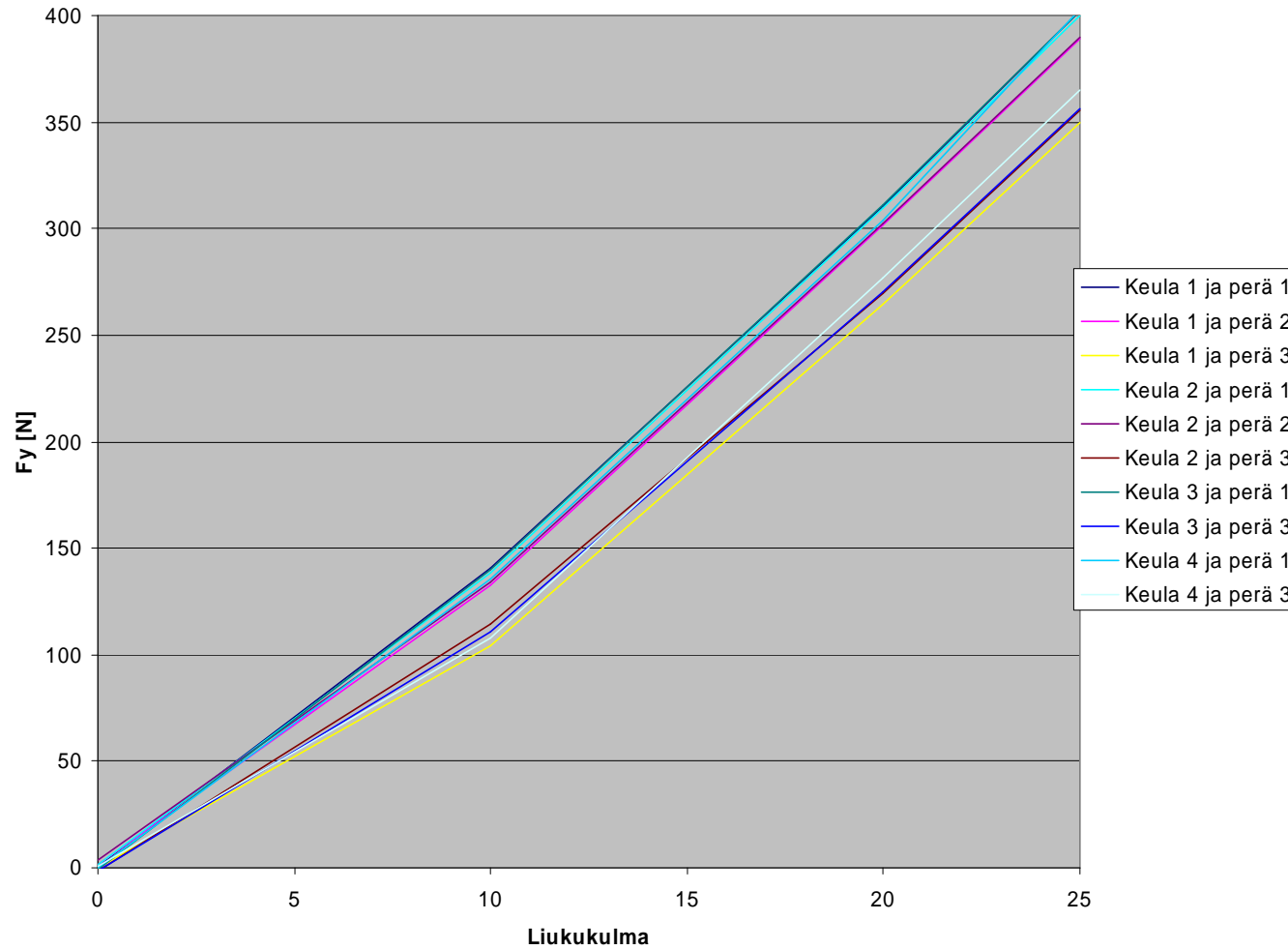




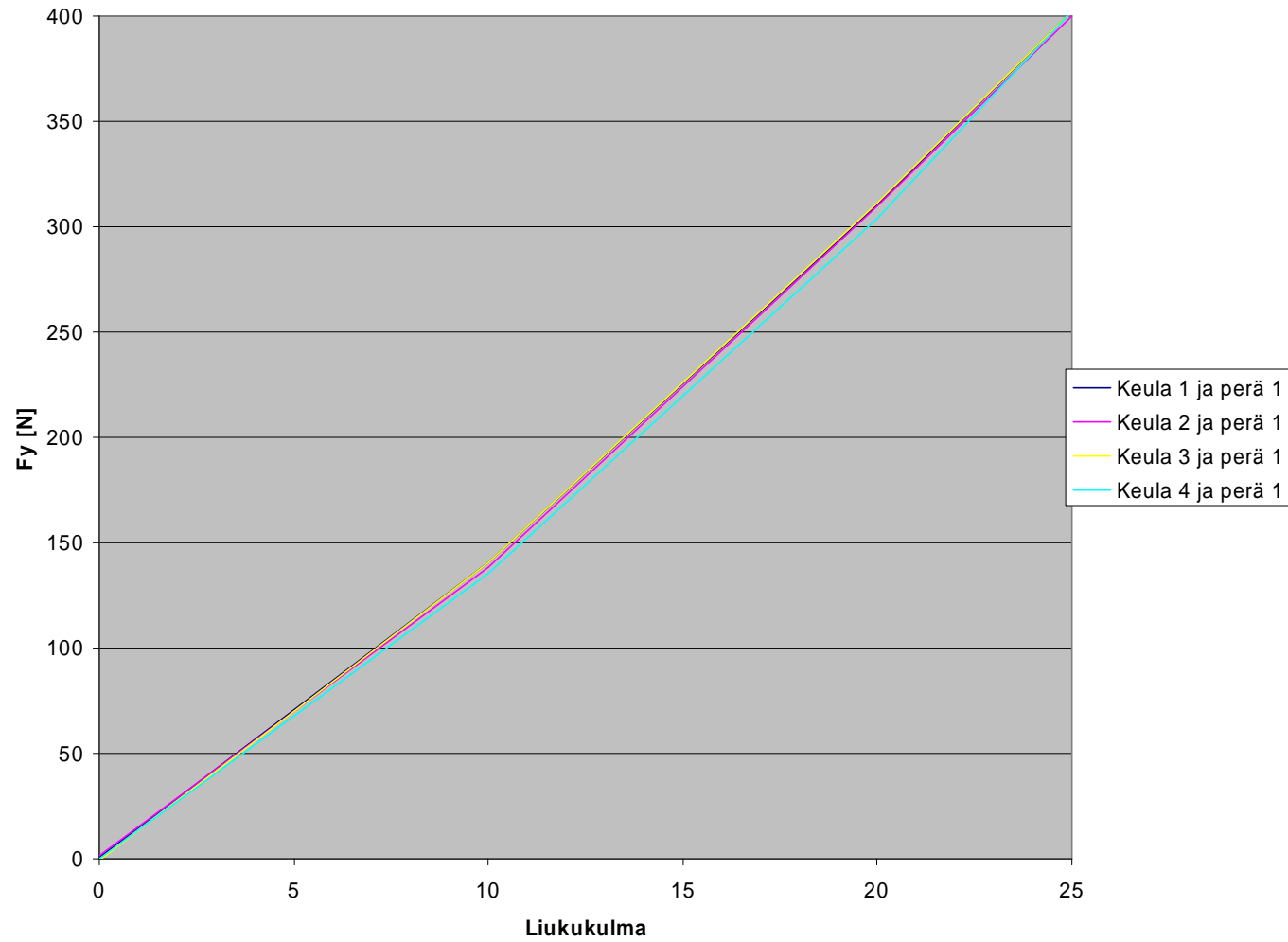
# Vastuskertoimet



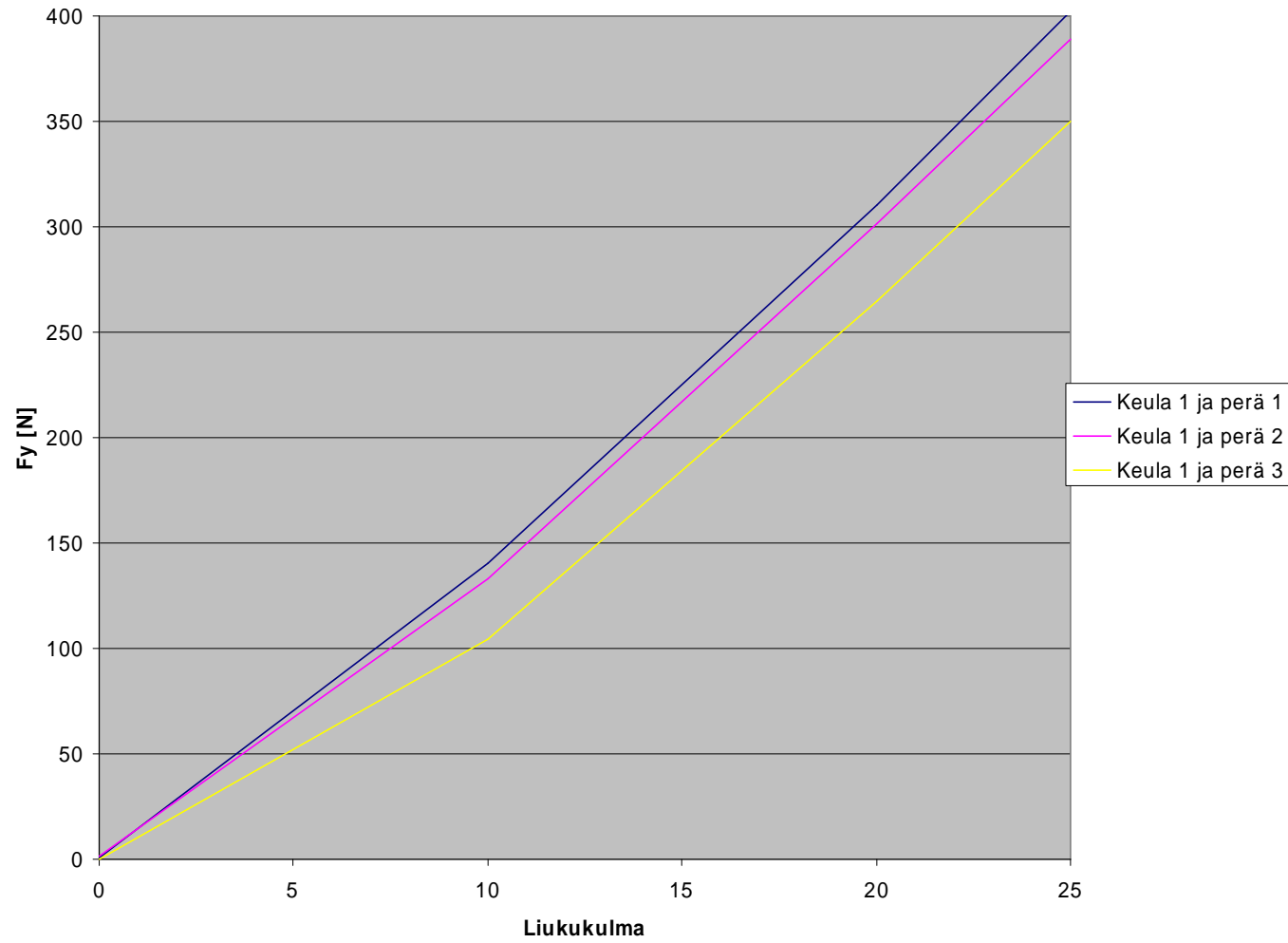
# Poikittaisvoimat



# Poikittaisvoimat



# Poikittaisvoimat



# Tulokset

- Mikäli keula on jokseenkin optimoitu, saadaan suuri parannus sekä ilmanvastukseen että sivuvoimaan perää muotoilemalla  
→ *suunnittelussa huomio kannattaa kiinnittää perään*
- Tuulilasin kallistuksella ei huomattavaa vaikutusta



# Henri Ritola: Raskaan kaluston perävaunujen kevytrakennetekniikka

- Kevennyksen hyödyt
  - Tärkein käyttökohde kappaletavarakuljetukset (suurin hyöty)
  - Suurempi hyötykuorma
  - Polttoainesäästö (kuljetettu tonnikipometri)
  - Turvallisuus
  - Tiestön kuluminen
  - Päästöt
- Tyypillisin puoliperävaunu Suomessa 24 t, jossa katteena irtopeite:
  - Suurin osa ulkomaisilta valmistajilta, vain murto-osa kotimaisia
  - V. 2006 puolipererien tyhjäpainon keskiarvo *6 418 kg*
- Tyypillisimmät täysperävaunut Suomessa:
  - 4-akseliset, kokonaismassa 36 t, keskiarvo v. 2006 oli *10 833 kg*
  - 5-akseliset, kokonaismassat 38 t, 40 t, 42 t, keskiarvo v. 2006 oli *11 620 kg*
  - Melkein puolet kalustosta eristetyllä umpikorilla



# Omamassan koostuminen keskimäärin

- Puoliperävaunu (42 t)
  - Sivusta aukeava eristetty
  - Omamassa 9000 kg (10000 kg)
  - Alusta 5250 kg
    - Runko 2900 kg
    - Akselit/jousitus 1500 kg
    - Renkaat 700 kg
    - Lisävarustus 50 kg
    - Muuta 100 kg
  - Päällirakenne 3750 kg
  - (Kylmäkone 1000 kg)
- Täysperävaunu 5-aks. (42 t)
  - Omamassa 10600 kg
  - Alusta 8400 kg
    - Runko 4300 kg
    - Akselit/jousitus 2500 kg
    - Renkaat 1150 kg
    - Lisävarustus 300 kg
    - Muuta 150 kg
  - Päällirakenne 2200 kg



# Käytössä olevat kevennysvaihtoehdot

- Alumiini yleisin kevennysmateriaali
  - 25 vuotta sitten 0,4 % kalustosta, vuonna 2000 yli 14 %
- Putkipalkit
- Suurlujuusteräkset
- Komposiitit
  - Kerrosrakenteet
- Muovit

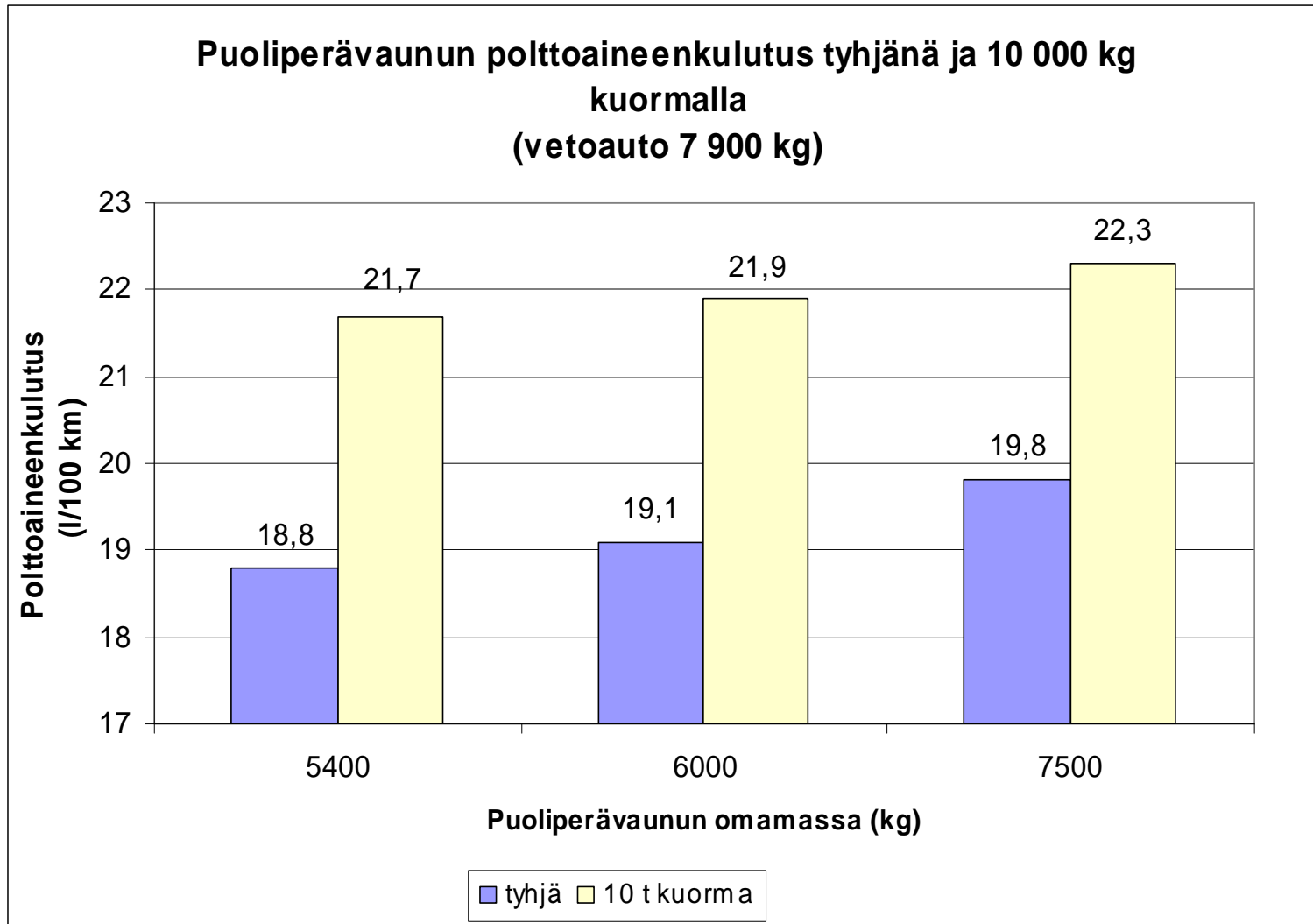


# Simuloinnit

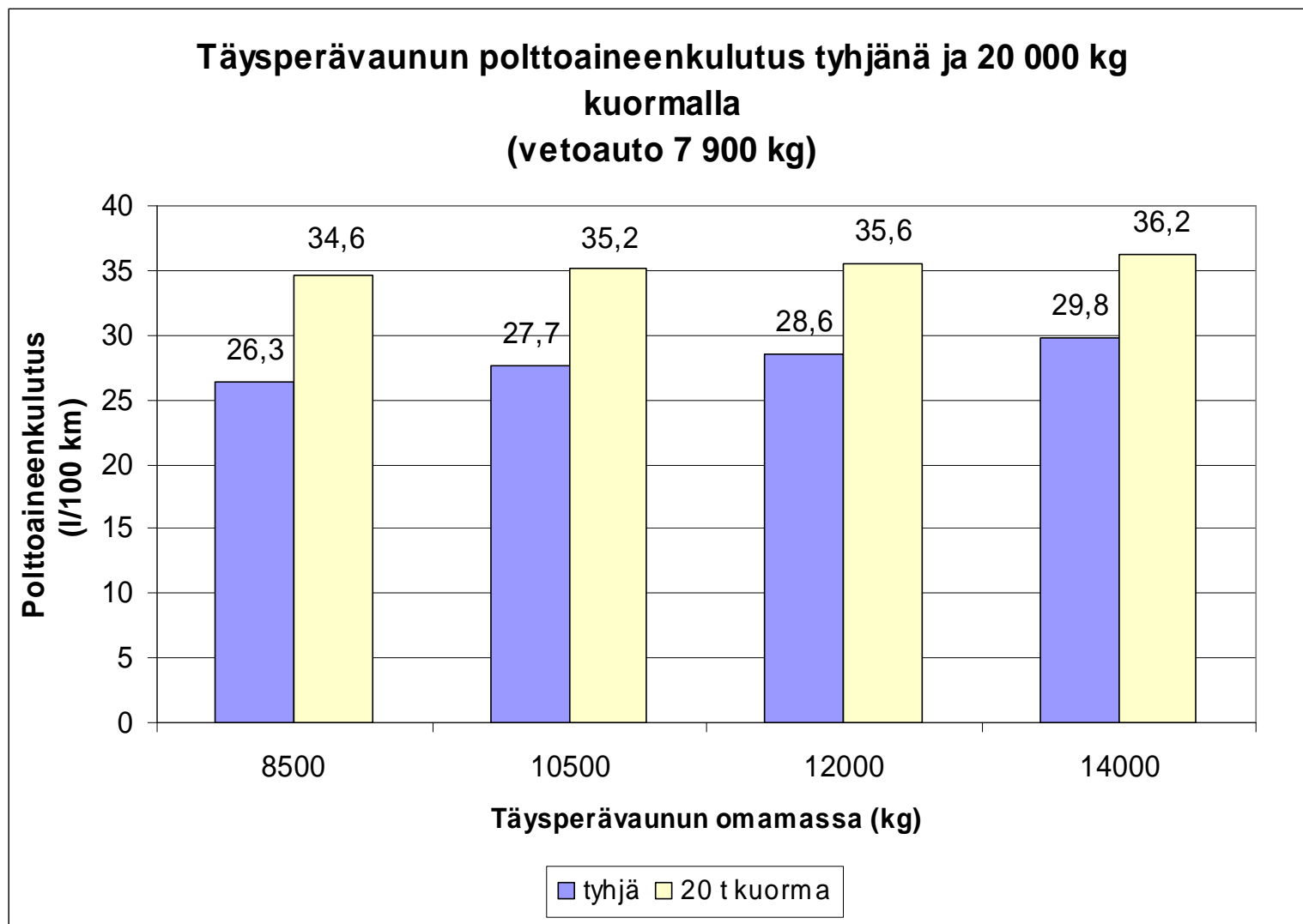
- ADVISOR-ohjelmalla
- Scanian mallit Antti Lajusen DI-työstä: "Ajotavan vaikutuksen simulointi polttoaineen kulutukseen"
- VTT:n Moottoritie –ajosykli
- Simuloinnit puoli- ja täysperävaunuyhdistelmillä
  - Polttoaineen kulutuksen vertailu perävaunun eri omamassoilla tyhjänä ja kuormattuna
- Laskelmat puoli- ja täysperävaunuyhdistelmillä
  - 1 000 milj. tonnikipometriä → vaadittava kalusto perävaunun eri omamassoilla



# Simuloitu polttoaineen kulutus



# Simuloitu polttoaineen kulutus



# Ajoneuvomäärät 1 000 milj. tonnikipometrin kuljetuksessa 400 km matkalla

Perävaunun omamassa (kg)		Tarvittava määrä yhdistelmiä (kpl)				Suomi
Puoliperävaunu	Täysperävaunu	Puoliperävaunuyhd.	Ero seuraavaan	Täysperävaunuyhd.	Ero seuraavaan	pp 24 % tp 76 %
3 000	4 500	75 758	5 942	52 521	4 818	58 098
<b>5 400</b>	<b>8 500</b>	81 699	<b>1 634</b>	57 339	<b>2 757</b>	63 186
<b>6 000</b>	<b>10 500</b>	83 333	4 386	60 096	2 248	65 673
7 500	12 000	87 719	4 873	62 344	3 273	68 434
9 000	14 000	92 593		65 617		72 091

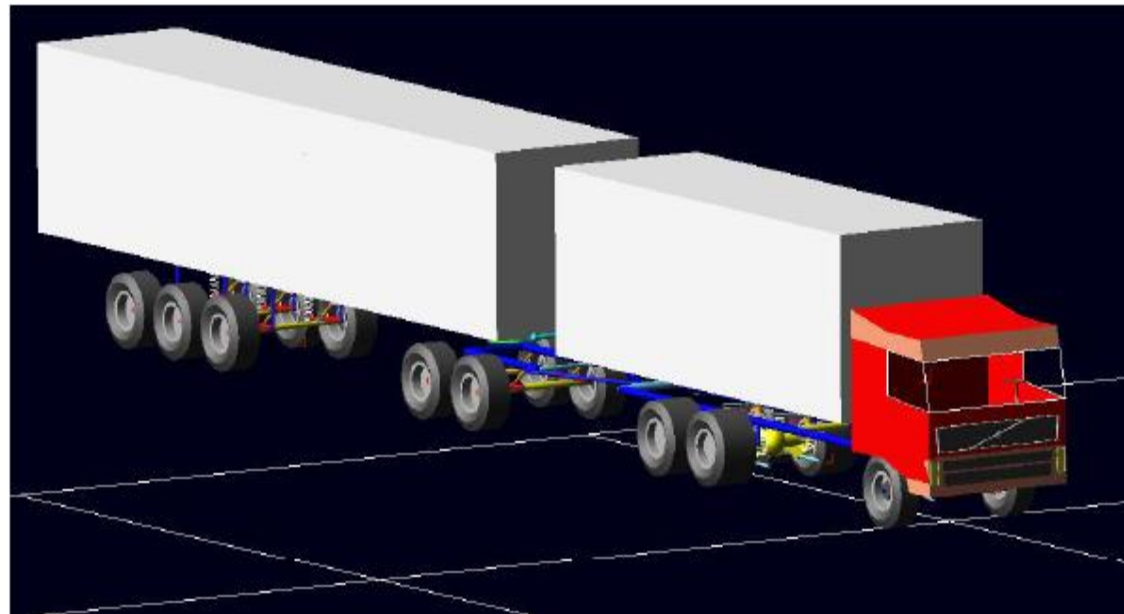
- Puoliperävaunuyhdistelmä: 1 634 yhdistelmää kulutuksella 35 l/100 km\*  
= n. 229 000 litraa
- Täysperävaunuyhdistelmä: 2 757 yhdistelmää kulutuksella 52 l/100 km\*  
= n. 570 000 litraa



\* Keskimääräinen polttoaineen kulutus täydellä kuormalla (VTT)

# Mikko Lehessaari: Moduuliyhdistelmän stabiliteetin parantaminen renkaiden avulla

- Kuorma-auton, apuvaunun ja puoliperävaunun yhdistelmä
  - Noin moduulimitat
    - Massa noin 57,8 tonnia
    - Kokonaispituus 24,4 metriä



# Onnettomuudet ja turvallisuus

- VTT:n selvityksen mukaan
  - Onnettomuuksia, joissa on mukana perävaunullinen kuorma-auto tapahtuu vuosittain noin 270 kpl.
  - 70 % onnettomuuksista, joissa perävaunullinen kuorma-auto on pääsyyllisenä, tapahtuu talvella
  - Noin 30 % tapauksissa, joissa yhdistelmä on ollut syyllinen, renkaat ovat olleet huonossa kunnossa
    - *Renkailla voidaan vaikuttaa noin 30 onnettomuuteen vuodessa*
- Turvallisuutta voidaan parantaa esimerkiksi
  - Parantamalla liikennejärjestelyitä
  - *Parantamalla ajoneuvon hallittavuutta*
    - *STABIILIUS*



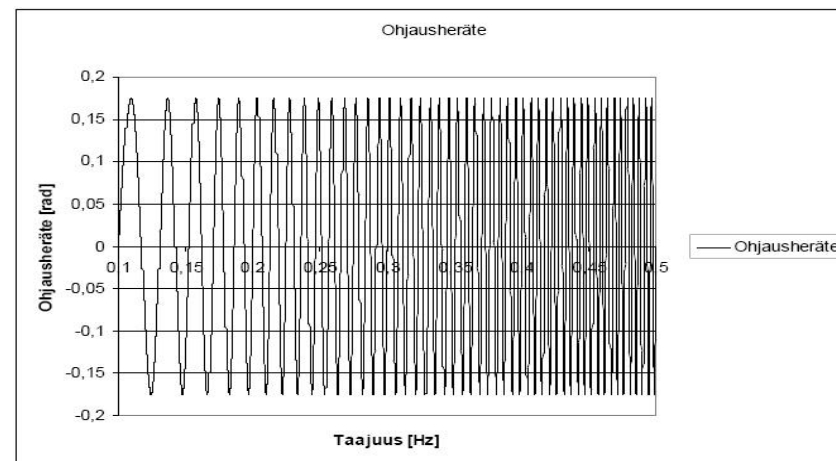
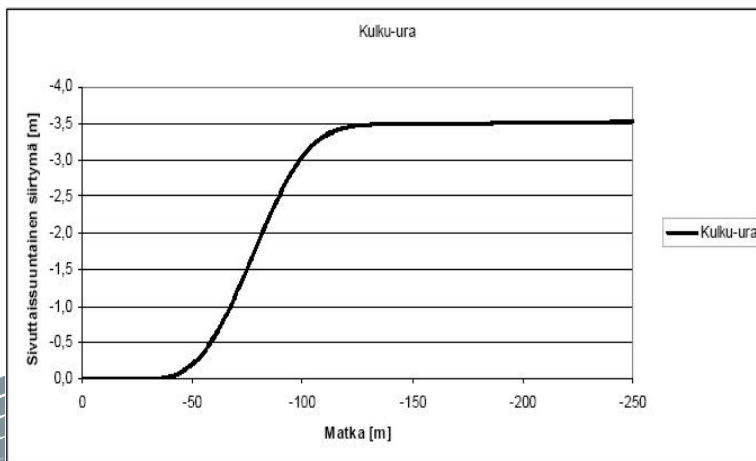
# Stabiiliuteen voidaan vaikuttaa

- Ajonopeudella
- Kuormaustavalla
- Ajoneuvon rakenteella
  - Perävaunun pituus
  - Akseleiden lukumäärä
  - Ohjaavia vai kiinteitä akseleita
  - *Renkailla*
    - *Laatu*
    - *Kuluneisuus*
- Stabiiliuden mittaaminen
  - Työssä keskitytty perävaunun ja apuvaunun heilahteluihin
  - *Mitataan sortokulmia*
    - Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvoa käytetty paljon, mutta koska kuorma-autolla ja perävaunulla täysin erilainen rakenne ja käyttäytyminen → Ei järkevää verrata keskenään



# Simulointi

- MSC.ADAMS-ohjelmalla
- Kaistanvaihtoja
  - Sivuttaissiirtymä 3,5 m
  - Kahdella eri nopeudella 50 km/h ja 80 km/h
  - Kolme eri kaistanvaihtoaikaa 4 s, 6,3 s ja 9 s
- Siniaalto-ohjauseräte ajokokeita
  - Ohjauserätteen taajuus kasvaa lineaarisesti ajan suhteen
  - Ohjausvaste riippuu rengastuksesta, ajonopeudesta ja kaistanvaihtoajasta



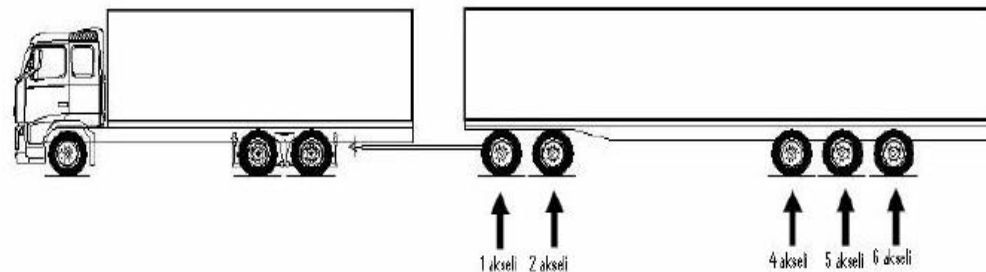
# Tuloksia

- Oikeanlaisella rengastuksella voidaan pienentää heilahtelua noin 40 % verrattuna rengastukseen, jossa kaikki renkaat ovat kuluneita
- Vaihtamalla kaikki renkaat uusiin saatiin paras tulos lähes kaikissa ajokokeissa
  - Kallista!
- Pyrittiin löytämään optimaalinen ratkaisu
  - Mahdollisimman vähän uusia renkaita, mahdollisimman paljon vaikutusta perävaunun heilahteluun



# Tuloksia

- "Uusi 1"
  - Huono kaikissa simuloinneissa
- "Uusi 2"
  - Pienentää heilahtelua reilusti räväköissä kaistanvaihdoissa, lisäksi parantaa perävaunun heilahtelun vaimenemista kaikissa kaistanvaihdoissa
- "Uusi 6"
  - Pienentää heilahtelua reilusti rauhallisemmissa kaistanvaihdoissa
- "Uusi 2 6"
  - Pienentää heilahtelua reilusti kaikissa kaistanvaihdoissa, lisäksi parantaa perävaunun heilahtelun vaimenemista kaikissa kaistanvaihdoissa
- Lähes kaikki rengasvaihtoehdot simuloitiin, mutta nämä mainitsemisen arvoisia

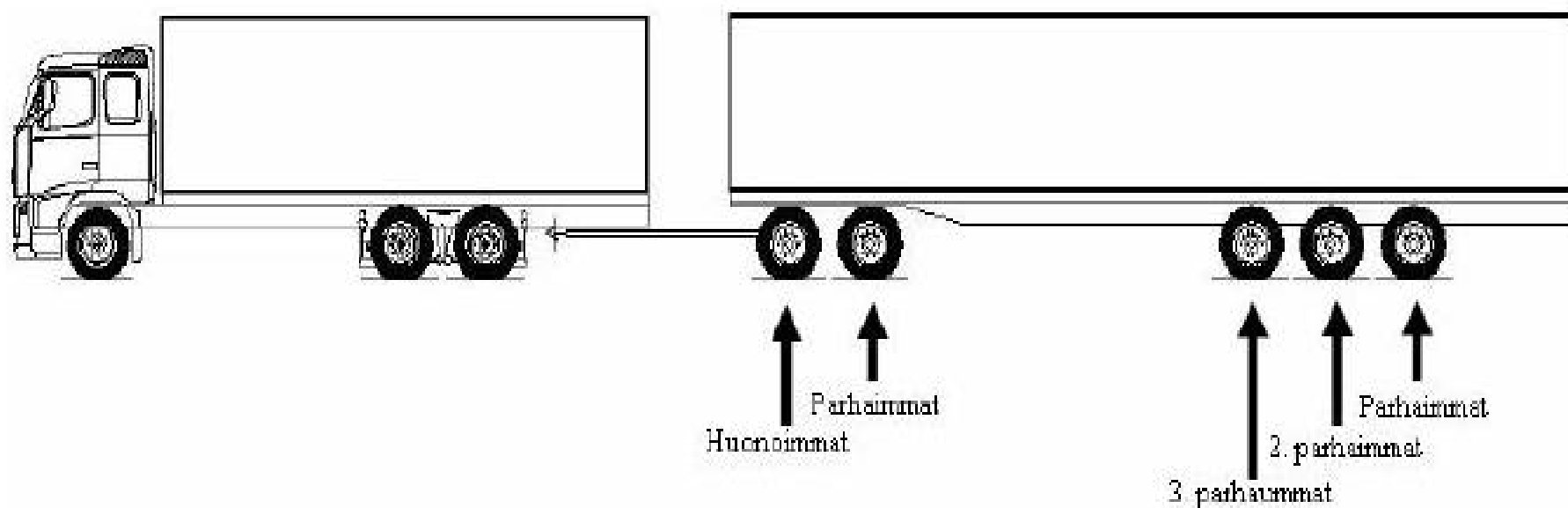


Kuva 53 Akseleiden nimeäminen



# Suositus

- Parhaat renkaat yhdistelmän *jokaisen ajoneuvoyksikön taka-akselille*
  - Henkilöautoille suositellaan parempien renkaiden asennusta taka-akselille



Kuva 83 Rengastussuositus



# Kimmo Killström: Kuorma-auton aerodynaamisen vastuksen pienentäminen

- Työn tarkoituksena oli perehtyä raskaan maantieajoneuvokaluston aerodynamiikan parantamiseen, kun ideoinnissa joustetaan käytännön rajoitteiden osalta.
- Vain kilpa-autot suunniteltu aerodynamiikan ehdoilla, normaaleissa ajoneuvoissa
  - Muodon määrää toiminnallisuus, muodon taloudellisuus ja estetiikka.
  - Kuorma-autojen evoluutio paljastaa aerodynaamisen kehityksen keskittyneen viime vuosikymmeninä yhdistelmän etupäähän: ohjaamoon ja kuormatilan etureunaan.
  - Tilavuuden maksimointi lain sallimissa rajoissa on vääjäämättä johtanut nykyisiin ratkaisuihin.
- Tavoitteena oli vastuskertoimen puolittaminen nykyisin vallitsevasta arvosta.
- Työssä keskitytään käytössä olevaan 60000 kg:n varsinaiseen perävaunuyhdistelmään, joiden ilmanvastuskerroin on suurin hyötyajoneuvojen joukossa.



# Kuorma-auton vastus

- Vastusta ei voi poistaa kokonaan mistään virtauksen kanssa vuorovaikutuksessa olevasta kappaleesta
  - Jotta hyötysuhde olisi maksimaalinen, virtauksen tulisi pysyä kappaleessa kiinni kauttaaltaan laminaarisena
  - Kuorma-auton vastusta voidaan ennen kaikkea pienentää modifioimalla keulan ja takapään muotoja
- Tavoitteena on vähentää keskimääräistä keulan etuosan painetta ja kasvattaa keskimääräistä peräpainetta → paine-eron minimointi
- Yksinkertaisetkin seikat vaikuttavat: kuormatilojen pintojen suoruus, laatu ja puhtaus
- Aerodynaamisen vastuksen minimoimiseksi on virtauksen luonne tunnettava. Kun paikalliset olosuhteet ovat tiedossa, pyritään virtausta ohjaamaan myötävirtaan mahdollisimman pienin energiahäviöin
  - Kuorma-auton vastuksen pienentämisessä on kyse kokonaisuudesta
  - Yksittäisen osan aerodynaaminen parantaminen saattaa pienentää vastusta tarkasteltavassa kohdassa, mutta samalla myötävirrassa olevan osan vastus voi pahimmassa tapauksessa kasvaa



# Tuulitunnelimallit

- Vastusmittauksia varten valmistettiin 2 tuulitunnelimallia
  - Referenssimalli jäljittelee pääpiirteiltään nykyisin käytössä olevia varsinaisia täysperävaunuyhdistelmiä
  - Alhaiseen vastuskertoimeen tähtäävä modulaarinen modifioitu malli, jossa osa aerodynaamisista muodoista on viety tarkoituksenmukaisesti äärimmäisyyksiin
    - Modifioidun mallin tapauksessa käytännön rajoitteet oli alunperin tarkoituksena jättää huomiotta, mutta suunnittelussa on kuitenkin jossain määrin pyritty pitämään mielessä täysikokoisen aerodynaamisen yhdistelmän toteuttamiskelpoisuus
- Kaiken kaikkiaan voimamittauksia suoritettiin 7 eri mallikombinaatiolle
- Tuloksista laskettiin vastuskerroin, tuulitunnelikorjaus ja korjattu vastuskerroin

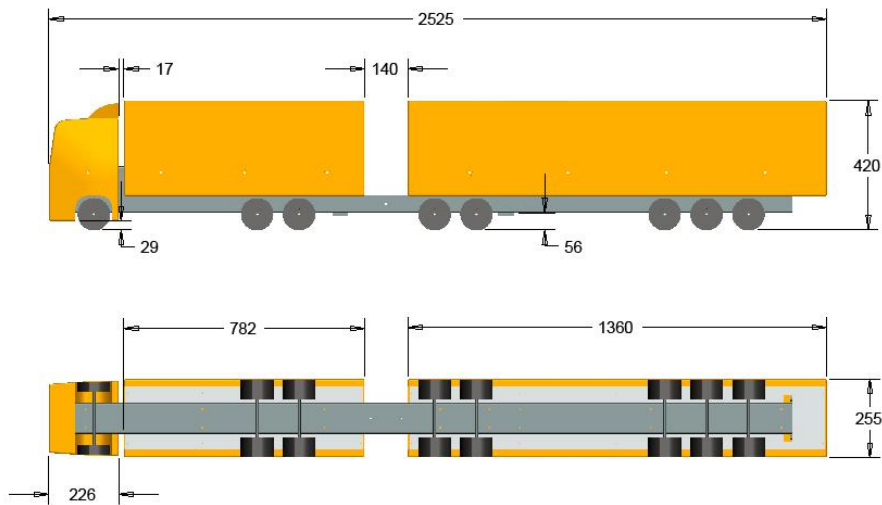
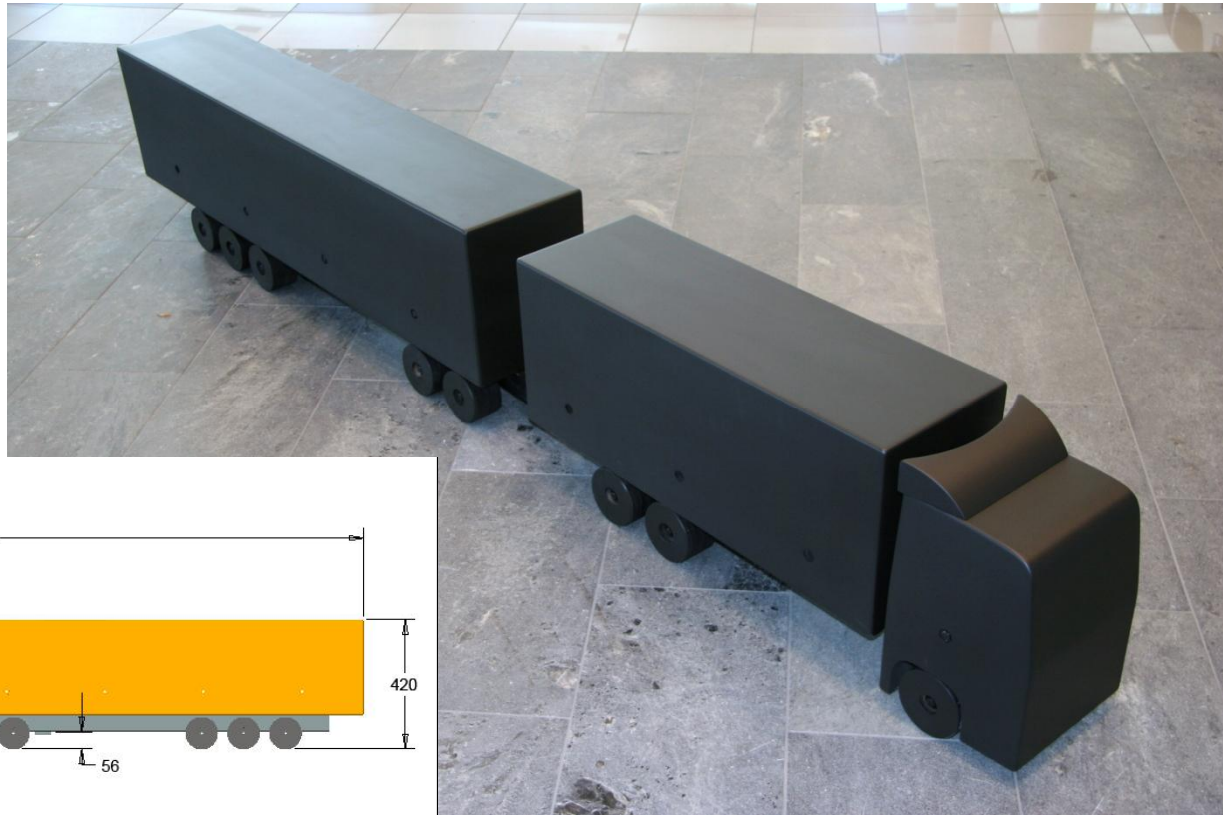


# Modifioitu malli

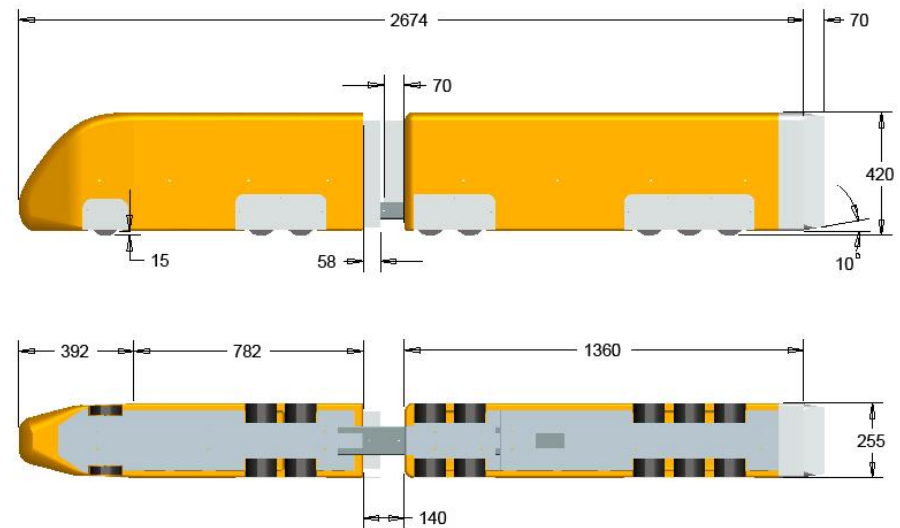
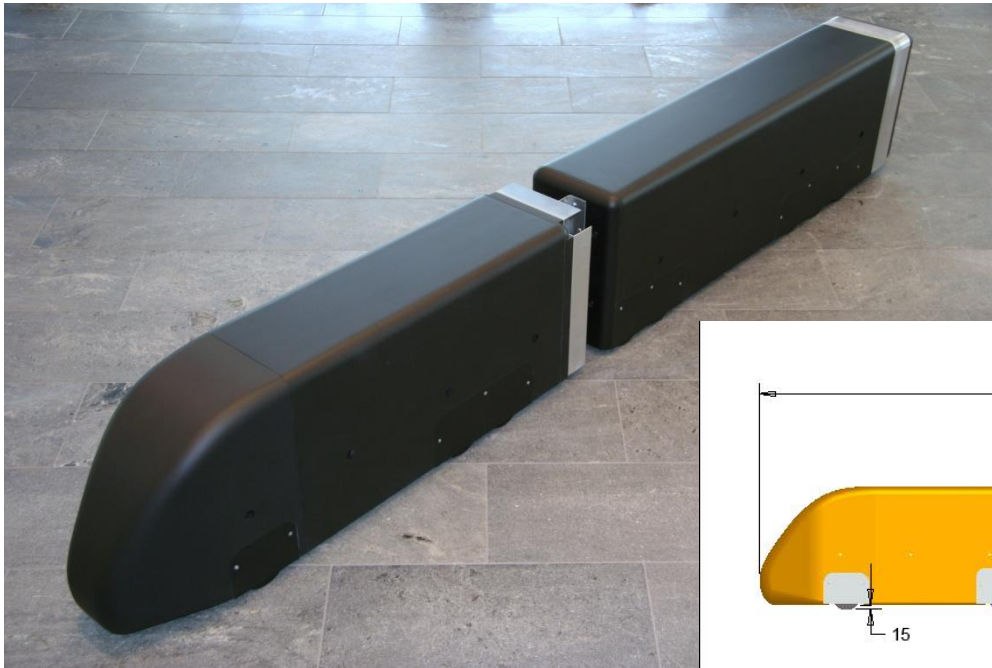
- Ohjaamon muotoihin haettiin vaikutteita luotijunan keulasta
- Ohjaamo päätettiin jatkaa eteenpäin nykyisestä noin 1,5m
  - Samalla kuljettajan sijoitus on ajateltu keskelle ohjaamo
- Ohjaamon takaseinä siirrettiin kuormatilaan saakka, jolloin osien välinen rako saatiin poistettua
- Ohjaamon nuolimuotoa kasvatettiin 15 asteeseen. Kulmapyöristykset on mitoitettu Reynoldsin luvun mukaan siten, että virtaus irtoaisi maantienopeuksissa mahdollisimman vähän
- Kuormatilojen väliin asennettiin takareunareunalaipat ja virtausaita
  - Vaihtoehtoisesti väli voidaan sulkea kokonaan
- Yhdistelmän perään suunniteltiin 3 erilaista muotoa: 10° takareunalaipat, takareunakaaret sekä varsinainen boat-tail
  - Näistä 2 ensin mainittua on mahdollista käyttää myös peräpuhalluksella



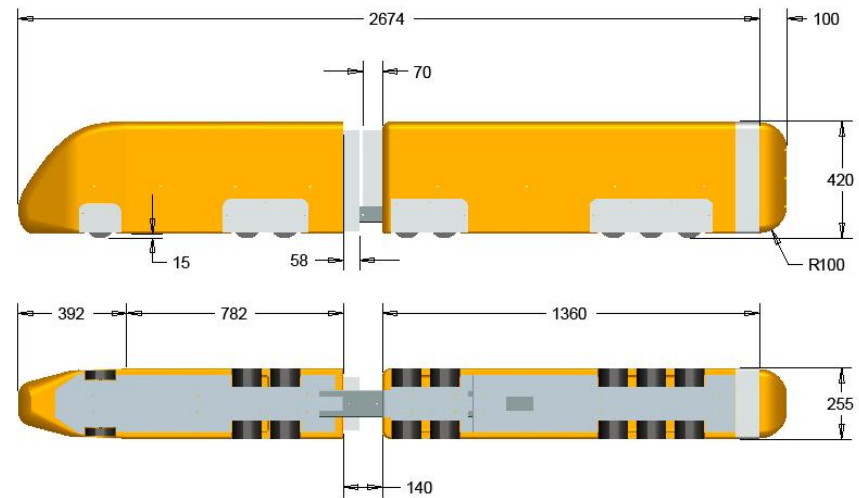
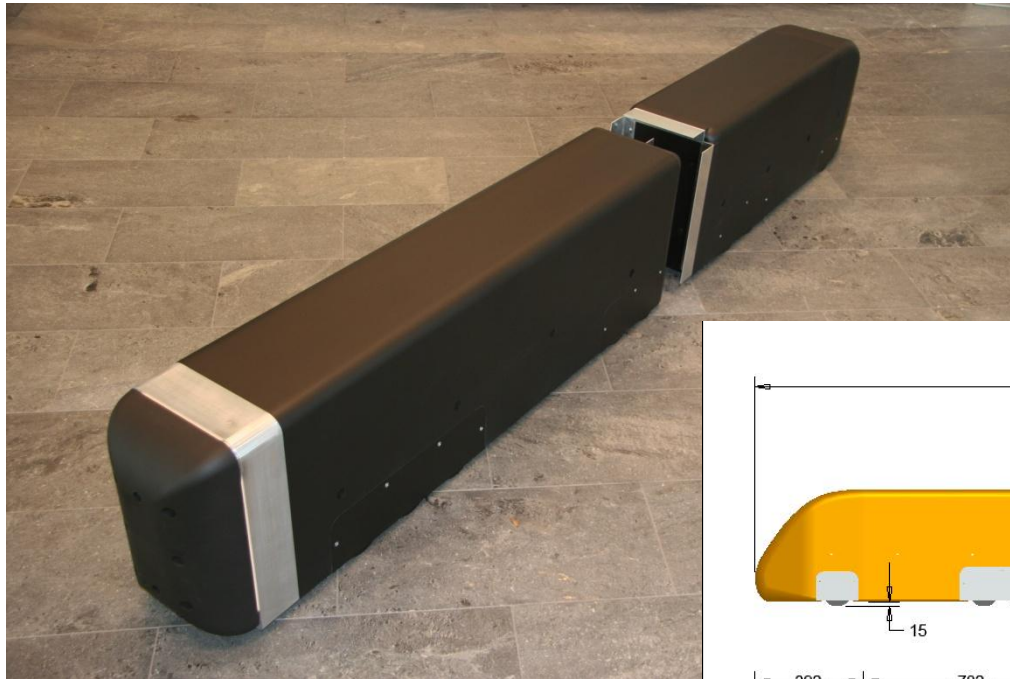
# Tuulitunnelimalli, referenssi



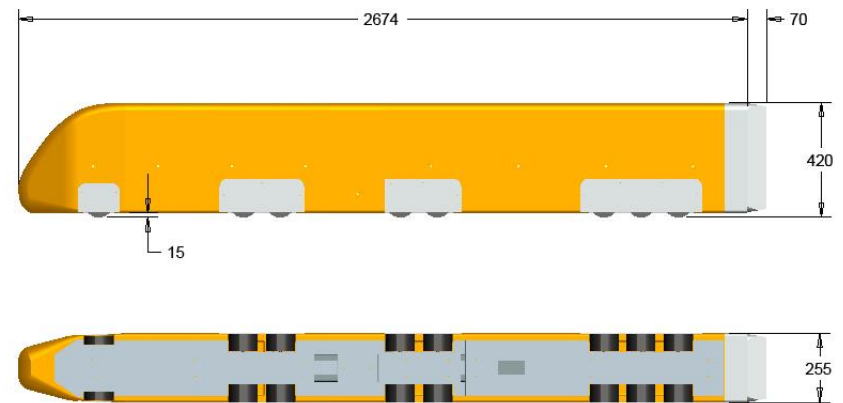
# Tuulitunnelimallit, modifioitu1



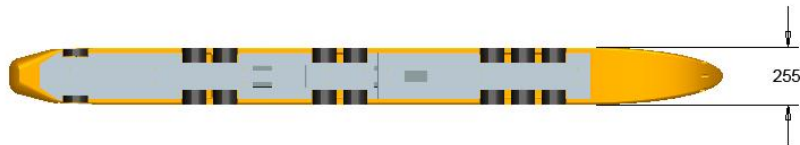
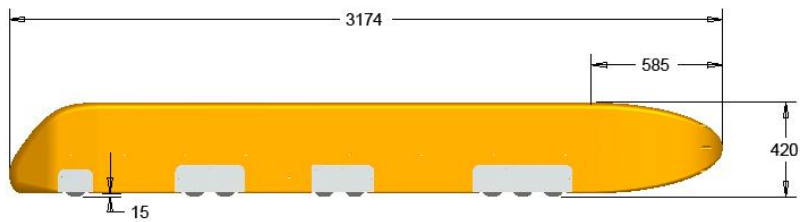
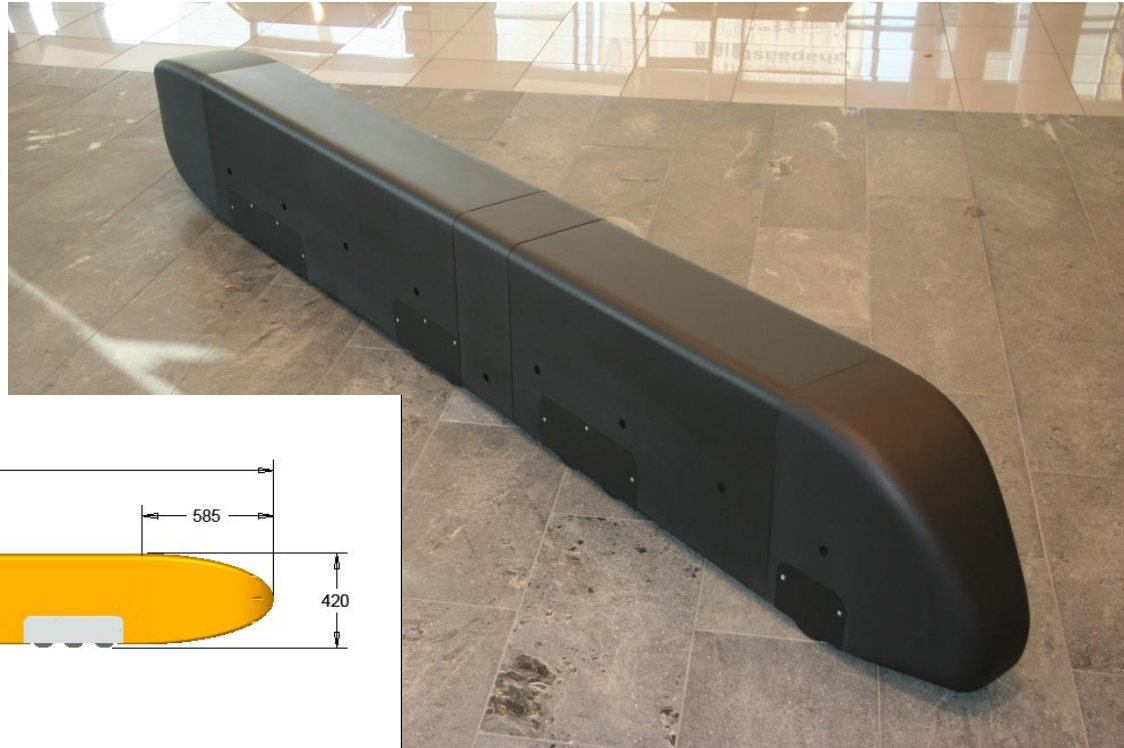
# Tuulitunnelimallit, modifioitu2



# Tuulitunnelimallit, modifioitu3

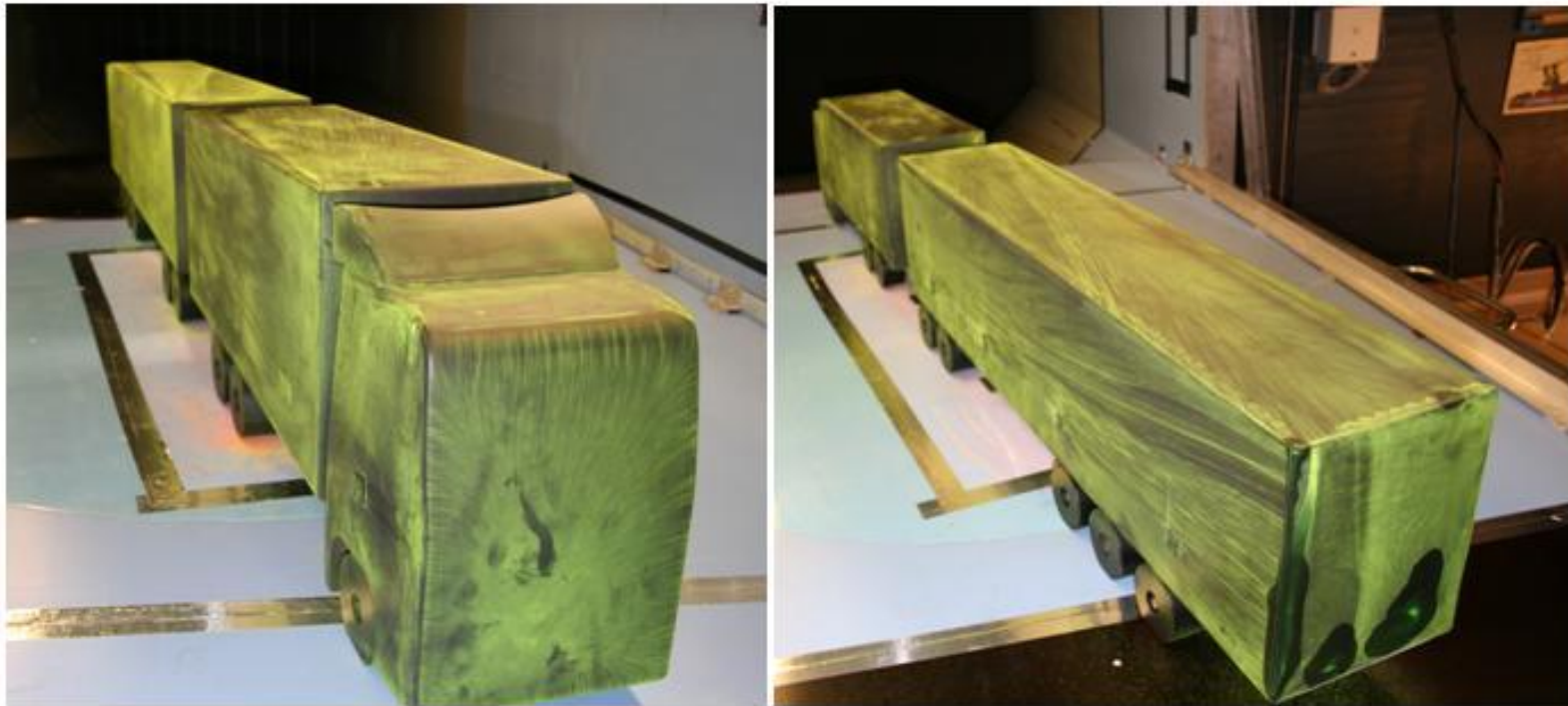


# Tuulitunnelimallit, modifioitu4



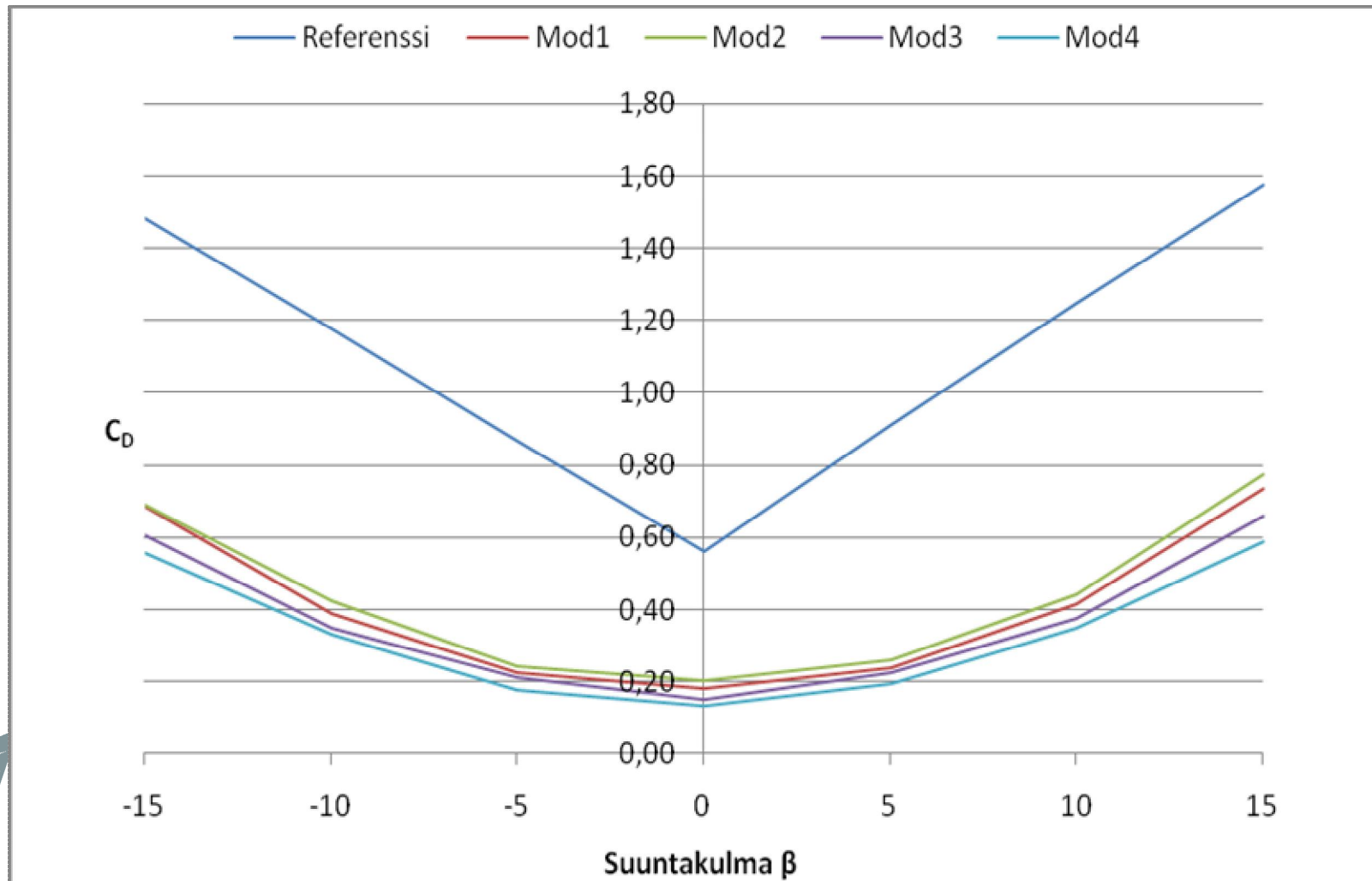
# Tuulitunnelikokeet

- vastusarvot mitattiin viiden asteen suuntakulmaporrastuksen arvoilla  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ , ja  $15^\circ$ .
- Kaikki mallit mitattiin vähintään kahdella eri nopeudella, 40 m/s ja 45 m/s.



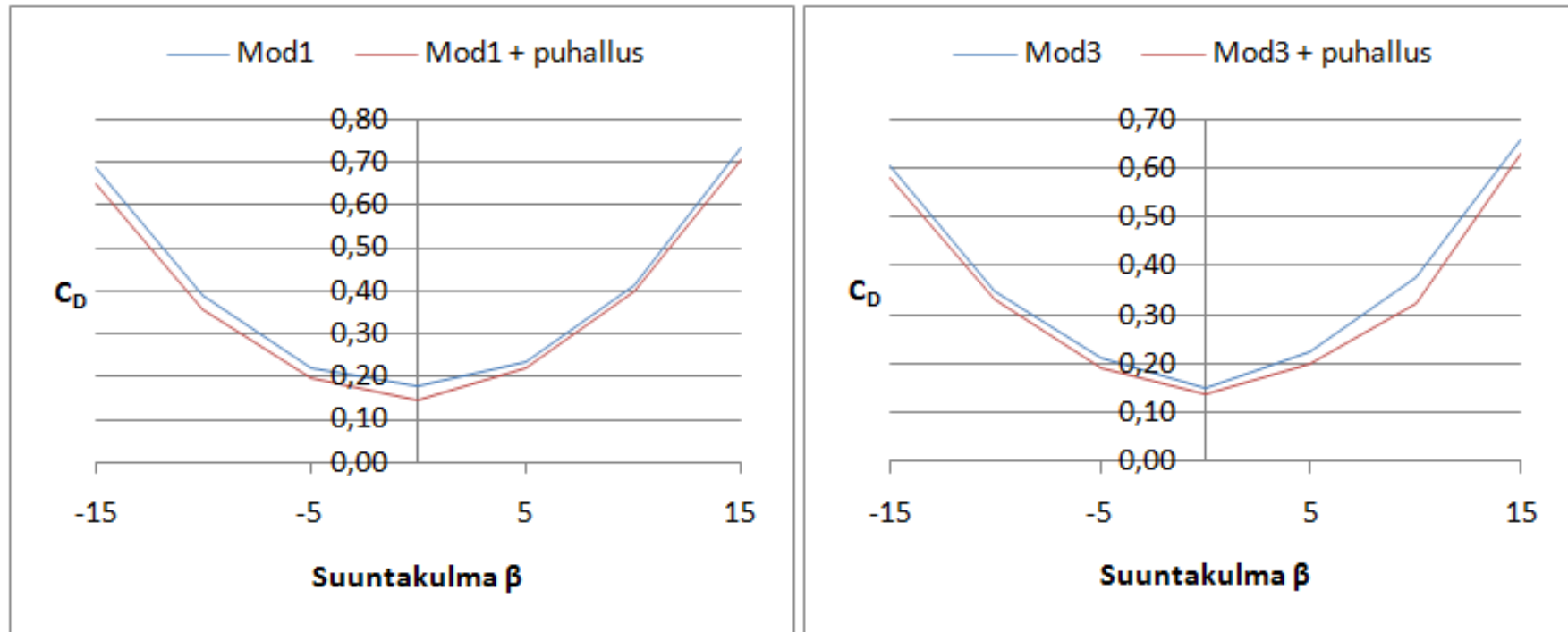
# Tuloksia

Kaikki mallit



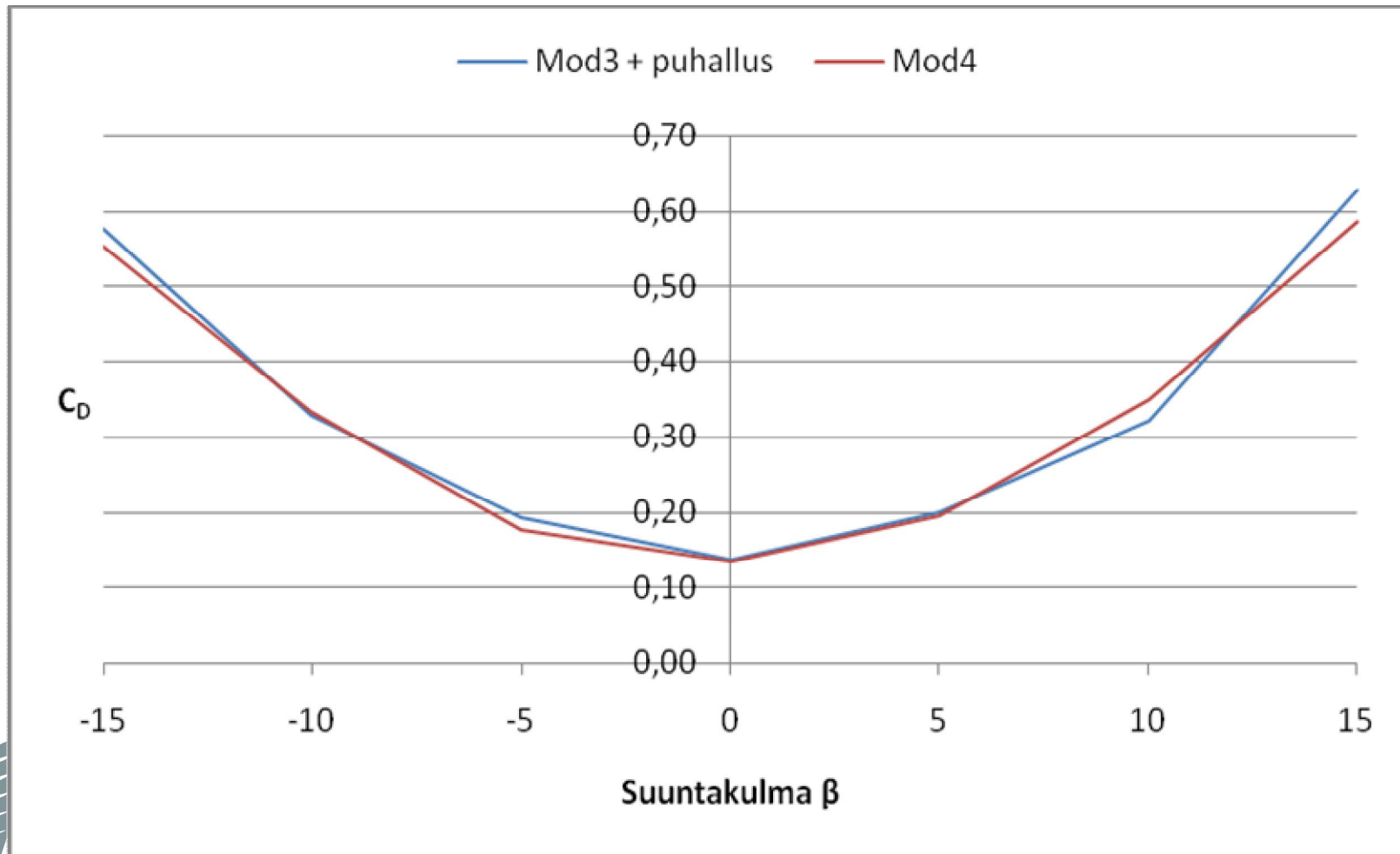
# Tuloksia

peräpuhallus on/off



# Tuloksia

Mod3 puhalluksella vs. Mod4



# Tuloksia

- Aerodynaamisten yhdistelmien vastuskertoimet ovat odotetusti huomattavasti referenssiä pienempiä
- Parhaimpaan tulokseen päästiin varsinaisella boat-tail-perällä varustetulla Mod4-mallilla. Sen vastuskerroin on yli 76 % referenssiä pienempi suuntakulmalla nolla

