



**TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO**

*Konetekniikan koulutusohjelma*

**JANNE LAAKSO**

**AJOSIMULAATTOREIDEN LIIKEALUSTAN**

**TOTEUTTAMISVAIHTOEHTOJEN TARKASTELU**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Kari T.  
Koskinen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Konetekniikan osastoneuvoston  
kokouksessa 18. huhtikuuta 2007

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma / Hydraulikka ja automatiikka

**LAAKSO, JANNE:** Ajosimulaattoreiden liikealustan toteuttamisvaihtoehtojen tarkastelu

Diplomityö, 65 sivua, 9 liitesivua

Heinäkuu 2010

Pääaine: Hydraulikka ja automatiikka: Tietotekniikka

Tarkastaja: professori Kari T. Koskinen

Avainsanat: Simulointi, mallinnus, hydraulikka, liikealusta, ajosimulaattori

Ajosimulaattori on monitieteinen sovellus, jonka useat alijärjestelmät muodostavat monimutkaisen kokonaisjärjestelmän. Tampereen teknillisen yliopiston hydraulikan ja automatiikan laitoksella on useita vuosia tehty tutkimusta liittyen ajosimulaattoreiden useisiin eri alijärjestelmiin. Tässä työssä on kerätty yhteen useita ajosimulaattoreihin liittyvien projektien osa-alueita, joihin tämän työn kirjoittaja on osallistunut.

Tässä työssä on esitetty perustiedot ajosimulaattorien historiasta, sekä niissä yleisesti käytetyistä alijärjestelmistä. Lisäksi tässä työssä on käsitelty syvällisemmin ajosimulaattoreiden liikealustoja, sekä erään projektin yhteydessä toteutettua pientyökoneen simulointimallia.

Liikealustan käyttö on hyvin yleistä huipputason ajosimulaattoreissa. TTY:llä, hydraulikan ja automatiikan laitoksella, toteutettiin erään projektin yhteydessä kartoitus erilaisista liikealustoista ja niiden toiminnasta. Tässä työssä on esitelty erilaisia liikealustojen toteutusvaihtoehtoja, sekä niiden ominaisuuksia.

Ajosimulaattorin ydinosa on simuloitavan ajoneuvon ajoneuvomalli. Eräässä projektissa TTY:llä hydraulikan ja automatiikan laitoksella toteutettiin pientyökoneen simulaattori vesihydraulisella liikealustalla. Simulaattorin ajoneuvomallin toteutus vaatii monimutkaisten poikkitieteellisten järjestelmien yhteensovittamista. Tässä työssä on esitelty tämä ajosimulaattori, sekä yksityiskohtaisemmin siihen toteutettu pientyökoneen simulointimalli.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Machine Technology

**LAAKSO, JANNE:** Study of driving simulator motion platform alternatives

Master of Science Thesis, 65 pages, 9 Appendix pages

July 2010

Major: Hydraulics and automation: Computer science

Examiner: Professor Kari T. Koskinen

Keywords: Simulation, Modelling, hydraulics, motion platform

Driving simulator is a interdisciplinary application, of which subsystems create an complicated system. At institute of hydraulics and automation, of Tampere University of technology, research concerning driving simulator subsystems has been done for several years. This work is a summary of parts from multiple projects, concerning driving simulators, in which author of this thesis has participated.

In this work, basic information about driving simulators, and commonly used subsystems have been presented. In addition, this work introduces more details about motion platforms of driving simulators and a small mobile machine simulator implemented as a part of a project at TUT/IHA.

Using a motion platform is very common in high-level driving simulators. At TUT/IHA a survey different kind of motion platforms and motion platform's characteristics were researched during a project. In this work, motion platform alternatives and qualities have been introduced.

The core of a driving simulator is model of the vehicle to be simulated. In a project, at TUT/IHA, a small mobile machine simulator with water hydraulics motion platform was introduced. Vehicle model of the simulator requires connecting of complicated and multi-science subsystems. In this work, this mobile machine simulator and vehicle model used in detail have been introduced.

## ALKUSANAT

Diplomityö toteutettiin Tampereen Teknillisen Yliopiston Hydraulikan ja Automaation laitoksella liittyen useisiin ajosimulaattori-, sekä liikealusta-projekteihin vuosina 2006-2007.

Kiitokset Sarille, Eerikalle, Joonalle ja Samulille loputtomasta kärsivällisyydestä ja motivoinnista tämän työn valmistumiseksi. Kiitokset myös työn tarkastajalle, professori Kari T. Koskiselle, ja korvaamattomasta tuesta Markus Rokalalle, Tuija Paloselle ja Mika Hyvöselle, sekä muille työyhteisön jäsenille IHA:n laitoksella. Erityiskiitokset myös vanhemmilleni, sekä appivanhemmilleni lapsenhoitoavusta tämän projektin loppuunsaattamiseksi.

Toholammilla, Kesäkuu 2010

Janne Laakso  
Kirkkojärventie 96  
69300 Toholampi  
email: [mrlaakso@gmail.com](mailto:mrlaakso@gmail.com)  
puh: 050-4441187

## SISÄLLYS

Tiivistelmä .....	II
Abstract .....	III
Alkusanat .....	IV
Lyhenteet ja merkinnät.....	VI
1. Johdanto .....	1
2. Ajosimulaattorit ja niiden sovellukset.....	2
2.1. Ajosimulaattorin historia.....	3
2.2. Ajosimulaattorin alijärjestelmät .....	6
2.3. Ajosimulaattorit ammattikäytössä.....	9
3. Liikealustan käyttö ajoneuvon liikkeiden mallinnukseen.....	12
3.1. Ajoneuvon kuljettajaan kohdistuvat voimavaikutukset .....	12
3.2. Ihmisen aistimat liikkeet .....	14
3.3. Kiihtyvyyden voimavaikutusten toteuttaminen liikealustan avulla .....	15
3.4. Kiihtyvyyksien laskennallinen toteuttaminen ja raja-arvot.....	19
4. Hydraulikäyttöisen pientyökoneen simulaattori .....	21
4.1. Simulaattorin rakenne .....	21
4.2. Mobilekoneen simulointimalli .....	22
4.3. Mekaanisten järjestelmien mallinnus .....	25
4.4. Hydraulisten järjestelmien mallinnus.....	34
4.5. Vesihydraulinen Stewart-liikealusta .....	51
5. Pientyökoneen simulaattorin toiminnan testaus.....	54
6. Lähteet.....	63
Liite 1: Avant 216 Simulointimallin mekaanisen järjestelmän Simulink®-kuvaus .....	66
Liite 2: Avant 216 puomin simulink®-kuvaus .....	67
Liite 3: Renkaan ja maaston välisen interaktion Simulink®-kuvaus.....	68
Liite 4: Rengasmallin simulink®-kuvaus .....	69
Liite 5: Avant 216 hydraulisen järjestelmän ylin Simulink®-kuvaus .....	70
Liite 6: Tilavuuden ja kuristuksen Simulink®-kuvaukset .....	71
Liite 7: Venttiilimallin Simulink®-kaaviot.....	72
Liite 8: Sylinterimallin Simulink®-kuvaus.....	73
Liite 9: Avant 216 simulointimallin liitännät ulkoisiin järjestelmiin.....	74

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$F_k$	Renkaan kautta maahan kohdistuma voima	[N]
$F_z$	Maaston renkaaseen aiheuttama tukivoima	[N]
$V_x$	Nopeus	[m/s]
$M_y$	Momentti renkaan akselin ympäri	[Nm]
$F_x$	Renkaan ja maaston välinen liikevoima	[N]
$F_\mu$	Renkaan sivuttaissuunnan kitkavoima	[N]
$y$	Nestekerroksen paksuus	[m]
$A$	Pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta V$	Tilavuuden muutos	
$B_n$	Nesteen puristuskerroin	[Pa]
$p_0$	Paine ennen puristumaa	[Pa]
$p_1$	Paine puristuman jälkeen	[Pa]
$B_{eff}$	Tehollinen puristuskerroin	[Pa]
$B_p$	Putkien ja sylinterin seinämien puristuskerroin	[Pa]
$B_l$	Letkujen puristuskerroin	[Pa]
$V_p$	Putkien tilavuudet	[m <sup>3</sup> ]
$V_l$	Letkujen tilavuudet	[m <sup>3</sup> ]
$t$	Putken tai sylinterin seinämävahvuus	[m]
$d$	Putken tai sylinterin kammion halkaisija	[m]
$Q_{in}$	Sisääntuleva tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
$\Sigma Q$	Tilavuusvirtojen summa	[m <sup>3</sup> /s]
$p_1$	Paine ennen kuristusta	[Pa]
$p_2$	Paine kuristuksen jälkeen	[Pa]
$\mu$	Purkautumiskerroin	
$K_v$	Kuristuskerroin	
$v_{max}$	Sulkuelimen suhteellinen liikenopeus	[1/s]
$u$	Venttiilin ohjaus	
$p_a$	Paine venttiilin portissa a	[Pa]
$p_b$	Paine venttiilin portissa b	[Pa]
$p_t$	Paine venttiilin portissa t	[Pa]
$p_s$	Paine venttiilin portissa s	[Pa]
$Q_a$	Tilavuusvirta venttiilin portin a läpi	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_b$	Tilavuusvirta venttiilin portin b läpi	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_t$	Tilavuusvirta venttiilin portin t läpi	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_s$	Tilavuusvirta venttiilin portin s läpi	[m <sup>3</sup> /s]
$l$	Sylinterin iskunpituus	[m]
$p_1$	Paine sylinterin kammiossa 1	[Pa]
$p_2$	Paine sylinterin kammiossa 2	[Pa]
$A_1$	Sylinterin pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$A_2$	Sylinterin pinta-ala männänvarren puolella	[m <sup>2</sup> ]

$F_{\mu}$	Sylinterin sisäinen kitka	[N]
$F_{syt}$	Sylinterin tuottama voima	[N]
$v_{syt}$	Sylinterin liikenopeus	[m/s]
$Q_1$	Tilavuusvirta sylinterin kammioon 1	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_2$	Tilavuusvirta sylinterin kammioon 2	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_L$	Vuotovirtaus sylinterin kammioiden välillä	[m <sup>3</sup> /s]
$V_1$	Sylinterin kammion 1 tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$V_2$	Sylinterin kammion 2 tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$V_{01}$	Sylinterin kammion 1 kuollut tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$V_{02}$	Sylinterin kammion 2 kuollut tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$x$	Sylinterin männän asema	[m]
<b>TTY</b>	Tampereen teknillinen yliopisto	
<b>TUT</b>	Tampere university of technology	
<b>IHA</b>	Institute of hydraulics and automation (Hydrauliikan ja automatiikan laitos)	
<b>VTI</b>	Ruotsin kansallinen tie- ja kuljetus instituutti	
<b>NADS</b>	National advanced driving simulator, Iowan yliopiston kehittämä ajosimulaattori	
<b>HYSIM</b>	Highway driving simulator. 80-luvulla kehitetty ajosimulaattori.	
<b>LCD</b>	Nestekidenäyttö, Liquid Crystal Display	
<b>HMD</b>	Virtuaalikypärä, Head-mounted display	
<b>AKE</b>	Ajoneuvohallintakeskus	
<b>DOF</b>	Vapausaste, degree of freedom	
<b>LAN</b>	Lähiverkko, local area network	
<b>UDP</b>	Tietokoneiden välinen tiedonsiirtoprotokolla, user datagram protocol	
<b>LVDT</b>	Linear variable differential transformer	

# 1. JOHDANTO

Vuosina 2006-2007 toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston hydraulikan ja automatiikan laitoksella useita projekteja liittyen ajosimulaattoreiden liikealustoihin. Tässä työssä on kartoitettu erilaisia liikealustavaihtoehtoja simulaattorikäyttöön, sekä esitelty tarkemmin eräs kehitteillä oleva mobilekonesimulaattori.

Ammattikäyttöön suunnitelluissa simulaattoreissa asetetaan usein korkeita vaatimuksia järjestelmän todenmukaisuudelle. Ajosimulaattorin tulisi kyetä toistamaan oikean ajoneuvon liikkeiden aiheuttamat voimavaikutukset mahdollisimman realistisina. Tähän tarkoitukseen on kehitetty useita eri tyyppisiä liikealustoja. Jäljiteltävän ajoneuvon luonne, simulaattorin käyttötarkoitus, sekä haluttu kustannusta määräävät usein valitun liikealustatyyppin.

Ajosimulaattori on monimutkainen kokonaisuus, jossa sovelletaan yhteen useita eri tieteenaloja. Huipputason simulaattoria ei voida toteuttaa vain yhden osa-alueen toteutuksella, vaan usein tarvitaan kaikkien alijärjestelmien korkeatasoista toteutusta ja niiden yhteensovittamista. Tampereen Teknillisellä Yliopistolla on pitkään kuljettu kehityksen aallonharjalla simulointitekniikassa ja vesihydrauliikassa. Luonnollinen seuraava askel on yhdistää nämä osaamisalueet yhdeksi vesihydraulista liikealustaa hyödyntäväksi ajosimulaattoriksi.



## 2. AJOSIMULAATTORIT JA NIIDEN SOVELLUKSET

Simuloinnilla tarkoitetaan yleensä todellisuuden jäljittelyä. Ajosimulaattori on simuloinnin sovellus, jossa pyritään jäljittelemään varsinaisen ajoneuvon käyttäytymistä mahdollisimman tarkasti. Ajosimulaattoreita käytetään yleisesti tuotekehityksen tukena, huvikäytössä, tieteellisessä tutkimuksessa, sekä koulutuksessa.

Useat ajoneuvotehtaat käyttävät ajosimulaattoreita tuotekehityksen apuna. Usein on kustannustehokasta kokeilla uusia ominaisuuksia simulaattorin avulla ennen varsinaisten prototyyppien valmistusta. Tätä menetelmää kutsutaan virtuaaliprototypoinniksi.

Huvikäyttöön ajosimulaattoreita sovelletaan etenkin tietokone- ja konsolipeleissä. Usein huvipuistoissa tai suurissa yleisötapahtumissa on nähtävillä myös erilaisia simulaattoreita, kuten rallisimulaattori tai vuoristoratasimulaattori. Nämä simulaattorit ovat yleensä passiivisia, eli niissä käyttäjät ovat ainoastaan laitteen kyydissä, eivätkä osallistu ajotapahtumaan mitenkään.

Ajosimulaattoria voidaan soveltaa myös tieteelliseen tutkimukseen. Tällöin voidaan soveltaa tilanteita, mitä oikeilla ajoneuvoilla ei voida turvallisesti tutkia. Simulaattorilla voidaan myös toistaa samaa koetta luotettavasti useita kertoja, mikä ei oikeassa liikenteessä aina ole mahdollista.

Ajosimulaattoreiden immersiivisyyden parantamiseksi, useisiin huippusimulaattoreihin on kehitetty kuljettajalle fyysistä palautetta luovia järjestelmiä. Myös yksinkertaisemmissakin huvikäyttöön tarkoitetuissa sovelluksissa, kuten peleissä käytetään hyvin yleisesti voimapalautetta (Force feedback) tuottavia ohjauslaitteita. Tällainen järjestelmä on usein kotikäytössä riittävä: Sen avulla saadaan kuljettajalle palautetta simulaattorin ajoneuvon käyttäytymisestä, ja simulaattorin immersiivisuus paranee huomattavasti.

Käytettäessä ajoneuvosimulaattoria vaativampiin sovelluksiin, kuten kuljettajan koulutukseen, kasvavat myös sen todenmukaisuudelle asetetut vaatimukset. Ihminen on erittäin herkkä aistimaan oikean ajoneuvon liikkeitä, ja saattaa kokea ongelmaksi ajoneuvon liikkeiden tunnon puuttumisen simulaattorissa. Liikkeiden tunteminen liittyy etenkin ajotuntuman kokemiseen, sekä nopeuden ja etäisyyksien hahmottamiseen.

Useissa huippuluokan ajosimulaattoreissa on tunnistettu nämä ongelmat. Ratkaisuksi on kehitetty erilaisia liikealustoja, joiden tarkoituksena on mallintaa oikean ajoneuvon liikkeitä. Ajosimulaattoriin liitettyä liikkeitä tuottavaa järjestelmää kutsutaan liikealustaksi. Kuvassa 2.1 on esitetty Renault ajosimulaattori ja siinä käytettävä liikealusta.



**Kuva 2.1.** Renault'n dynaaminen ajosimulaattori ja liikealusta. [23].

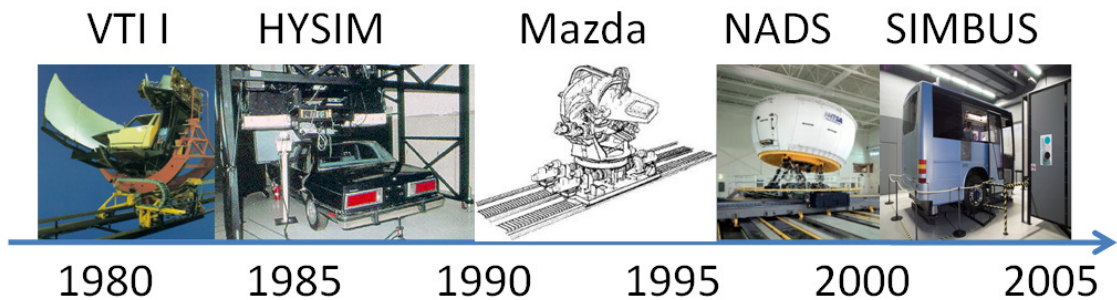
Ajosimulaattoreiden mahdollisuudet kuljettajakoulutuksessa on huomattu myös Suomessa. Liikenneministeriö on päättänyt, että osa linja-auton, tai raskaan ajoneuvoyhdistelmän ajo-opetuksesta voidaan korvata simulaattorissa annettavalla opetuksella. Koulutukseen käytettävän simulaattorin tulee täyttää sille asetetut tekniset ja koulutukselliset vaatimukset. Enimmäismäärä simulaattorilla korvattavasta opetuksesta on linja-autolla 15 tuntia, ja raskaalla ajoneuvoyhdistelmällä 20 tuntia. Liikenne- ja viestintäministeriön tiedotteessa sanotaan myös, että simulaattorin on kyettävä luomaan ajoneuvon kiihtyvyyksistä, jarrutuksista ja ohjauksesta aiheutuvia kiihtyvyyksiä, eli kuljettajan ajokoulutukseen käytettävässä simulaattorissa vaaditaan liikepalautteita tuottavan järjestelmän käyttöä. [13,14]

## 2.1. Ajosimulaattorin historia

Ajosimulaattoreiden juuret ovat 1900-luvun alkupuolella kehitetyissä primitiivisissä lentosimulaattoreissa. Ensimmäiset lentosimulaattorit luotiin hallintalaitteen käytön oppimisen tueksi. Seuraavina vuosikymmeninä lentosimulaattoreita kehitettiin lisäämällä siivet, korkeusperäsin, sekä mittaristot. Tällöin simulaattoreita voitiin jo hyödyntää mittarilennon harjoittelussa. Toisen maailmansodan aikana, analogiset tietokoneet mahdollistivat simulaattoreiden kehittymisen, kuten Richard Dehmelin kehittämän aerodynaamisia vasteita huomioivan simulaattorin. Modernin ajan lentosimulaattorit alkoivat kehittyä 1960-luvun lopulla yhdessä digitaalisten tietokoneiden ja hienostuneempien visualisointikeinojen myötä. [7, 27]

Tietotekniikan kehitys aikojen saatossa on mahdollistanut myös ajosimulaattoreiden huomattavan kehityksen. 2000-luvulla ajosimulaattoreita kehitetään useissa yrityksissä, yliopistoissa ja ajoneuvovalmistajien toimesta. Useimpien modernien ajosimulaattoreiden toteutukset ovat tietokonepohjaisia. Yleisin ajosimulaattorin sovellus on huvikäyttö, kuten tietokone- tai konsolipelit. Tällaisten sovellusten vaatimustaso on yleensä suhteellisen alhainen. Ajosimulaattoreita on sovellettu myös vaativampaan ammattikäyttöön, kuten kuljettajan ajokoulutukseen tai ajoneuvojen tuotekehitykseen. Tietotekniikan kehitys on mahdollistanut yhä realistisemmat ajoneuvomallit, joiden ansiosta ajosimulaattorit soveltuvat monipuolisiin sovelluksiin.

Ensimmäiset versiot varsinaisista ajosimulaattoreista kehitettiin 1970-luvulla General Motorsin ja Virginan Technin toimesta. 20-vuotinen kehitystyö konkretisoitui simulaattorissa, johon sisältyi 16-vapausasteinen ajoneuvomalli, sekä pieni liikealusta. Kuvassa 2.2 on esitetty eräitä eri aikakausien ajosimulaattoreita. [7]



**Kuva 2.2.** Ajosimulaattoreiden aikajana [24, 26, 28].

Ruotsissa kehitettiin 1980-luvulla liikealustalla varustettua simulaattoria Ruotsin kansallisen tie- ja kuljetusalan instituutin (VTI) toimesta. Jo silloin havaittiin, että tärkeä osa ajoneuvon käyttäytymistä on dynaaminen vuorovaikutus ympäristön kanssa. VTI:llä koettiin tärkeäksi myös mahdollisuus simuloida suuria lateraalisia kiihtyvyyksiä. Ainoastaan Volkswagen-konserni oli otannut kehittyneen liikealustan aikaisemmin kuin VTI. Tämä urauurtava simulaattori oli käytössä aina vuoteen 2004 saakka. VTI:n SIM I simulaattori on esitetty kuvassa 2.3. [7, 26, 28]



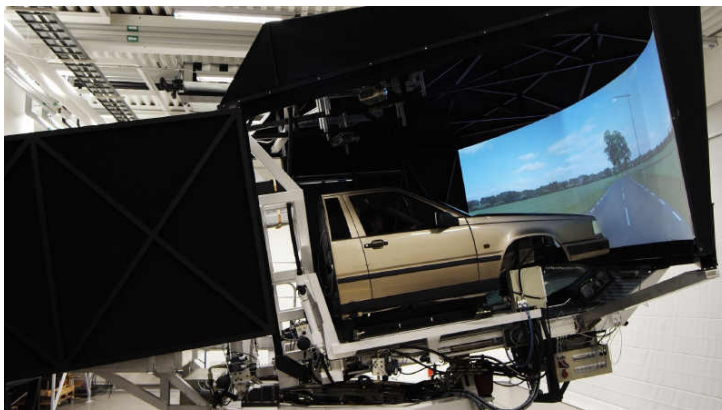
**Kuva 2.3.** VTI SIM I [26].

VTI on jatkanut simulaattoreiden kehitystä jo usean vuosikymmen ajan. Seuraavan sukupolven simulaattori VTI II rakennettiin vuonna 1990 vakuutusyhtiö Trygg-Hansan käyttöön. Rakenteeltaan tämä oli vastaava VTI I:n kanssa. Uudemman sukupolven simulaattori oli suurempikokoinen, jolloin siihen oli mahdollista kytkeä kuorma-auton ohjaamo. Tällöin voitiin simuloida myös raskaan liikenteen ajoneuvoja. Myöhemmin simulaattori palautui VTI:n käyttöön, ja se on edelleen toiminnassa. SIM II on esitetty kuvassa 2.4. [7, 26, 28]



**Kuva 2.4.** VTI SIM II [26].

Vuonna 2004 VTI esitteli järjestyksessään kolmannen ajosimulaattorin (Kuva 2.5). Rakenteeltaan simulaattori on hyvin pitkälti edeltäjiensä kaltainen. Uudistuksina esiteltiin Volvo 850 runko, liikealustan 90 asteen kääntö, sekä XY-suuntaiset suuret lineaariset liikkeet mahdollistava liikejärjestelmä. Vuonna 2008 simulaattoria modernisoitiin lisäämällä Saab 9-3 ohjaamo. [7, 28]



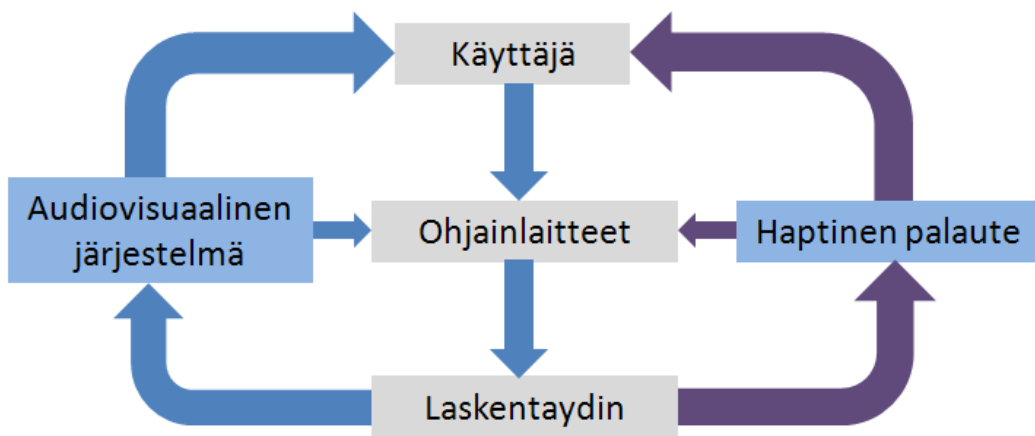
**Kuva 2.5.** VTI SIM III [26].

VTI:n neljännen sukupolven simulaattori on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2010 keväällä. Simulaattorin visuaalinen järjestelmä koostuu yhdeksästä projektorista, jotka mahdollistavat 210 asteen näkökentän. Lisäksi järjestelmässä käytetään kolmea LCD-näyttölaite tuottamaan taustapeilien näkymät. VTI SIM IV:n liikejärjestelmän muodostavat XY-tason liikepöytä, sekä hexapod-liikealusta. Uusimpaan simulaattoriin on myös rakennettu modulaarinen ohjaamo, jolloin simulaattoriin on mahdollista

vaihtaa eri ajoneuvojen ohjaamoja. Samalla laitteella on myös tarkoitus simuloida niin henkilöautoja, kuin raskaita ajoneuvoja. Tärkeimpänä lähtökohtana simulaattorin suunnittelussa on huomioitu realistinen pituussuuntainen kiihtyvyys, sekä laaja näkökenttä. [28]

## 2.2. Ajosimulaattorin alijärjestelmät

Ajosimulaattori on moniulotteinen kokonaisuus, joka koostuu useista liitetystä alijärjestelmistä. Eri järjestelmien yhteensovittaminen on erittäin haastavaa, ja vaatii osaamista monelta eri tieteenalalta. Kuvassa 2.6 on esitetty ajosimulaattorin kaaviokuvaus.



**Kuva 2.6.** Ajosimulaattorin kaaviokuvaus.

Ajoneuvosimulaattorin ydin on jäljiteltävän ajoneuvon malli, eli laskentaydin. Sen tarkoituksena on toimia oikean ajoneuvon kaltaisesti, ja lähettää ohjaustietoa liikepalautteita luovalle järjestelmälle (Haptinen palaute), sekä audiovisuaalisille järjestelmille. Ajoneuvomallin luominen vaatii taitoa, sekä tuntemusta mallinnettavan ajoneuvon yksityiskohdista. Ajoneuvomallin luomiseen tarvitaan huomattava määrä teknistä tietoa, kuten ajoneuvon mittoja, massa, sekä useita muita suureita. Lisäksi usein on suositeltavaa suorittaa monipuolisia mittauksia ajoneuvon käyttäytymisestä. Eräs tällainen ajoneuvomalli on esitelty tarkemmin luvussa neljä.

Kuljettaja on yhteydessä muuhun järjestelmään simulaattorin ohjainlaitteiden avulla. Ajosimulaattorissa nämä laitteet ovat yleensä vähintään ohjauspyörä, sekä kaasu- ja jarrupoljin. Vaativampaan käyttöön suunnitellussa simulaattorissa voidaan usein lisätä esimerkiksi vaihteenvalitsin ja kytkinpoljin. Usein ammattikäytössä oleva ajoneuvosimulaattori toteutetaan aitoon ohjaamoon, jolloin immersion taso usein paranee, koska kuljettaja on tutussa ympäristössä ja voi käyttää ajoneuvon omia hallintalaitteita.

Suurin osa kuljettajan saamasta palautteesta tulee visuaalisen järjestelmän kautta. On arvioitu, että noin 90% kuljettajan toimintaan vaikuttavasta informaatiosta on visuaalista. Ihmisen näkökenttä on silmän liikealueet mukaanlukien vaakasuunnassa n. 188° ja pystysuunnassa noin 120°. Kuitenkin silmän tarkan näkemisen sektori on ainoastaan 1°, joten laaja näkökenttä perustuu silmän nopeisiin pieniin liikkeisiin, sekä silmän asennon havaittavaan kääntymiseen. [9, 6]

Visuaalinen palaute tuodaan näyttölaitteen kautta. Yleisimmin käytetään monitoria, televisiota, videoprojektoria tai virtuaalilaseja. Taulukossa 2.1 on esitelty eri näyttölaitteita ja niiden ominaisuuksia.

**Taulukko 2.1.** Näyttölaitteiden ominaisuuksia.

Näyttölaite	Monitori/Televisio	Videoprojektori	Taustaprojektio TV	Virtuaalilasit
Stereokuva	Kyllä (harvinainen)	2x projektori + stereolasit	2x projektori + stereolasit	Kyllä
Kuvakoko	17"-103"	40"-120"	40"-60"	0.5"-1"
Resoluutio	1080p	1080p	1080p	540p
Hinta	130€-65000€	130€-5400€	2000€-5500€	500€- 90000€
Muuta	Pieni tilantarve	Suuri tilantarve	Kohtalainen tilantarve	Pieni tilantarve

Perinteisessä viihdekäytössä, kuten tietokonepeleissä, yleensä käytetään edullisia kulutuselektroniikkatuotteita, kuten LCD- tai Plasmatelevisioita, Tietokoneen monitoria tai videoprojektoria. Näillä laitteilla selvittäään yleensä hyvin viihdekäytön asettamista vaatimuksista.

Vaativammissa järjestelmissä on usein toivottavaa saavuttaa suurempi katselukulma, kuvakoko tai muu näyttävämpi ominaisuus. Tällainen ratkaisu voidaan toteuttaa myös yhdistämällä useita perinteisiä näyttölaitteita. Eräs tällainen usean näytön sovellus on esitetty kuvassa 2.7.





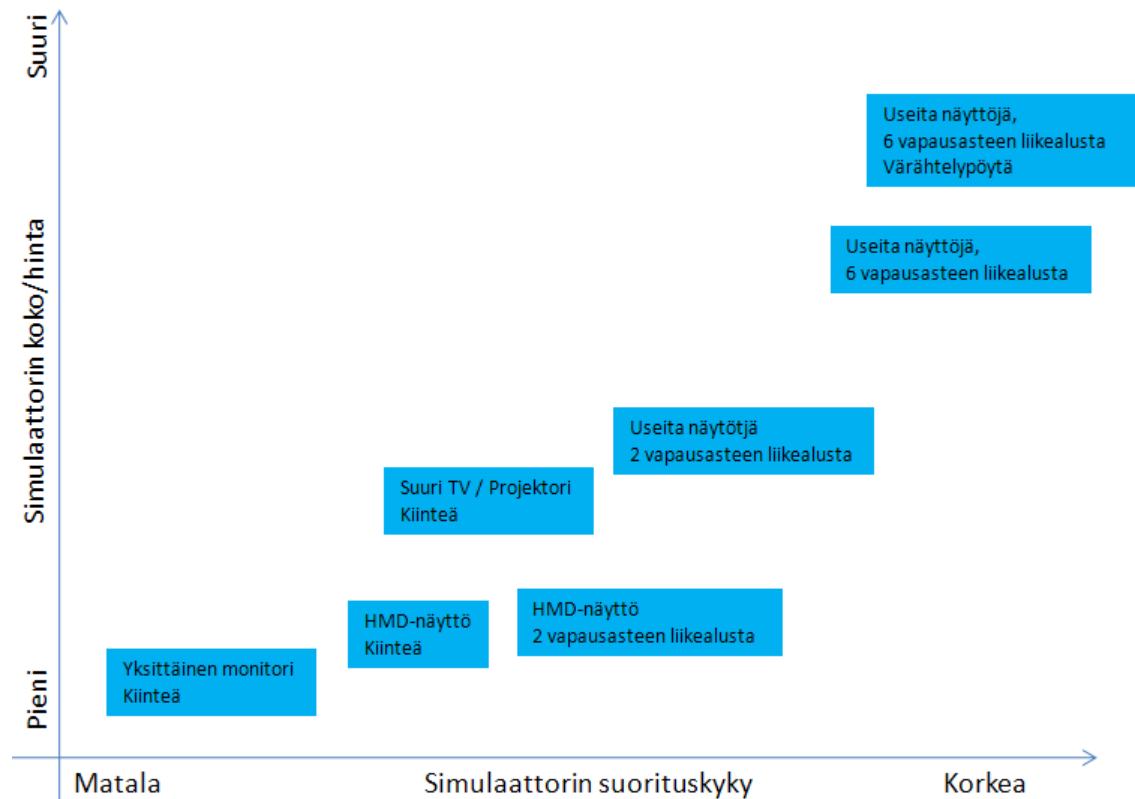
**Kuva 2.7.** Erään ajosimulaattorin näyttölaitteet [20].

Visuaalista kokemusta voidaan myös tehostaa käyttämällä stereokuvaa. Perinteisissä näyttölaitteissa luodaan kaksiulotteinen kuva. Syvyys suunnan etäisyyksien hahmottaminen tällaisesta kuvasta on erittäin hankalaa ja epätarkkaa. Stereokuva mahdollistaa kolmiulotteisen kuvan, joka parantaa huomattavasti syvyysvaikutelmaa. Stereokuvaa voidaan tuottaa kahdella tavalla: Käyttämällä kaksinkertaista kuvataajuutta, sekä aktiivistereotekniikalla. Kun käytetään kaksinkertaista kuvataajuutta, tarvitaan kaksi videoprojektoria, sekä polarisoivat lasit, joilla polarisoidaan toisen projektorin kuva vasemmalle, ja toisen oikealle silmälle. Aktiivistereotekniikkaa hyödynnetään virtuaalilaseissa. Lasien sijainti lähellä käyttäjän silmiä mahdollistaa kahden eri kuvan näyttämisen silmille. Kuvassa 2.8 on esitetty erään valmistajan virtuaalilaseit.



**Kuva 2.8.** Virtuaalilaseit [23].

Visuaalisen palautteen lisäksi audiovisuaalisessa alijärjestelmässä käytetään lisäksi äänipalautetta tuottavaa audiojärjestelmää. Ihmisen havainnoinnin kannalta audiojärjestelmä on tärkeässä osassa näkökentän ulkopuolisissa havainnoissa.



**Kuva 2.9.** Simulaattorin koko, hinta ja suorituskyky.

Liikepalautteita luova järjestelmä mahdollistaa kuljettajalle tuotettavan fyysisen palautteen. Tätä järjestelmää kutsutaan kaaviokuvassa 2.5 nimellä *Haptinen palaute*. Yksinkertaisimmissa sovelluksissa saatetaan käyttää tärinää luovia ohjainlaitteita, eli esimerkiksi *force feedback*-ominaisuudella varustettua ohjauspyörää. Force feedback ohjauspyörässä voidaan laitteeseen tuottaa eritaajuisia värähtelyitä. Tällaisella ratkaisulla saadaan luotua ajosimulaattorin käyttäjälle tuntumaa esimerkiksi tien epätasaisuuksista tai vaikka ajoneuvon viasta. Haluttaessa parantaa immersiota entisestään, voidaan simulaattorijärjestelmään lisätä simulaattorin käyttäjän istuinta tai koko simulaattoria liikuttavia laitteita. Tällaista ratkaisua kutsutaan liikealustaksi. Liikealustaa on käsitelty tarkemmin luvussa 3.

### 2.3. Ajosimulaattorit ammattikäytössä

Huippuluokan ajosimulaattorit on yleensä tarkoitettu vaativampaan käyttöön, kuten kuljettajien ajokoulutukseen tai ajoneuvoteollisuuden tuotekehitykseen. Tällaiset simulaattorit on yleensä kehitetty vastaamaan todella tarkasti oikean ajoneuvon käyttäytymistä tai haluttua osa-aluetta.

Ajoneuvokehitys perinteisin menetelmin on usein kallista ja aikavievää. Simuloinnilla ja virtuaaliprototyyppien avulla voidaan jossain määrin korvata prototyyppien valmistusta ja testausta. Tällä saadaan usein säästöä kustannuksissa ja tuotekehitysajoissa.

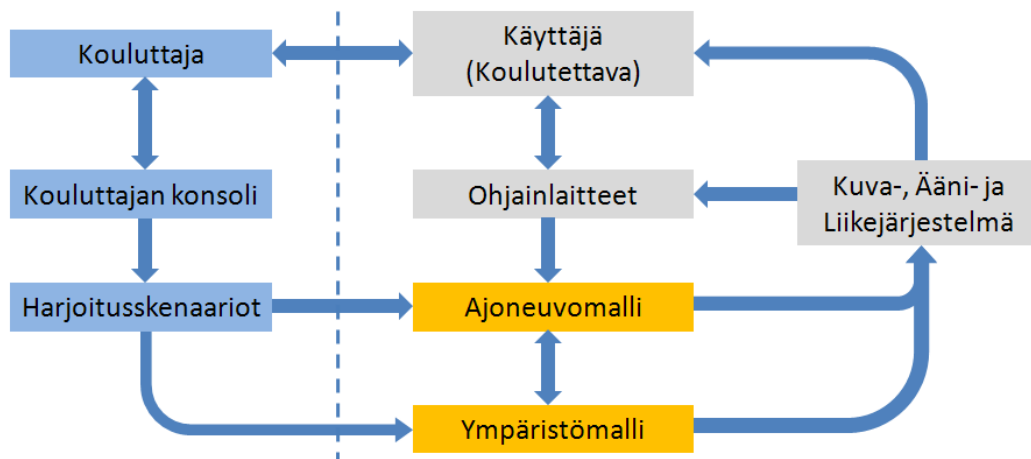


Kemeny et al. [9, s. 31] esittävät artikkelissaan, että ajosimulaattoreiden käyttö ajoneuvosuunnittelussa ja kuljettajan aistien tutkimisessa on yleistynyt suuresti. Tämä johtuu enimmäkseen siitä, että simulaattorikäyttö ajoneuvosuunnittelussa säästää insinööriä ja sen kautta edelleen kustannuksia. Niitä voidaan käyttää myös tie- ja liikenneturvallisuuden tutkimiseen.

Ajosimulaattori voi tarjota tärkeää tietoa ajoneuvon suunnittelussa, ja sen monitieteisen luonteen ansiosta, se voi edistää kehitystä, avaten uusia suuntia liikkeiden havaitsemisen tutkimisessa. [9, s. 36]

Tutkimuskäyttöön ajosimulaattorit voidaan soveltaa mainiosti ääritilanteiden tutkimisessa. Ääritilanteiksi voidaan määritellä kaikki tilanteet, jotka oikealla ajoneuvolla aiheuttaisivat mahdollisen vaaratilanteen. Simulaattorissa samaa skenaariota voidaan toistaa loputtomiin. Simulaattorissa voidaan myös ympäristöä vaarantamatta tutkia esimerkiksi ajamista päihteiden vaikutuksen alaisena.

Koulutuskäytössä ajosimulaattoreita on käytetty jo pitkään. Simulaattorin etuja perinteisiin koulutusmuotoihin nähden ovat etenkin ääritilanteiden turvallinen harjoittelu ja harjoitusten toistettavuus. Kuvassa 2.9 on esitetty koulutussimulaattorin kaaviokuvaus. Katkoviivalla on erotettu koulutuskäyttöön tarkoitetun simulaattorin osat alueet simulaattorin yleisestä rakenteesta. Lisäksi Kuvan 2.5 laskentaydin on jaettu kahteen osa-alueeseen: Ajoneuvomalliin ja Ympäristömalliin.



**Kuva 2.9** Koulutussimulaattorin kaaviokuvaus.

Myös Suomessa on käytetty ajosimulaattoria koulutuksen osana. Vuonna 2004 otettiin Vantaan Työtehoseuralla käyttöön Suomen ensimmäinen koulutuskäyttöön käytettävä linja-autosimulaattori. Kuvassa 2.10 on esitetty linja-autosimulaattori. [19]



**Kuva 2.10** Linja-autosimulaattori [24].

AKEn tutkimuksessa vuonna 2005 kokeiltiin linja-autosimulaattoria koulutuskäytössä. Tutkimuksessa vertailtiin kahta verrokkiryhmää. Toisen ryhmän ajoharjoituksista yhdeksän prosenttia suoritettiin simulaattorilla, kun taas toisen ryhmän ajoharjoitukset suoritettiin normaalisti varsinaisella linja-autolla. Vertailtaessa näiden kahden ryhmän kehittymistä, sekä kurssin läpäisyä, ei havaittu eroja ryhmien välillä. [19]

Tutkimukseen osallistuneilta oppilailta kerättiin myös palautetta simulaattorilla tehdyistä ajoharjoituksista. Usein ensimmäisten käyttökertojen jälkeen simulaattoriharjoittelu koettiin hieman staattiseksi harjoittelumuodoksi, jossa samat skenaariot toistuvat. [19]

Linja-autosimulaattorin palautteesta voidaan päätellä, että pelkkä laadukas tekninen toteutus ei riitä simulaattorissa. Koulutuskäyttöön tarkoitetun simulaattorin tulisi myös tarjota monipuolisia skenaarioita ja satunnaisuutta, jotta koulutustapahtuma ei olisi liian yksinkertainen tai ennalta-arvattava. Toisaalta simulaattorin vahvuus on juuri tietyn tilanteen toistettavuus.

Usein ammattikäyttöön rakennetuissa ajosimulaattoreissa on käytetty liikepalautteita tuottavia järjestelmiä. Jo 1970-luvulla kehitetyissä ensimmäisissä ajosimulaattoreissa käytettiin useiden vapausasteiden liikealustoja. Myös koulutuskäyttöön tarkoitetulle ajosimulaattorille asetetut vaatimukset velvoittavat käyttämään tarkoitukseen riittävää haptista järjestelmää.

### **3. LIIKEALUSTAN KÄYTTÖ AJONEUVON LIIKKEIDEN MALLINNUKSEEN**

Liikepalautteita luova järjestelmä on koettu tärkeäksi elementiksi huipputason simulaattoreissa. Toisaalta kaikkien simulaattorissa olevien alijärjestelmien yhteensovittaminen on erittäin tärkeää: jos liikepalautteet eivät vastaa kuljettajan saamaa visuaalista palautetta, on kuljettajan altistuminen simulaattorisairaudelle mahdollista. [27]

Liikealustat määritellään usein toimialueiden, kantavuuden, vapausasteiden (DOF), sekä alustan liikuttamiseen käytettyjen toimilaitteiden tyyppin mukaan. [29]

Liikealustalla pyritään jäljittelemään simuloidun ajoneuvon liikkeitä mahdollisimman tarkasti. Usein liikealusta luokitellaan sen vapausasteiden (DOF) lukumäärän mukaan. Yleensä liikealustan rakentaminen on kompromissi sen vapausasteiden lukumäärän ja kustannusten välillä.

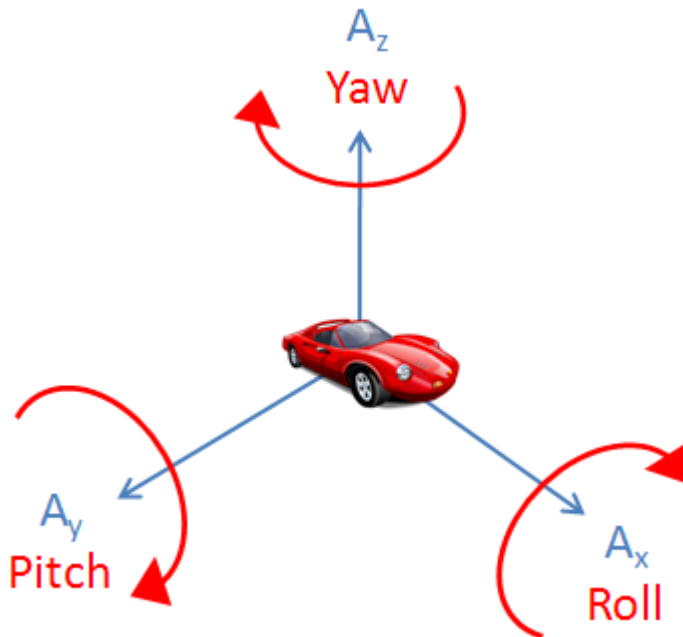
Huipputason simulaattoreiden liikepalautteiden realistisuudelle asetetaan yleensä korkeita vaatimuksia. Simulaattorin ajotuntuman parantamiseen käytetään usein nopeita värähtelyitä luovaa värähtelypöytää, ja/tai hitaampia liikkeitä mallintavaa suurempiliikkeistä liikealustaa. On todettu, että nopeat värähtelyliikkeet ovat tärkeitä juuri kuljettajan ajotuntuman kannalta, kun taas hitaammat liikkeet vaikuttavat enemmän nopeuksien ja etäisyyksien hahmottamiseen. [11]

Simulaattorin liikealustan vaatimustaso on suuresti riippuvainen sovelluksesta: huvikäyttöön ei vaadita välttämättä liikealustaa lainkaan, kun taas tuotekehityksessä tai ajokoulutuksessa käytettävältä simulaattorilta vaaditaan usein mahdollisimman aidot liikkeet.

#### **3.1. Ajoneuvon kuljettajaan kohdistuvat voimavaikutukset**

Ajoneuvon kuljettajaan kohdistuu useita erisuuntaisia kiihtyvyyksistä aiheutuneita voimavaikutuksia. Lineaarisia kiihtyvyyksiä kaikkien kolmen suorakulmaisen koordinaatiston akselin suuntiin (X-Y-Z), sekä kulmakihtyvyyksiä kaikkien kolmen akselin ympäri (Roll, Pitch, Yaw). Kuvassa 3.1 on esitetty nämä kiihtyvyydet ja niiden suunnat. Näiden kiihtyvyyksien luonteeseen vaikuttavat suuresti ajoneuvo, kuljettaja ja

ajoympäristö. Tuntuma ajoneuvolla ajamiseen syntyy pitkälti näiden kiihtyvyyksien, ja niiden aiheuttamien voimavaikutusten kautta.



**Kuva 3.1** Ajoneuvon kiihtyvyydet ja kulmakihtyvyydet.

Kemenyn mukaan liikkeiden havaitsemisen tarkkuus mielletään yleensä visuaaliseksi toiminnoksi. Toisaalta kokemukset osoittavat, että liikkeiden havaitseminen pelkästään visuaalisten vihjeiden avulla on erittäin vaikeaa. Tätä tukevat myös eräät kokeelliset tutkimukset, jotka osoittavat ihmisen tasapainoainin tärkeyden liikkeiden havaitsemisessa. [10, 11]

Ajoneuvon tyyppi vaikuttaa suuresti liikkeiden luonteeseen ja suuruuteen: Suuret ajoneuvot kuten kuorma- ja linja-autot kiihtyvät hitaasti, kun taas esimerkiksi ralliautojen, sekä muiden urheiluautojen kiihtyvyydet ovat huomattavasti korkeampia. Myös ajoneuvon fyysiset mitat vaikuttavat, sillä ajoneuvon kulmaliikkeet ovat suurissa ajoneuvoissa huomattavasti pienempiä kuin pienissä ajoneuvoissa. Taulukossa 1 on esitetty henkilöauton suurimpia mitattuja kiihtyvyyksiä.

**Taulukko 3.1:** Testiajoneuvon suurimmat mitatut kiihtyvyydet [23].

Vapausaste (DOF)	Kiihtyvyys	Ajoneuvon liike
Pitkittäinen	-0.6g – 0.4g	Jarrutus, kiihdytys
Sivuttainen	-0.7g – 0.7g	Kaarrajo
Pystysuuntainen	-0.8g – 1.1g	Jousitus ja tien korkeus
Roll	$\pm 320^\circ/s^2$	Jousitus ja kaarrajo
Pitch	$\pm 360^\circ/s^2$	Jousitus ja kaarrajo
Yaw	$\pm 45^\circ/s^2$	Ohjaus

On jokseenkin kyseenalaista minkä tyyppiset ajoneuvon liikkeet ovat olennaisia ajotapahtuman kannalta. Usein eri ihmiset kokevat ajotapahtuman synnyttämät liikkeet myös eri tavoin. Ajoneuvon lisäksi, näihin liikkeisiin vaikuttavat myös suuresti tien laatu, kuljettajan ajotyyli, sekä esimerkiksi sääolot.

Ajoneuvon liikkeiden vaikutukset välittyvät ajoneuvon kuljettajaan joko suoraan tai esimerkiksi jousituksen välityksellä. Kuljettaja aistii näistä liikkeistä ajoneuvon käyttäytymistä. Kehitettäessä korkean tason ajosimulaattoria, myös näitä liikkeiden aiheuttamia vaikutuksia kuljettajaan pyritään mallintamaan.

### **3.2. Ihmisen aistimat liikkeet**

Xun et al. [29] mukaan ihmisen liikkeiden aistiminen perustuu ensisijaisesti näköön ja ihmisen tasapainoaistiin, sekä toissijaisesti muuhun vartaloon vaikuttaviin voimiin. Heidän mukaansa eräs tärkeä havainto myös on, että impulssimaiset, tai muuttuvat kiihtyvyydet ovat ajosimulaattorin kannalta tärkeämpiä kuin tasaiset kiihtyvyydet, etenkin yhdistettynä visuaalisiin vihjeisiin.

Ihmisen sisäkorvassa sijaitsevat tasapainoelimet havaitsevat pään ja vartalon liikkeet. Tasapainoelin koostuu kahdesta osasta: suoraviivaisia kiihtyvyyksiä havaitsevasta kuulokivielimestä (Otoliittinen elin), sekä kulmakiihtyvyyksiä havaitsevasta liikeelimestä (sisäkorvan kaarikäytävät). Lisäksi Otoliittinen elin aistii pään asennon suhteessa gravitaatioon. Myös ihmisen lihaksiston kuorimitus toimii osana tasapainoaistin toimintaa. Ajosimulaattoreissa tasapainoaistien käyttämän informaation puuttumisen on todettu heikentävän kuljettajan ajosuoritusta. [9, 6]

#### ***Suoraviivaiset liikkeet***

Kun liikutaan lineaarisesti johonkin suuntaan, puhutaan suoraviivaisista liikkeistä. Tällaista liikettä on esimerkiksi ajoneuvon suora liike eteenpäin tai taaksepäin, pystysuora liike ylös tai alas, sekä sivuttaissuuntainen liike. Suoraviivaisen kiihtyvyyden voimakkuuden mittasuurena käytetään yleisesti kiihtyvyyttä  $s$  [ $m/s^2$ ] Johanssonin et al. [7, s. 8] mukaan ihminen aistii suoraviivaisen liikenopeuden muutoksia todella herkästi. He toteavat ihmisen havaitseman kiihtyvyyden kynnsarvon olevan ainoastaan  $0.05 m/s^2$ . Nopeiden kiihtyvyyksien mallintaminen on erittäin haastavaa, johtuen ihmisen herkästä havaintokyvystä.

#### ***Rotaatioliikkeet***

Tarkastelun kohteen liikkuessa suorakulmaisen koordinaatiston akselin ympäri, sanotaan liikettä rotaatioliikkeeksi. Ihminen havaitsee rotaatioliikkeen pitkälti korvassa sijaitsevien tasapainoelinten avulla.

Lyhyitä rotaatioliikkeitä ajoneuvossa syntyy lähinnä kiihdytyksissä, jarrutuksissa ja kaarreajossa. Nämä liikkeet aiheutuvat yleensä jousituksen ja muiden osien aiheuttamista joustoista. Rotaatioliikkeiden voimakkuuden mittarina käytetään yleisti kulmakiiktyvyyttä:  $\alpha$  [ $^{\circ}/s^2$ ]. Ihminen aistii herkästi myös rotaatioliikkeitä: Johanssonin et al. [7, s. 8] mukaan ihmisen havaitseman kulmakiiktyvyyden kynnsarvo on noin 0.3-1  $^{\circ}/s^2$ . Tämän kynnsarvon alle jäävät liikkeet ovat siis ajosimulaattorin toteutuksen kannalta merkityksettömiä, koska kuljettaja ei niitä havaitse.

### ***Korkea- ja matalataajuiset liikkeet***

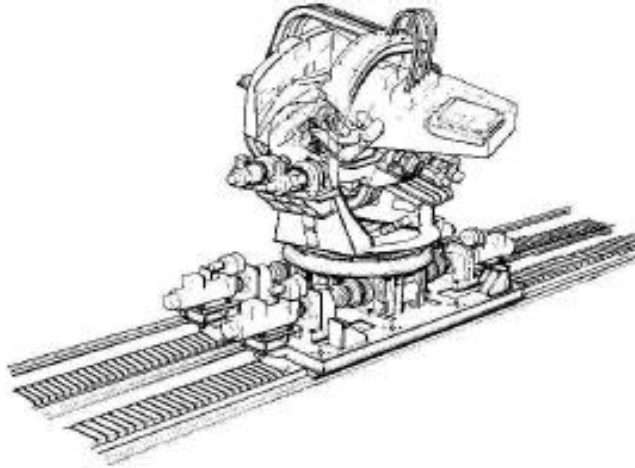
Ajoneuvon erilaiset liikkeet välittyvät kuljettajaan eri tavoin. Osan liikkeistä ihminen tuntee välittömästi niiden tapahduttua, kun taas toiset liikkeet välittyvät viiveellä, esimerkiksi jousituksen välityksellä. Yleensä liikkeet jaetaan kahteen kategoriaan: korkeataajuiset liikkeet, eli moottorista ja tiestä aiheutuvat nopeat värähtelyt, sekä ajoneuvon kiihdytyksistä, jarrutuksista, kaarreajosta yms. syntyvät hitaammat liikkeet.

Värähtelyliikkeet välittyvät ajoneuvon kuljettajalle kahden pääkanavan kautta: Tien pinnan aiheuttamat värähtelyt kulkeutuvat pitkälti ratin ja penkin välityksellä, kuten myös moottorin värähtelyt. Osa värähtelyistä saattaa välittyä myös ajoneuvon rungon kautta, tai jopa kuuloaistin kautta erilaisina resonointiääninä.

Ajoneuvon matalataajuiset kiihtyvyydet välittyvät pitkälti tasapainoaistin, näköaistin, sekä lihaksiston kautta: tasapainoaisti on herkkä myös pienille kiihtyvyyden muutoksille, kun taas näköaistin ja lihaksiston kautta välittyvät tiedot ovat hieman epätarkempia, ja saattavat vääristää havaintoja. Tällaisia vääristymiä ovat esimerkiksi näköaistin vauhtisokeus, sekä lihaksiston puutuminen.

### **3.3. Kiihtyvyyden voimavaikutusten toteuttaminen liikealustan avulla**

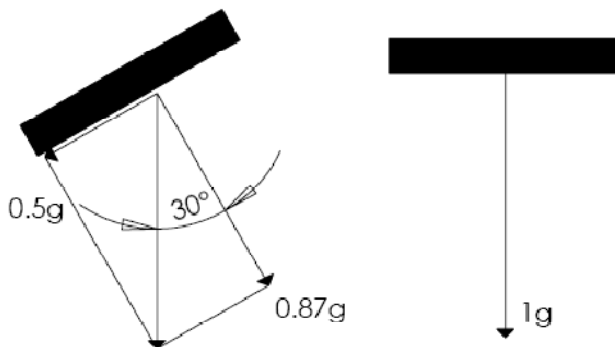
Eräs tapa mallintaa ajoneuvon liikkeitä on lineaarinen liikealusta, joka liikuttaa simulaattorin ohjaamoja yleensä kiskoilla, jolloin kuljettajaan saadaan kohdistettua haluttuja voimavaikutuksia. Kuvassa 3.2 on esitetty Mazdan kehittämä lineaarinen liikealusta. Kyseinen sovellus toimii yhden vapausasteen kiskoilla, ja simulaattorin ohjaamoja on mahdollista kiertää akselinsa ympäri, jolloin voidaan yhdellä kiskolla mallintaa kiihtyvyyksiä kahteen eri suuntaan. Lineaarista liikealustaa käyttävä sovellus vaatii yleensä suuren tilan, jossa simulaattoria voidaan liikuttaa tehokkaasti useita metrejä haluttuun suuntaan.



**Kuva 3.2.** Mazdan lineaarinen liikealusta [7].

Liikkeiden rajoittuvuus on suurin heikkous mallinnettaessa ajoneuvon liikkeitä lineaarisilla liikkeillä. Koskaan ei voida rakentaa niin suurta simulaattoria, että sen lineaariset liikkeet olisivat rajoittamattomia, tällöin kyse olisi täysin vapaasta kappaleesta, eli oikeasta ajoneuvosta. Suoraviivaisia liikkeitä käyttävän liikealustan toimialue on aina rajallinen. Simuloitaessa kiihtyvyyttä suorakulmaisen koordinaatiston yhden akselin suuntaisesti, voidaan kiihtyvyyttä pitää yllä hyvin rajallinen aika.

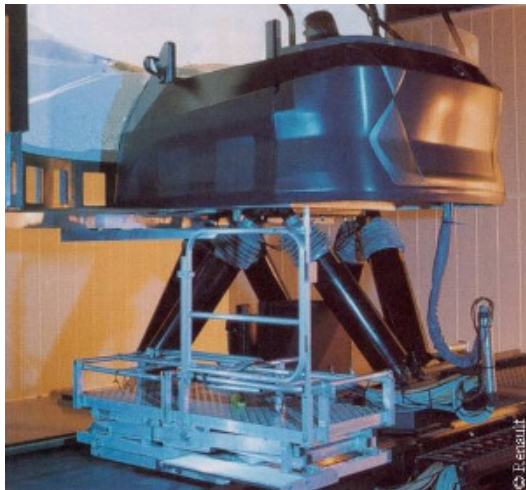
Ajoneuvon kiihtyvyyksiä voidaan myös mallintaa kallistamalla simulaattoria, jolloin haluttu voimavaikutus saadaan aikaan putoamiskiihtyvyydestä aiheutuvan voiman avulla. Kuvassa 3.3 on esitetty kallistamisen periaate: 30 asteen kallistuskulmalla saadaan aikaan noin 0.5 g:n suuruinen voimavaikutus kallistettavaan suuntaan.



**Kuva 3.3.** Kiihtyvyyden mallinnus kallistamalla.

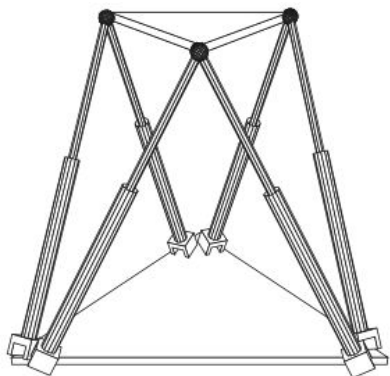
Mallinnettaessa kiihtyvyyksiä kallistamalla, ongelmia syntyy kallistamisen aiheuttamista kiihtyvyyksistä, joita ei aiheudu oikeassa ajoneuvossa. Usein myös kiihtyvyyden muutokset ovat erittäin nopeita, joten kallistusliikkeiden tulisi myös olla nopeita. Tällöin taas nopeat kallistukset aiheuttavat ylimääräisiä kiihtyvyyksiä jotka saattavat heikentää merkittävästi simulaattorin immersiota.

Vaadittaessa todella tarkkaa liikkeiden mallintamista, on kahdessa edellisessä luvussa (4.1., 4.2.) mainitut menetelmät mahdollista yhdistää. Tällöin liikealustan lineaarisella liikkeellä on mahdollista luoda tarvittava voimavaikutus erittäin nopeasti, kun taas rotaatioliikkeellä voidaan paremmin mallintaa pitkäkestoista kiihtyvyyksistä aiheutuvia voimavaikutuksia.



**Kuva 3.4.** Renault simulaattorin Stewart-liikealusta [7].

Yleisin ratkaisu lineaari- ja rotaatioliikkeiden yhdistämiseen on Stewart-tyyppinen liikealusta, jonka rakenne on esitetty kuvissa 3.4 ja 3.4. Kyseistä rakennetta kutsutaan myös nimellä Hexapod, ja sen kehitti D. Stewart [31]. Tällainen alustatyyppi koostuu kahdesta tasosta, jotka on kytketty yhteen kuuden lineaarisen toimilaitteen avulla. Alusta mahdollistaa kuuden vapausasteen liikkeitä.



**Kuva 3.5.** Stewart-liikealusta [4].

Hexapod tyyppisessä alustassa yhdistyvät lineaari- ja rotaatioliikkeiden edut: Kiihtyvyyksiä voidaan mallintaa nopeasti lineaaristen liikkeiden avulla, ja lisäksi pitkäkestoisia kiihtyvyyksiä mallinnetaan rotaatioliikkeiden avulla. Tämän tyyppisessä alustassa lineaariset liikkeet ovat yleensä todella lyhyitä: alustan koosta riippuen kymmenistä sentteistä noin metriin. Rotaatioliikkeet ovat yleensä noin  $\pm 20-30$  asteen suuruisia. Stewart-tyyppisen liikealustan muutamien kymmenien senttien lineaariset liikkeet helpottavat pehmeää siirtymää pitkäkestoista kiihtyvyyttä mallintavaan rotaatioliikkeeseen.



Edellä esitettyjä ratkaisuja voidaan myös yhdistellä, jotta saavutetaan simulaattorille enemmän vapausasteita. Kuvassa 3.6 on Iowan yliopiston kehittänyt NADS ajosimulaattori ja siinä käytetty liikealusta. Siinä yhdistyvät kiskojen avulla toteutetut kahden vapausasteen pitkät ( $\pm 9.75\text{m}$ ) lineaariset liikkeet, sekä kuuden vapausasteen Stewart-tyyppinen alusta.



**Kuva 3.6.** NADS simulaattori [20].

Usein edellä mainittuihin liikealustaratkaisuihin lisätään vielä erillinen värähtelypöytä simuloimaan ajoneuvon nopeataajuisia liikkeitä, kuten edellä mainitussa NADS-simulaattorissa. Tällaisella värähtelypöydällä saattaa olla suuri merkitys ajosimulaattorilla saavutettavaan ajotuntumaan.

NADS simulaattori on myös toteutettu modulaariseksi. Siinä voidaan hyödyntää useiden eri ajoneuvojen ohjaamoja. Kuvassa 3.7 on esitetty NADS simulaattorin sisärakenne.



**Kuva 3.7.** NADS simulaattorin sisärakenne [20].

Kuvissa 3.6 ja 3.7 esitetyn simulaattorin rakenteesta voidaan havaita käytetty liikejärjestelmä. Hitaat ja matalataajuiset liikkeet voidaan toteuttaa kuvassa 3.6 näkyvillä suurilla lineaarisilla kiskoilla. Keskinopeat ja keskitaajuiset liikkeet on mahdollista toteuttaa kuvan 3.6 Stewart-alustalla. Kuvasta 3.7 voidaan havaita nopeataajuisien liikkeiden toteuttamiseen tarkoitettut toimilaitteet ajoneuvon renkaiden paikoilla.

### **3.4. Kiihtyvyyksien laskennallinen toteuttaminen ja raja-arvot**

Aina ei ole mahdollista mallintaa kiihtyvyyksiä täsmälleen samansuuruisina kuin ne tapahtuvat mallinnettavassa ajoneuvossa. Tätä rajoittavat liikealustan ominaisuudet, sekä järjestelmässä esiintyvät viiveet. Tällöin kiihtyvyyksiä täytyy skaalata liikealustalle sopivan suuruisiksi ja laatuiseksi. Kuvassa 3.8 on esitetty kaavio liikealustan ohjauksen rajapinnoista.



**Kuva 3.8.** Ohjausalgorithmi.

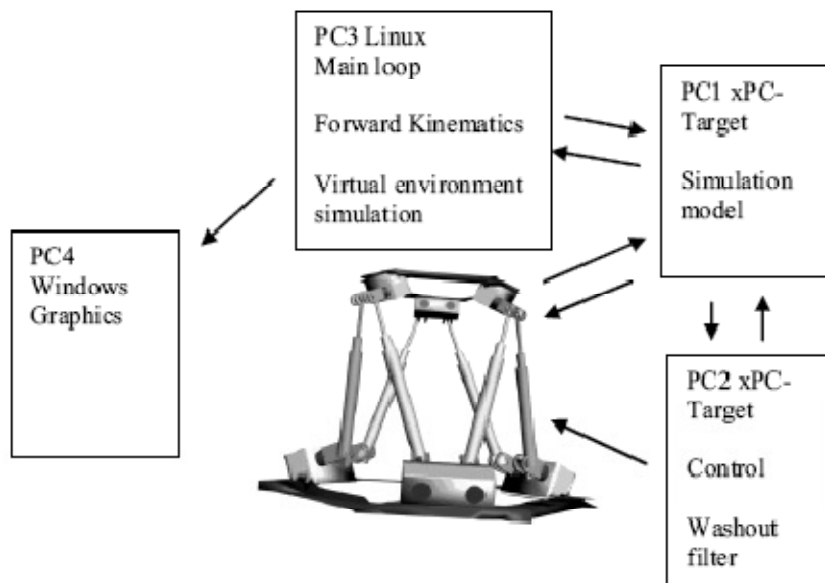
Kiihtyvyyksien simulointiin liikealustalla on kehitetty useita erilaisia liikkeenjäljittely algoritmeja (motion cueing algorithm, washout filter). Näiden algoritmien tarkoitus on muokata ajoneuvomallin suureet liikealustan ohjausparametreiksi. Etenkin Stewart-tyyppiselle liikealustalle on kehitetty useita algoritmeja, johtuen alustatyyppin monimutkaisesta rakenteesta. Liikealustan ohjausta on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.5.

## 4. HYDRAULIKÄYTTÖISEN PIENTYÖKONEEN SIMULAATTORI

Tampereen teknillisen yliopiston hydraulikan ja automatiikan laitoksella on tutkittu vesihydrauliikan hyödyntämistä liikealustakäytössä. Kehityksen tuloksena on esitelty vesihydraulinen Stewart-liikealusta. Tämän liikealustan testaamiseksi on myös luotu mobilekoneen simulointimalli. Tässä työssä on syvennytty pääasiassa mobilekoneen simulointimallin toteutukseen, ja muut järjestelmät on käsitelty ainoastaan pintapuolisesti.

### 4.1. Simulaattorin rakenne

Ajosimulaattori koostuu useista eri alijärjestelmistä. Kuvassa 4.27 on kuvattu simulaattorin eri alijärjestelmiä. Kuvan simulaattorin runkona toimii neljästä tietokoneesta koostuva verkosto.



**Kuva 4.1** Simulaattorin rakenne [21].

Kuvan 4.1 rakenteen mukaisesti simulaattoriympäristö on toteutettu viidestä eri osasta: Liikealusta oheislaitteineen, xPC-target simulointiympäristö (PC1), liikealustan ohjausympäristö (PC2), pääympäristö (PC3), sekä graafinen järjestelmä (PC4). Nämä alijärjestelmät on esitelty tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

Mobilekoneen simulointimalli on simulaattorin ydin. Tämä malli määrittää miten mobilekone käyttäytyy simulaattorissa. Monimutkainen ajoneuvon dynamiikan laskenta tarvitsee huomattavasti laskentatehoa, joten se toimii omana ympäristönään. Tämä simulointimalli on esitelty tarkemmin kappaleissa 4.2.-4.4.

Eräs tärkeä osa simulaattoria on myös liikealusta. Liikealustan avulla pyritään toteuttamaan varsinaisen ajoneuvon kaltaiset liikkeet simulaattorissa. Sovelluksessa käytettävää stewart-liikealustaa on käsitelty tarkemmin luvussa 4.5.

Ajosimulaattorissa käytettävälle liikealustalle tarvitaan erillinen ohjausjärjestelmä. Tämän alijärjestelmän avulla muunnetaan mobilekoneen simulointimallin liikkeet liikealustan liikkeiksi. Liikealustan ohjausta on käsitelty tarkemmin luvussa 4.5.

Simulaattorikonaisuus tarvitsee keskuskoneen, joka ohjaa järjestelmän muita osia, sekä yhdistää nämä. Tähän tarkoitukseen on rakenne erillinen Linux-PC, johon on rakennettu pääjärjestelmä. Tähän järjestelmään liittyvät interaktiot käyttäjän, ympäristön simulointi, sekä graafisen järjestelmän Forward Kinematics-laskenta.

Käyttäjälle näytettävä audiovisuaalinen palaute rakennetaan sille dedikoidulla tietokoneella. Järjestelmän ainoa tarkoitus on näyttää ympäristö kuten pääkone (PC3) sen graafiselle järjestelmälle esittää.

## 4.2. Mobilekoneen simulointimalli

Liikealustakäyttöisissä simulaattoreissa ajosovelluksena toimii usein jonkinlainen ajosimulaatio tai lentosimulaatio. Tässä sovelluksessa liikealustajärjestelmän yhteyteen toteutettiin pienen mobilekoneen reaaliaikainen ja dynaaminen ajosimulaatio. Tavoitteena oli myös asettaa Avant 216 koneen runko liikealustan päälle, ja tämän vuoksi mallinnuksen pohjana käytettiin myös kyseistä konetta. Avant 216 ja siitä tehty graafinen malli on esitetty kuvassa 4.2.



**Kuva 4.2.** Mobilekoneen virtuaalinen ja aito malli [2].

Yleensä simuloinnilla tarkoitetaan jonkun tapahtuman kuvaamista, jäljittelemistä tai keinotekoisista matkimista [12]. Usein järjestelmän tietokoneavusteinen jäljittelemineen, eli tietokonepohjainen simulointi, perustuu järjestelmän tai sen osan numeeriseen kuvaukseen.

Koneenrakennuksessa tuotekehitysprosessi on monesti erittäin monimuotoinen. Tarvitaan osaamista mekaniikan, hydraulikan, pneumatiikan, sähkö-, ohjaus- ja säätötekniikan aloilta. Yksittäisen alueen suunnittelijan on vaikea arvioida valitsemiensa ratkaisujen vaikutusta koko laitteen toimintaan. Simulointi on usein hyvä apuväline tuotekehityksen työkaluna. Sen avulla yksittäisen osan suunnittelija voi nopeasti tutkia muutosten vaikutusta kokonaisuuteen. Parhaimmillaan simulointi vähentää fyysisten prototyyppien määrää ja säästää tätä kautta huomattavasti kustannuksia. [21]

Täytyy myös muistaa, että simulointi ei koskaan vastaa täydellisesti aitoa tilannetta. Monesti simulointimallin teossa on jouduttu tekemään kompromisseja, tai siihen on tullut virheitä. Lisäksi simulointitulosten tarkastelussa vaaditaan kokemusta ja taitoa. Yksi simulointikerta kertoo vain mallin toiminnan yhdessä tilanteessa. [16]

### ***Simulointimallin arkkitehtuuri***

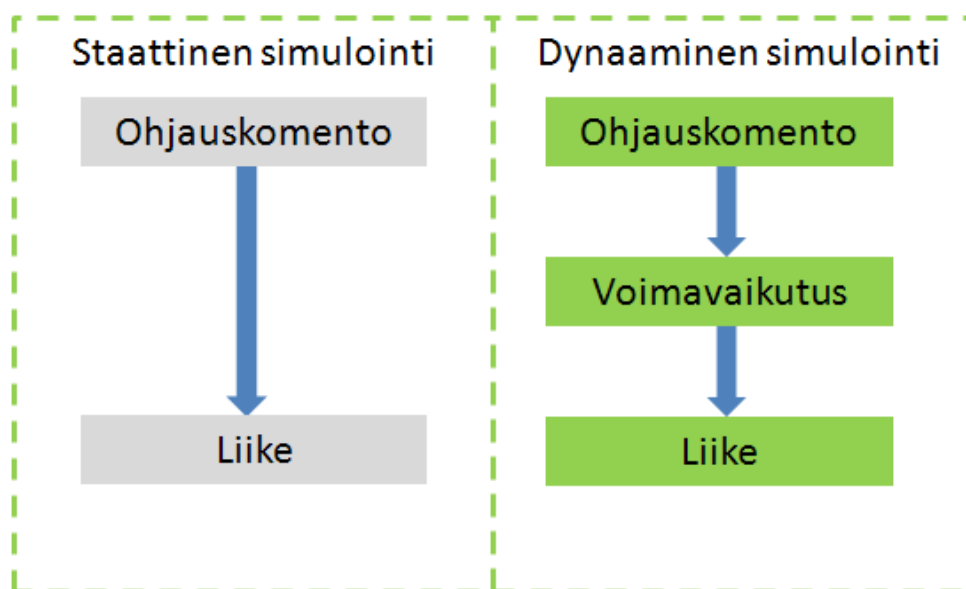
Avant 216 simulointimalli toteutettiin yksinkertaistettuna dynaamisena simulointimallina. Tavoitteena oli rakentaa riittävän kevyt simulointimalli, jotta sitä ei tarvitsisi hajauttaa usealle laskentakoneelle. Kuitenkin tavoitteena oli myös päästä riittävään aitoon ajoneuvon käyttäytymiseen liikealustakäyttöä ajatellen.

Kuljettajana toimiva ihminen on tärkeä osa ajosimulaattoria. Tämä ihmisen oleminen olennaisena osana järjestelmää, johtaa siihen, että muulta järjestelmältä vaaditaan reaaliaikaisuutta. Reaaliaikaisuudella tarkoitetaan reagointia välittömästi tai mahdollisimman pienellä viiveellä, jotta ihminen ei havaitsisi järjestelmän viiveitä. Todellisuudessa on mahdotonta päästä täydelliseen reaaliaikaisuuteen: kaikki järjestelmän osat tuottavat pieniä viiveitä: näyttölaitteet, signaalinkäsittely, simulointimalli, sekä ohjausjärjestelmä. Täten viiveet on pyrittävä minimoimaan siten, että ne pysyvät pienempinä kuin ihmisen havaintokyky on.

Usein reaaliaikaiset sovellukset jaetaan kahteen kategoriaan: kova- ja pehmeä reaaliaikaisuus (hard ja soft real-time). Kova reaaliaikaisuus asettaa järjestelmän viiveelle tiukan rajan, jota se ei voi ylittää, kun taas pehmeässä reaaliaikaisessa järjestelmässä voidaan järjestelmälle asetettu raja-arvo ylittää hetkellisesti. Tässä sovelluksessa Avant 216 simulointimalli toimii kovan reaaliaikaisuuden vaatimusten mukaan, kun taas muu järjestelmä pehmeän reaaliaikaisuuden mukaan.

### *Staattinen ja dynaaminen simulointi*

Liikkuvan ajoneuvon simuloinnissa on kaksi perustoteutustapaa: Dynaaminen ja staattinen simulointi (Kuva 4.3). Dynaamisessa simuloinnissa ajoneuvon liikkeet lasketaan voimavaikutusten avulla. Tällöin esimerkiksi ajoneuvo liikkuu eteenpäin kun sille lasketaan renkaan välityksellä syntyvä voimavaikutus renkaan ja maaston välillä.



**Kuva 4.3.** Staattinen ja dynaaminen simulointi.

Staattisessa simuloinnissa ajoneuvon liikkeet toteutetaan kontrolloimalla suoraan kappaleiden asemaa ja liikenopeuksia. Tällä menetelmällä voidaan toteuttaa simulointimalleja huomattavasti kevyemmässä muodossa, koska paljon laskentatehoa vaativat voimavaikutukset voidaan jättää huomioimatta.

Voimien avulla laskettavat liikkeet (dynaaminen simulointi) vaativat huomattavasti enemmän laskentatehoa kuin suoraan nopeuksien avulla laskettavat liikkeet, mutta tällä menetelmällä päästään myös oikein toteutettuna huomattavasti aidompaan käyttäytymiseen. Useissa simulointisovelluksissa käytetään molempia menetelmiä limittäin: tarkempaa tarkastelua vaativiin kohteisiin sovelletaan dynaamisia menetelmiä, kun taas muihin osiin voidaan hyödyntää kevennettyä staattista mallia. Usein hyvin toteutetulla staattisella mallilla päästään kohtuullisen tarkkaan toteutukseen, mutta ei kuitenkaan hyvin toteutetun dynaamisen mallin tarkkuuteen.

### *Simulointiohjelmisto*

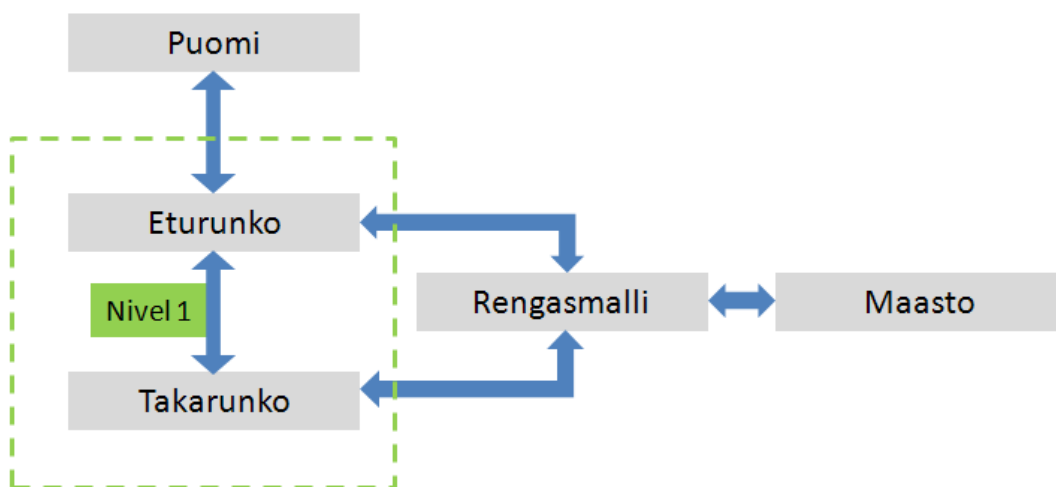
Markkinoilla on useita simulointiin erikoistuneita ohjelmistoja, jotka tarjoavat tehokkaita työkaluja simulointikäyttöön. Tässä sovelluksessa mallinnetun mobilekoneen simulointimallin luomiseen käytettiin Matlab/Simulink®-ohjelmistoa. Matlab® on

Mathworksin kehittämä matematiikkaohjelmisto, jota on mahdollista käyttää Windows, Linux, Macintosh ja Solaris käyttöjärjestelmissä. [15, 18]

Simulink® on Matlabin® yhteydessä toimiva graafinen simulointiohjelmisto. Simulink® ympäristössä on mahdollista muodostaa erilaisten järjestelmien simulointimalleja lohkokaaviomuodossa, omilla funktiolla matlabin omassa m-file muodossa tai c-kielisenä koodina [15]. Simulink®-ympäristön tarjoamia graafisessa muodossa esitettyjä kirjastoja hyödyntämällä saadaan koottua erittäin monimuotoisia järjestelmiä, joita voidaan vielä täydentää kustomoiduilla ohjelmointiosilla.

### 4.3. Mekaanisten järjestelmien mallinnus

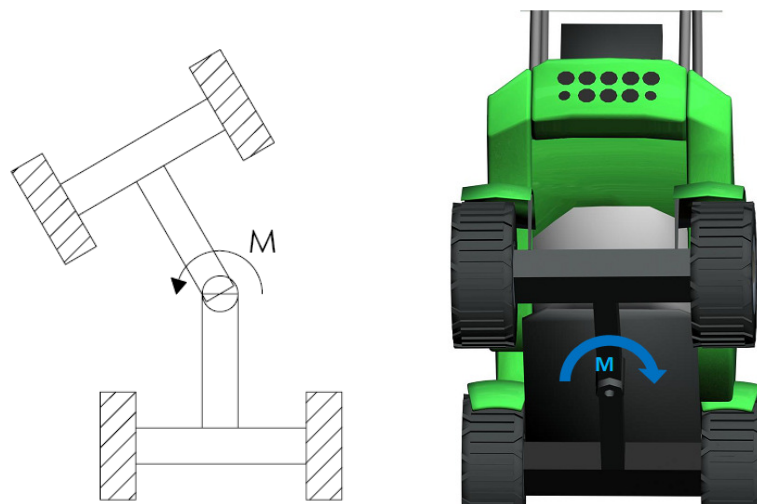
Mekaaniset osat käsittävät lähinnä koneiden rungot, joilla on koneen käyttäytymisen kannalta merkitystä, eli ne liikkuvat toistensa suhteen. Avant 216 koneessa tällaisia ovat mm. koneen etu- ja takarunko, puomin osat, sekä ajoneuvon renkaat. Simulointiohjelmistossa kappaleet kytketään toisiinsa erilaisilla rajoitteilla, eli nivelillä. Lisäksi kappaleille voidaan määritellä massat, inertiat, sekä haluttu määrä kiinnitys- ja mittauspisteitä.



**Kuva 4.4.** Simulointimallin mekaanisen järjestelmän ylin taso.

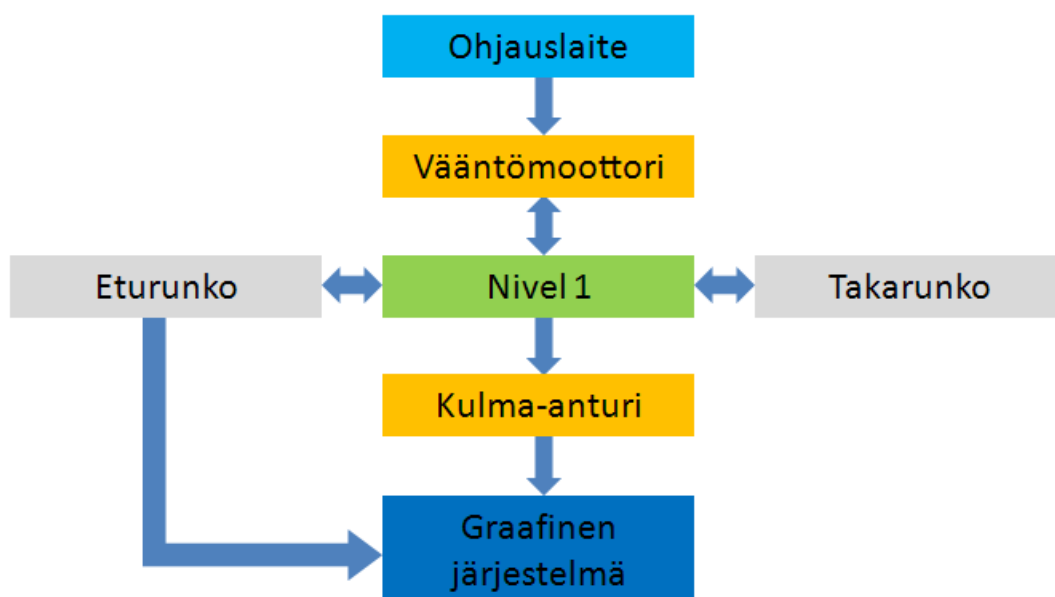
Kuvassa 4.4 on esitetty simulointimallin mekaanisen järjestelmän ylimmän tason lohkokaaviokuvaus. Mallin mekaaninen järjestelmä voidaan jakaa neljään tasoon: Koneen runko, puomi, rengasmalli ja maastomalli. Näiden osien väliset interaktiot mahdollistavat simulointimallin perustoiminnot.





**Kuva 4.5.** Keskinivel ja siihen vaikuttava vääntömomentti  $M$ .

Koneen runko koostuu kahdesta erillisestä osasta, jotka on kytketty yhteen yhden vapausasteen nivelellä (Nivel 1). Kuvassa 4.5 on esitetty keskinivel ja siihen vaikuttava vääntömomentti  $M$ . Tämä nivel mahdollistaa runkojen rotaation toistensa suhteen, joka mahdollistaa runko-ohjatun koneen kääntämisen.

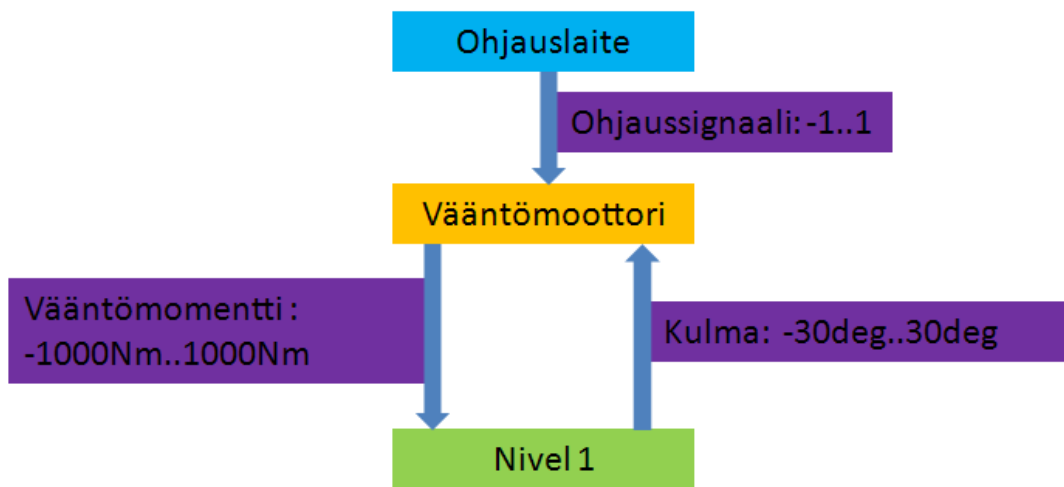


**Kuva 4.6.** Mobilekoneen rungon lohkokaavio.

Kuvassa 4.6 on esitetty rungon mekanismien liittynät muihin järjestelmiin. Graafiselle järjestelmälle lähetetään Eturungon asema globaalissa koordinaatistossa, sekä rotaatiomatriisi. Näiden tietojen perusteella graafinen järjestelmä osaa sijoittaa koneen graafisen mallin oikeaan paikkaan ja asentoon. Lisäksi graafiselle järjestelmälle lähetetään tieto koneen etu- ja takarungon välisen nivelen kulmasta. Tämän avulla

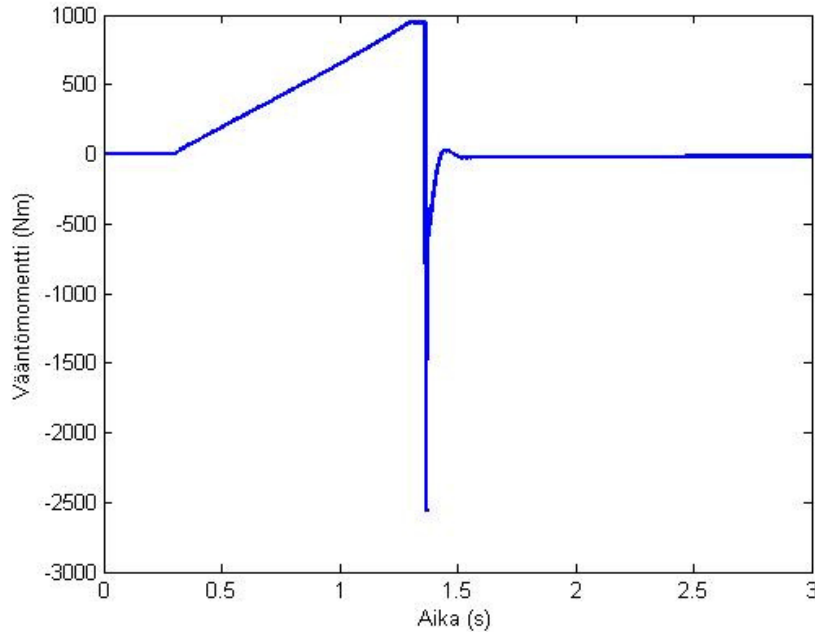
saadaan yksiselitteinen tieto, missä asennossa koneen takarunko on eturunkoon nähden. Takarungon asemaa ei tarvita erikseen, sillä se on laskettavissa eturungon aseman ja nivelen kulman avulla.

Varsinaisessa Avant 216 mobilekoneessa koneen rungon ohjaus on toteutettu sylinterin avulla. Simulointimalliin haluttiin mallin yksinkertaistamisen vuoksi toteuttaa rungon kääntö yksinkertaisen vääntömoottorin avulla. Tällöin voidaan koneen keskiniveleen (Nivel 1, kuva 4.7) johtaa suoraan kääntämisen mahdollistava vääntömomentti. Sylinterikäännön toteutus olisi vaatinut useita ylimääräisiä kiinnityspisteitä, sekä lohkoja, ja lopputulos olisi ollut samankaltainen.



**Kuva 4.7.** Vääntömoottorin lohkokaaviokuvaus.

Vääntömoottorin lohkokaaviokuvaus on esitetty kuvassa 4.7. Vääntömoottorilohkon sisääntulona on ohjainlaitteen signaali. Ohjainlaitteena testiympäristössä käytetään analogista joystick-ohjainta, jonka signaali vaihtelee välillä +/- 1. Tämä ohjaussignaali skaalataan halutulle vääntömomenttialueelle, välille 0-1000 Nm. Käytettäessä lyhyellä toiminta-alueella toimivaa ohjainta, on myös toivottavaa, ettei vääntömomentti kasvaa liian suureksi liian lyhyessä ajassa. Tämän estämiseksi on rajoitettava vääntömomentin muutosnopeutta. Varsinaisessa sovelluksessa on tarkoitus siirtyä käyttämään ohjauspyörää, jolloin ohjausarvon vaihtelunopeus on huomattavasti alhaisempi, jolloin vääntömomentin muutosnopeutta ei enää tarvitse rajoittaa.



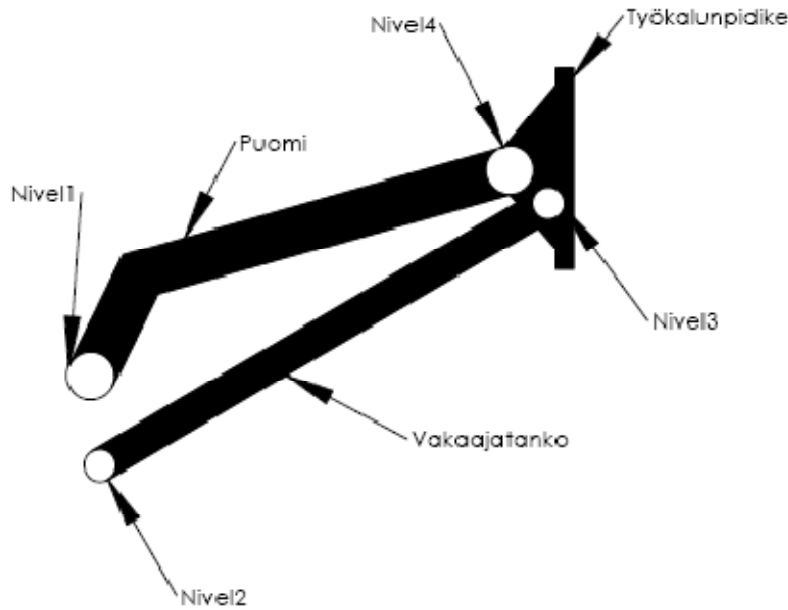
**Kuva 4.8.** Keskiniveleen vaikuttava vääntömomentti ajan funktiona.

Kuvassa 4.8 on esitetty ohjaussignaalin muutos vääntömomentiksi. Ajassa 0,3s ohjaussignaalia aletaan kasvattamaan tasaisesti. Ohjaussignaali saavuttaa maksimiarvon ajassa 1,3s, ja noin ajassa 1,4s keskinivel saavuttaa ääriarvon (30 astetta), jolloin vääntömoottoriin aiheutuu pysähtymisen aiheuttava vastamomentti (n. 2500 Nm).

Puomimallin, Rengasmallin ja Maaston interaktiota koneen runkoon on käsitelty tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Liitteessä 1 on esitetty simulointimallin ylimmän mekaanisen tason Simulink® lohkokaaaviokuvaus.

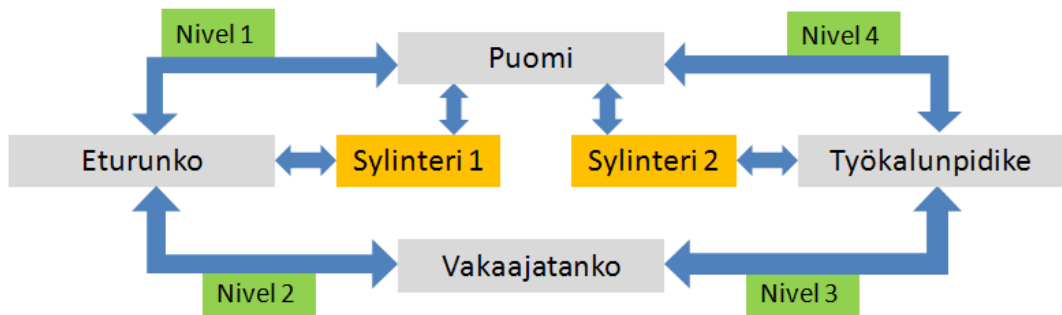
### ***Puomin mekanismit***

Avant 216 mobilekoneen puomissa on kaksi vapausastetta. Kuvassa 4.9. on esitetty puomin nivelrakenteet, ja kuvassa 4.4 puomimallin lohkokaaaviokuvaus. Puomin rungon liikuttamisen (Nivel 1) lisäksi voidaan liikuttaa työkalunpidikettä oman akselinsa ympäri (Nivel 4). Lisäksi puomissa on mekanismi, joka pitää työkalun kulman vakiona, vaikka puomin runko liikkuisi. Tämä mekanismi on vakaajatanko, joka on kytketty koneen runkoon (Nivel 2), ja toisesta päästä vastaavasti työkalunpidikkeen yhteyteen (Nivel3). Tämä mekanismi tekee puomin mallintamisesta erittäin haastavaa. Puomiin muodostuu ns. nivelnelikulmio, jolloin sen ratkaiseminen reaaliaikaisella simuloinnilla on erittäin raskasta. Liitteessä 2 esitetty puomimallin Simulink® lohkokaaaviokuvaus.



**Kuva 4.9.** Puomin nivelnelikulmio.

Kuvassa 4.10 on esitetty Puomin lohkokaaviokuvaus. Kuvasta voidaan havaita erillisten mekaanisten osien, puomin toimilaitteiden ja nivelten väliset yhteydet. Sylinteri 1 liikuttaa koko puomia, kun taas Sylinteri 2 on tarkoitettu työkalunpidikkeen kääntämiseen.



**Kuva 4.10.** Puomin lohkokaaviokuvaus.

Kuten kuvan 4.10 rakenteesta voidaan havaita, syntyy puomin rakenteesta eräänlainen silmukka. Tällaista rakennetta kutsutaan nivelnelikulmioksi. Silmukkarakenne on simulointiohjelmistolle laskennallisesti erittäin haastava, koska laskettaessa rakenteen tilaa, joudutaan silmukkaa laskemaan jatkuvasti. Tämä johtuu siitä, että jokainen osa on kytketty kahteen rakenteen toiseen osaan, joten laskenta ei missään vaiheessa katkea kiinteään osaan. Usein tällaisessa tilanteessa joudutaan simulointimalliin asettamaan jokin matemaattinen operaattori (Esim integraattori), joka katkaisee laskennan yhdestä kohtaa silmukkaa.

Edellä kuvatun ongelman esiintyminen riippuu kuitenkin suuresti simulointimallin kokonaisuudesta, eikä tässä sovelluksessa toistaiseksi ole esiintynyt kyseistä ongelmaa. Kuitenkin jatkossa kehitettäessä mallin puomijärjestelmän toimintaa, on ongelmien esiintyminen mahdollista.

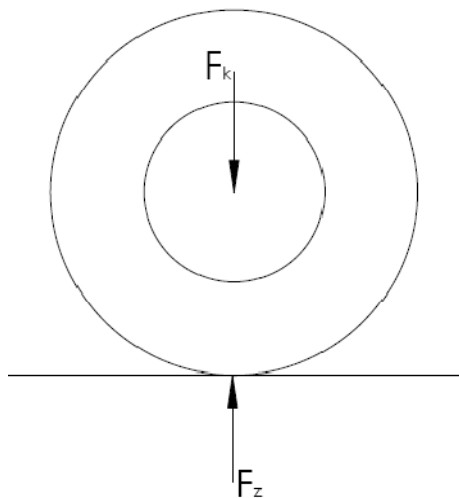
### ***Renasmalli***

Renkaan simulointi on eräs dynaamisen ajosimulaattorin kriittisimmistä osista. Kaikki interaktio ajoneuvon ja maaston välillä tapahtuu renkaan välityksellä. Ajosimulaattorin realistinen käytös on suuresti riippuvainen rengasmallin toimivuudesta. Renkaan ja maaston vuorovaikutuksessa on useita vaikeasti mallinnettavia epälineaarisuuksia, kuten kitkoja ja joustoja.

Renkaan käyttäytymiseen sisällytetään usein myös renkaan kytkentään käytettävien komponenttien vaikutukset, sekä jousituksen ja iskunvaimennuksen huomioiminen. Näiden ja fyysisen renkaan joustojen yhteisvaikutukset ovat erittäin monimutkaisia kokonaisuuksia.

Erilaisten ajoneuvojen renkaat ja niihin liittyvät komponentit vaihtelevat suuresti ajoneuvotyypeittäin: Mobilekoneiden jousittamattomista massiivisista renkaista, henkilöauton kompakteihin tehokkaasti jousitettuihin ja vaimennettuihin renkaisiin. Tässä sovelluksessa mallinnettavana oli pienen mobilekoneen renkaan ja maaston välinen interaktio.

Renkaan yksi tehtävä on kantaa ajoneuvon massasta aiheutuva kuormitus maata vasten. Tämä mahdollistaa ajoneuvon liikkeen maaston muotojen mukaan. Ilmatäytteinen ja kumipintainen rengas myös joustaa kuormituksen ja renkaassa vallitsevan ilmanpaineen suhteen jonkin verran. Lisäksi erillisillä jousituskomponenteilla voidaan tarvittaessa lisätä joustoa ajoneuvon ja maaston välillä.



**Kuva 4.11.** Renkaan pysty akselin suuntainen kuormitus.

Kuvassa 4.11 on esitetty rengasmallin ja maaston välisen interaktion peruseriaate. Kone aiheuttaa voiman  $F_k$  suuruisen voimavaikutuksen Z-akselin negatiiviseen suuntaan. Vastaavasti maaston täytyy aiheuttaa voiman  $F_k$  suuruisen vastavoima  $F_z$ , jotta kone pysyisi tasapainossa maaston pinnalla.

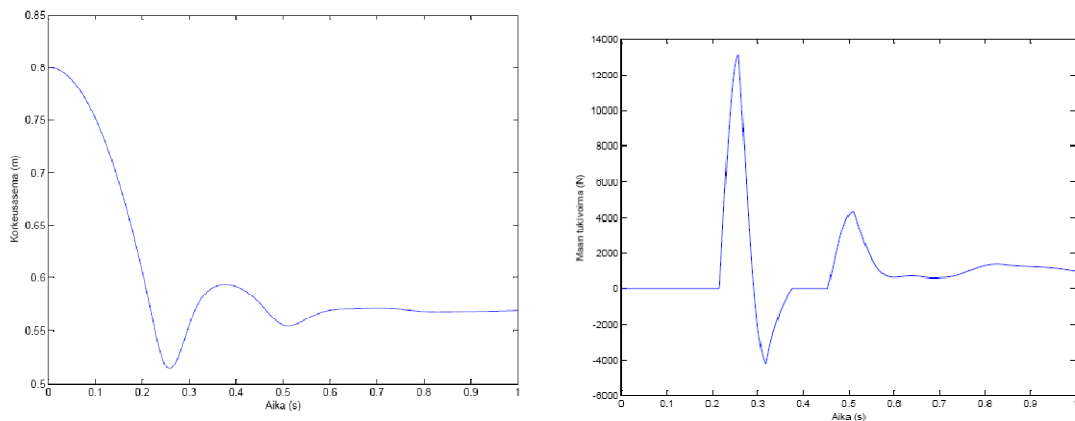
Rengasmalli tarvitsee toimiakseen maaston korkeustietoja. Tässä sovelluksessa maaston korkeustiedot on esitetty matriisimuodossa. Maastomatriisissa on määritelty koneen toiminta-alueen korkeustiedot. Renkaan keskipisteen X ja Y koordinaatit viedään maastomallille, ja vastaavasti sieltä saatu korkeustieto takaisin rengasmallille.

Tämän sovelluksen Avant 216 mobilekoneen simulointimalliin ajoneuvo-maasto interaktion pystysuuntainen komponentti toteutettiin yhdellä jousi-vaimennus parilla yhtä rengasta kohden. Rengasmallille tuodaan maaston korkeustieto erilliseltä maastomatriisilta. Tämän ja koneen renkaan oman korkeustiedon erosuureen perusteella lasketaan renkaaseen vaikuttava pystysuuntainen voima. Totetutuksen Simulink® lohkokaaavio on esitetty liitteessä 3. Liitteen vasemmassa laidassa olevalta Body Sensor lohkolta saadaan renkaan asema- ja nopeustiedot, josta ne puretaan Demux-lohkon avulla omiksi signaaleikseen. Asematieto jaetaan X-, Y- ja Z-koordinaatteihin, sekä nopeustieto vastaavasti X-, Y- ja Z-akselin suuntaisiin nopeuksiin. Globaalien koordinaatiston asematiedosta, renkaan keskipisteen X- ja Z-koordinaatit viedään eteenpäin maastomatriisille korkeustiedon määrittelemiseksi. Maastomallia on käsitelty tarkemmin seuraavassa kappaleessa. Maastomallilta palautuu maaston korkeustieto (Y-koordinaatti) renkaan keskipisteen kohdalla (From Ground-lohko). Tämä lohko on Liitteen 3 alareunassa. Saatua korkeustietoa verrataan renkaan omaan korkeustietoon From Ground-lohkon yläpuolella olevan summalohkon avulla. Renkaan korkeustieto saadaan Body Sensor-lohkolta vastaavasti kuin maastomallille lähetetyt X- ja Z-koordinaatit aiemmin. Lisäksi renkaan keskipisteen Y-koordinaatista täytyy vähentää renkaan säde, jotta saadaan renkaan alareunan kosketuspinnan asema. Tämä on toteutettu Function-lohkolla, jossa tulevasta signaalista vähennetään parametritiedostoon syötetty renkaan säde.

Renkaaseen alkaa kohdistua tukivoima, kun renkaan pinta koskettaa maaston pintaa. Lohkokaavio kuvauksessa kosketusrajapinta on määritelty kytkimen (Switch-lohko) avulla. Lohkon raja-arvon avulla voidaan määrittää milloin maaston tukivoima kohdistetaan renkaaseen. Tässä tapauksessa raja-arvona toimii renkaan ja maaston korkeustiedon erosuure: Kun renkaan alapinnan korkeusasema on alempana kuin maaston, alkaa maaston tukivoima vaikuttaa. Switch-lohkon keskimmäiseen porttiin tuodaan laskettu erosuure, ja lohkon asetuksista on määritelty tarvittavat asetukset: Kun erosuure on negatiivinen, päästää kytkin porttiin yksi tulevan voiman läpi. Muuten portin 3 nollasuure menee kytkimen läpi.

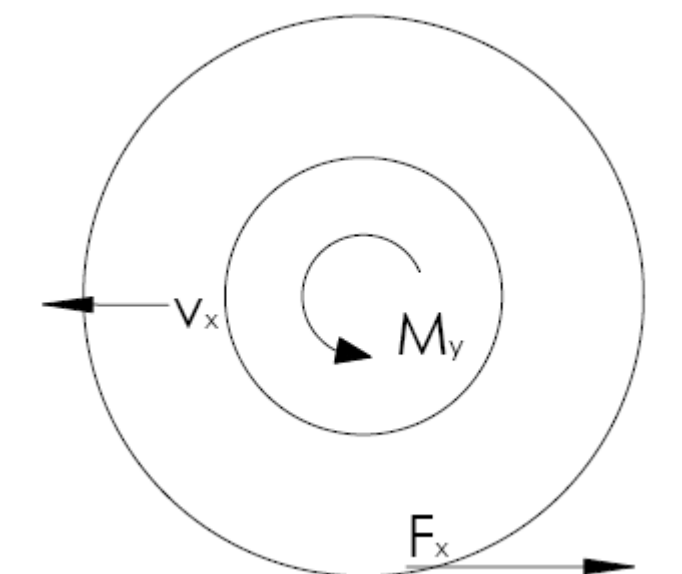
Renkaan ja maaston välisen voiman suuruus määräytyy erosuureen ja vakiokertoimen tulon avulla. Alustavasti kokeiden avulla kertoimeksi on määritetty 220 000, jolla saavutettiin silmämääräisesti sopiva käyttäytyminen. Lisäksi renkaan ja maaston väliseen interaktioon vaikuttaa mallinnettu vaimennus. Tällä ominaisuudella rauhoitetaan mallin toimintaa ja mallinnetaan renkaan yhteydessä olevia joustojen vaimennusominaisuuksia. Vaimennus toimii samaan tapaan kuin varsinainen maaston tukivoima: Parametrina vaimennukselle käytetään asematiedon sijasta Y-akselin suuntaista nopeustietoa. Vaimennuksen suunta on aina nopeuden suuntaan nähden vastakkainen. Lisäksi vaimennus tapahtuu ainoastaan positiivisen Y-akselin suuntaan oleville nopeuksille, eli ylöspäin suuntautuville liikkeille. Tämä johtuu siitä seikasta, että maaston aiheuttama tukivoima on aina ylöspäin, ja haluttaessa vaimentaa tämän voiman aiheuttamia liikkeitä, tulee vaimennuksen suuntautua aina päinvastaiseen suuntaan.

Kuvassa 4.12 on renkaan korkeusasemaa ja renkaaseen vaikuttavaa tukivoimaa esittävät kuvaajat simulaation käynnistystilanteesta. Malli putoaa alussa n. 25 senttimetrin korkeudelta johtuen maastomatriisin ja simulointimallin parametreissa olevista eroavaisuuksista. Tämä toiminta kuvaa kuitenkin hyvin maaston tukivoiman toimintaa. Oikean puoleisesta kuvaajasta nähdään putoamisen aiheuttama yli 13 000 Newtonin voimapiikki, sekä stabiilin tilanteen (malli liikkumatta suorassa maastossa) tukivoiman suuruus, joka on noin 1000 Newtonia.



**Kuva 4.12.** Renkaan ja maaston voimavaikutus.

Rengas myös välittää voimansiirrota tai jarrulta saatavan voimavaikutuksen maaston pintaan, jolloin ajoneuvoa voidaan kiihdyttää tai jarruttaa. Tähän toimintaan vaikuttaa suuresti myös renkaan ja maaston välinen kitka, sekä renkaan pyörimistä hidastava vierintävastus ja renkaan akseliston kitka.

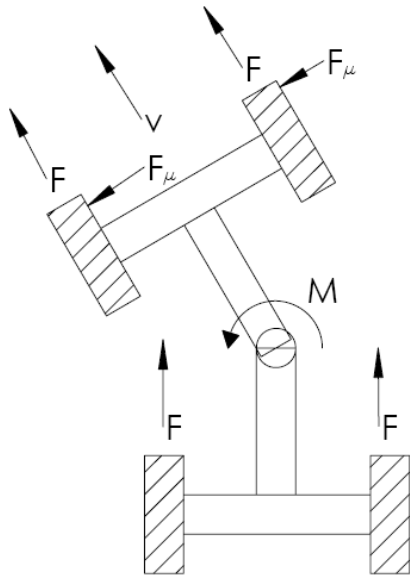


**Kuva 4.13.** Renkaaseen vaikuttava momentti.

Avant 216 mobilekoneen vääntömoottorit tuottavat renkaalle tietynsuuruisen momentin. Tämän momentin ja renkaan säteen avulla voidaan laskea konetta eteen- tai taaksepäin kuljettava voima. Kuvassa 4.13 on esitetty periaatekuva eräistä renkaan toimintaan vaikuttavista voimista. Vääntömoottori aiheuttaa renkaan akselin ympäri vaikuttavan vääntömomentin  $M_y$ . Renkaan ja maaston välille syntyy renkaan liikkeestä aiheutuva voimavaikutus  $F_x$ , joka taas lopulta johtaa koneen liikkeeseen (nopeus  $v_x$ ). Lisäksi voiman määrään vaikuttaa renkaan ja maaston välinen kitka, mutta tässä sovelluksessa tämä jätettiin tarkoituksella huomiotta ja käytettiin rajatonta pitoa. Mallinnettuja vääntömoottoreita on käsitelty tarkemmin luvussa 5.3.3. Lisäksi malliin toteutettiin renkaan liikettä hidastava voima. Tällä toteutuksella vältetään mallin ei-toivottu valuminen.

Kun liikkeessä olevaa ajoneuvoa käännetään, yleensä ajoneuvon eturenkaiden kulmaa muutetaan ohjauspyörän avulla. Tällöin jälleen renkaan ja maaston välinen kitka mahdollistaa ajoneuvon kääntämisen. Avant 216 mobilekoneessa koneen kääntäminen tapahtuu etu- ja takarungon välissä olevan nivelen avulla. Kuvassa 4.14 on esitetty tämä periaate.





**Kuva 4.14.** Rengasmallin sivuttaispito.

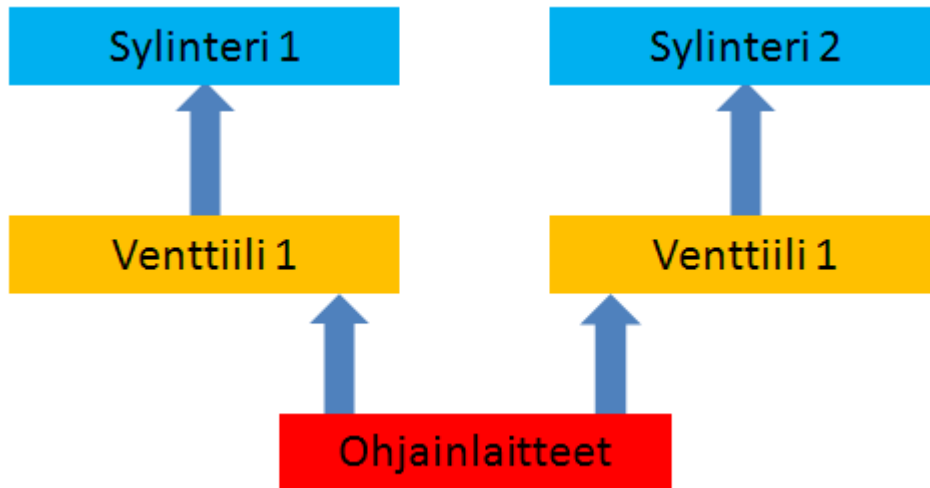
Tässä sovelluksessa sivuttaispito mallinnettiin tarkastelemalla yksittäisen renkaan sivuttaisnopeutta. Nopeuden suhteen laskettiin sitä vastakkaisen suuntainen voimavaikutus, jolloin rengas ei pääse liikkumaan sivulle, ainakaan havaittavissa olevia etäisyyksiä. Malli ei ota huomioon renkaan ja maaston välistä kitkaa, sillä pito on lähes rajaton. Liitteessä 4 on esitetty toteutuksen lohkokaaviokuvaus. Rengasmallilta saadaan nopeustietoa sensorin avulla. Nyt tarkastellaan renkaan nopeutta sivusuunnassa (x-akselin suhteen) renkaan lokaalin koordinaatiston suhteen. Tällöin voimavaikutus saadaan kohdistettua kohtisuoraan renkaan sivuun.

#### 4.4. Hydraulisten järjestelmien mallinnus

Hydraulisia järjestelmiä voidaan mallintaa useilla eri tavoilla. Osa menetelmistä perustuu ainakin osittain mittauksiin (Empiirinen ja semiempiirinen malli), kun toiset menetelmät nojautuvat hydrauliiikan matemaattisiin yhtälöihin (Analyttinen malli). Paras mallinnusmenetelmä on usein suuresti riippuvainen käyttötarkoituksesta.

Tässä sovelluksessa ei ollut tarkoituksenmukaista lähteä verifioimaan mallinnettavan koneen hydraulisen järjestelmän täysin aitoa käyttäytymistä, koska sovelluksen pääasiallinen tutkimuksen kohde oli tutkia liikealustan käyttäytymistä.

Avant 216 mobilekoneessa on useita mallinnettavia hydraulisia komponentteja: Puomin liikuttamiseen käytettävät kaksi sylinteriä ja niitä ohjaavat venttiilit, ohjausjärjestelmän sylinteri, koneen liikuttamiseen käytettävät hydraulimoottorit, sekä tilavuusvirtalähteenä toimiva hydraulipumppu.



**Kuva 4.15.** Puomin hydraulisen järjestelmän ylimmän tason lohkokuvaus.

Kuvassa 4.15 on esitetty mobilekoneen puomiston hydraulisen järjestelmän ylimmän tason lohkokaaaviokuvaus. Lisäksi liitteessä 5 on esitetty saman järjestelmän Matlab® toteutus.

Hydraulisten järjestelmien mallinnus rakentuu kolmen ytimen ympärille: Nestemalli, tilavuusmalli, sekä kuristusmalli. Näitä malleja yhdistämällä voidaan rakentaa tehokkaasti hydraulikomponenttimalleja, kuten sylinteri tai suuntaventtiili. Seuraavissa kappaleissa on esitetty järjestelmässä käytettyjen osien toteutukset.

### *Nesteen ominaisuudet*

Hydrauliikka on energian siirtoa nesteen välityksellä. Perusteena hydrauliikan ymmärtämiselle on nesteen käyttäytymisen ymmärtäminen. Nesteen ominaisuuksia ovat tiheys, viskositeetti, puristuskerroin. Nämä ominaisuudet määräävät hyvin pitkälle nesteiden ja nestetilavuuksien käyttäytymistä. [5, 16]

Tiheys  $\rho$  on määritelty seuraavasti:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

jossa  $m$  on kappaleen massa [kg] ja  $V$  kappaleen tilavuus [ $\text{m}^3$ ]. Nesteen tiheys on lisäksi riippuvainen lämpötilasta ja paineesta, sekä vaikuttaa kuristimen läpäisemään tilavuusvirtaan, äänennopeuteen nesteessä ja paineiskuihin. Öljyn tiheys on noin  $870 \text{ kg/m}^3$ . [16]

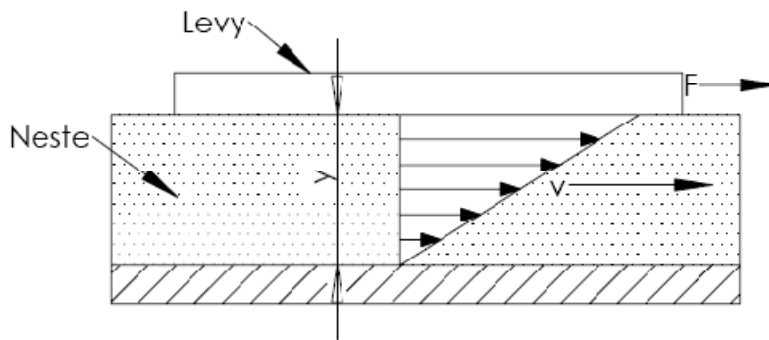
Kaikissa todellisissa nesteissä esiintyy sisäistä kitkaa, joka aiheutuu virtausaineiden sitkeydestä eli viskositeetista. Lisäksi kun neste virtaa kiinteiden kappaleiden ohi, esiintyy virtausaineen ja kiinteän kappaleen rajapinnassa ulkoista kitkaa. Tämä kitka

aiheuttaa adheesiovoimia, joiden vaikutuksesta virtaus kiinnittyy kappaleen seinämään, ja tällöin seinämän viereisen nestekerroksen nopeus on sama kuin seinämän. Sisäinen kitka aiheuttaa tämän jälkeen nesteeseen nopeusjakauman. [5, 8]

Kuvassa 4.16 nestekerroksen päällä liikkuu kosketuspinta-alaltaan nesteen kanssa  $A$ :n suuruinen levy. Levy liikkuu kiinteään pohjaan nähden nopeudella  $v$ , ja nestekerroksen paksuus on  $y$ . Kun neste jaetaan levyn suunnassa hyvin ohuisiin kerroksiin, voidaan olettaa, että pohjan viereisen kerroksen nopeus  $v_0 = 0$ , ja levyn viereisen kerroksen  $v_y = v$ . Tällöin nesteen sisäinen kitka aiheuttaa kerrosten välille leikkausvoiman, jonka seurauksena levyn liikuttamiseen tarvitaan yhtä suuri voima

$$F = \frac{\eta \cdot A \cdot v}{y} \quad (2)$$

jossa verrannollisuuskerroin  $\eta$  [Pa·s] on nesteen absoluuttinen, eli dynaaminen viskositeetti. [5, 8, 16]



**Kuva 4.16.** Nesteen viskoosikitkan aiheuttama vastus.

Leikkausvoiman johdosta pohjan ja levyn väliset kerrokset ovat liikkeessä, jolloin muodostuu kuva 4.16 mukainen nopeusjakauma. Nestekerroksien välillä voima vaikuttaa hitaammin kulkevaan kerrokseen kiihdyttävästi, ja nopeammin kulkevaan hidastavasti. Leikkausvoiman  $F$  ja levyn nesteen vastaisen pinta-alan  $A$  avulla voidaan ratkaista nesteessä vaikuttava leikkausjännitys, jolloin yhtälö (3) saadaan yleiseen muotoon. [10, 18]

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

Tätä yhtälöä kutsutaan myös Newtonin laiksi ja lakia noudattavia nesteitä newtonilaisiksi nesteiksi. Tällaisissa nesteissä pienetkin leikkausjännitykset aiheuttavat virtausta. Myös kaikki hydraulinesteet kuuluvat tähän ryhmään. [8, 16]

Usein teoreettisissa tarkasteluissa käytetään dynaamisen viskositeetin sijaan kinemaattista viskositeettiä, joka saadaan jakamalla dynaaminen viskositeetti nesteen tiheydellä:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (4)$$

Kinemaattisen viskositeetin SI-yksikkö on  $[v]=[m^2/s]$ , mutta yleisesti käytetään myös vanhaa yksikköä *senttistokea*:  $[cSt] = 10^{-6} [m^2/s] = 1 [mm^2/s]$ . [14, 15]

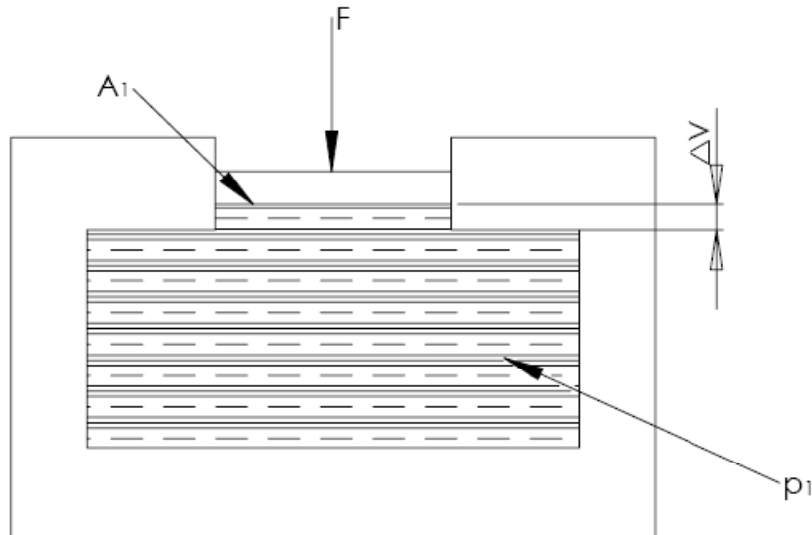
Viskositeetti riippuu voimakkaasti lämpötilasta, sekä jonkin verran paineesta. Etenkin öljyllä lämpötilariippuvuus tulisi huomioida, sillä se voi aiheuttaa vaikeasti hallittavia ongelmia laitteissa. [5, 16]

Paineen kasvaessa neste puristuu hieman pienempään tilavuuteen. Hydraulinesteen kokoonpuristuvuus aiheuttaa joustoja järjestelmään. Myös hydraulijärjestelmän muut komponentit aiheuttavat joustoja, jotka aiheuttavat järjestelmään epätarkkuutta ja värähtelyjä etenkin toimittaessa suurilla paineilla, suurilla nestetilavuuksilla ja suurilla kuormia liikuteltaessa. Kokoonpuristuvuus on tärkein hydraulijärjestelmien dynamiikkaan vaikuttava tekijä. [5, 8, 16]

Puristuskertoimella tarkoitetaan nesteen tilavuuden riippuvuutta nesteessä vallitsevasta paineesta. Kuvan 4.17 tilanteessa joustamattomassa astiassa on nestetilavuus  $V_0$ , jonka paine on  $p_0$ . Nesteeseen kohdistetaan männän välityksellä voima  $F$ , jolloin nesteen paineeksi muodostuu  $p_1$ , ja tilavuudessa tapahtuu muutos  $\Delta V$ . Tilavuuden muutokselle voidaan kirjoittaa yhtälö

$$\Delta V = -\frac{1}{B_n} \cdot V_0 \cdot (p_1 - p_0) \quad (5)$$

jossa  $B_n$  on nesteen puristuskerroin [Pa]. Mitä isompi nesteen puristuskerroin on, sitä vähemmän neste puristuu kokoon. Kaava on validi ainoastaan kun tilavuuden muutos  $\Delta V$  selvästi pienempi kuin tilavuus  $V$ , eli jos paineen muutos  $(p_1 - p_0)$  selvästi pienempi kuin puristuskerroin  $B$  ( $\Delta p \ll B$ ). [5, 8, 16]



**Kuva 4.17.** Nesteen kokoonpuristuminen.

Puristuskerroin on myös riippuvainen vallitsevasta paineesta ja lämpötilasta. Paineen vaikutus on huomattavasti vähäisempi, mutta lämpötilan nousu pienentää, ja lasku vastaavasti kasvattaa puristuskerrointa. Painealueella 0-30 MPa paineen muutoksen vaikutus puristuskertoimeen on merkityksetön, kun taas lämpötilan vaikutus 20-60 celsiusasteen välillä on noin 10%. Öljyn teoreettinen arvo on noin 1500 MPa, ja veden 2100 MPa, joten oletus  $\Delta p \ll B$  pätee hyvin tavallisissa hydraulijärjestelmissä, joissa paine alle 40 MPa. Usein käytännön mallinnustyössä puristuskerroin oletetaan paineesta ja lämpötilasta riippumattomaksi. [5, 8, 16]

Hydraulijärjestelmässä on nesteen lisäksi myös muita joustoihin vaikuttavia tekijöitä. Näitä ovat mm. sylinterien, putkien ja letkujen joustot, sekä nesteessä oleva vapaa ilma. Usein mekaanisten osien, eli sylintereiden, letkujen ja putkien joustot voidaan määrittellä suhteellisen tarkasti, koska niiden tilavuudet tunnetaan. Vapaan ilman määrää ei yleensä tunneta järjestelmässä, joten sen huomioonottaminen on hankalaa. [5, 8, 16]

Järjestelmän kokonaisjousto saadaan määrittämällä tehollinen puristuskerroin, joka ottaa huomioon järjestelmän kaikki osa-alueet. Se lasketaan kaavalla

$$\frac{1}{B_{eff}} = \frac{1}{B_n} + \frac{V_p}{V} \cdot \frac{1}{B_p} + \frac{V_l}{V} \cdot \frac{1}{B_l} \quad (6)$$

jossa  $B_{eff}$  tehollinen puristuskerroin,  $B_n$  nesteen puristuskerroin,  $B_p$  putkien ja sylintereiden seinämien puristuskerroin,  $B_l$  on letkujen puristuskerroin, ja vastaavasti  $V$  järjestelmän kokonaistilavuus, sekä  $V_p$  ja  $V_l$  putkien ja letkujen tilavuudet. [8, 16]

Sylinterin seinämien, ja teräsputkien puristuskertoimet on määritelty seuraavasti:

$$B_p \approx \frac{t \cdot E}{d} \quad (7)$$

jossa t putken tai sylinterin seinämävahvuus, E materiaalin kimmomoduli (teräkselle 210GPa) ja d putken tai sylinterin kammion halkaisija. Esimerkiksi sisähalkaisijaltaan 12mm, seinämäpaksuudelta 1.5mm teräsputkelle:  $B_p \approx 25$  GPa). Letkut ovat huomattavasti joustavampia kuin teräsputket, yleensä letkujen puristuskerroin  $B_1$  on luokkaa 100-800 MPa. [5, 8, 16]

### *Nestetilavuuden mallinnus*

Nesteen ominaisuudet ovat yleensä vakioita jossain tietyssä tilavuudessa. Hydraulikassa yhdistetään eri tiloissa olevia nestetilavuuksia, jolloin niiden erillisten tilavuuksien ominaisuuden muuttuvat. Simuloinnissa nestetilavuudeksi määritellään sellainen järjestelmän osa, jossa paine oletetaan samaksi joka kohdassa. Paineen muutos etenee nesteessä äänennopeudella c, joka on määritelty

$$c = \sqrt{\frac{B_{eff}}{\rho}} \quad (8)$$

jossa  $B_{eff}$  on tehollinen puristuskerroin ja  $\rho$  tiheys. [8, 16]

Raja-arvoiksi tilavuudelle on määritelty: tilavuuden pisimmän dimension on oltava pieni verrattuna äänennopeuteen (normaalisti joitakin metrejä), sekä tilavuuden eri osien välillä ei saa olla merkittäviä virtaushäviöitä. Yleensä simuloinnissa esimerkiksi putken tai letkun painehäviö voidaan ottaa huomioon putken päissä, jolloin niitä voidaan käsitellä yhtenä tilavuutena. [16]

Aiemmin esitetystä puristuskertoimen kaavasta (6) voidaan asettaa muotoon

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{B_{eff}}{V} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

jossa tilavuuden muutosnopeus ( $dV/dt$ ) voidaan korvata sisääntulevalla tilavuusvirralla  $Q_{in}$ , jolloin kaava saadaan muotoon:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{B_{eff}}{V} \cdot Q_{in} \quad (10)$$

Edelleen yhdistämällä edelliset ja huomioimalla, että tilavuuteen tulevien ja sieltä lähtevien tilavuusvirtojen summa on  $\sum Q$ , saadaan tilavuuden tilayhtälö

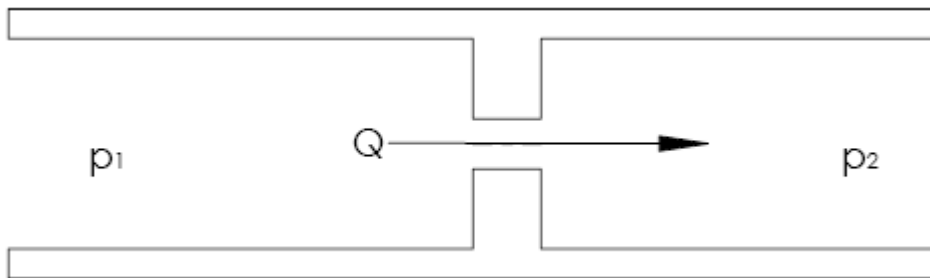
$$\frac{dp}{dt} = \frac{B_{eff}}{V} \left( \Sigma Q - \frac{dV}{dt} \right) \quad (11)$$

joka kuvaa paineen  $p$  riippuvuuden nettotilavuusvirrasta  $\Sigma Q$  ja tilavuudesta  $V$ . Lisäksi yhtälössä on verrannollisuuskerroin  $B_{eff}/V$ . Toisaalta täytyy myös muistaa, että tilayhtälö on vain approksimaatio. Yhtälö ei toteuta massan säilymisen lakia, sillä tarkalleen ottaen tulisi käsitellä massavirtoja tilavuusvirtojen suhteen. Lisäksi yhtälö ei huomioi kavitaatiota. Kuitenkin tarkkuus on yleensä vähintäänkin riittävä, sillä usein virhettä tulee enemmän mallinnuksessa käytettävien parametrien epävarmuudesta. [16]

Liitteessä 6 on esitetty tilavuuden tilayhtälö Simulink® lohkokaaviomuodossa. Yksittäisen tilavuuden simulointilohkon parametreiksi tarvitaan nettotilavuusvirta (Net Flow), tilavuuden muutosnopeus  $dV/dt$ , tilavuus  $V$ , sekä tehollinen puristuskerroin  $B$ . Lisäksi voidaan asettaa tilavuudelle jokin alkupaine, syöttämällä Integrator-lohkolle parametriksi alkuarvo.

### ***Kuristuksen mallinnus***

Kuristus on lyhyt kapenema virtaustiessä, jonka poikkipinta-ala on selvästi pienempi kuin muualla virtaustiessä (Kuva 4.18). Kuristuksessa virtaus voidaan usein olettaa turbulenttiseksi, etenkin suurilla paine-eroilla. [16]



**Kuva 4.18.** Kuristus.

Kuristuksen läpäisevälle tilavuusvirralle on johdettu kaava (12),

$$Q = A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (12)$$

jossa  $A$  on kuristuksen poikkipinta-ala,  $p_1$  paine ennen kuristusta,  $p_2$  paine kuristuksen jälkeen ja  $\rho$  väliaineen tiheys. [8, 16]

Lisäksi tarkasteltaessa kuristusta, tulisi huomioida kuristuksen geometria. Erilaisia geometrioita on lukemattomia, ja kaikki poikkeavat toisistaan suuresti. Usein kuristusgeometria ja muut varioivat tekijät otetaan huomioon lisäämällä kaavan 12 eteen

kertoimeksi kuristuksen huomioon ottava purkautumiskerroin  $\mu$ , jolloin kaava saadaan muotoon:

$$Q = \mu A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (13)$$

Purkautumiskertoimelle on esitetty teoreettinen arvo 0,611. Kuitenkin todellisten arvojen on todettu olevan tapauskohtaisesti välillä 0,5-1,0. Simuloinnissa käytetään yleensä purkauskertoimen arvoja 0,6-0,8, joilla päästään yleensä riittävään tarkkuuteen. Enemmän tarkkuutta vaativissa sovelluksissa on kokeellinen verifiointi usein suositeltavaa. [8, 16]

Usein kaava supistetaan muotoon

$$Q = K_v \cdot \sqrt{p_1 - p_2} \quad (14)$$

Jossa  $K_v$  on ainoa kuristuksen määrittämiseen tarvittava parametri. Tämä esitysmuoto on hyödyllinen tilanteessa, jossa on saatavilla mittausdataa kuristuksesta. Tarvitaan vain yksi tilavuusvirran ja paineiden suhteen mittaus, jolla saadaan määriteltyä parametri  $K_v$ .

$$K_v = \frac{Q_{mitattu}}{\sqrt{p_{1\_mitattu} - p_{2\_mitattu}}} \quad (15)$$

Tämä tapa on kuvaa usein riittävällä tarkkuudella kuristuksen ominaisuuksia. Toisaalta täytyy muistaa, että todellisessa tilanteessa kerroin ei ole täysin vakio, vaan on riippuvainen lievästi paine-erosta, nesteen viskositeetista, virtaustyypistä ja kavitaatiosta. [5, 8, 16]

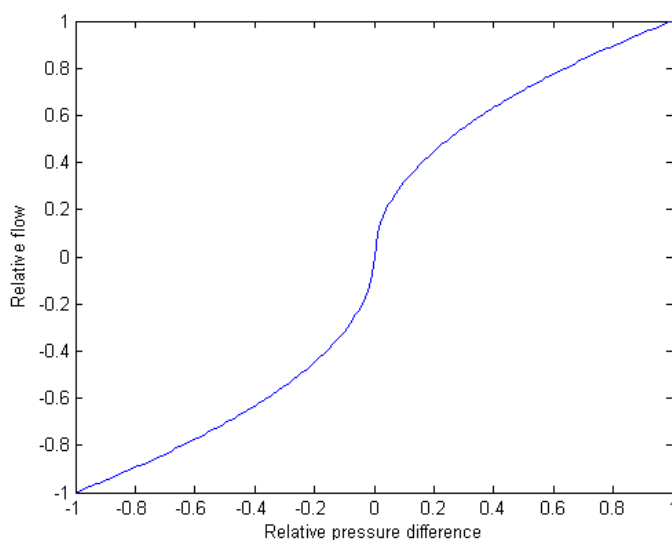
Kuristuksen simulointimalli on tärkeässä roolissa hydrauliiikan simuloinnissa, sillä hydraulijärjestelmässä on useita kuristuksia, ja ne vaikuttavat suuresti järjestelmän toimintaan. Etenkin suuntaventtiilin mallinnuksessa kuristimen malli on merkittävässä osassa.

Kuristuksen simulointimalli perustuu edellä esitettyihin yhtälöihin. Yhtälössä on tiettyjä rajoitteita, jotka tulee huomioida. Ensimmäinen huomioitava asia on yhtälön ratkaisu, kun paine-eron suunta muuttuu, eli  $p_2$  kasvaa suuremmaksi kuin  $p_1$ . Tällöin neliöjuuren alle muodostuu negatiivinen luku, joten sitä ei voida ratkaista numeerisesti. Ongelma voidaan ratkaista muokkaamalla yhtälö muotoon

$$Q = K_v \cdot \text{sgn}(p_1 - p_2) \sqrt{|p_1 - p_2|} \quad (16)$$



Tällöin kuristus toimii paine-eron ( $p_1-p_2$ ) ollessa negatiivinen tai positiivinen. Toinen ongelmakohta on paine-eron nollakohta ( $p_1-p_2=0$ ). Tällöin tilavuusvirran muutosnopeus kasvaa äärettömäksi, ja simulointimallin laskeminen tässä tilanteessa tulee mahdottomaksi. Tilanne vastaa virtauksen siirtymistä turbulenttisesti virtauksesta laminaariseen ja edelleen laminaarisesta takaisin turbulenttiseen. Pienillä paine-eroilla ei esiinny turbulenttista virtausta, joten edellä esitetty kaava ei ole validi tilanteille, joissa paine-ero on pieni.



**Kuva 4.19.** Kuristuksen suhteellinen paine-ero ja suhteellinen tilavuusvirta.

Kuvassa 4.19 on esitetty toteutetun kuristuksen suhteellinen tilavuusvirta suhteellisella paine-erolla. Edellä mainitulla yhtälöllä (16) saadaan toteutuksesta jatkuva koko toiminta-alueella. Liitteessä 6 on esitetty kuristusmallin Simulink® realisaatio.

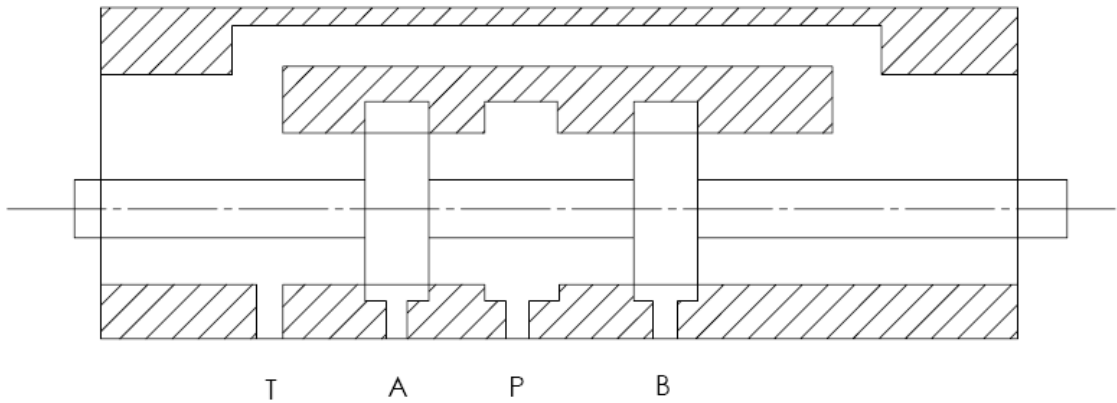
### ***Teoreettinen venttiilimalli***

Suuntaventtiili säätelee toimilaitteelle menevän tilavuusvirran suuntaa ja määrää, ja tätä kautta myös toimilaitteen suuntaa ja nopeutta [8]. Suuntaventtiileitä on myös useita erilaisia: On/off venttiilit mahdollistavat ainoastaan tilavuusvirran suunnan säädön, kun taas proportionaali- ja servoventtiilit mahdollistavat tilavuusvirran määrän tarkan säädön.

Suuntaventtiilin mallinnuksessa käytetään hyväksi edellä esitetyn kuristuksen mallia. Suuntaventtiili on teoriassa useita kuristuksia, joissa on säädettävä virtauspinta-ala. [5, 8, 16]

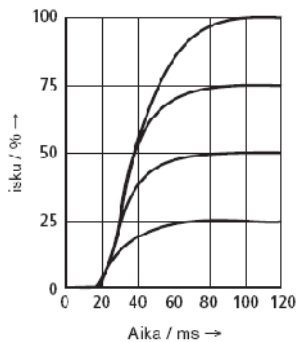
Tässä käsiteltävässä sovelluksessa, eli Avant 216 mobilekoneessa, käytetään kahta 4/3-venttiiliä puomin ohjaamiseen. Tämän tyyppisessä venttiilissä on yhteensä neljä eri virtaustietä: painepuolelta toimilaitteporttiin A (P-A), painepuolelta toimilaitteporttiin B

(P-B), toimilaitepuolelta A tankkiliitántään (A-T), sekä toimilaitepuolelta B tankkiliitántään (B-T). Yhteensä tämän tyyppisessä venttiilissä on siis neljä virtausreunaa (A,B,T,P). Virtauksen kulkiessa yhden virtaustien (esimerkiksi P-A) läpi, ohittaa se aina kaksi virtausreunaa, eli kuristinta. 4/3 venttiilin leikkauskuva on esitetty alla.



**Kuva 4.20.** 4/3-suuntaventtiilin leikkauskuva.

Virtausaukkojen (kuristusten) koot muuttuvat venttiilin sulkuelimen mukaan. Sulkuelimen liikkeeseen vaikuttavat sulkuelimen ja sen ohjauksen tyyppi. Venttiilien valmistajat ilmoittavat avauksen ja sulkuelimen välisen riippuvuuden yleensä erilaisina diagrammeina. Näistä käyrästä voidaan yleensä määrittää sulkuelimen nopeuden maksimiarvo, venttiilin aikavakio, viiveet, sekä hystereesi ja mahdolliset ohjauksen ylitykset tai alitukset. Alla on esitetty erään Bosch-Rexrothin venttiilin askelvastekuvaaja, jossa on esitetty suhteellinen avaus (0-100%) ajan funktiona.

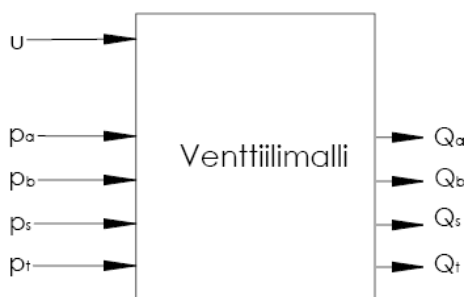


**Kuva 4.21.** Bosch Rexroth 4WRA 6 venttiilin askelvasteet [3].

Kuvasta 4.21 nähdään suoraan viive ohjauksen ja venttiilin sulkuelimen liikkeen välillä, joka on kulunut aika enne käyrän nousua. Tässä tilanteessa arvo olisi noin 20 millisekuntia. Toinen arvo joka voidaan kuvaajasta suoraan määrittää, on sulkuelimen suhteellinen liikenopeus (rate limit), joka voidaan laskea jakamalla ohjauksen arvo (esimerkiksi 10 V) sulkuelimen liikkeen alku- ja loppuajan erotuksella (17):

$$v_{\max} = \frac{U}{t_2 - t_1} \approx \frac{10V}{90ms - 20ms} = \frac{1Avaus}{70ms} \approx 14 \frac{1}{s} \quad (17)$$

Suuntaventtiilin simulointimalli tarvitsee parametreikseen venttiilimallin ulkopuolelta tulevan ohjauksen ( $u$ ), sekä liitäntäporteissa vallitsevat paineet ( $p_a$ ,  $p_b$ ,  $p_s$ ,  $p_t$ ). Rajapinnat on esitetty kuvassa 4.22. Nämä parametrit toimitetaan simulointimallin muilta osilta: paineet saadaan tilavuusmalleilta, ja ohjaus ohjausjärjestelmältä.



**Kuva 4.22.** Suuntaventtiilimallin rajapinnat.

Suuntaventtiilin mallinnuksessa tarvitaan myös tietoa venttiilin dynamiikasta. Tällä tarkoitetaan venttiilin ohjauksen muuntamisesta sulkuelimen, eli karan suhteelliseksi asemaksi ja edelleen virtausaukkojen pinta-aloiksi. Tähän prosessiin vaikuttavat suuresti venttiilin tyyppi ja koko, ohjauksen viive, avautumisen viive, sekä hystereesi. Tarvittavat löytyvät yleensä venttiilin valmistajan tarjoamista datalehdistä tai käyrästäistä. Usein on sovelluskohtaista kuinka tarkkaa tietoa venttiilistä tarvitaan. Yleensä jotain parametreja joudutaan arvioimaan kokemusten pohjalta, joten venttiilin mallinnuksessa päästään usein vain kohtalaiseen tarkkuuteen. [16]

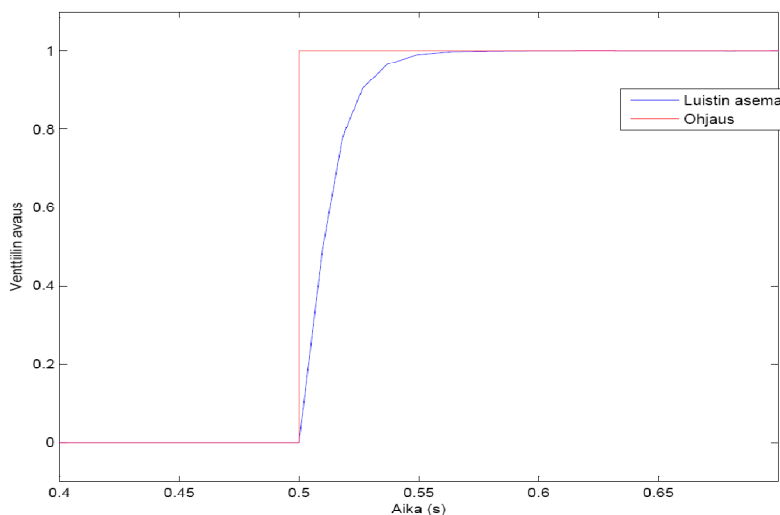
### *Suuntaventtiilin mallinnus*

Avant 216 mobilekoneessa käytetyistä venttiileistä ei ollut saatavilla yksityiskohtaista tietoa, joten sovelluksessa käytettiin yleistä proportionaaliventtiilin mallia, muokattuna sovelluksen kokoluokkaan sopivaksi. Johtuen myös sovelluksen luonteesta, ei nähty tarpeelliseksi mallintaa kaikkia venttiilissä esiintyviä ilmiöitä.

Ensimmäinen vaihe venttiilimallin rakentamisessa on ohjaussignaalin muuntaminen suhteelliseksi ohjaukseksi. Yleensä venttiiliä ohjataan jollain tietyllä alueella toimivalla signaalilla, esimerkiksi 0-10 voltia. Tämä ohjaussignaali tulisi muuntaa venttiilin karan asemaksi, joka vaikuttaa venttiilin virtausteiden avaukseen. Liitteessä 7 on esitetty venttiilin dynamiikan toteutuksen Simulink® lohkokaaviokuvaus.

Liitteen 7 venttiilin dynamiikan kuvauksessa nähdään lohkon sisääntulo  $u$ , eli ohjaussignaali. Seuraavan lohkon (Scaling) tarkoituksena on skaalata ohjaus välillä -1..1, mutta tässä sovelluksessa skaalausterminä käytetään kerrointa 1, koska ohjauslaitteelta saatava signaali on valmiiksi oikeaa muotoa.

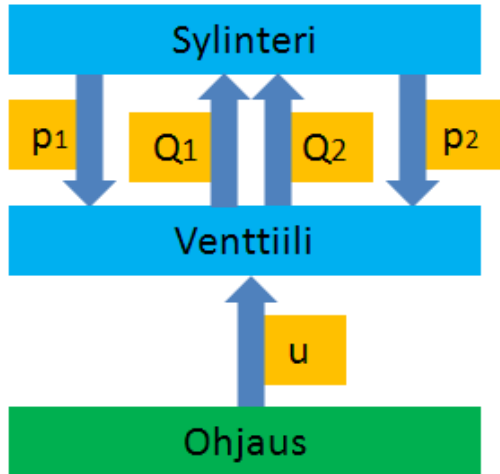
Seuraavat liitteen 7 venttiilin dynamiikan toteutuksen lohkoaviossa olevat neljä lohkoa muodostavat ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälön. Parametreina käytetään venttiilin valmistajan ilmoittamasta Bode-diagrammista saatavaa aikavakiota ( $\tau$ ), sekä askelvasteista nähtävää luistin nopeusrajoitetta (rate limit). Kuvassa 4.23 on esitetty venttiilin simulointimallin askelvaste erällä suhteellisen ohjauksen arvolla.



**Kuva 4.23.** Venttiilin simulointimallin askelvaste.

Luultavasti esitetyn venttiilin dynamiikka ei vastaa täysin oikeassa sovelluksessa käytetyn venttiilin käyttäytymistä, mutta tässä sovelluksessa tarkkuus on riittävä. Simulointimallia käyttävä henkilö ei huomaa sekunnin kymmenyksien eroja aidon mallin ja simulointimallin välillä. Lisäksi muista järjestelmistä tulevat viiveet erottavat oikean ja simuloidun järjestelmän toisistaan, joten tarkkuuden lisäämisestä venttiilin sulkuelimen mallinnuksessa ei olisi hyötyä.

4/3-suuntaventtiilissä on aina kaksi virtaustietä avoinna samanaikaisesti. Usein näiden virtausteiden koot voidaan olettaa symmetrisiksi molempiin suuntiin. Virtausaukkojen suhteellisen avauksen Simulink® toteutus on esitetty liitteessä 7. Kun venttiilin virtausaukon koko tunnetaan, aukon läpäisemä tilavuusvirta määrittää aiemmin esitetyn kuristuksen yhtälön avulla (16). Kuvassa 4.24 on esitetty venttiilin simulointimallin rajapinnat.

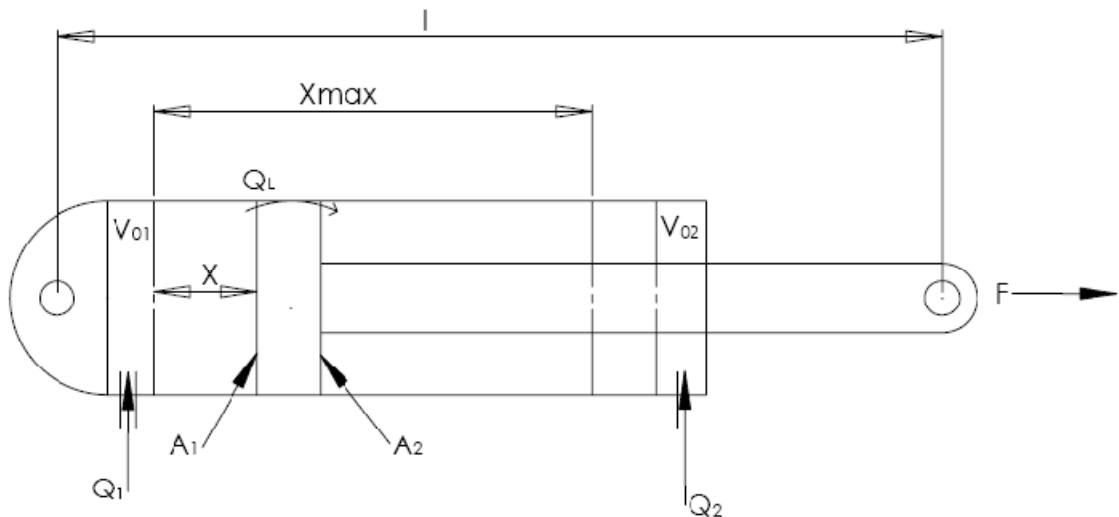


**Kuva 4.24.** Venttiilimallin kaaviokuvaus.

Sovelluksessa käytetty 4/3-suuntaventtiili on käytännössä neljä muuttuvaa kuristumallia, jotka yhdistetään ohjaussignaaliin  $u$ , sekä sylinterimallin kammioiden tilavuusmalleihin. Sylinterin tilavuusmallille tarvitaan venttiilin läpäisemät tilavuusvirrat ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ), ja vastaavasti sylinterimallilta saadaan sylinterissä vallitsevat paineet ( $p_1$ ,  $p_2$ ).

### *Teorettinen sylinterimalli*

Sylinterillä muunnetaan hydraulineesteeseen sidottu teho mekaaniseksi suoraviivaiseksi, edestakaiseksi liikkeeksi [8]. Tässä sovelluksessa mallinnetussa koneessa käytetään kahta epäsymmetristä kaksitoimista sylinteriä puomin liikuttamiseen. Kuvassa 4.25 on esitetty mallinnettavan sylinterin rakenne ja perusmerkinnät. Merkinnöissä käytetyt lyhenteet on selitetty alempana kaavojen yhteydessä.



**Kuva 4.25.** Sylinterin rakenne ja perusmerkinnät.

Sylinterillä tuottaa kammioiden paineiden ( $p_1, p_2$ ) eron, sekä männän pinta-alojen ( $A_1, A_2$ ) perusteella laskettavaa voimaa. Lisäksi sylinterin tuottamaan voimaan vaikuttaa alentavasti sylinterissä esiintyvä kitka ( $F_\mu$ ). Sylinterin voimayhtälö on esitetty alla (18).

$$F_{syl} = p_1 \cdot A_1 - p_2 \cdot (A_1 - A_2) - F_\mu \quad (18)$$

Lisäksi sylinterin toimintaan vaikuttaa sen liikenopeus, joka on riippuvainen sylinterille tulevista tilavuusvirroista ( $Q_1, Q_2$ ), sylinterin männän pinta-aloista ( $A_1, A_2$ ) ja vuotovirtauksesta sylinterin kammioiden välillä ( $Q_L$ ). Sylinterin nopeusyhtälö positiiviseen (kuvassa 4.25. oikealle) suuntaan on esitetty alla (19). Vastaavasti liikenopeus toiseen suuntaan saadaan korvaamalla  $Q_1$  ja  $A_1$  termeillä  $Q_2$  ja  $A_2$ .

$$v_{syl} = \frac{(Q_1 - Q_L)}{A_1} \quad (19)$$

Sylinterin toimintaan vaikuttavat oleellisesti myös sylinterin männän asema, sekä kammioiden tilavuudet. Näiden avulla määritellään sylinterin päädyt sekä kammioiden hetkelliset tilavuudet ja niistä aiheutuvat vaimennukset. Alla on esitetty sylinterin tilayhtälöt (20, 21), joissa muuttujat  $V_1$  ja  $V_2$  ovat kammioiden 1 ja 2 tilavuudet,  $V_{01}$  ja  $V_{02}$  kammioiden päätyihin jäävät hukkatilavuudet,  $A_1$  ja  $A_2$  männän pinta-alat,  $x$  sylinterin asema, sekä  $x_{max}$  sylinterin iskunpituus.

$$V_1 = V_{01} + A_1 \cdot x \quad (20)$$

$$V_2 = V_{02} + A_2 (x_{max} - x) \quad (21)$$

Näiden esitettyjen yhtälöiden lisäksi sylinterillä on useita vaikeasti mallinnettavia epälineaarisia ominaisuuksia. Näitä ovat sylinterin tiivisteiden joustot, kitkat, stick-slip ilmiö, sekä sylinterin vuodot. Mallinnettaessa tarkkaa sylinterimallia usein nämä ilmiöt ovat tärkeitä mallin toiminnan kannalta. Tässä sovelluksessa ei ollut tarpeen tutkia sylinterimallin tarkkaa käyttäytymistä, joten nämä ilmiöt jätettiin tarkoituksella vähemmälle huomiolle luotaessa sylinterin simulointimallia.

### ***Sylinterin mallinnus***

Sylinterin kammioiden mallinnukseen käytetty tilavuusmalli on esitelty aiemmin kohdassa tilavuusmalli ja nestemalli. Lisäksi mallinnukseen käytetyt perusyhtälöt on esitetty aiemmin.

Sylinteri ei toimi yksinään, se tarvitsee liitännät muihin järjestelmiin toimiakseen. Tässä sovelluksessa vaaditaan liitännät venttiiliin ja sylinterillä liikuteltavaan kuormaan. Venttiilin simulointimallilta sylinterille tuodaan tilavuusvirrat ( $Q_1, Q_2$ ) kammioihin 1 ja 2. Venttiilimallia on käsitelty edellisissä kappaleissa. Sylinterin tuottama voima ( $F$ )

viedään järjestelmässä eteenpäin sitä käyttävälle mekaaniselle järjestelmälle. Vastaavasti voiman aiheuttamat reaktiot, eli kuorman asema ( $x$ ) ja nopeus ( $dx/dt$ ) palautetaan sylinterimallille.

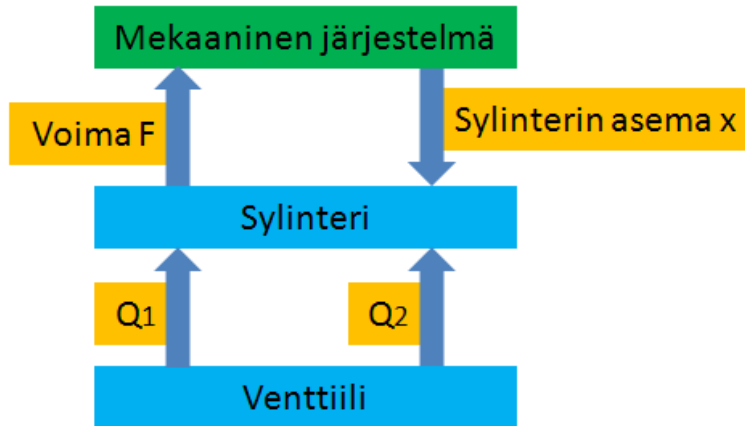
Paine muodostuu tilavuudessa, sen koon ja tulevan sekä lähtevän tilavuusvirran funktiona. Sylinterin kammioiden tilavuuksien mallinnukseen käytettiin aiemmin esitettyä lohkoa. Tilavuuden nettotilavuusvirrat saadaan myös edellä esitetyltä venttiilimallilta. Sylinterin kammioiden tilavuudet, sekä tilavuuksien muutosnopeudet riippuvat sylinterin männän asemasta ja aseman muutosnopeudesta. Nämä taas ovat verrannollisia sylinteriin kytketyistä mekanismeista ja niiden asemasta ja liikenopeudesta. Sylinteri on kytketty näiltä osin luvussa 4.3. esiteltyyn mekaaniseen järjestelmään.

Mekaaniselta järjestelmältä saadaan sylinterin kiinnityspisteiden välinen etäisyys, sekä niiden välinen liikenopeus. Näiden parametrien avulla voidaan määrittää sylinterin männän asema, sekä nopeus. Edelleen, käyttäen hyväksi sylinterin pinta-aloja, voidaan sylinterin kammioiden tilavuusmalleille määrittää niiden tarvitsemat parametrit.

Sylinterin tuottaman voiman suunta ja suuruus riippuu kammioissa vallitsevista paineista, sekä sylinterin männän pinta-aloista kaavan 1 mukaisesti. Lisäksi sylinterissä on sisäisiä kitkoja, jotka vaikuttavat alentavasti sylinterin tuottamaan voimaan.

Sylinterillä on rajallinen iskunpituus, jota rajoittavat sylinterin päädyt. Näiden päätyjen mallinnus on tärkeä osa sylinterimallin käyttäytymistä. Simulointimallin kannalta on tärkeää, että päädyt on mallinnettu oikein, jolloin sylinterin kammioiden tilavuudet eivät pääse negatiiviselle alueelle. Tällöin järjestelmän simuloiminen kävisi mahdottomaksi. Eräs keino sylinterin päätyjen esittämiseen on niiden mallintaminen lyhyinä, erittäin jäykkinä jousina. Tällöin sylinterin tullessa päädyn vaikutusalueelle, jousi antaa sylinterille erittäin suuren voiman, ja liike pysähtyy. Liitteessä 8 on esitetty sylinterimallin Simulink® toteutus.

Kuvassa 4.26 on esitetty sylinterimallin lohkokaaviokuvaus. Kuvasta nähdään sylinterimallin rajapinnat järjestelmän muihin osiin. Venttiilimallilta saadaan sylinterimalliin vaikuttavat tilavuusvirrat ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ), venttiilimallille vastaavasti tarvitaan sylinterin kammioiden paineet ( $p_1$ ,  $p_2$ ). Mekaanisen järjestelmän rajapintoina ovat kuormaan vaikuttava voima  $F$ , sekä sylinterin todellinen asema ( $x$ ). Liitteessä 8 on myös esitetty sylinterimallin Simulink® toteutus.



**Kuva 4.26.** Sylinterimallin lohkokaavio.

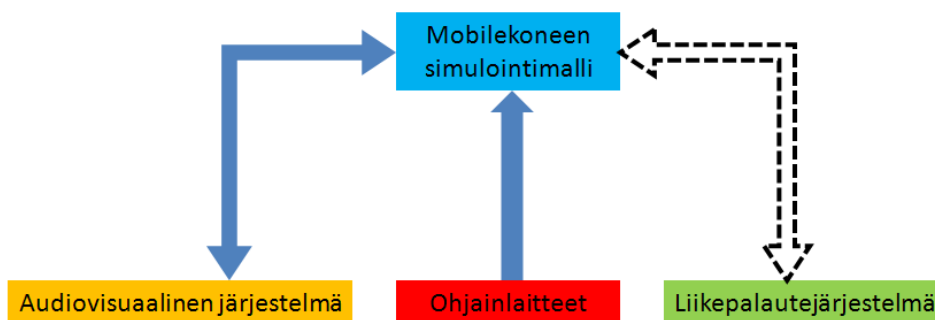
### *Muu hydraulikka*

Hydraulimoottorin mallinnuksessa periaate on hyvin samankaltainen kuin hydraulisylinterin tapauksessa. Moottorin tapauksessa tulosuurena mekaaniseen järjestelmään saadaan suoraviivaisen sylinterin voiman  $F$  sijasta moottorin vääntömomentti  $M$ . Tässä sovelluksessa ei kuitenkaan lähdetty toteuttamaan ajovoimansiirron hydraulikkaa, vaan koneen liikuttamiseen käytettävät napamoottorit toteutettiin yksinkertaistettuina funktioina, jotka muuntavat ohjaussignaalin suoraan renkaisiin kohdistuvaksi vääntömomentiksi.

### *Liittynyt järjestelmän muihin osiin*

Kokonainen ajosimulaattori tarvitsee toimiakseen myös muita järjestelmiä. Näitä ovat audiovisuaalinen järjestelmä, jolla käyttäjälle luodaan simulaattorin graafinen esitys, sekä ääniympäristö. Toinen ulkoinen järjestelmä tässä ajosimulaattorisovelluksessa on simulointimallin ohjaukseen käytetty laitteisto, johon kuuluvat ohjauspyörä, kaasupoljin, sekä puomin ohjaukseen käytettävä ohjainsauva.

Kuvassa 4.27. on esitelty simulointimallin liittytäräpinnat muihin alijärjestelmiin. Lisäksi liitteessä 9 on esitetty Simulink® lohkokaaaviokuvaus liittynöistä muihin järjestelmiin.



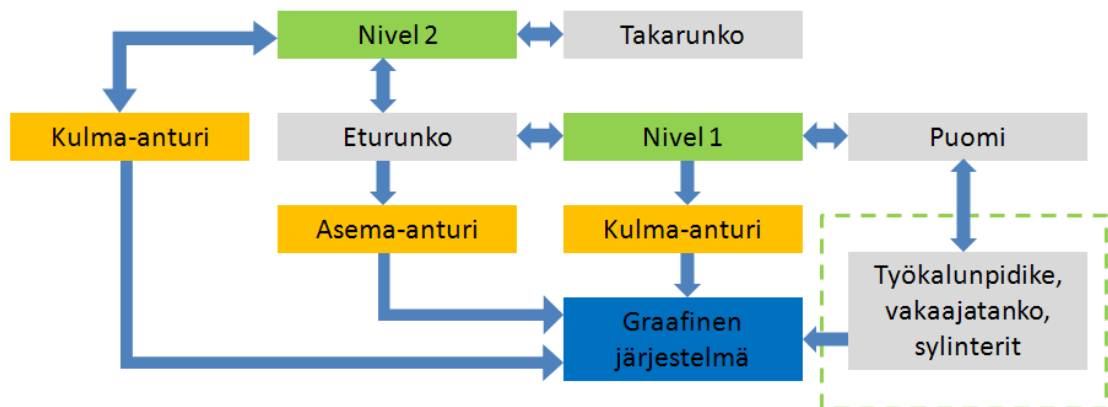
**Kuva 4.26.** Simulointimallin liittynät muihin järjestelmiin.



Tiedonsiirtoon käytettiin lähiverkkoa (LAN), ja Matlab®/Simulink® ohjelmistossa olevaa valmista UDP protokollaa. Ohjelmistossa on valmiit työkalut signaalien pakkaamiseen, purkamiseen, lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Liitteen 9 alareunassa nähdään ohjausjärjestelmän vaaleansininen rajapinta, jossa vastaanotetaan ohjauslaitteiden vektori, puretaan se ja lähetetään eteenpäin. Vastaavasti liitteen 9 oikeassa reunassa on vaaleansininen graafisen järjestelmän rajapinta: tarvittavat signaalit kerätään yhteen, pakataan yhdeksi vektoriksi, ja lähetetään lähiverkon yli graafiselle järjestelmälle, joka piirtää simulointimallin tilaa näyttölaitteelle. Seuraavassa vaiheessa järjestelmä on tarkoitus liittää Kuvan 4.27 mukaisesti Liikepalautejärjestelmään.

### *Audiovisuaalinen järjestelmä*

Mobilekoneen simulointiympäristön graafinen järjestelmä toimii erillisellä työasemalla Linux-ympäristössä. Järjestelmän OpenGL Performer-pohjainen toteutus on Tampereen Teknillisen Yliopiston omaa tuotantoa.



**Kuva 4.28.** Graafisen järjestelmän rajapinnat.

Kuvassa 4.28 on esitetty graafisen järjestelmän rajapinnat simulointimalliin. Perustoiminnallisuuden graafiselle järjestelmälle mahdollistaa tieto mobilekoneen eturungon sijainnista virtuaaliympäristössä, eli asema suorakulmaissessa koodinaatistossa, sekä rotaatiomatriisi. Näiden tietojen avulla graafinen järjestelmä voi sijoittaa koneen graafisen esityksen oikeaan paikkaan, sekä oikeaan asentoon ympäristössä.

Lisäksi graafinen järjestelmä tarvitsee mobilekoneen simulointimallin liikkuvien osien asemat suhteessa koneen runkoon. Takarunko pääsee kääntymään eturungon suhteen ainoastaan yhden akselin ympäri. Takarungon asema voidaan siis määrittellä yhden kulmasuureen avulla, joka saadaan runkojen välissä sijaitsevan nivelen tiedoista. Vastaavasti puomin liikkuvien osien (Puomi, vakaajatanko, työkalunpidike, sylinterit), sekä renkaiden asemat saadaan niitä sitovista nivelistä. Koska osat on sidottu nivelten

kautta kiinteästi koneen eturunkoon, riittää pelkän nivelen asematieto (kulma) osan graafisen esityksen luomiseen.

Paremmen immersiiivisyyden saavuttamiseksi ajosimulaattori tarvitsee myös audiojärjestelmän. Vähimmillään audiojärjestelmään kuuluu mobilekoneen moottorin ääni. Tätä järjestelmää tullaan kehittämään myöhemmässä vaiheessa.

### ***Ohjausjärjestelmä***

Järjestelmän ohjaukseen pyrittiin toteuttamaan vastaavat ohjauslaitteet kuten oikeassa Avant 216 mobilekoneessa. Koneen ohjaamiseen tarvitaan kolme laitetta: ohjauspyörä, kaasupoljin, sekä puomin ohjaukseen käytettävä joystick. Tavoitteena oli säilyttää alkuperäinen ohjauspyörästä, johon asennettiin laitteisto ratin asennon tunnistamiseksi. Lisäksi ajatuksena oli toteuttaa siihen myöhemmässä vaiheessa liikepalautetta antava järjestelmä. Koneen alkuperäinen kaasupoljin korvattiin elektronisella kaasupolkimella, josta asematieto saadaan oikeassa muodossa simulointimallille. Lisäksi ympäristöön asennettiin erillinen analoginen joystick, josta saadaan asematietoa kahden akselin suhteen (puomin nosto ja kääntö).

## **4.5. Vesihydraulinen Stewart-liikealusta**

Tampereen teknillisellä yliopistolla, hydrauliiikan ja automaation laitoksella, on tutkittu vesihydrauliiikan soveltumista liikealustakäyttöön. Perinteisesti liikealustatoteutuksissa on käytetty öljyhydrauliiikka-, pneumatiikka- tai sähkökäyttöisiä laitteita. Käyttämällä vesihydrauliiikkaa saadaan yhdistettyä öljyhydrauliiikan suuri teho, sekä pneumatiikan ympäristöystävällisyys ja helppokäyttöisyys.

Projektin tavoitteena oli yhdistää laitoksen osaaminen simulaattorikehityksestä ja vesihydrauliiikasta. Liikealustan kehittäminen oli luonnollinen askel eteenpäin perinteisistä kehitetyistä simulaattoreista. Lisäksi avautui hyvä mahdollisuus vesihydrauliiikan osaamisen soveltamiselle vaativaan liikealustakäyttöön.

Stewart-tyyppinen liikealusta on eräs yleisimmistä liikealustatyypeistä. Alustatyypistä on kerrottu lisää kappaleessa 3.3. Perinteisesti toteutukseen on käytetty öljyhydrauliiikkaa tai elektromekaanisia toimilaitteita, kuitenkin tässä esitellyssä tutkimuksessa haluttiin tutkia vesihydrauliiikan soveltuvuutta liikealustakäyttöön.

### ***Liikealustan mekaaninen rakenne***

Alusta rakenne on perinteisen Stewart-liikealusta mukainen: Kaksi kolmion muotoista tasoa kytketään toisiinsa kuuden toimilaitteen avulla. Alempi taso on kiinteä, ja ylempi taso liikkuu toimilaitteiden avulla. Alustan mekaaninen rakenne on toteutettu kokonaisuudessaan Tampereen Teknillisen Yliopiston raskaskonelaboratoriossa. Ylempään tasoon tullaan seuraavassa vaiheessa kiinnittämään mobilekoneen runko,

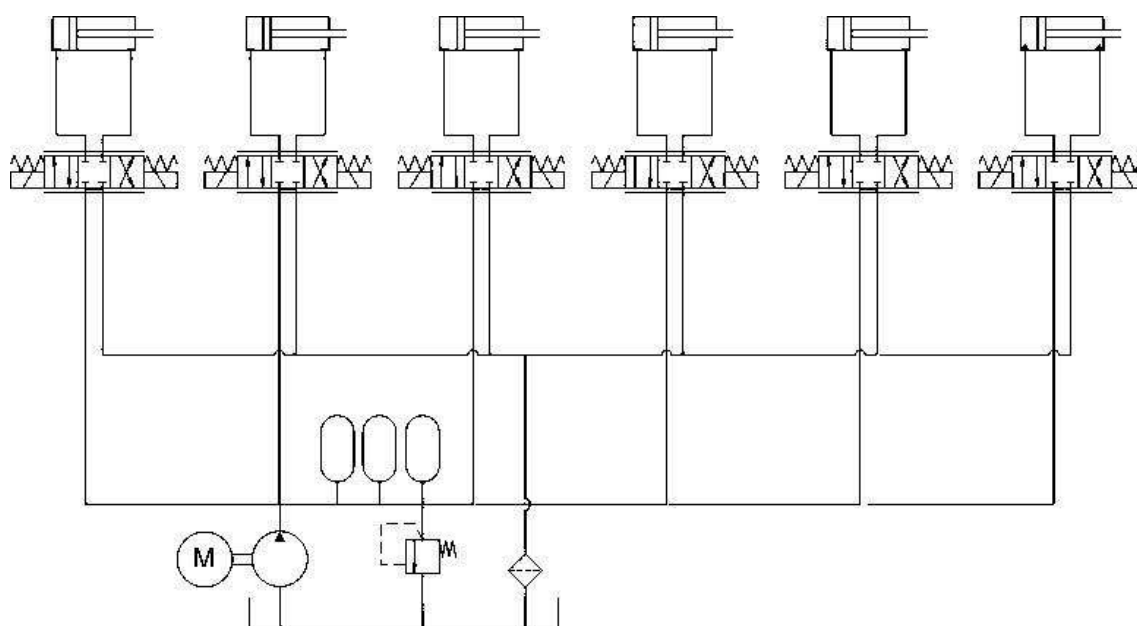
joka toimii simulaattorin ohjaajana. Alustan alaosa tullaan lopullisessa sovelluksessa kiinnittämään kiinteästi loppusijoituspaikan rakenteisiin. Kiinnitys on tehtävä huomattavan tukevasti, jotta alustan päälle asetettavaa mobilekoneen ohjaamaa voidaan liikuttaa turvallisesti.

Johtuen alustan rakenteesta, ylempi taso on täysin kuuden toimilaitteen (sylinterit) varassa. Alustaa liikuttaessa, täytyy vähintään kahta toimilaitetta käyttää samanaikaisesti, jotta alustan olisi mahdollista liikkua. Usean toimilaitteen samanaikainen käyttö asettaa omat haasteensa alustan ohjaukselle. Alustan hydraulisia toimilaitteita ja ohjausta on käsitelty seuraavissa kappaleissa.

### *Liikealustan hydraulinen järjestelmä*

Alustan liikuttamiseen käytetään kuutta ruostumattomasta teräksestä valmistettua, 40/25-400 sylinteriä. Kaikissa sylintereissä on integroidut asemasensorit vedenpitävillä koteloinneilla. [21]

Sovelluksessa käytettävät venttiilit ovat muunneltuja Sitekin L22 4/3 proportionaaliventtiileitä. Venttiileiden suurin sallittu syöttöpaine on 70 bar ja ne toimivat vesijohtovedellä. Venttiilien luistin asemaa mitataan LVDT-sensorin avulla. Luistin asematietoa voidaan hyödyntää säätimen toteutuksessa. [21]



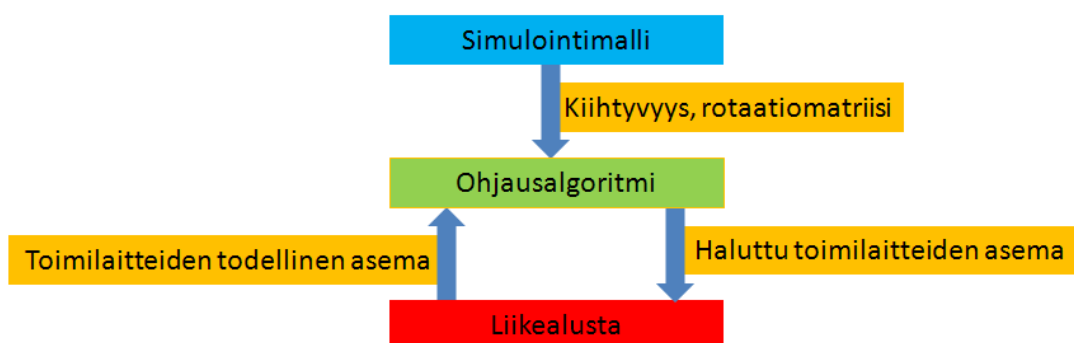
**Kuva 4.29.** Liikealustan hydraulikaavio [22].

Kuvassa 4.29 on esitetty vesihydraulisen liikealustan hydraulikaavio. Kuvan yläosassa ovat kuusi toimilaitetta (sylinteriä), sekä kuusi venttiiliä. Alaosan kuvat kuuluvat vesihydrauliseen koneikkoon, joka koostuu sähkömoottorista, hydraulipumpusta, kolmesta paineakusta, paineenrajoitusventtiilistä, vesisäiliöstä, sekä suodattimesta.

### *Alustan ohjaus*

Liikealustan ohjausjärjestelmän kehitys määrää hyvin pitkälti suunnan ajosimulaattorin suorituskyvylle. Muilta ominaisuuksiltaan huipputason simulaattorin suorituskyky voidaan pilata huonolla ohjausjärjestelmällä. Ohjausjärjestelmän kehityksessä on myös huomioita simulaattorin käyttötarkoitus, sekä muun järjestelmän suorituskyky.

Stewart-tyyppisen liikealustan ohjaus on oma tieteenalansa, johon on vuosien saatossa kehitetty useita erityyppisiä ohjausalgoritmeja. Liike-ennustealgoritmien on tarkoitus ohjata liikealustaa tuottamaan haluttu liike. Liikealgoritmien tehtävänä on myös palauttaa liikealusta kohti alkuasemaa. Tätä ominaisuutta kutsutaan termillä washout. Nämä washout-filtterit pyrkivät palauttamaan alustan kohti alkuasemaa liikkeen jälkeen. Tällöin on mahdollista hyödyntää tehokkaammin liikealustan toimialuetta. Tähän sovellukseen toteutetuista ohjausjärjestelmistä on kerrottu tarkemmin Tuija Palosen diplomityössä. [22]



**Kuva 4.30.** Liikealustan ohjauksen lohkokaavio.

Kuvassa 4.30 on esitetty ohjausjärjestelmän rajapintojen lohkokaaviokuvaus. Mobilekoneen simulointimallilta hyödynnetään koneen absoluuttisen asennon kertovaa rotaatiomatriisia, sekä koneeseen vaikuttavat kiihtyvyydet (suoraviivaiset kiihtyvyydet ja kulmakiihtyvyydet). Näiden suureiden avulla voidaan ohjata liikealustan toimilaitteita. Lisäksi ohjausjärjestelmälle tarvitaan toimilaitteiden takaisinkytkentä liikealustalta. Tällöin voidaan liikkeitä suhteuttaa käytettävissä oleville liikealueille.

Liikealustan ohjauksessa on myös tärkeää huomioida yhteensopivuus muun järjestelmän suhteen. Mikäli liikealustan liikkeet eivät vastaa visuaalista palautetta, kasvaa käyttäjän mahdollisuus kärsiä pahoinvoinnista. Järjestelmien synkronoinnista on huolehdittava tulevaisuudessa, kun ajosimulaattorin eri järjestelmät yhdistetään.

## 5. PIENTYÖKONEEN SIMULAATTORIN TOIMINNAN TESTAUS

Simulointimallille ei suoritettu tarkkaa verifiointia sen esikuvana toimineen Avant 216 mobilekoneen suhteen. Sovelluksen toiminnan kannalta riittävä tarkkuus saavutettiin vertailemalla simulointimallin suorituskykyä (koneen huippunopeus) ja ominaisuuksia (massa, kääntösäde, puomin toiminta-alue) varsinaisen koneen valmistajan ilmoittamiin tietoihin. Mitään yksittäisen osa-alueen suuretta ei pyritty mallintamaan äärettömän tarkasti, vaan tavoitteena oli mallin hyvä yleistoimivuus.



**Kuva 5.1.** Kuljettajan näkymä [17].

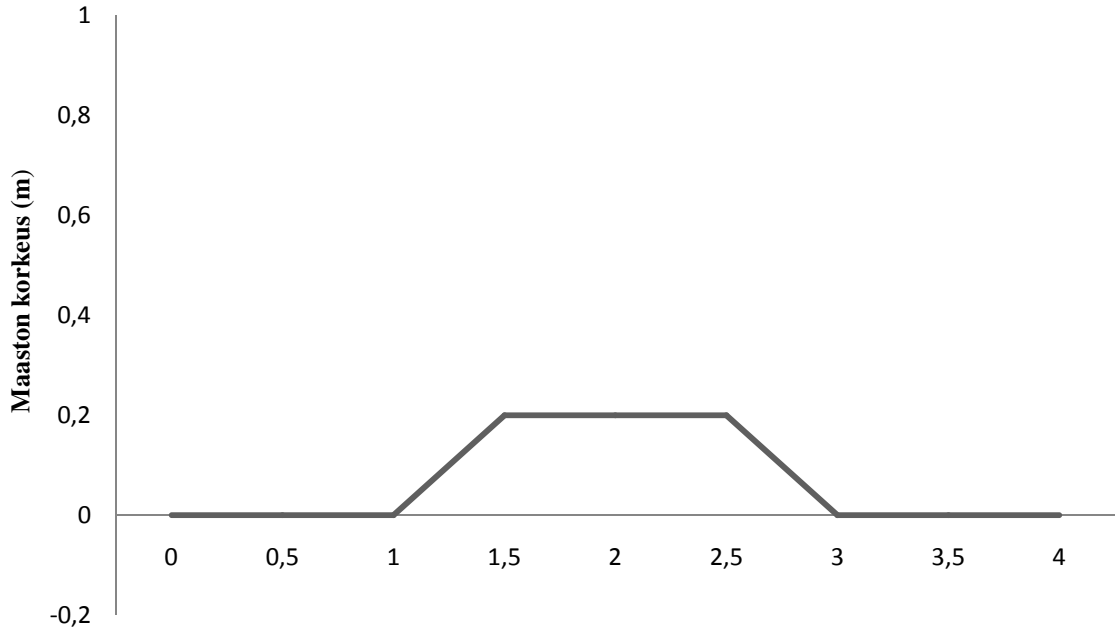
Avant 216 mobilekoneen mekaanisten järjestelmien mallinnuksessa päästiin riittävään tarkkuuteen valmistajan ilmoittamien tietojen, sekä omien mittausten avulla. Koneen kokonaisuusmassat, erillisten osien massat, sekä mittasuhteet saatiin selville. Näiden avulla simulointimallin mekaaninen järjestelmä saatiin hyvälle tasolle.

Ajovoimansiirron mallinnuksessa esiintyi huomattavasti enemmän haasteita. Työn tarkoituksen kannalta ei ollut tarpeen mobilekoneen moottorin ja ajovoimansiirron yksityiskohtaiseen toteutukseen. Nykyisellä toteutuksella voidaan riittävällä tasolla hienosäätää koneen maksiminopeutta ja kiihtyvyyttä, jotka ovat liikealustan kannalta tärkeimmät suureet.

Rengasmalli on ajosimulaattorissa aina hyvin tärkeässä asemassa. Lisäksi sen tarkka toteutus vaatii monimutkaisten ilmiöiden tarkkaa mallintamista. Nykyiseltä

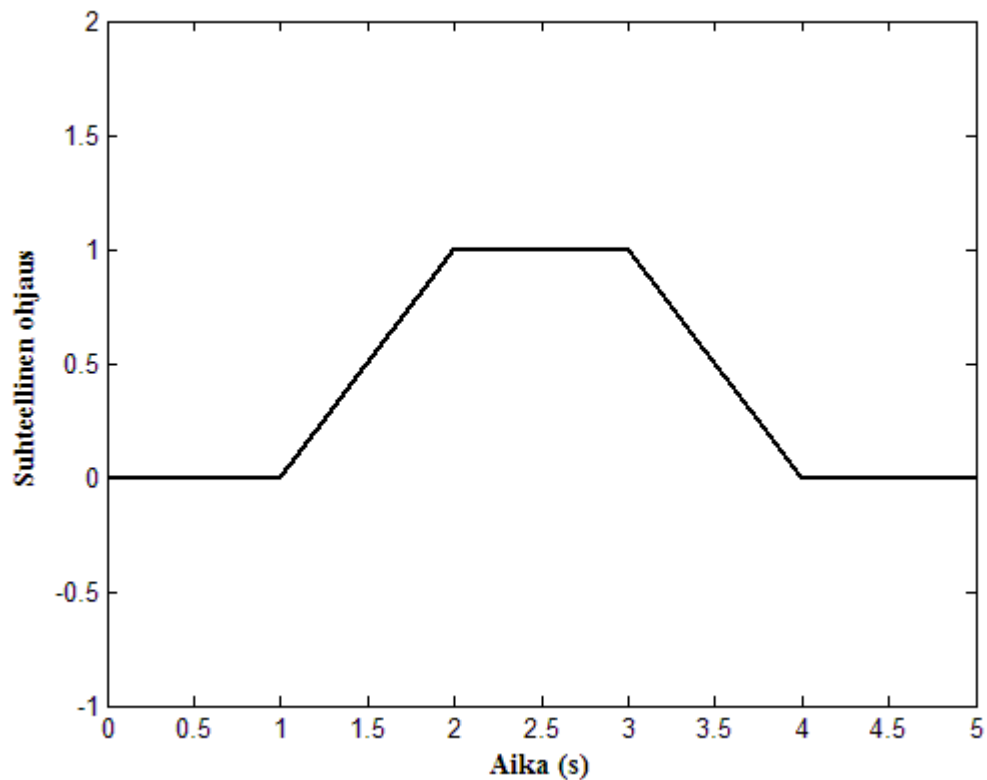
toteutukseltaan rengasmalli on erittäin yksinkertaistettu malli. Kuitenkin sitä hienosäätämällä on mahdollista saavuttaa riittävä taso tämän hetken sovellukseen.

Mobilekoneen simulointimalliin rakennettiin tulevaisuuden tarpeita silmälläpitäen myös oikeaa konetta vastaava puomisto. Nykyisessä sovelluksessa sillä ei ole juuri muuta tarkoitusta kuin tehdä konemallista aidon näköinen, sekä viedä koneen painopiste mahdollisimman vastaavalle paikalle kuin aidossa koneessa.



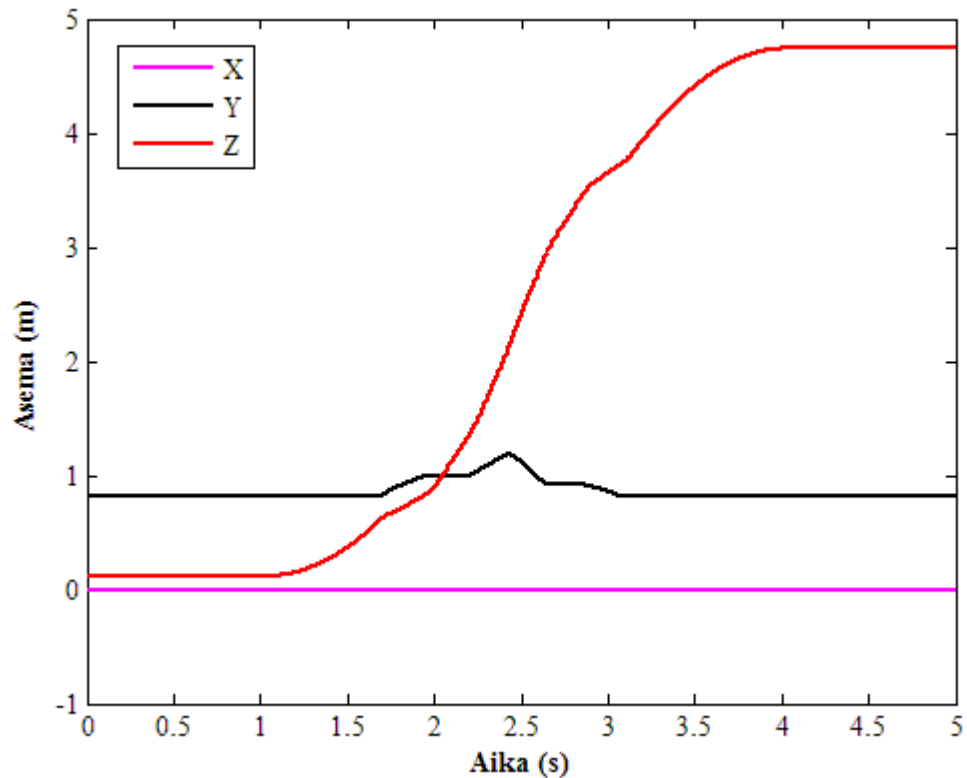
**Kuva 5.2.** Simuloitu ajorata.

Pientyökoneen simulointimallille luotiin kuvan 5.2 profiilin mukainen noin 4 metrin mittainen ajorata. Koneen ajosuunta on rampin yli vasemmalta oikealle. Simuloimalla koneen käyttäytymistä ajettaessa säännöllistä ja toistettavissa olevaa reittiä, voidaan simulointimalliin tehdä tarvittavia hienosäätöjä ja muutoksia. Kaikki alla olevat mittaustulokset on saatu simuloimalla pientyökoneen suoraa liikettä kuvan 5.2 mukaisen maastoprofiilin mukaisesti, jossa ajetaan 0,2m korkean rampin yli.



**Kuva 5.3.** Suhteellinen ohjaussignaali ajan funktiona.

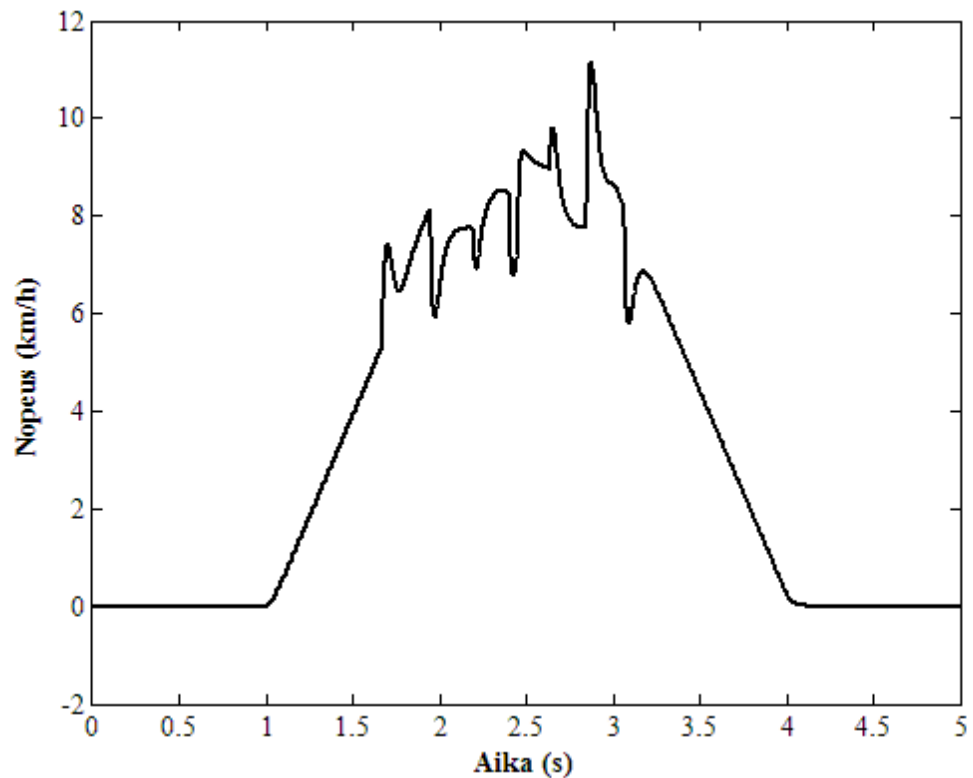
Jotta mobilekoneen testisimulointi olisi mahdollisimman tarkasti toistettavissa, siihen luotiin automaattinen liikeseqvenssi. Ohjausvälineenä oleva joystick-ohjain korvattiin väliaikaisesti vakioidulla signaalilla. Tämä ohjaussignaali on esitetty kuvassa 5.3. Simuloinnin alussa ohjaussignaali on 0, eli kone ei liiku lainkaan. Ajassa 1s aletaan ohjaussignaalia kasvattaa, siten että se kasvaa täyteen avaukseen (1) ajassa 2s. Vastaavasti ajassa 3s aletaan ohjaussignaalia pienentää, siten että se saavuttaa arvon 0 ajassa 4s. Näin saadaan vakioitu ohjausseqvenssi viiden sekunnin simulonnille. Seqvenssi koostuu siis kolmesta vaiheesta: kiihdytys, tasainen ajo, sekä pysäytys.



**Kuva 5.4.** Pienkoneen asema suorakulmaisessa koordinaatistossa ajan funktiona.

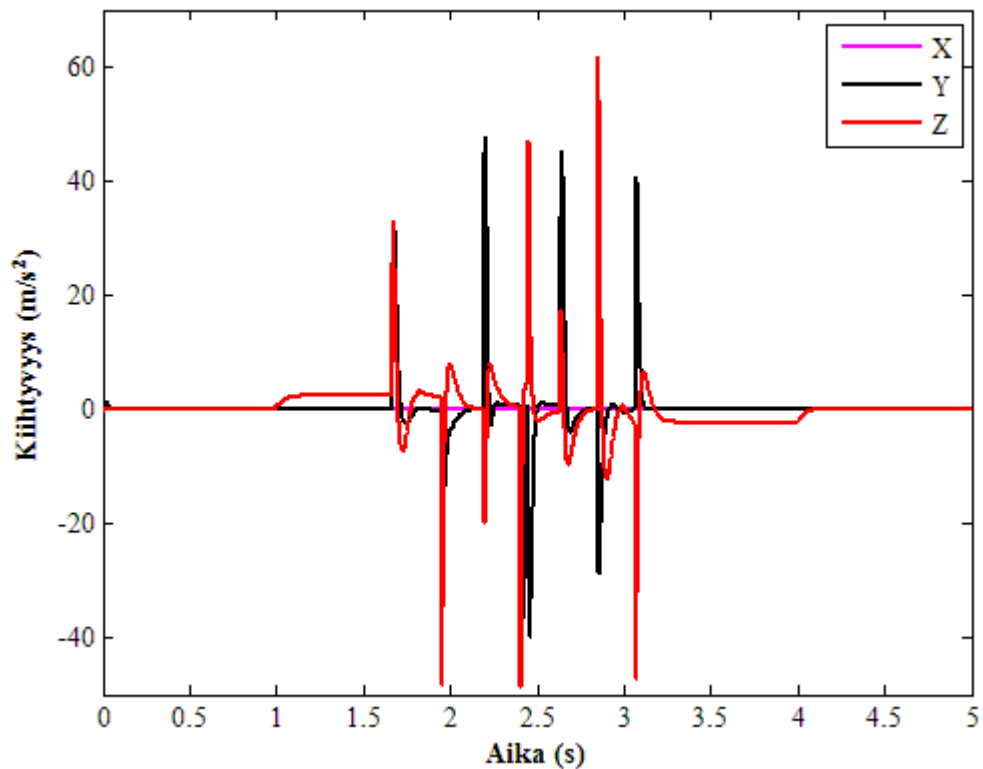
Kuvasta 5.4 nähdään koneen liike testisimuloinnin aikana. Liike eteenpäin (Z-akselin suuntaisesti) alkaa koneen lähtiessä liikkeelle ajassa 1s. Liike jatkuu melko tasaisena lukuunottamatta pieniä ylä- ja alamäen aiheuttamia nopeusmuutoksia (ajassa 1,6s ja 3s) aina neljän sekunnin kohdalle, jolloin ohjaussignaali menee nolnaan (Kuva 5.3). Lisäksi kuvasta 5.4 voidaan nähdä koneen korkeustieto. Koneen rungon nollapiste on Y-akselin suunnassa määritelty n. 0,9m kohdalle. Ajettaessa koneella rampin yli, myös koneen Y-akselin suuntainen asema muuttuu odotetun 0,2m, ja palaa rampin jälkeen takaisin alkuperäiseen 0,9m kohtaan. Koneelle ei testiajon aikana anneta minkäänlaista käännön ohjaussignaalia, eikä myöskään tasainen maasto X-akselin suunnassa aiheuta koneen kääntymistä, joten koneen X-akselin suuntainen asema säilyy koko ajan ajan arvossa 0.





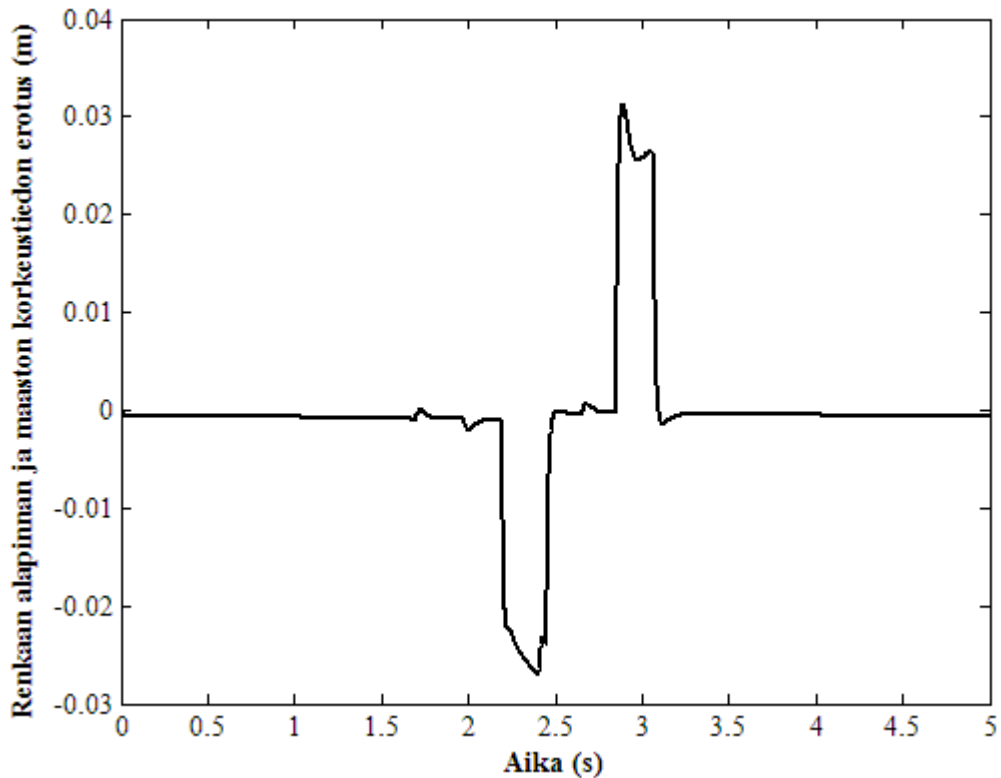
**Kuva 5.5.** Mobilekoneen etenemisnopeus testiajossa.

Kuvassa 5.5 on esitetty mobilekoneen nopeus testiajon aikana. Nopeus kasvaa lineaarisesti aina n. 1.6s kohdalle, jossa alkaa rampin ylitys. Rampin ylitys aiheuttaa luonnollisesti vaihtelua nopeuteen korkeusvaihtelujen, sekä vastuksen muuttumisen vuoksi. Rampin ylityksen jälkeen seuraa tasaisen hidastuvuuden vaihe: Ajassa 3s ohjaussignaali lähtee pienemään kohti nollaa, joten koneen vauhti hidastuu samassa vaiheessa.



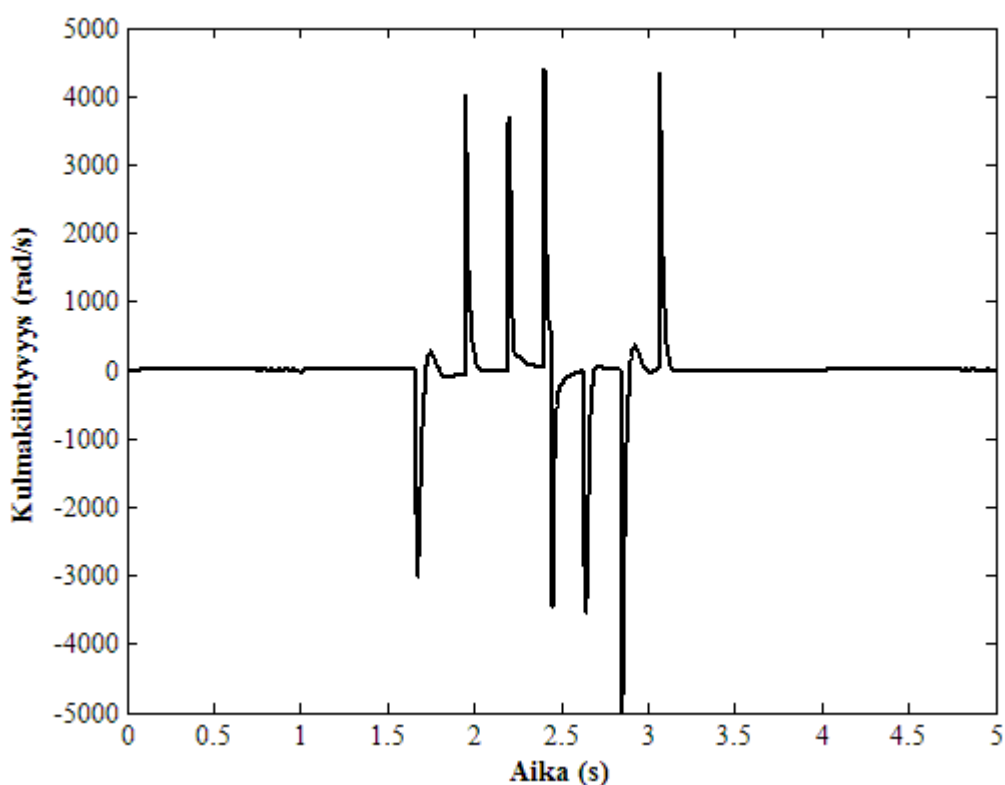
**Kuva 5.6.** Mobilekoneen kiihtyvyydet testiajossa.

Kuvassa 5.6 on esitetty mobilekoneen kiihtyvyydet suorakulmaisen koordinaatiston akselien suuntaisesti. Kuvasta voidaan havaita Z-akselin suuntainen tasainen alkukiihdytys aikavälillä 1s-1,5s, sekä tasainen hidastuvuus aika välillä 3,2s-4s. Lisäksi rampin ylitys aiheuttaa lyhytaikaisia kiihtyvyydspiikkejä Z- ja Y-akselin suuntaisesti. Nämä piikit ajoittuvat nousun alkuun, rampin tasaisen osuuden alkuun, sekä alamäen alkuun ja loppuun.



**Kuva 5.7.** Maaston ja renkaan alapinnan välinen korkeusero ajan funktiona.

Kuvassa 5.7 on esitetty mobilekoneen simulointimallin renkaan alareunan ja maaston pinnan välinen korkeusero ajettaessa aiemmin (kuva 5.3) esitettyä testirataa. Kuvasta voidaan havaita, että enimmillään renkaan pinta joustaa n. 0,025m maaston sisään ajassa 2-2,5s. Tässä vaiheessa rengas siirtyy ajoradan ylämäkeen. Noin 2,5cm jousto vaikuttaa oikeankaltaiselta ajettessa jyrkästi alkavaan ramppiin. Vastaavasti n. ajassa 3s, tapahtuu päinvastainen ilmiö: Renkaan pinnan ja maaston välillä on n. 0,03m ero. Toisin sanoen rengas irtoaa maasta noin kolme senttimetriä. Myös tämä käyttäytyminen vaikuttaa loogiselta ajettaessa jyrkästi alkavaan alamäkeen täydellä vauhdilla.



**Kuva 5.8.** Koneen kulmakiikkyvyys X-akselin ympäri.

Kuten aiemmissa luvuissa on esitetty, liikealustan ohjaamiseen voidaan hyödyntää simulointimallilta saatavia kulmakiikkyvyyksiä, kuten kuvassa 5.8 esitetty kulmakiikkyvyys X-akselin ympäri, sekä rotaatiomatriisia (koneen absoluuttinen asento simulointiavaruudessa).

Seuraavassa vaiheessa on tarkoitus toteuttaa mobilekoneen simulointimallin ja vesihydraulisen liikealustan yhdistäminen. Tämä prosessi sisältää simulointimallin parametrien virittämistä, ohjausjärjestelmän parametrien hienosäätöä, mobilekoneen rungon kiinnittämistä liikealustaan (kuvan 5.9 mukaisesti), sekä kokonaisjärjestelmän testausta ja hienosäätöä.



**Kuva 5.9.** Simulaattori [17].

Alustavien kokeilujen mukaan nopeataajuisten liikkeiden mallintaminen vesihydraulisella liikealustalla ei ole mahdollista. Tämä johtuu vesihydraulisten komponenttien suorituskyvyn rajallisuudesta. Tulevaisuudessa vesihydraulisten komponenttien kehittyessä ja niiden hintojen laskiessa on mahdollista kehittää myös tässä työssä esitettyä järjestelmää edelleen.

Järjestelmään mallinnettua mobilekoneen puomistoa on tulevaisuudessa mahdollista hyödyntää. On mahdollista lisätä simulaattoriympäristöön toiminnallisuutta, joka lisää järjestelmän kiinnostavuutta. Eräs tällainen toiminnallisuus voisi olla kuormalavojen siirtely mobilekoneen avulla. Tällainen koneen varsinaista käyttöä vastaava skenaario parantaa järjestelmän todentuntuisuutta.

## 6. LÄHTEET

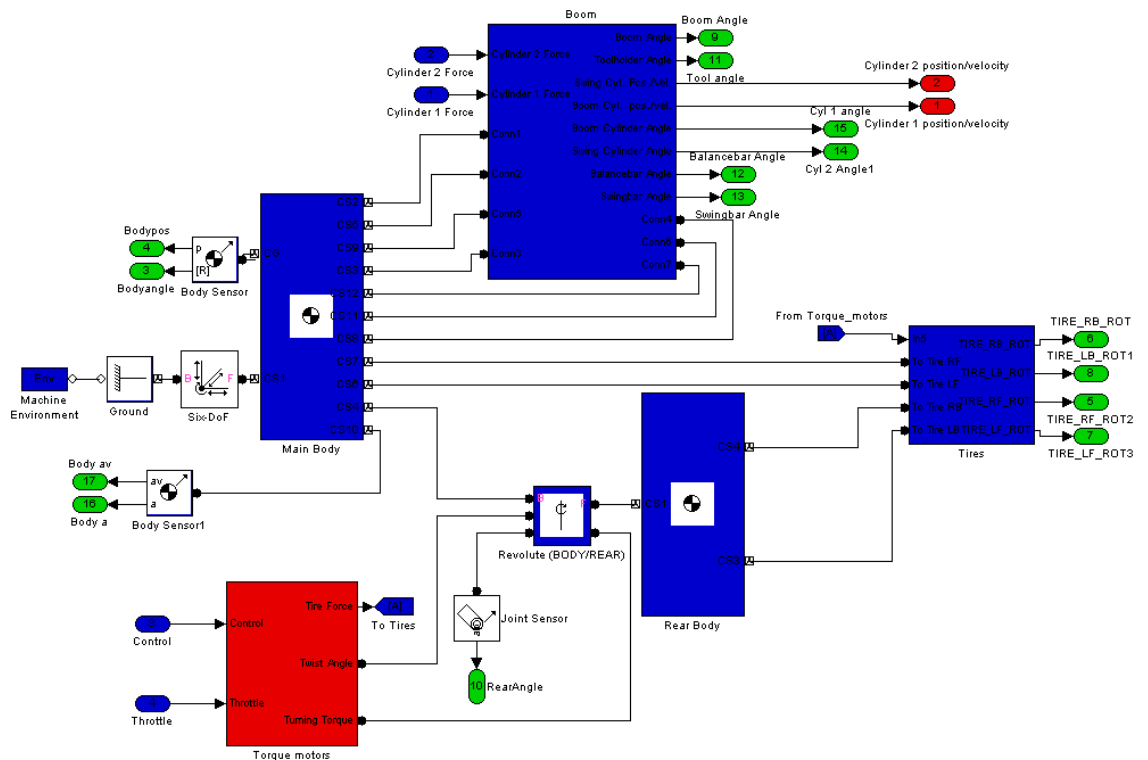
- [1] Alavalkama I. Näköhavainto ja optiikka. Kurssimoniste: kuvausmenetelmät. Tampere 2000, TTKK 7 p.
- [2] Avant tecno Oy kotisivu. <http://www.avanttecno.com/> . Luettu 2.5.2007.
- [3] Bosch Rexroth kotisivu. <http://www.boschrexroth.com/>. Luettu 2.5.2007.
- [4] Curtis Collinsin kotisivu. <http://synthetica.eng.uci.edu/~curtis/project2.html>. Luettu 13.4.2007.
- [5] Hammarberg, T., Liukkala, M., Arola, S., Mikkola, A., Leino, S., Handroos, H., Venemies, M. Dynamiikan simuloinnin mahdollisuudet moniteknisten konejärjestelmien tuotekehityksessä. Helsinki 2001. Metalliteollisuuden Keskusliitto, MET-Julkaisuja 22/2001. 74 p.
- [6] Iltanen, M. Virtuaalitodellisuusteknologiat ja -ohjelmistot koulutussimulaattoreiden teknisessä toteutuksessa. Luentomateriaali, Tampere 2007, 101 p.
- [7] Johansson, M., Nordin, J., A Survey of Driving Simulators and their Suitability for Testing Volvo Cars. Master's Thesis. Göteborg 2002. Chalmers University of Technology, Department of Machine and Vehicle systems. 38 p + liit. 2 p.
- [8] Kauranne, H., Kajaste, J., Vilenius, M. Hydraulitekniiikan perusteet. Vantaa 2000, 354 p.
- [9] Kemeny, A., Panerai, F. Evaluating perception in driving simulation experiments. TRENDS in Cognitive Sciences 7 (2003), pp. 31-37.
- [10] Kemeny, A. Simulation and Perception of Movement. Proceedings of the Driving Simulator Conference. Pariisi, Syyskuu 2000, pp. 13-22.

- [11] Kemeny, A. Motion cueing in driving simulation experiments. *Vehicle System Dynamics*. 34. pp. 249-259.
- [12] Kilpeläinen, P. 3D-Mallinnus ja simulointi ladontarobotin suunnittelussa. Diplomityö. Tampere 1997. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Hydrauliiikan ja automatiikan laitos. 127 p. + liit. 11 p.
- [13] Liikenne- ja viestintäministeriön päätös 24.9.2002/807. Kuljettajaopetus linja-auton ja raskaan ajoneuvoyhdistelmän ajo-oikeutta varten.
- [14] Liikenne- ja viestintäministeriön tiedote: Simulaattorikoulutusta myös yhdistelmäkorttia varten. Verkkodokumentti. <http://www.mintc.fi/scripts/cgiip.exe/WService=lvcm/cm/pub/showdoc.p?docid=1870&menuid=88&channelitemid=13653&channelid=55>. Luettu 14.5.2007.
- [15] Linjama, M. MATLAB® + SIMULINK® Alkeet, Opintomoniste, Tampere 2003, 37 p.
- [16] Linjama, 2601020 Hydraulijärjestelmien mallinnus ja simulointi. luennot 1-5, syksy 2004, Opintomoniste, Tampere 2003, 55 p.
- [17] Martinez, L. Simulation and control of proportional valve controlled water hydraulic motion platform. Tampere 2009 75 p + liit. 4 p.
- [18] Mathworks kotisivu. <http://www.mathworks.com/>. Luettu 23.4.2007.
- [19] Mikkonen V. Linja-autosimulaattorin soveltuvuus koulutusvälineeksi. Ajoneuvohallintokeskuksen (AKE) raportti, Helsinki, Helmikuu 2005.
- [20] NADS kotisivu. <http://www.nads-sc.uiowa.edu/press/pressmedia.htm>. Luettu 9.1.2010.
- [21] Palonen, T., Rokala, M., Sairiala, H., Uusi-Heikkilä, J., Hyvönen, M., Koskinen, K.T. Design and implementation of a water hydraulic 6-DOF motion platform for real-time simulators. *Proceedings of Power Transmission and Motion Control. PTMC 2006*. Bathin yliopisto, Iso-Britannia, Syyskuu 2006. pp. 251-264.

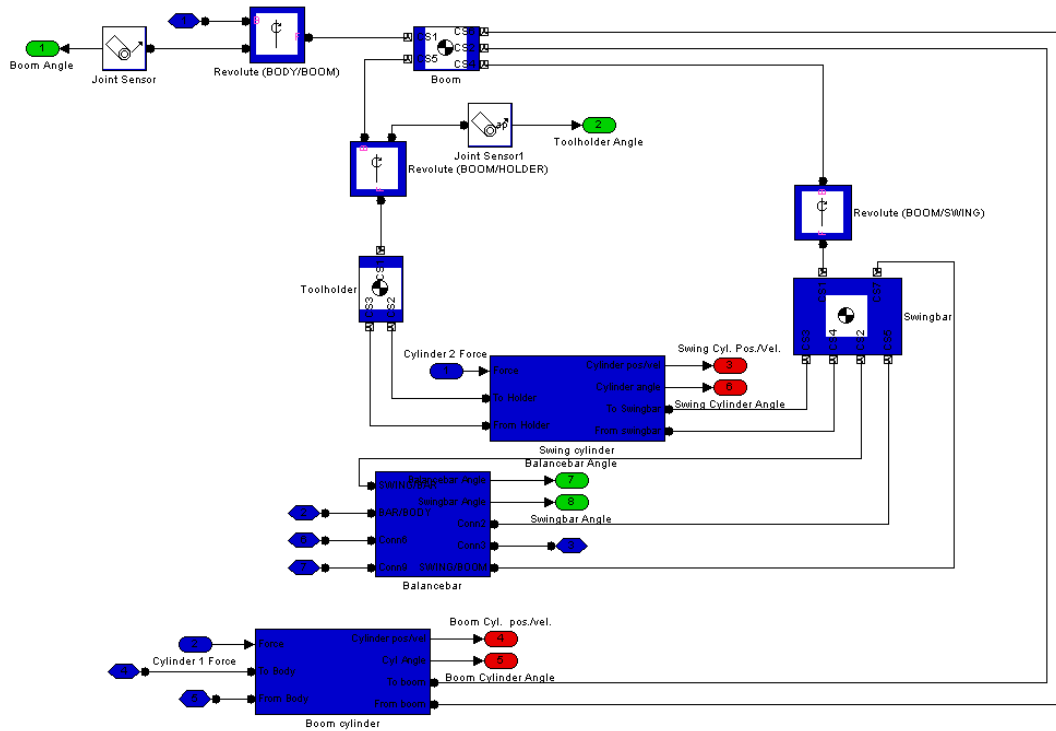
- [22] Palonen, T. Vesihydraulisen liikealustan liikkeenohjausalgoritmin ja hydrauliiikan ohjauksen toteutus. Diplomityö. Tampere 2006. 65 p.
- [23] Reymond, G., Heidet, A., Canry, M., Kemeny, A. Validation of Renault's dynamic simulator for Adaptive Cruise Control experiments. Proceedings of the Driving Simulation Conference, Pariisi, Syyskuu 2000, pp. 333-343.
- [24] STC, Simbus technical specification, Linja-autosimulaattorin käyttöopas.
- [25] VRLogic kotisivu, <http://www.vrlogic.com/html/emagin.html>, luettu 14.5.2010.
- [26] VTI's simulator history, verkkodokumentti, [http://www.vti.se/templates/Page\\_\\_\\_\\_\\_11865.aspx](http://www.vti.se/templates/Page_____11865.aspx). Luettu 5.1.2010.
- [27] Wong-Sung, L., Jung-Ha, K., Jun-Hee, C. A Driving Simulator as a Virtual Reality Tool. Proceedings of the International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgia, 1998, pp. 71-76.
- [28] World-class driving simulator, verkkodokumentti, <http://www.vti.se/5053.epibrw>. Luettu 5.1.2010.
- [29] Xu, Z., Taylor, D. Using Motion Platform as a Haptic Display for Virtual Inertia Simulation. Proceedings of IV'03 Conference on Information Visualization. Heinäkuu 2003. pp. 498-504.



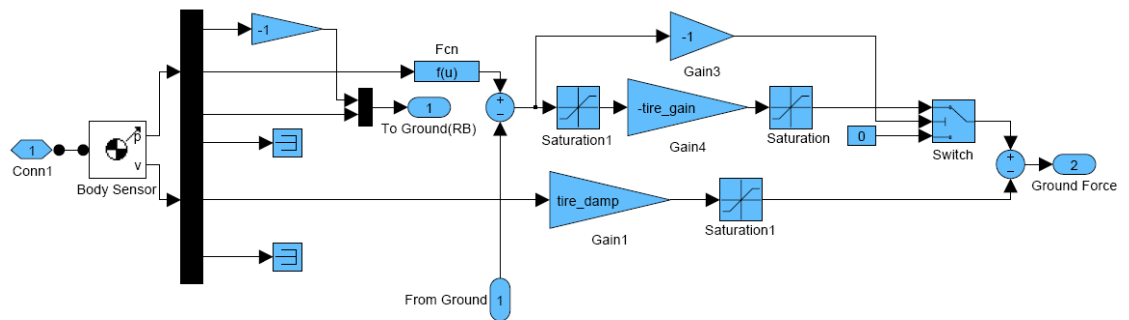
# LIITE 1: AVANT 216 SIMULOINTIMALLIN MEKAANISEN JÄRJESTELMÄN SIMULINK®-KUVAUS



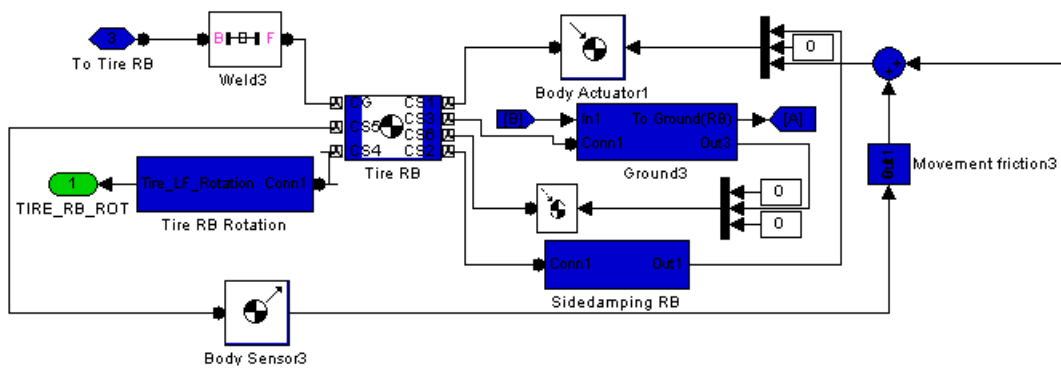
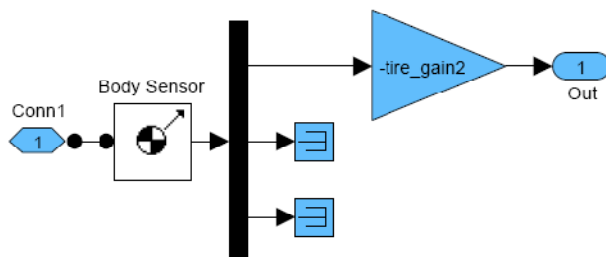
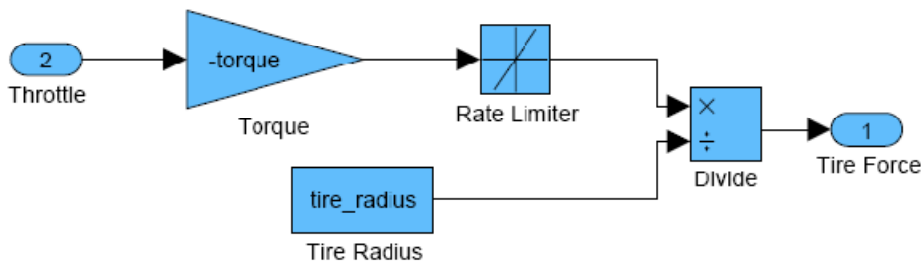
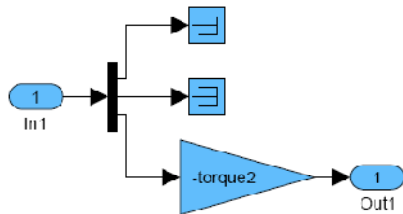
# LIITE 2: AVANT 216 PUOMIN SIMULINK®-KUVAAUS



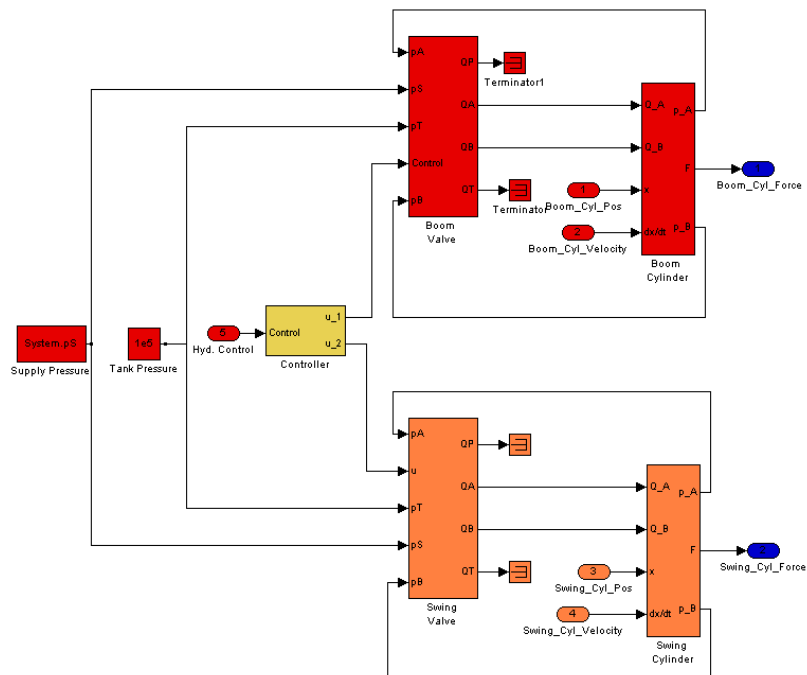
# LIITE 3: RENKAAN JA MAASTON VÄLISEN INTERAKTION SIMULINK®-KUVAUS



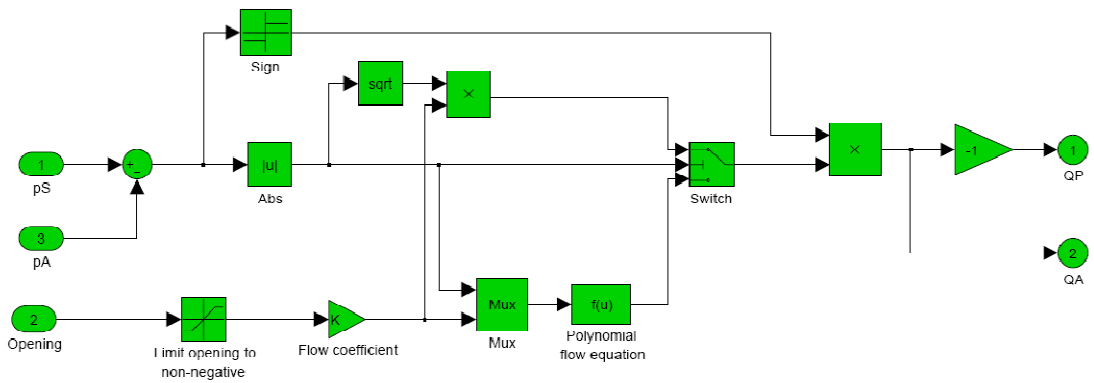
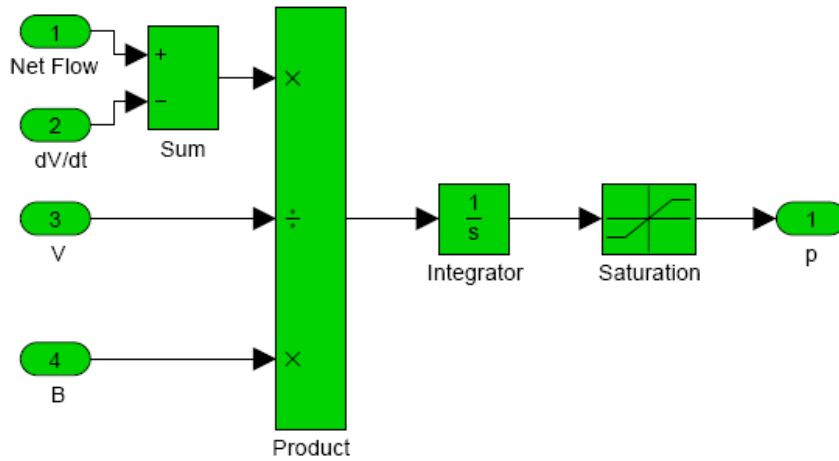
# LIITE 4: RENGASMALLIN SIMULINK®-KUVAUS



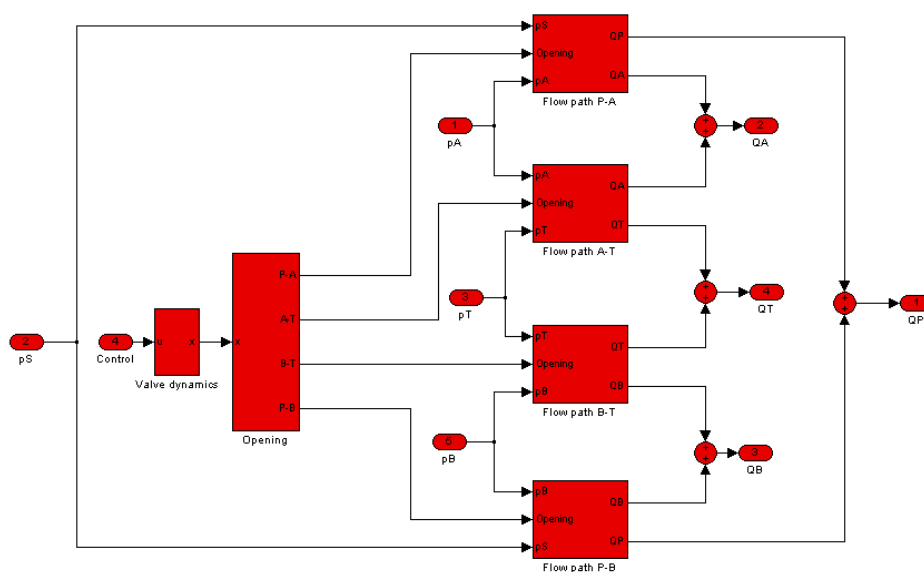
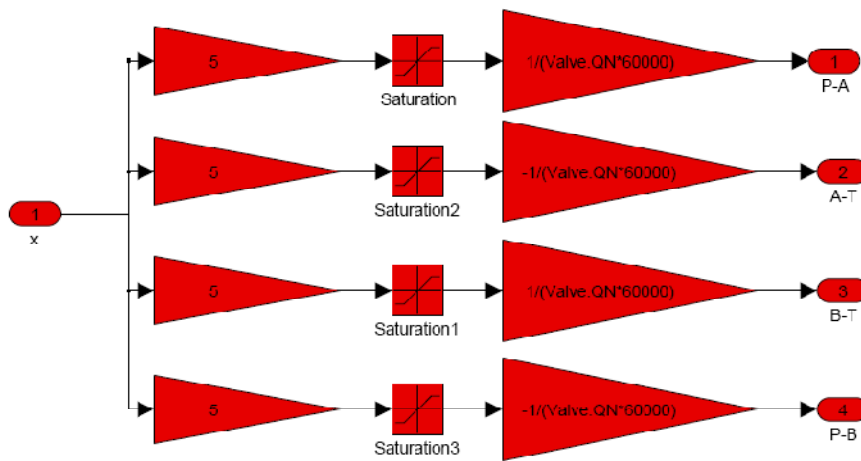
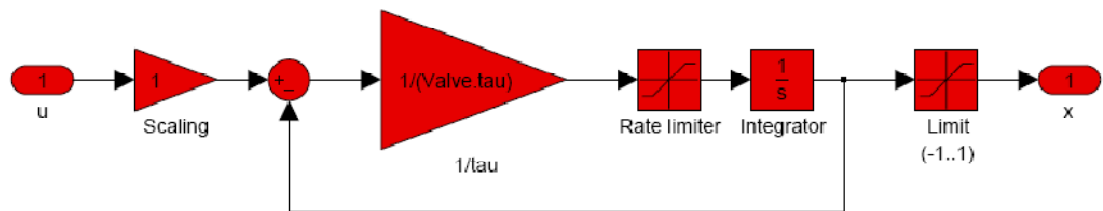
# LIITE 5: AVANT 216 HYDRAULISEN JÄRJESTELMÄN YLIN SIMULINK®-KUVAUS



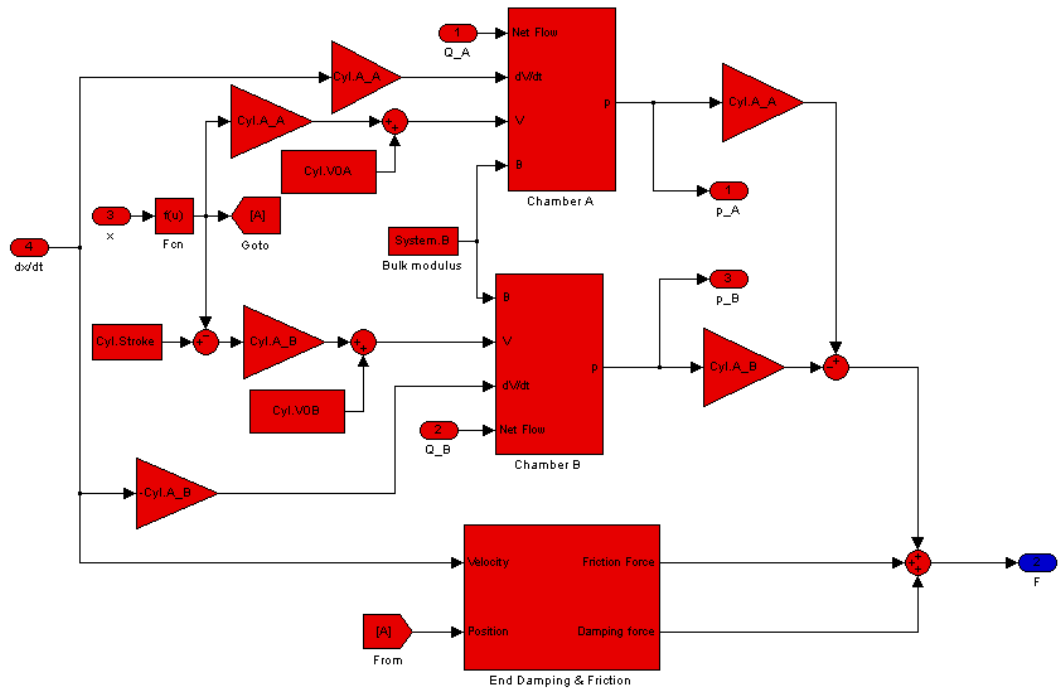
# LIITE 6: TILAVUUDEN JA KURISTUKSEN SIMULINK®-KUVAUKSET



# LIITE 7: VENTTIILIMALLIN SIMULINK®-KAAVIOT



# LIITE 8: SYLINTERIMALLIN SIMULINK®-KUVAUS





# LIITE 9: AVANT 216 SIMULONTIMALLIN LIITYNNÄT ULKOISIIN JÄRJESTELMIIN

