

Opinnäytetyö

Auto- ja kuljetustekniikka

Autotekniikka

2012

Samu Hyypiä

KÄSIKIRJA AUTON ALUSTARAKENTEISTA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Alkusanat

Käsikirja auton alustarakenteista on tehty Uudessakaupungissa Valmet Automotive Oy:n Tuotekehitysosaston Chassis-jaokselle marraskuun 2011 ja toukokuun 2012 välillä. Alustarakenteet on laaja ja haastava alue käsiteltäväksi opinnäytetyössä, mutta koin projektin erittäin mielenkiintoiseksi ja opettavaiseksi.

Haluaisin kiittää ensin Valmet Automotive OY:n puolelta Ari Wandenia, joka välitti toiveeni opinnäytetyön aiheesta eteenpäin uudelle alustarakennejaokselle. Seuraavaksi kiitän Risto Sarakaskea ja Jukka-Pekka Multasuota opinnäytetyöni ohjaamisesta ja mielekkästä aiheesta. Koko Valmet Automotive Oy:n tuotekehitysosaston henkilöstöä kiitän lisäksi ystävällisestä ja kannustavasta työilmapiiristä, sekä asiantuntevasta avusta. Turun Ammattikorkeakoulun puolelta kiitoksen ansaitsee Kalevi Vesterinen, joka toimi opinnäytetyön koulun puoleisena ohjaajana. Hän auttoi minut työssäni alkuun tarjoten runsaasti hyvää lähdemateriaalia ja ohjeita. Erityiskiitos pitkäjänteisyydestä ja ymmärtävyydestä kuuluu vielä puolisolteni Mari Vainio-Kailalle, joka jaksoi kestää loputtomalta tuntuvan projektin aiheuttamaa turhautumista ja sitä, että toinen puolisko istuu jatkuvasti iltamyöhään tietokoneen ääressä.

Uudessakaupungissa 26.4.2012

Samu Hyypiä

Samu Hyypiä

KÄSIKIRJA AUTON ALUSTARAKENTEISTA

Opinnäytetyön tarkoitus on toimia Valmet Automotive Oy:n tuotekehitysosaston alustarakennejaoksen peruskoulutusmateriaalina uusille alustarakenteiden suunnitteluinsinööreille. Työ koostuu kahdesta osiosta. Ensimmäisessä osassa esitellään auton alustarakenteet yhden Eurooppalaisen jaottelutavan mukaisesti. Alustakokonaisuudesta kerrotaan ensin yleisesti, jonka jälkeen eri osa-alueisiin perehdytään tarkemmin. Tarkoituksena on perustietojen lisäksi esitellä ja vertailla nykyaikaisissa autoissa käytettyjä perinteisiä sekä erikoisia rakenneratkaisuja. Elektroniikan räjähdysmäisen yleistymisen takia työssä käsitellään myös periaatetasolla mahdollisimman useita elektronisia lisälaitteita ja -ominaisuuksia. Teorian lisäksi osa-alueittain listataan Euroopan, USA:n, sekä Kanadan direktiivit, normit ja lakivaatimukset.

Toinen osa käsittelee markkinatutkimuksen, johon kootaan useista eri tietokannoista nykyaikaisten autojen alustarakennetietoja. Markkinatutkimuksessa autot jaetaan kolmeen pääluokkaan niiden käyttötarkoituksen mukaan (henkilönkuljetus, tavarankuljetus ja off-road). Henkilönkuljetusluokka jaetaan lisäksi kolmeen alaluokkaan (perheautot, edustusautot ja urheiluautot). Jokaisesta Euro Car Segmentistä (A-J) valitaan kolme esimerkkiautoa tarkasteltavaksi. Alustarakennetiedot taulukoidaan omaksi tietokannakseen, jota voidaan myöhemmin täydentää. Tietojen perusteella analysoidaan eri autosegmenttien tyypillisiä ratkaisuja.

ASIASANAT:

ajoneuvot, autot, ajonvakautusjärjestelmät, etuveto, henkilöautot, jarrut, jarrutus, jousitus, kesärenkaat, kitkarenkaat, , iskunvaimentimet, neliveto, ohjaus, ohjauslaitteet, pakkaus, pyörät, renkaat, takaveto

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive & Transportation technology | Automotive technology

26.4.2012 | 221 pages

Instructor: Jukka-Pekka Multasuo

Samu Hyypiä

A HANDBOOK OF THE CAR CHASSIS SYSTEM

The purpose of this thesis is to act as a basic training material for the new chassis design engineers at Valmet Automotive Inc. The thesis consists of two main parts. The first part introduces a basic European concept of the chassis. The general chassis product development is introduced as well as modern Euro Car Segment car types and their "crossover" and trend versions. Each chassis part has its own paragraph where the basic theory and structural examples are introduced. Also a number of extraordinary solutions and applications are shown. Electronics take part in most of today's chassis components or systems. Therefore it is also necessary to deal with as many electronic applications as possible. In addition to theory and examples, laws and standards must also be listed. In this thesis there are three relevant regions to be considered: Europe, the USA and Canada. The UNECE regulations, EU directives and norms and laws of the USA and Canada are listed as necessary.

The second part of this thesis is a market research. Cars are divided into three basic groups according to their purpose of use (passenger cars, transportation cars, and off-road-cars). Passenger cars are additionally divided into family cars, luxury cars and sports cars. Three example cars are listed from each Euro Car Segment (A-J). The purpose is to examine, compare and analyze the structural differences of each car segment. The list will act as a database that can be completed later.

KEYWORDS:

vehicles, cars, stability control, front wheel drive, passenger cars, brakes, braking, suspension, summer tires, friction tires, dampers, four wheel drive, steering, steering system, packaging, wheels, tires, rear wheel drive

SISÄLTÖ

LYHENTEET	12
1 JOHDANTO	14
2 YLEISTÄ ALUSTARAKENTEISTA	14
2.1 Historia ja yleistieto	14
2.2 Tuotekehitys	18
3 RENKAAT	20
3.1 Historia	20
3.2 Yleistieto	21
3.3 Tyypit ja rakenne	23
3.3.1 Ristipunosrakenne	25
3.3.2 Vyöpunosrakenne	25
3.3.3 Run-flat-rakenne	26
3.4 Vaikutus ajo-ominaisuuksiin	26
3.5 Lainsäädäntö	30
3.5.1 YK:n normit (tulevat määrääviksi 2017)	30
3.5.2 EU-direktiivi (kumoutuu 2017)	30
3.5.3 USA:n lakivaatimukset	31
3.5.4 Kanadan lakivaatimukset	32
4 JARRUT	32
4.1 Historia	32
4.2 Yleistieto	33
4.2.1 Lisäjärjestelmät	34
4.3 Käyttöjarru	38
4.3.2 Vaihtoehtoiset järjestelmät	44
4.3.3 Rumpujarru	47
4.3.4 Levyjarru	50
4.3.5 Vertailu	53
4.4 Seisontajarru	54
4.4.1 Tyypit ja rakenne	54
4.4.2 Vertailu	55
4.5 Lainsäädäntö	55

4.5.1 YK:n normit (tulevat määrääviksi 2014)	55
4.5.2 EU-Direktiivi (kumoutuu 2014)	56
4.5.3 USA:n lakivaatimukset	56
4.5.4 Kanadan lakivaatimukset	56
5 JOUSITUS	57
5.1 Historia	57
5.2 Yleistieto	57
5.3 Vaikutus ajo-ominaisuuksiin	61
5.3.1 Suunnitteluparametrien vaikutus	64
5.4 Tyypit ja rakenne	71
5.4.1 Lehtijousi	71
5.4.2 Vääntötanko­jousi	73
5.4.3 Kierrejousi	74
5.4.4 Kaasujousi	78
5.4.5 Kumijousi	81
5.4.6 Hydropneumaattinen jousi	83
5.5 Vertailu	84
6 VAIMENTIMET	85
6.1 Historia	85
6.2 Yleistieto	86
6.3 Vaikutus ajo-ominaisuuksiin	88
6.4 Tyypit ja rakenne	91
6.4.1 Vertailu	93
6.4.2 Erikoisrakenteet	94
6.5 Aktiivijousitus	97
6.5.1 Adaptiivinen alusta	98
6.5.2 Semiaktiivinen alusta	99
6.5.3 Aktiivinen alusta	100
7 KALLISTUKSENVAKAUS	103
7.1 Vaikutus ajo-ominaisuuksiin	103
7.2 Tyypit ja rakenne	103
8 AKSELISTORAKENTEET	108
8.1 Historia	108
8.2 Yleistieto	109

8.2.1	Rakenteet	114
8.2.2	Kinematiikka	117
8.2.3	Elastokinematiikka	131
8.3	Jäykkä tuenta	132
8.3.1	Jäykkä akseli	132
8.3.2	De Dion	136
8.3.3	Aisatuenta	137
8.4	Puolijäykkä tuenta	138
8.4.1	Vääntötuki	139
8.4.2	Kytetty tuki	140
8.4.3	Yhdystuki	140
8.4.4	Dynaaminen puolijäykkä tuenta	140
8.5	Erillistuenta	142
8.5.1	Heilurituenta	142
8.5.2	Trapetsi- ja double wishbone-tuennat	146
8.5.3	Monivarsituenta	150
8.5.4	Joustintukituenta	154
8.6	Vertailu	158
9	OHJAUS	160
9.1	Historia	160
9.2	Yleistieto	161
9.3	Hammastanko-ohjaus	167
9.4	Kuulamutteriohjaus	169
9.5	Rakenne ja toiminta	169
9.6	Aktiiviohjaus	175
9.7	Lainsäädäntö	176
9.7.1	YK:n normit (tulevat määrääviksi 2014)	176
9.7.2	EU-Direktiivi (kumoutuu 2014)	176
9.7.3	USA:n lakivaatimukset	177
9.7.4	Kanadan lakivaatimukset	177
10	MARKKINATUTKIMUS	177
10.1	A-segmentti	181
10.2	B-segmentti	181
10.3	C-segmentti	181
10.4	D-segmentti	182

10.5	E-segmentti	182
10.6	F-segmentti	183
10.7	S-segmentti	183
10.8	J-segmentti	184
10.9	Tavarankuljetusautot	184
10.10	Off-road-autot	185
10.11	Päätelmät	186
11	YHTEENVETO	188
	LÄHTEET	189

LIITTEET

Liite 1.	Auton osien taajuuksia (Vesterinen 2010, Jousitus, 29)
Liite 2.	Suunnitteluosuureiden vaikutuksia korin kiihtyvyyteen (Vesterinen 2010, Jousitus, 59)
Liite 3.	Eri jousityyppien ominaisuuksia (Bosch 2002, 682)
Liite 4.	Akselistorakenteiden suunnittelumatriisi (Heiðing & Ersoy 2011, 417)
Liite 5.	Tukivarsien valmistusmenetelmiä (Heiðing & Ersoy 2011, 295, 297)
Liite 6.	Apurungon suunnittelumatriisi
Liite 7.	Esimerkkiautojen kinemaattisia parametrejä (Heiðing & Ersoy 2011, 29—30)
Liite 8.	Esimerkkiauton kinemaattisia tavoitearvoja (Heiðing & Ersoy table 2011, 32)
Liite 9.	Eri tuentatyyppien ominaisuuksia (Bosch 2002, 686)
Liite 10.	Autoja, joihin on saatavilla tehdasvarusteena ilmajousitus (Saastamoinen 2011, 22)
Liite 11.	Alustarakenteiden toimittajia (Sarakaski 2012)
Liite 12.	Markkinatutkimuksen tietokanta

KUVAT

Kuva 1.	Renkaan pääkitkakomponentit	22
Kuva 2.	Henkilöauton renkaan poikkileikkaus (Tuononen & Koisaari 2010, 15)	24
Kuva 3.	Teves ABS Mk20-jarrujärjestelmä (Bosch 2002, 730)	35
Kuva 4.	Jarrupiirijaot (Bosch 2002, 718)	40
Kuva 5.	Tandem-pääsylinteri (bosch 2002, 719)	43
Kuva 6.	Sähköhydraulinen jarrujärjestelmä (SBC-jarrujärjestelmä)	45
Kuva 7.	Rumpujarrutyypit	47
Kuva 8.	Drum-in-hat-yksikkö	49
Kuva 9.	Kiinteä satularakenne	52
Kuva 10.	Uiva satularakenne	53
Kuva 11.	Yksimassamalli	59
Kuva 12.	Kaksimassamalli	59
Kuva 13.	Yksiraidemalli	60
Kuva 14.	Kaksiraidemalli	61
Kuva 15.	Yleismalli kuljettajaan kohdistuvista värähtelyistä	64

Kuva 16. Tienpintojen herätetaajuuksia ajonopeuden mukaan (Laine 1981, 181)	70
Kuva 17. Eri lehtijousirakenteiden jännitysjakautumat	72
Kuva 18. Apujousi lehtijousessa	72
Kuva 19. Vääntötankojousia (Heiðing & Ersoy 2011, 230)	74
Kuva 20. Vääntötankojousi (Mercedes-Benz) (Reimpell ym. 2001, 4)	74
Kuva 21. Jousien sarjaan- ja rinnankytkennät	75
Kuva 22. Muuttuva kierteen nousu	76
Kuva 23. Muuttuva jousilangan paksuus	76
Kuva 24. Muuttuva kierteen halkaisija	76
Kuva 25. Perinteinen joustintukiratkaisu, kierrejousi vaimennintolpan ympärillä (Reimpell ym. 2001, 49)	77
Kuva 26. Vetoakselia väistävä kierrejousi (Vesterinen 2010, Jouset, 59)	77
Kuva 27. Citroën 2CV:n jousitus sivultapäin katsottuna. (Bastow 1987, 247)	78
Kuva 28. Rengaspalje ja rullapalje	80
Kuva 29. Etuakselin ilmajousi-vaimenninyksikkö (ATZ 09I2009 Jahrgang, 111)	80
Kuva 30. Ilmajousijärjestelmä (Porsche Panamera) (Saastamoinen 2011, 11)	81
Kuva 31. Kumijousielementti (Mini) (Vesterinen 2010, Jouset, 72)	82
Kuva 32. Hydrolastic-jousielementti (BMC) (Laine 1981, 150)	82
Kuva 33. Hydropneumaattisen jousen toiminta (Vesterinen 2010, Jouset, 83)	84
Kuva 34. Kitkavaimennin (Laine 1981, 210)	86
Kuva 35. Neste-vipuvaimentimia (Laine 1981, 211)	86
Kuva 36. Kaksiputkivaimentimen toiminta	92
Kuva 37. Yksiputkivaimentimen toiminta	93
Kuva 38. Kaksivaiheisia vaimennusratkaisuja	95
Kuva 39. Active Body Control-järjestelmä (Daimler)	101
Kuva 40. Vakaajatankojen muotoja (Heiðing & Ersoy 2011, 232)	104
Kuva 41. Passiivinen vakaaja	104
Kuva 42. Kytkevä off-road-vakaaja	105
Kuva 43. ZF Lemförder:n AOS (adaptive off-road stabilizer)	105
Kuva 44. Kytkevä on-road-vakaaja	106
Kuva 45. Semiaktiivinen vakaaja	107
Kuva 46. Aktiivinen vakaaja	107
Kuva 47. Tukivarsien muotoja	115
Kuva 48. Pallonivelen liikkeen vapausasteet	116
Kuva 49. Hetkellinen kallistuskeskiö erillistuennassa (Laine 1981, 222)	120
Kuva 50. Vinojen tukivarsien keskikohta ja pyörän liikenapa (Reimpell 2001, 167)	121
Kuva 51. Pyörän liikenapa joustintukituennassa. (Reimpell 2001, 169)	121
Kuva 52. Vinoheilurin kallistuskeskiön määrittäminen (Reimpell 2001, 172)	122
Kuva 53. Puolijäykän tuennan kallistuskeskiö (Reimpell 2001, 173)	122
Kuva 54. Lehtijousen kallistuskeskiön korkeus (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 49)	123
Kuva 55. Kallistusakseli	124
Kuva 56. Vinojoustokulma	125
Kuva 57. Nyökkäyskeskiön määrittäminen (Laine 1981, 268)	125
Kuva 58. Camber-kulman aiheuttama liikenapa	127
Kuva 59. KPI-kulma ja olkapoikkeama	128
Kuva 60. Caster-kulma ja caster-jättämä	129
Kuva 61. Spindle offset ja parallel offset	129
Kuva 62. Braking disturbance force lever arm ja acceleration disturbance force lever arm	130
Kuva 63. Neljän nivelsauvan jäykkä tuenta (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 12)	132
Kuva 64. Lehtijousitettu jäykkä tuenta (Reimpell ym. 2001, 26)	132

Kuva 65. Panhard-tanko	134
Kuva 66. Watt-vivusto	134
Kuva 67. Lehtijousen kiertoliike ja tuen vaikutus (Vesterinen 2010, Jouset, 29)	135
Kuva 68. De Dion-akselin kaavio (Autozine 2011,1)	136
Kuva 69. Mercedes-Benz A-mallin takatuenta (Heiing & Ersoy 2011, 389)	137
Kuva 70. Puolijäykät perustuentatyytit yhdystangon asemasta riippuen	139
Kuva 71. Magna Steyrin dynaaminen puolijäykkä takatuenta	140
Kuva 72. Trailing arm-tuenta	144
Kuva 73. Semi trailing arm-tuenta	145
Kuva 79. Trapetsituenta (Reimpell ym. 1988, 72)	147
Kuva 80. Weissach-akseli	148
Kuva 81. Double-wishbone-tuenta (SLA-tyyppi)	149
Kuva 82. 1999 Ford Focusin trailing blade-takatuenta (Heiing & Ersoy 2011, 404)	152
Kuva 83. Imaginäärinen kääntöakseli	153
Kuva 84. Pallonivelen ja etummaisien puslan offset	156
Kuva 85. Joustintukituenta	156
Kuva 86. Kaaviokuva Fordin RevoKnucklesta	158
Kuva 87. Ackermann-kulma	164
Kuva 88. Ohjausvivustotyyppijä	165
Kuva 89. Korjattu Ackermann-kulma	166
Kuva 90. Tavallinen avoimen järjestelmän hydraulinen ohjaustehostin	168
Kuva 91. Nykyaikainen ohjausvoimalinja	172
Kuva 92. Steering column drive-sähkömekaaninen tehostus	174
Kuva 93. Pinion drive- sekä dual pinion drive-sähkömekaaninen tehostus	174
Kuva 94. Parallel axis drive- sähkömekaaninen tehostus	175
Kuva 95. Suoraan tai planeettapyörästön kautta kuulamutteria ajava aksiaalinen sähkömekaaninen tehostus	175

KUVAAJAT

Kuvaaja 1 Luistoprosentin vaikutus kitkakertoimeen (Heiing & Ersoy 2011, 57)	28
Kuvaaja 2. Ajonopeuden ja pinnan vaikutus kitkakertoimeen (Heiing & Ersoy 2011, 58)	28
Kuvaaja 3. Camber-kulman vaikutus renkaan välittämään maksimisivuvoimaan (Heiing & Ersoy 2011, 355)	29
Kuvaaja 4. Tien herätteen aiheuttama kiihtyvyys, pystynopeus, ja pystysuuntainen liike (Heiing & Ersoy 2011, 79)	58
Kuvaaja 5. Ihmisen värähtelynsietokyky 63	
Kuvaaja 6. Jousittamattoman massan kevyttämisen vaikutus dynaamisiin pyöräkuormiin esimerkkiteipinnalla (PSD) (Heiing & Ersoy 2011, 80)	65
Kuvaaja 7. Rengaspaineen vaikutus dynaamisiin pyöräkuormiin esimerkkiteipinnalla (PSD) (Heiing & Ersoy 2011, 80)	66
Kuvaaja 8. Jousivakion vaikutus dynaamisiin pyöräkuormiin esimerkkiteipinnalla (PSD). (Heiing & Ersoy 2011, 80)	67
Kuvaaja 9. Eri jousityyppien ominaistuuksien muutos kuormituksen muuttuessa (Heiing & Ersoy 2011, 69)	68
Kuvaaja 10. Virtauskanavan muodon sekä paineenrajoitusventtiilin vaikutus nesteeseen virtaukseen ja paineenmuutokseen (Heiing & Ersoy 2011, 268)	88

Kuvaaja 11. Iskunopeuden vaikutus vaimennusvoimaan (Laine 1981, 183)	89
Kuvaaja 12. Suhteellisten vaimennuksien kuvaajia ajan funktiona (Vest 2010, Vaimentimet_Aktiivijousitus, 17)	90
Kuvaaja 13. Vaimennusvakion vaikutus dynaamisiin pyöräkuormiin esimerkkitiepinpinnalla (PSD) (Heiðing & Ersoy 2011, 81)	91
Kuvaaja 14. Alustan eri jäykkyyksien kuvaajat korin kiihtyvyyden sekä dynaamisen pyöräkuorman suhteen, ja adaptiivisen alustan säätöalue	99
Kuvaaja 15. BMW:n aktiivivakaajiin perustuvan Dynamic Drive-järjestelmän vaikutus korin kallisteluun	108
Kuvaaja 16. Etuakselistotuentojen jakauma vuosina 2005 ja 2010 (Heiðing & Ersoy 2011, 411)	112
Kuvaaja 17. taka-akselistotuentojen jakauma vuosina 2005 ja 2010 (Heiðing & Ersoy 2011, 414)	112
Kuvaaja 18. Raidevälin muutos ulos- ja sisäänjoustossa esimerkkituennassa. (Reimpell 2001, 157)	119
Kuvaaja 19. Simuloitu camber-muutos pelkän kinematiikan, sekä kinematiikan+elastokinematiikan kanssa	131
Kuvaaja 20. Jäykän akselin ominaisuudet	135
Kuvaaja 21. Puolijäykän tuennan ominaisuudet	142
Kuvaaja 22. Trailing arm-tuennan ominaisuudet	144
Kuvaaja 23. Semi trailing arm-tuennan ominaisuudet	146
Kuvaaja 23. Double wishbone-tuennan ominaisuudet	150
Kuvaaja 24. Monivarsituennan ominaisuudet	154
Kuvaaja 25. Joustintukituennan ominaisuudet	157
Kuvaaja 26. Etutuennat	159
Kuvaaja 27. Takatuennat	160
Kuvaaja 28. Takapyörien ohjauskulman suhde etupyörien ohjauskulmaan eri nopeuksilla (esimerkkitapaus)	167
Kuvaaja 29. Muuttuvavälitteisen ohjausvaihteen vaikutus pyörien ja ohjauspyörän kääntymisen suhteen	170
Kuvaaja 30. Tavallisen ohjausventtiilin paine suhteessa ohjausvääntöön	170
Kuvaaja 31. Servotronic-venttiilin toiminta	171

TAULUKOT

Taulukko 1. Auton ajomukavuuteen vaikuttavia taajuuksia ja niitä aiheuttavat herätteet	62
Taulukko 2. Ihmisruumiin osien ominaistajuuksia	63
Taulukko 3. Jousituksen suunnitteluparametrien vaikutuksia pystyheilahteluun (Bosch 2002, 676)	69
Taulukko 4. Tien pinnan simulointimalli	70
Taulukko 5. Jousitusjärjestelmien kuvaukset	98
Taulukko 6. Hydraulisen ja sähkömekaanisen järjestelmän vertailua	102
Taulukko 7. Eri akselistorakenteiden ominaisuuksia (0=ei mahdollista)	110
Taulukko 8. Akselistotyyppien rakenne	111
Taulukko 9. Tukivarsien materiaaleja	115
Taulukko 10. Tietokannan autojen perustiedot	179
Taulukko 11. Automallikohtainen alustatietotaulukko	180

LYHENTEET

C.F.R	Council of foreign relations, USA:n ulkoasiainvaltuusto
CMVSS	Canada Motor Vehicle Safety Standards, Kanadan moottoriajoneuvojen turvallisuusstandardit
Crossover	tavallisen henkilöauton alustalle rakennettu SUV-tai tavarankuljetustyyppinen auto. Crossover-malli yhdistää eri autosegmenttejä toisiinsa.
Differentiaali	tasauspyörästö
DIN	Deutsche Institut für Normung, Saksan standardointi-instituutti
DOT	Department Of Transportation, USA:n liikennevirasto
E/E	electrical & electronic, auton sähköjärjestelmäarkkitehtuuri
ECU	electronic control unit, elektroninen ohjausyksikkö
ETRTO	European Tyre and Rim Technical Organisation, laatii Euroopan rengasnormit (vrt. STRO)
Euro Car Segment	Euroopan komission käyttämä autojen luokittelumenetelmä
Fail-safe	hajotessaan turvallisempaan suuntaan toimintaansa ohjaava laite
FEM	Finite Element Method (tai FEA, Finite Element Analysis), numeerinen menetelmä, jolla approksimoidaan integraali- ja osittaisintegraaliyhtälöiden ratkaisuja
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards, USA:n moottoriajoneuvojen turvallisuusstandardit
ISO	International Organization for Standardization, Kansainvälinen standardisointijärjestö
Lift-off-oversteer	(myös snap-oversteer, trailing-throttle oversteer, tai throttle off oversteer) Kaarreaajossa syntyvä tilanne, jolloin vedon katkaisussa (jalan nostamisessa kaasulta) syntyvä painonsiirto eteenpäin aiheuttaa taka-akselin yliohjautumisen (lift-off=jalan nostaminen kaasupolkimelta)
M1	Henkilöiden kuljetukseen valmistettu ajoneuvo, jossa on kuljettajan lisäksi tilaa enintään kahdeksalle henkilölle (Trafafi 2012, 1)
Miniblock-jousi	kierrejousi, jossa on muuttuva kierteen halkaisija (keskellä paksuin), muuttuva kierteen nousu (keskellä suurin), sekä muuttuva jousilangan paksuus (keskellä paksuin), ja jousistaessa kie rteet menevät toistensa sisään

N1	Tavaran kuljetukseen valmistettu ajoneuvo, jonka kokonaismassa on enintään 3,5 tonnia. Tavarakantavuuden tulee olla suurempi kuin henkilökantavuuden (henkilö 68kg). (Trafi 2012, 1)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Tässä työssä OEM:llä tarkoitetaan automerkkivalmistajaa.)
Off-road-auto	nelivetoinen auto, joka on tarkoitettu myös ajettavaksi tien ulkopuolella (maastoajoon)
PTFE	Polytetrafluorieteeni, tunnettu esimerkki on DuPontin Teflon
RFID	Radio Frequency IDentification, radioaalloilla toimiva etätunnistus/tiedonkulkumenetelmä
Robusti	jykevä, kestävä, luja
SAE	Society of Automotive Engineers, Yhdysvaltalainen autoalan standardointijärjestö
Spindle	akseli, varttinä, tässä pyörän keskiön kääntöetäisyys
STRO	Scandinavian Tire and Rim Organisation, pohjoismainen Rengasnormien laatija (vrt. ETRTO)
SUV	Sports Utility Vehicle, kauppanimitys off-road-auton näköiselle autolle, jonka alustarakenteiden/voimalinjan ei tarvitse vastata off-road-autoa (Suomalainen kansankielinen nimitys on City-maasturi)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe, YK:n Euroopan talouskomissio

1 JOHDANTO

Käsikirja auton alustarakenteista tehdään päättötyönä Valmet Automotive Oy:lle. Työ on kaksiosainen. Ensimmäisen osan tarkoitus on esitellä M1- ja N1-luokan autojen alustarakenteet perustietotasolla. Se palvelee uusien alustasuunnitteluun suuntautuvien insinöörien peruskoulutusmateriaalina. Toinen osa on markkinatutkimus, jossa kootaan tiettyjen autosegmenttien esimerkkiautojen alustarakenneratkaisuja. Tietokannan perusteella on tarkoitus havainnoida eri asioiden vaikutuksista alustarakenteiden valintaan. Alustava tietokanta toimii pohjana, jota laajennetaan ajan myötä.

2 YLEISTÄ ALUSTARAKENTEISTA

2.1 Historia ja yleistieto

Alustarakenteet ovat moottorin ja voimansiirron ohella auton tärkeimpiä osakokonaisuuksia. Alustarakenteilla käsitetään kaikkia osia, joilla aiheutetaan voimia, jotka siirretään tien pintaan kiihdytys-, ohjaamis-, tai jarrutustarkoituksessa. Historiallisia alustarakenteiden kehitysprosessin kulmakiviä ovat:

- Pyörän ja akselin keksiminen
- korin erottaminen alustasta
- jousitetun ja jousittamattoman massan erottaminen
- jousituksen ja vaimennuksen erottaminen
- pyörän ja renkaan erottaminen
- pyörien erottaminen akselistä (erillistuenta)
- tukivarsien erottaminen

- tuennan erottaminen alustasta apurungolla

Ilmanvastusvoimia ja massan hitausvoimia lukuunottamatta kaikki ajovoimat siirtyvät tien ja renkaan kosketuspinnan välillä. Pyörien tuennat välittävät voimat auton runkoon. Alustarakenteilla on myös suuri merkitys auton valmistuskustannuksissa, painossa, aerodynaamisissa ominaisuuksissa ja pakkauksessa. Rakenteiden keveydellä on suuri merkitys alustarakenteissa, sillä jousittamattoman massan minimointi on äärimmäisen tärkeä tekijä ajoturvallisuudessa ja ajo-ominaisuuksissa. (Heiðing & Ersoy 2011, 2—8.)

Autoja luokitellaan segmenteissä. Segmentti määräytyy auton käyttötarkoituksen ja koon mukaan. Erilaisia jakotapoja on useita, mutta tässä työssä käytetään Euroopan komission määrittämää hyvin suurpiirteistä ”Euro Car Segment”-jakoa:

- A: mini cars
- B: small cars
- C: medium cars
- D: large cars
- E: executive cars
- F: luxury cars
- S: sport coupés
- M: multi purpose cars
- J: sport utility cars (including off-road vehicles)

(Comission of the European communities, 1999, 2)

Nykyisin tosin segmenttien rajat ovat hämärtyneet erilaisten segmenttejä yhdistävien ”crossover”-mallien myötä, mikä tekee autojen vertailusta vaikeaa.

Autonvalmistajat eivät luo jokaista autoa varten omaa alustaa, vaan kehittävät muutamia ajoneuvoarkkitehtuuriratkaisuja (platform tai moduli). Auton hinta ja käyttötarkoitus määrittää sen, millaista platformia siinä käytetään. (Heißing & Ersoy 2011, 9—10.)

Voimalinjan rakenne vaikuttaa ratkaisevasti alustarakenteisiin. Moottorin sijainti yhdistettynä vetotapaan määrittää voimansiirron rakenteen. Tässä työssä käsitellään markkinatutkimuksessa seuraavia voimalinjan rakennetyyppejä:

- etumoottori/etuveto
- etumoottori/takaveto
- etumoottori/neliveto
- keskimoottori/takaveto
- keskimoottori/neliveto
- takamoottori/takaveto

Lisäksi moottorin asennustapa voi olla poikittain tai pitkittäin. Seuraavassa esitellään yleisimmät voimalinjaratkaisut. (Hybridi- ja sähköautoteknologiassa koko voimalinja-ajattelu uudistuu, eikä kyseisiä ratkaisuja tässä käsitellä.)

Pitkittäin asennettu moottori etuvedossa on melko harvinainen rakennetyyppi, ja sitä käytetään lähinnä mikäli moottorin koko ei mahdollista sen sijoittamista poikittain. Pitkittäisellä asennuksella saavutetaan symmetrisen voimalinjarakenteen ansiosta poikittaista moottoria paremmat ajo-ominaisuudet.

Poikittain asennettu moottori ja etuveto on halpa, tilaasäästävä ja kevyt ratkaisu keskikokoisiin ja pieniin autoihin. Rajoituksena on moottorin koko. Yleisesti rivi-4 tai V-6 ovat suurimpia mahdollisia moottorityyppejä. Moottorin ja voimalinjan epäsymmetrisestä asennuksesta saattaa myös koitua ongelmia, kuten vetoakselien eripituisuudesta johtuvat vääntöerot. Etuakseli on vetävä ja ohjaava, joten kääntöakselin sijainnilla on tärkeä merkitys ns. torque-steering-momenttien syntyemisessä. Tuentatyyppiksi eteen sopii hyvin joustintuki.

Takatuena voidaan käyttää esim. puolijäykkää akselia tai erillistuenta. Taka-akselin rakenne voi olla erittäin yksinkertainen, koska se ei ole vetävä, eikä ohjaava. Etuvedossa painojakauma tulee olla (ja rakenteen ansiosta onkin, joitakin poikkeuksia lukuunottamatta) etupainoinen, sillä kiihdytyksissä paino siirtyy taakse pois vetävältä akselilta. Takavetoisen tai nelivetoisen auton ajo-ominaisuuksia etuvedolla ei kyetä saavuttamaan, mutta liukkaalla alustalla auton hallinta on takavetoista helpompaa. (Heiðing & Ersoy 2011, 11; Reimpell ym. 2001, 45—63.)

Pitkittäin asennettu moottori ja takaveto sopii suurempiin autoihin, joissa moottorin koko voisi olla muuten haittaava tekijä. Ohjaava akseli erotetaan vetävältä akselilta, jolloin ajo-ominaisuudet paranevat. Painojakauma saadaan myös tällä rakenneratkaisulla lähelle 50:50-jakaumaa. Etutuennaksi sopii esim. kaksoiskolmiotuenta (double wishbone). Takatuennaksi sopii jäykkä tai erillistuenta. Tässä voimalinjassa voidaan (painojakauman niin vaatiessa) soveltaa ns. transaxle-rakennetta (esim. Volvo 300-mallit, Chevrolet Corvette) jossa kardaanit toimii vaihteiston ensiöakselina, ja vaihteisto on integroitu taka-akselin differentiaalihin yhteyteen. Kolariturvallisuuden kannalta pitkittäinen moottori liikuu kardaanitunneliin helposti parantaen muodonmuutosvyöhykettä (crumple zone). Voimansiirto saadaan toteutettua suorana linjana. (Heiðing & Ersoy 2011, 11; Reimpell ym. 2001, 30—32.)

Pitkittäin tai poikittain asennettu etumoottori yhdistettynä nelivetoon on 1980-luvun alun Audi Quattron ansiosta henkilöautopuolelle yleistynyt rakenneratkaisu. Nelivedolla saavutetaan paras vetopito ja hyvä ajodynamiikka. Voimalinja on kallis toteuttaa ja häviöt ovat suuria. Perinteinen rakenne lisää auton massaa noin 6-10%, ja lisää polttonesteen kulutusta noin 5-10%. Uudet sähköisesti kytkeytyvät nelivetojärjestelmät kuluttavat vähemmän polttoainetta perinteiseen rakenteeseen verrattuna. Tuentatyypeiksi sopivat esim. double wishbone tai multilink. (Heiðing & Ersoy 2011, 12; Reimpell ym. 2001, 64—82.)

Keskimoottorirakenne soveltuu vain urheiluautoihin. Taka-akselin etupuolella oleva moottori vie takapenkiltä tilaa ja siirtää painopistettä taakse suurentaen ylioheuttaipumusta (esim. Toyota MR2). Sivutuuliherkkyys voi olla suurempi

kuin etumoottoriautoissa takapainoisen painojakauman ansiosta (akselistorakenteesta riippuen). Pakoputkisto on suunniteltava lyhyeksi ja jäähdytyskanavat pitkiksi (mikäli jäähdyttimen kenno sijaitsee edessä). Keskimoottoriautossa on nopea ohjausvaste pienen kiertymissuuntaisen momentin ansiosta (koska suurin osa auton massasta on pienemmällä alueella). Voimansiirron häviöt ovat pienet, kuten etumoottorisessa etuvetoisessa autossa. (Reimpell ym. 2001, 41—45.)

2.2 Tuotekehitys

Alustarakenteiden kehityksessä tulee ottaa huomioon materiaalien ja teknisten ratkaisujen sopivuus käyttöympäristöön ja käyttötapaan. Laatu, kustannukset ja painon minimointi väentävät kättä keskenään sekä kelloa vastaan. Maailman johtavat autonvalmistajat käyttävätkin ongelmien välttämiseksi standardoitua (platform) strategiaa. (Heiðing & Ersoy 2011, 449.)

Viime aikojen suuntauksena on ollut kehittää trendiautoja sekä henkilöauton pohjaratkaisuun rakennettuja korotettuja crossover-malleja. Nämä kyseiset autotyypit ovat nostaneet suosiotaan, ja perinteisten segmenttien autojen prosentuaalinen osuus myyntitilastoissa on ennustettu putoavan vuoden 1995 95%:sta vuoteen 2015 50%:iin. Crossover- ja trendimallit valtaisivat siis puolet henkilöautomarkkinoista. Trendiautossa on usein perinteisen segmentin autoon jokin lisävaatimus, kuten suuri sisätila pieneen autoon, tai korkea maavara. Esimerkkinä voitaneen mainita vaikka Mercedes-Benz A-malli. Alustarakkitehtuuria tulisi siis nykyisin kehittää sellaisiksi, että yhdestä arkkitehtuurirakenneratkaisusta (platform) saadaan muunneltua mahdollisimman paljon variaatioita mahdollisimman pienellä osien vaihdolla. (Heiðing & Ersoy 2011, 13—14.)

Ajodynamiikka koostuu pituus-, leveys- ja korkeussuuntaisesta tarkastelusta. Pituussuuntainen dynamiikka käsittelee x-suuntaisia voimia, joita syntyy kiihdytyksessä ja jarrutuksessa. Leveysuuntainen dynamiikka käsittelee y-suuntaisia voimia, joita syntyy ohjaamisesta. Lisäksi x- ja y-akselien ympäri vaikuttavat momentit käsitellään nyökkäyksen ja niiauksen estona sekä

kallisteluna, z-akselin ympäri vaikuttavat momentit kääntymisenä. Ajodynamiikkaan vaikuttaa ohjauksen kinematiikka, sekä tuennan kinematiikka ja elastokinematiikka. Korkeussuuntainen dynamiikka käsittelee jousitusta ja heilahtelun vaimennusta ja keskittyy pyörän pitämiseen tiessä, sekä ajomukavuuteen. Näihin vaikuttaa värähtelymekaniikka, tuennan kinematiikka sekä elastokinematiikka. (Heiðing & Ersoy 2011, 35, 65—69.) ISO-normit määrittävät auton dynamiikan testaukselle tietyn testimenetelmän ohjausvasteista riippuvilla avoimen ja suljetun testauspiirin menetelmillä. (Bosch, 2002, 394).

Auton valintaan vaikuttaa asiakkaan silmissä enenevässä määrin auton välittämä arvomaailma, ei niinkään sen käytännöllisyys. Ajettavuus on tärkeä osa tätä arvo- ja tunnemaailmaa. Alustan tulisi tarjota yhä enenevässä määrin turvallisuutta, ajomukavuutta, sekä hyviä ajo-ominaisuuksia. Mukavuus ja ajettavuus/turvallisuus ovat usein toisensa poissulkevia ominaisuuksia, joten tuotekehitys ei ole helppoa. Pääasiallisesti tuentatyyppien valikoima on vakiintunut hyvin pienelle vaihteluvälille. Lähes kaikissa tiettyjen segmenttien autoissa on samanlaisia alustarakaisuja. Erikoisempia rakenteita käytetään enää lähinnä merkin imagon takia (esim. Citroënin hydropneumaattinen jousitus). Kalliita innovaatioita, kuten aktiivivakaaja, löytyy kustannuspaineiden takia lähinnä premium-luokkaan rinnastettavista autoista. Toisaalta innovaatio voi joskus olla myös kustannuksia laskeva, esimerkiksi pieneen autoon sopiva sähköinen ohjaustehostus, jolloin se sopii halpaankin sarjatuotantoautoon. (Heiðing & Ersoy 2011, 557—559.)

Aktiivinen turvallisuus (pyritään estämään onnettomuus) sekä passiivinen turvallisuus (pyritään minimoimaan onnettomuuden seuraukset) ovat korostuneet autojen suunnitteluissa lähiaikoina. Alustarakenteisiin kuuluu useita antureita ja kolariturvallisuuteen vaikuttavia rakenteita. Ajodynamiikan ja ajoturvallisuuden ohjaus luottaa tulevaisuudessa yhä enemmän elektroniikkaan. (Heiðing & Ersoy 2011, 145—146, 493.) Tässä työssä pyritäänkin esittelemään alustarakenteisiin liittyviä elektronisia sovelluksia mahdollisimman laajasti.

3 RENKAAT

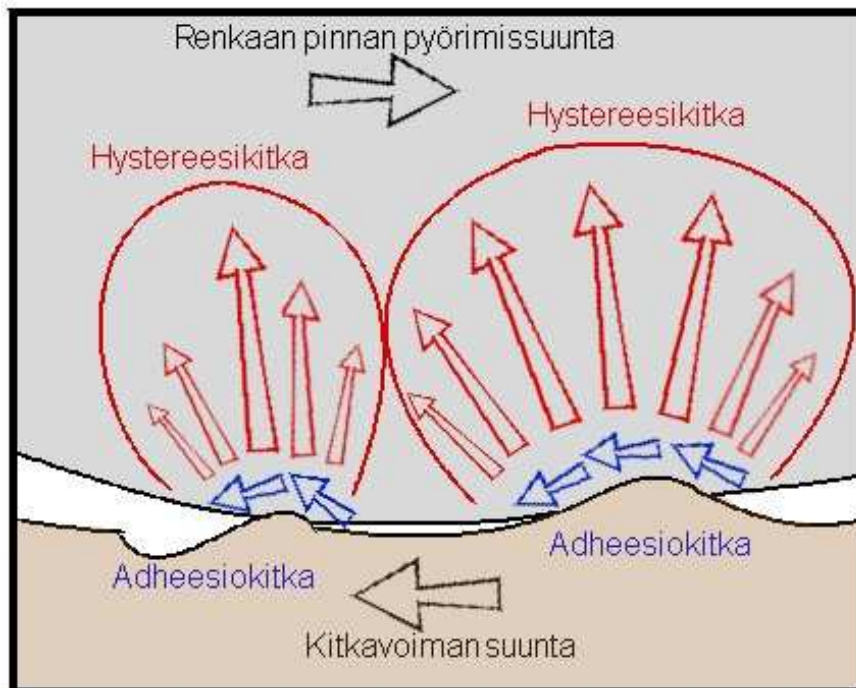
3.1 Historia

Ensimmäisissä autoissa käytettiin umpikumisia renkaita. Kumin värähtelyominaisuudet rajoittivat suurimmaksi ajonopeudeksi noin 30km/h. Skotlantilainen John Boyd Dunlop esitteli vuonna 1888 ensimmäisen paineilmarenkaan. Rengasta käytettiin aluksi pääasiassa polkupyörässä tuomaan joustoa ja ajomukavuutta. (Heißing & Ersoy 2011, 2—3.) Ensimmäiset autokäytössä olleet paineilmarenkaat olivat polkupyörän renkaan tapaisia ”sinkilärenkaita” tasapohjaisten (flat base) vanteiden päällä. Rengaspaineet olivat suuria ja materiaali kovaa luonnonkumia vahvistettuna renkaan sisäpinnalle punotulla tekstiilikuidulla. Renkaan elinikä oli lyhyt ja vaihto aikaavievää ja ongelmallista, joten vuonna 1910 Goodyear esitteli renkaan raaka-aineeksi nokikumi-yhdisteen. Nopeuksien kasvaessa ajomukavuus vaati entistä matalapaineisempien renkaiden kehittämistä. Michelin kehitti vuonna 1923 Citroenille puuvillaista ristipunosrakennetta käyttävän ”pallorenkaan”, joka oli U-mallisen (drop base) vanteen päällä ja jonka ilmanpaine oli noin 2,5bar. Vanhoissa renkaissa käytettiin yleisesti sisäkumeja. Dunlop esitteli jo vuonna 1938 ensimmäisen sisärenkaattoman renkaan. Sisärenkaita käytettiin kuitenkin autoissa yleisesti 1960-luvulle saakka. Michelin patentoi vyöpunosrakenteen (radial) vuonna 1946 ja esitteli sen Citroen 2CV:ssä vuonna 1949. (Heißing & Ersoy 2011, 6—7.) Tubeless radial-tyyppiset renkaat ovat nykyisin yleisesti autokäytössä. Renkaan profiili on madaltunut ja leventynyt huomattavasti alkuajoista. Renkaiden leventymisen syynä voi olla kasvanut ajoneuvon massa tai autojen parantunut suorituskyky, mutta markkinoinnilla on myös suuri osuus asiaan. Profiilin madaltuminen johtuu niin ikään vanteiden valmistusmenetelmien kehittymisen mahdollistamasta (markkinoinnin vaatimasta) vannekoon suurentumisesta. Suuri vannekkoko mahdollistaa myös suuret jarrut.

3.2 Yleistieto

Rengas on ajo-ominaisuuksiin nähden auton tärkein osa, koska renkaan ja tien pinnan välinen kitka välittää tiehen kaikki ajovoimat. Renkaan päätehtäviä ovat: kannattaa ajoneuvon paino, tasata tien pinnan epätasaisuuksia, antaa pitoa ja suuntavakautta sekä ohjaustuntuma. Kitkaa syntyy, koska rengas on jatkuvasti luistossa kiihdytyksessä, jarrutuksessa sekä sivusuuntaisissa liikkeissä (Heiðing & Ersoy 2011, 52—53). Kitkaan vaikuttavat käyttöympäristön olosuhteet, renkaan ikä ja kuluneisuus, tien ominaisuudet, ja tietysti rengastyypin (Heiðing & Ersoy 2011, 352). Renkaan ja tien välinen kitka jaetaan pääasiassa kahteen komponenttiin: hystereesi ja adheesio. Hystereesikomponentti syntyy tien epätasaisuuden aiheuttaessa renkaan pintaan painuman. Painuma aiheuttaa renkaan materiaaliin sisäisen painejakauman. Paineesta syntyy materiaalin sisäinen voima. Materiaalin sisäinen vaimennuskyky ja tien pinnan karheus määrittävät hystereesikitkan suuruuden. Adheesiokomponentti syntyy renkaan liukumisesta tien pintaa vasten. Molekyylien välisten sidosten katkeamisesta aiheutuu leikkausvoima, josta adheesio syntyy (kuva 1). Adheesiokitka on kuivalla maantiellä ajettaessa suurin kitkakomponentti. Mikäli tien pinnan ja renkaan väliin muodostuu suoran kosketuksen estävä kerros (yleensä vesikerros), adheesiokomponentti poistuu ja ainoastaan hystereesikitka jää jäljelle. Adheesiokomponentti pyritään säilyttämään märälläkin pinnalla vettä poistavan renkaan kuvioinnin avulla. (Heiðing & Ersoy 2011, 52—53.) Lumella ja jäällä, sekä yleisesti kylmissä lämpötiloissa ajettaessa renkaan materiaali saavuttaa lasittumislämpötilan, eikä enää kykene mukautumaan tien epätasaisuuksiin. Kitkan hystereesikomponentti näin ollen poistuu ja ainoastaan adheesiokomponentti jää jäljelle. Talvirenkaissa käytetäänkin joko jäähän tai lumeen pureutuvia nastoja (nastarengas) tai lamellimaista kuviointia yhdistettynä kylmiin lämpötiloihin optimoituun rengasmateriaaliin hystereesikitkan palauttamiseksi (kitkarengas). (Heiðing & Ersoy 2011, 53—54.) Hystereesi- ja adheesiokomponenttien lisäksi on olemassa muitakin kitkamekanismeja (esim. hydrodynaaminen kitka liukkaalla ja lämpimällä jäällä, tai abraasio, eli kuluminen voimakkaassa jarrutuksessa). Näiden komponenttien merkitys kokonaiskitkasta on kuitenkin hyvin pieni normaalissa ajotilanteessa.

(Tuononen & Koisaari 2010, 6.) Goodyear on kehittänyt vuonna 2009 Optigrip-renkaan, jonka kumiseoksen ominaisuudet muuttuvat renkaan pinnan kuluessa. Renkaan kulutuspinnan kuviopalat on sidottu toisiinsa lamelleilla. Kuvion alla sijaitsevat laajemmät kanavat, jotka tulevat esiin renkaan kuluessa ja muotoilevat paljastuessaan kulutuspinnan uudelleen. Laveammalla kanavoinnilla ja erilaisella kuviolla on tarkoitus säilyttää sekä vesiliirto-ominaisuudet että pito. Myös pohjempi kumiseos on erilainen, mikä parantaa märän kelin ominaisuuksia kuluneena. (Laitala, 2009, 1.)



Kuva 1. Renkaan pääkitkakomponentit

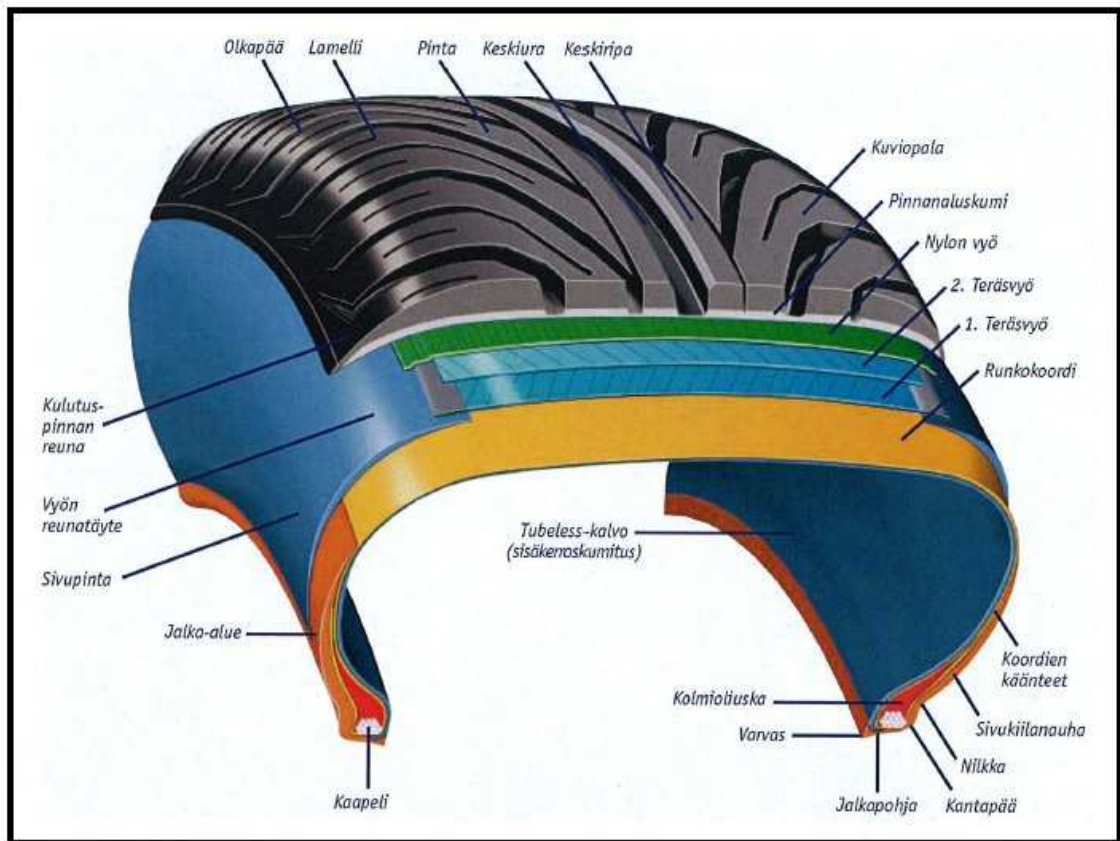
Rengaskuviolla on suuri merkitys rengasmeluun sekä vesiliirtoon. Rengaskuvio on nykyisin siirtynyt kohti entistä pituussuuntaisempaa kuviointia, joka mahdollistaa matalan melutason, alhaisen vierintävastuksen sekä suuren ajonopeuden (Heißing & Ersoy 2011, 7, 350).

Nykyisin uusien renkaiden ilmanpainetta voidaan tarkkailla erilaisilla TPM-järjestelmillä (Tire Pressure Monitoring). Järjestelmä sisältää akkukäyttöisen jokaiseen pyörään kiinnitettävän anturiyksikön, joka lähettää tiedon

rengaspaineesta radioaallolla vastaanottimelle ja edelleen käsiteltäväksi esim. mittaristolle. On olemassa myös pyörän kulmanopeutta mittaava järjestelmä, joka aistii ilmanpaineen laskiessa pienentyvän renkaan dynaamisen vierintäsäteen ja sen myötä kasvavan kulmanopeuden. Tämä on varsinaista TPM-järjestelmää halvempi ja yksinkertaisempi vaihtoehto, jonka voi toteuttaa helposti ABS-järjestelmän pyörintänopeusanturin yhteyteen vaikka jälkiasennettuna. Continental esitteli 1990-luvun lopussa renkaan sivuseinämän vääntösensorin (Sidewall Torsion Sensor eli SWT) joka mittaa magneettikenttäsensorien avulla renkaan sivuseinämän pituus- ja poikittaissuuntaista muodonmuutosta mitaten samansuuntaisia renkaan voimia. Voimien avulla voidaan laskea auton sortokulmaa ja yli- tai aliohjautumista. (Heißing & Ersoy 2011, 364—366.) Nokian renkaat kokeili 2000-vuoden alussa renkaaseen valettua pietsokidettä, joka antaa pyörintänopeustietoa ja kertoo renkaan kulumisesta. Yksi vaihtoehto paineentarkkailuun voisi olla RFID-saattomuistiteknologia. (Juha-Pekka Lindqvist 17.1.2011.)

3.3 Tyypit ja rakenne

Renkaan kudusrunko (carcass) koostuu kumimassaan valetuista synteettisistä, metallisista, tai luonnonkuiduista. Kuidut kiinnitetään vahvoihin teräslankareunuksiin (jalka), jotka tukeutuvat vanteeseen. Synteettisellä kumilla saavutetaan hyvä kuiva- ja märkäkitkakerroin, joten sitä käytetään kulutuspinnoissa. Renkaan sisäpinta on oltava ilmatiivis ja sen materiaalina on usein butyylikumi. (Heißing & Ersoy 2011, 350—351.) Ilmatiiviyden varmistaa renkaan jalan rakenne. Tubeless-renkaan ilmanpaine laskee vuodessa kuitenkin keskimäärin 25-30% (Reimpell ym. 2001, 87). Kuva 2 esittää tubeless radial-renkaan poikkileikkauksen ja renkaan osat.



Kuva 2. Henkilöauton renkaan poikkileikkaus (Tuononen & Koisaari 2010, 15)

Rengasmerkintä on Euroopassa ja USA:ssa nykyisin samankaltainen. Esimerkkimerkintänä esitettäköön eurooppalainen merkintätapa 185/65 R14 86 T, missä 185 on renkaan leveys millimetreinä, 65 on profiilisuhde, R on vyörenkaan merkintä (Radial), 86 on kantavuusluku, eli LI-luku (Load Index) ja T on nopeusluokka, eli SI-luku (Speed Index). USA:ssa valmistetuissa renkaissa voi olla merkinnän edessä myös P-kirjain osoittamassa, että kyseessä on henkilöautoon (Passenger vehicle) tarkoitettu rengas. Profiilisuhde on renkaan poikkileikkauksen korkeus jaettuna leveydellä prosentteina ilmoitettuna. LI-luku määräytyy pyörän suurimmasta kuormankantokyvystä. Nopeusluokka tulee valita ajoneuvon valmistajan ilmoittaman rakenteellisen huippunopeuden mukaan, ei voimassa olevien nopeusrajoitusten mukaan. Rakenteellisen huippunopeuden mukaan valittu rengas pystyy toteuttamaan ajoneuville suunnitellut ajo-ominaisuudet.

Talvirenkaissa on lisäksi erillinen merkintä M+S (Mud+Snow). Hyötyajoneuvojen rengasmerkinnät ovat nykyisin samantapaiset kuin henkilöautojenkin. Ne voivat lisäksi sisältää alennetun LI-luvun paripyörälle. Esimerkkinä nykyisestä hyötyajoneuvon rengasmerkinnästä esitelläkään 185 R14 102/100 M. (Reimpell ym. 2001, 93— 101, 104.)

3.3.1 Ristipunosrakenne

Ristipunosrakenne on radiaalipunosrakennetta vanhempi ratkaisu. Ristipunokset estävät kumikerrosten suhteellisen liikkeen toisiinsa nähden ja näin ollen vähentävät renkaan ylikuumenemista käytön aikana. Ristipunosrakenne toi renkaalle entiseen rakenteeseen verrattuna kymmenkertaisen eliniän ja paransi sivusuuntaista vakautta huomattavasti. (Heißing & Ersoy 2011, 6—7.) Punoskulma (crown angle) tarkoittaa punoksen ja renkaan vierintäsuunnan välistä kulmaa. Ristipunosrenkaan punoskulma on noin 40 astetta. Renkaan pyöriessä kudosterrosten välinen kulma elää ja aiheuttaa vierintävastusta sekä kulumista. Ristipunosrengas ei ole enää autokäytössä yleisesti, mutta Reimpell ym. (2001, 89) lisää myös, että vararengas voi myös olla ristipunosrakenteinen johtuen sen matalasta nopeusvaatimuksesta.

3.3.2 Vyöpunosrakenne

Toinen ja uudempi punosrakenne on vyöpunos. Tätä ratkaisua käytetään nykyisin yleisesti autojen renkaissa. Rakenteessa rayon- ja nylonpunokset ovat poikittaissuunnassa renkaan kulkusuuntaan nähden vähentäen renkaan muodonmuutosta ja sisäistä kitkaa sekä lisäten sivusuuntaista vakautta. Renkaan kehällä olevat synteettiset- sekä teräsvyöt mahdollistavat litteän poikkileikkausprofiilin, sekä huippunopeuden kasvun. Litteä profiili kasvattaa tien ja renkaan välistä kosketuspintaa lisäten poikittaissuuntaista kitkaa. (Heißing & Ersoy 2011, 6—7.)

3.3.3 Run-flat-rakenne

Ilmatäytteisen renkaan puhkeaminen on riskitekijä, joka voi johtaa kohtalokkaiisiin seurauksiin suurissa nopeuksissa. Run-flat-rakennetta yritettiin kehitellä jo 1920-luvulla (Heißing & Ersoy 2011, 7). Autonvalmistajat haluavat nykyisin päästä eroon varapyörän tarpeesta ja lisätä auton turvallisuutta, joten run-flat-renkaiden kehitys on tärkeää. Kaksi erilaista rakennetta hallitsee run-flat-renkaissa. Itsekantava runko on ensimmäinen vaihtoehto. Se toteutetaan vahvistamalla renkaan seiniä sellaisiksi, että ne kykenevät kantamaan pyöräkuorman ilman ilmanpainetta. Ylikuumeneminen ja ajomukavuus säilytetään erikoisella materiaalisella. Tällä rengastyypillä saavutetaan noin 100km:n matka ilman ongelmia. Toinen vaihtoehto run-flat-rakeenteeksi on erillinen renkaan sisäpuolinen kannatin. Ilmanpaineen kadotessa renkaasta sisäpuolinen tukirengas pehmentää vanteen ja renkaan välistä kosketusta. Tukirengas on metallinen ”vanne”, joka tukeutuu vanteeseen kumisilla tukijaloilla. Tulevaisuuden näkymänä on suunniteltu rengasta, joka ei tarvitsisi ollenkaan ilmanpainetta, vaan tukeutuisi kokonaan renkaan rungon kantavaan voimaan. (Heißing & Ersoy 2011, 366—367.) Continental on kehittänyt CT-rengasrakenteen, jossa vanteen laipat nojaavat renkaan runkoon ilmanpaineen laskiessa, jolloin renkaalla voi ajaa tyhjänä useita satoja kilometrejä (Bosch, 2002, 694).

3.4 Vaikutus ajo-ominaisuuksiin

Renkaan profiilisuhde on tärkeä tekijä ajo-ominaisuuksia suunniteltaessa. Se määrittää pyörän tilantarpeen leveyssuunnassa, sekä yhdessä vanteen kanssa tilantarpeen radiaalisuunnassa. Matala profiili mahdollistaa suuren vannekoon, suuret jarrulevyt tai -rummut, suuren sivu- ja pituussuuntaisten ajovoimien välittämisen. Suuret jarrulevyt tai -rummut mahdollistavat lisäksi hyvän pysähtyvyyden. Toisaalta korkea profiili tasaa paremmin värähtelyä ja tuntuu mukavammalta ajaa. (Reimpell ym. 2001, 93— 101)

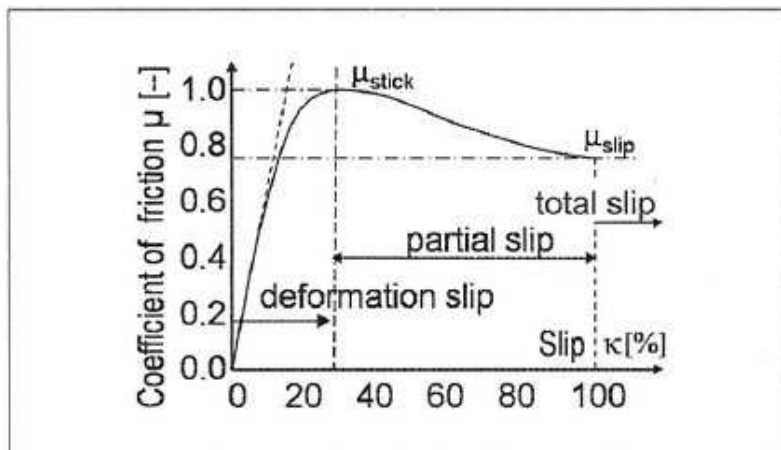
Rengasta voidaan tarkastella yhdistettynä kumi- ja ilmajousena. Renkaan jousivakio lasketaan siihen kohdistetun pystysuuntaisen kuormituksen ja sen

aiheuttaman painumamatkan avulla ($c = \frac{F_z}{\Delta s}$) ja sitä voidaan pitää vakiona koko renkaan toimintamatkalla. Mikäli renkaaseen kohdistuu sivusuuntaista voimaa jouston aikana, jousivakio pienenee, eli renkaan jousto pehmenee, koska sivuvoima työntää tukevaa vyörakennetta pois tasapainotilastaan ja muuttaa painejakaumaa. Ilmanpaine vaikuttaa jousivakioon, mutta rengaskuorma ei. (Reimpell ym. 2001, 116— 118.) Renkaalla on kyky ”nielaista” pienet tien epätasaisuudet ilman värähtelyn siirtymistä koko pyörälle (Reimpell ym. 2001, 56).

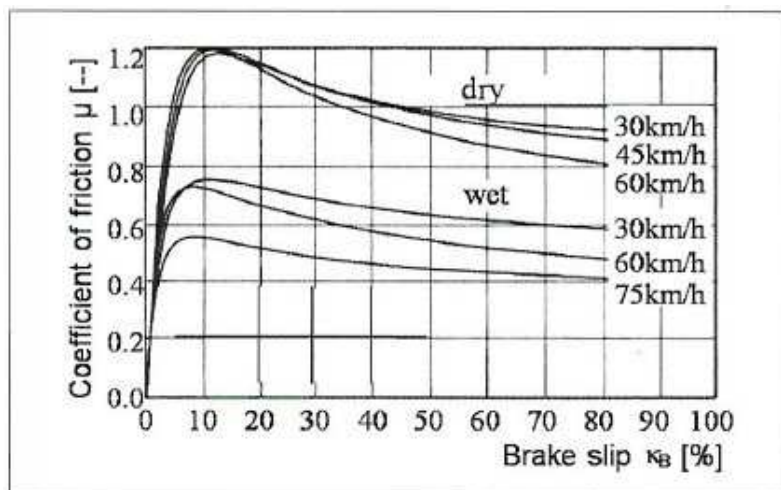
Renkaan muodonmuutostyö ja materiaalin vaimennus muuttaa renkaan vierintään tuotua energiaa lämmöksi. Kumiseos on tässä asiassa avainasemassa. 60-70% vierintävastuksesta syntyy kulutuspinalla. Vierintävastus ilmoitetaan joko vierintävastusvoimana tai vierintävastuskertoimenä. Vierintävastusta voidaan pitää normaalinopeuksilla melko lailla vakiona (kasvaa loivasti nopeuden kasvaessa). Suurten nopeusluokkien renkailla vastuksen kasvu on pienten nopeusluokkien renkaita loivempi. Suurten nopeusluokkien renkaat tuottavat kuitenkin pienillä nopeuksilla pienten nopeusluokkien renkaita suurempaa vierintävastusta. Sivusuuntainen voima renkaaseen lisää vierintävastusta. Suurin sivuvoima aiheutuu ohjauksesta, mutta sivusuuntaista voimaa aiheutuu huomattava määrä myös joustosta aiheutuvassa raidevälän muutoksessa, camber-kulman yli 2 asteen positiivisista tai negatiivisista poikkeamista, tai liiasta aurauksesta/harituksesta. Tien pinnan epätasaisuudella on myös suuri merkitys vierintävastukseen. (Reimpell ym. 2001, 121— 124.)

Renkaan ja tien pinnan välinen luisto on pakollinen ominaisuus kitkan synnyttämiseksi. Kitkakertoimen arvo voi olla kuivalla asfaltilla jopa yli 1 (kuvaaja 1). Lisäksi nopeuden alentuessa alle 20km/h:iin kitkakertoimen arvo kasvaa lisää, koska renkaan dynaaminen vierintäsäde alenee ja tartuntapinta-ala kasvaa. Lähellä nollanopeutta rengas alkaa asettua tien epätasaisuuksiin ja ns. hammasratas-efekti lisää kitkakertoimen arvoa jopa 1,3:een. Märkä tienpinta luonnollisesti laskee kitkakertoimen arvoa. (Reimpell ym. 2001, 124— 126.)

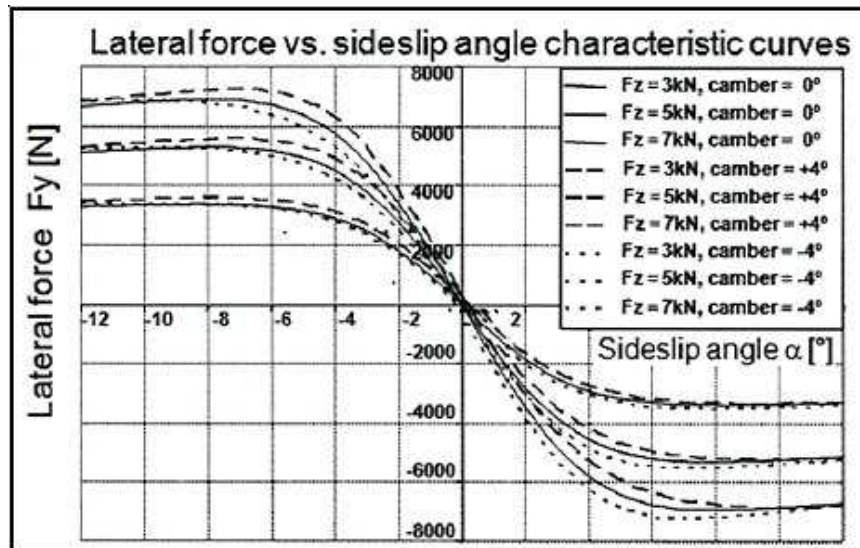
Suhteellisen luistonopeuden ja rengaspaineen vaikutus kitkakertoimeen on esitetty kuvaajassa 2 (Heiing & Ersoy 2011, 353). Renkaan vastaanottama sivusuuntainen maksimivoima on tärkeä parametri ajoneuvon suunnittelussa. Suurin voima saavutetaan noin 5-15 asteen sortokulmalla. Camber-kulmalla ja renkaan leveydellä voidaan vaikuttaa sivuvoiman maksimiarvoon. Camber-kulman ja sivuvoiman suhde näkyy kuvaajassa 3. (Heiing & Ersoy 2011, 355—356.)



Kuvaaja 1 Luistoprosentin vaikutus kitkakertoimeen (Heiing & Ersoy 2011, 57)



Kuvaaja 2. Ajonopeuden ja pinnan vaikutus kitkakertoimeen (Heiing & Ersoy 2011, 58)



Kuvaaja 3. Camber-kulman vaikutus renkaan välittämään maksimisivuvoimaan (Heißing & Ersoy 2011, 355)

Vesiliirto on tapahtuma, jossa rengas ei kykene työntämään pois tieltään tienpinnan vesikalvoa. Vesikerros tunkeutuu renkaan alle ja nostaa renkaan irti tien pinnasta poistaen adheesiokitkan. (Bosch, 2002, 383.) Vesiliirtoa aiheuttavia tekijöitä ovat ajonopeus, alhainen rengaspaine, tien pinnankarheus, renkaan urien muoto ja syvyys sekä renkaan leveys. Tuononen & Koisaari (2010, 46) kertoo, että vesiliirto syntyy veden hydrodynaamisen paineen ylittäessä renkaan ilmanpaineen.

Camber-kulma vaikuttaa vierintävastuksen lisäksi renkaan ohjautumiseen ja kulumiseen. Camberin ei tulisi renkaan vaurioitumisen ja vanteella pysymisen kannalta ylittää 4 astetta edes täysjoustossa. (Reimpell ym. 2001, 104— 105.)

Renkaan ominaisuuksia voidaan simuloida FEM-analyysillä. Kokonaisvoimien laskentaan on olemassa erilaisia malleja, kuten "Magic formula", "HSRI", "Tmeasy" ja "UA-Tire". Näissä malleissa otetaan huomioon epälineaariset muuttujat. Vieläkin tarkempia malleja on olemassa, mutta niitä käyttävät rengasvalmistajat, eikä niitä ole tarpeen käyttää ajoneuvon ominaisuuksien määrittämiseen. (Reimpell ym. 2001, 64.)

3.5 Lainsäädäntö

Renkaan ja vanteen on oltava yhteensopivia ja vaihdettavia. Euroopassa normeista vastaa ETRTO. Normeihin kuuluvat mm. Rengaskoot, merkinnät ja LI- sekä SI- taulukot. Skandinaviassa on vielä erillinen STRO-normisto (Scandinavian Tire & Rim Organization). Lisäksi mm. ISO-, SAE-, TRA- ja DIN-standardit ottavat myös kantaa renkaisiin.

3.5.1 YK:n normit (tulevat määrääviksi 2017)

ECE R30 (Pneumatic tyres for motor vehicles and their trailers)

ECE R54 (Pneumatic tyres for commercial vehicles)

ECE R64 (Temporary use spare unit, run flat tyres, run flat-system and tyre pressure monitoring system)

ECE R108 (Retreaded pneumatic tyres for motor vehicles)

ECE R109 (Retreaded pneumatic tyres for commercial vehicles)

-Rengastermistö (kaikissa ylläolevissa normeissa)

-SI- ja LI- taulukot (kaikissa ylläolevissa normeissa)

-Rengasmerkinnät (kaikissa ylläolevissa normeissa)

-Hyväksyntä (kaikissa ylläolevissa normeissa)

-Testaus (kaikissa ylläolevissa normeissa)

ECE R117 (Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance)

-Rengastermistö

-Rengasmerkinnät koskien ko. testausten arvoja

-Hyväksyntä

-Vierintävastustestaus

-Märkä- ja lumipitotestaukset

-Äänemissiotestaus

ECE R124 (Uniform provisions concerning the approval of wheels for passenger cars and their trailers)

-Pyörätermistö

-Merkinnät

-Hyväksyntä

-Rakennevaatimuksia

-Erilaisia materiaali- ja rasiustestejä

(United Nations Economic Commission for Europe)

3.5.2 EU-direktiivi (kumoutuu 2017)

92/23/EEC (relating to tyres for motor vehicles and their trailers and to their fitting)

-Henkilöautojen ja hyötyajoneuvojen renkaat

-ETY-tyyppihyväksyntä

-Renkaita koskevat vaatimukset

-Rengastermistö

-Rengasmerkinnät

- SI- ja LI-taulukot
- Paineluokkien ja –yksiköiden valise suhteet
- Tiettyä kokomerkintää olevien renkaiden mittavanne, ulkohalkaisija ja poikkileikkausleveys
- Testaus
- Kantavuuden vaihtelu nopeuden mukaan (hyötyajoneuvot)

Direktiivi 92/23/EEC kumoutuu vuonna 2017 direktiivillä EC 661/2009 (General safety of vehicles). (European Commission)

3.5.3 USA:n lakivaatimukset

49 C.F.R Part 574- Tire identification and recordkeeping

- Rengastermistö
- DOT-Rengasmerkinnät
- Vaatimuksia rengaskauppiaille ja –jakelijoille, autokauppiaille ja autonvalmistajille

49 C.F.R Part 571- Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS), Subpart B §571.109 (New pneumatic tires)

- Mitoitus
- Testaus
- Kuormitusluokitus
- Rengasmerkinnät (henkilöautot)

§571.110 (Tire selection and rims for motor vehicles with a GVWR of 4536kg or less)

Rengasvalinta ylikuormituksen estämiseksi

§571.117 (Retreaded pneumatic tires)

- Suorituskyky
- Rengasmerkinnät
- Hyväksyntä (henkilöauton pinnoitetut renkaat)

§571.119 (New pneumatic tires for vehicles other than passenger cars)

- Mitoitus
- Testaus
- Kuormitusluokitus
- Rengasmerkinnä

§571.129 (New non-pneumatic tires for passenger cars)

- Mitoitus
- Testaus
- Kuormitusluokitus
- Rengasmerkinnät (henkilöautot, ei-pneumaattiset vararenkaat)

§571.138 (Tire pressure monitoring systems)

TPMS-järjestelmien vaatimukset

§571.139 (New pneumatic radial tyres for light vehicles)

- Mitoitus
- Testaus
- Kuormitusluokitus
- Rengasmerkinnät

(US Law, 49 C.F.R Part 571, 574)

3.5.4 Kanadan lakivaatimukset

Motor Vehicle Safety Regulations (C.R.C., c 1038), Part 2,
Standard 110 (Tire selection and rims for motor vehicles with a GVWR of
4536kg or less)

-Rengasvalinta ylikuormituksen estämiseksi

(Motor Vehicle Safety Regulations, C.R.C., c. 1038, Part 2)

4 JARRUT

4.1 Historia

Jarrut kehitettiin jo hevosvaunuihin kauan ennen auton keksimistä. Ensimmäisten autojen suuresta voimansiirron kitkasta johtuen niissä ei koettu jarruja edes tarpeellisiksi. Jarrut olivat lisävaruste. Auton painon, moottoritehon ja nopeuden kasvaessa mekaanisia jarruja kehitettiin ensin voimansiirtoon ja takarenkaisiin. Ensimmäiset neljään pyörään vaikuttavat jarrujärjestelmät esiteltiin 1920-luvulla. Näissä täysin mekaanisissa järjestelmissä oli jopa 200 osaa ja 50 nivelpistettä. Huollon tarve oli suuri, jotta jarrut vaikuttivat tasaisesti neljälle pyörälle. Vuonna 1925 kehitettiin ensimmäiset hydrauliset rumpujarrut. Hydrauliikka paransi huomattavasti jarruvoiman tasaista jakautumista. (Heiðing & Ersoy 2011, 157.) Ensimmäinen auto, jossa hydrauliset jarrut nähtiin, oli 1926 Chrysler 70. Kaksipiirinen jarrujärjestelmä tuli mukaan 1930-luvulla. Jarrutehostin keksittiin 50-luvulla. Levyjarrut tulivat kuvaan 1957 Dunlopin esittelemänä (Joskin Jaguar käytti niitä kilpakäytössä jo 1952). Levyjarrun pakkaustila parani 1978 kelluvan satularakenteen myötä. 1965 kehitettiin ABS-järjestelmän (antilock braking system tai anti blockier system) edeltäjä Jensen C V8 FF:ään. (Heiðing & Ersoy 2011, 4.) Elektroniikan yhdistäminen jarrujärjestelmään mahdollisti suuren harppauksen jarrujen kehityksessä etenkin renkaan luiston hallinnassa. Boschin kehittämä elektroninen ABS-järjestelmä esiteltiin 1978 Mercedes Benz-autoissa. ABS:n kanssa toimiva pyörän luistoa estävä TCS-järjestelmä (traction control system) esiteltiin 1987 (ASR-nimellä) ja ensimmäinen elektroninen jarruvoiman jakojärjestelmä EBD (electronic brake force distribution) vuonna 1994. Ohjausta avustava

elektroninen ajonvakautusjärjestelmä ESC (electronic stability control) tuli markkinoille 1995. (Heiðing & Ersoy 2011, 157.)

4.2 Yleistieto

Autossa on lain mukaan oltava vähintään kaksi jarrujärjestelmää (käyttöjarru ja seisontajarru), joiden piirit ovat toisistaan riippumattomia.

Jarrujen suunnittelussa huomioitavia parametrejä ovat:

- Auton omamassa ja kokonaismassa
- Akselimassojen jakauma
- Akseliväli
- Painopisteen sijainti
- Vannekoko ja rengaskoko
- Rengastyypit
- Jarrutehostintyyppi
- Lakivaatimukset
- Huippunopeus
- Ajoneuvosegmentille asetetut odotukset esim. poljintuntumassa

(Heiðing & Ersoy 2011, 160.)(Crolla 2009, 362.)

Kolme tärkeää parametriä ovat auton suurin sallittu massa, akselien välinen painojakauma sekä huippunopeus (Heiðing & Ersoy 2011, 160). Yksityiskohtaisia suunnitteluparametrejä käydään läpi rakennekohtaisesti myöhemmissä kappaleissa. Jarrujen tavoite on tuottaa suurin mahdollinen hidastuvuus, josta etuakseli tuottaa painonsiirron johdosta noin 70%. (Stone & Ball 2004, 406). Pyöräkuormat määrittävät pyörän suurimman mahdollisen jarrutusvoiman tietyllä kitkakertoimella. Staattinen pyöräkuorma määräytyy

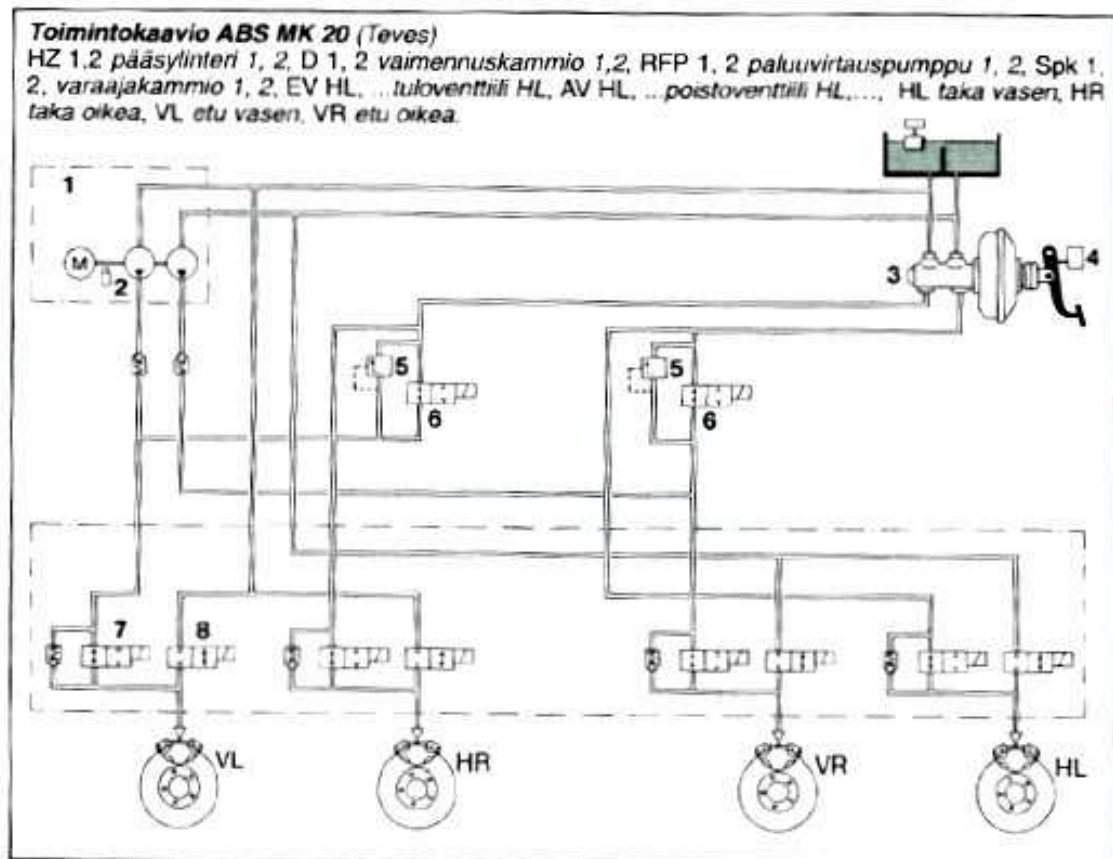
ajoneuvon rakenteesta ja lastauksesta. Kitkakertoimen suuruus ja painopisteen sijainti vaikuttavat akselien jarruvoimaosuuksiin. Pyörän jarrutusmomenttiin vaikuttaa pyörän halkaisija ja jarrulevyn tai –rummun tehollinen halkaisija. Jos halutaan optimoida jarruvoiman jako jarrutuksen jokaisessa tilanteessa ja estää taka-akselin lukkiutuminen ennen etuakselia koko jarruvoima-alueella, on käytettävä hydraulista tai elektronista jarruvoiman jakojärjestelmää. Jarrut muuttavat auton kineettisen energian lämpöenergiaksi, joten huippunopeus vaikuttaa suoraan jarrujen lämmönkestovaatimukseen. Jarrut ja niitäy mpäröivät komponentit suunnitellaan kestävänsä maksimilämpö (esim. 700°C teräslevyillä) realistisessa ääritilanteessa. (Heißing & Ersoy 2011, 160—162.)

Jarruvoima suunnitellaan aina niin, että auton hidastuvuus on paljon suurempi, kuin mitä laki vaatisi. Hidastuvuutta rajoittaa käytännössä ainoastaan renkaan ja tien välinen kitka. Etuakselin suurimpaan jarruvoiman arvoon vaikuttaa dynaaminen akselipainon muutos, kitkakerroin, auton massa sekä aerodynaaminen alaspainava voima eli ”negatiivinen noste” (downforce). Jarrut tulisi suunnitella niin, että tämä maksimiarvo pystytään saavuttamaan helposti. Taka-akselin suurimpaan jarruvoimaan vaikuttaa etuakselin maksimijarruvoima, sekä suunniteltu lineaarinen jakosuhte, tai EBD:n toiminta. Jarrujen kokoa rajoittaa yleisesti vanteen sisähalkaisija. (Heißing & Ersoy 2011, 162.)

4.2.1 Lisäjärjestelmät

Lukkiutumattomassa jarrujärjestelmässä (ABS) on yleensä molemmille etupyörille oma sekä takapyörille yhteinen tai jokaiselle neljälle pyörälle oma solenoidiventtiili, joka säättää järjestelmän painetta pyörien nopeussensorien signaalien avulla. Venttiili pitää jarrupaineen vakiona tai kytkee paineen takaisinsyötön matalapainesäiliöön, jos pyörä on lukkiutumassa. Erillinen pumppu siirtää jarrunesteen säiliöstä takaisin jarrupääsylinterille. Venttiilin takaisinsyöttö katkeaa, kun jarruvoimaa tarvitaan lisää, ja paine kasvaa. Tämä sykli toistuu muutamasta kerrasta jopa 15 kertaa sekunnissa. Henkilöauton esimerkkijarrujärjestelmäkaavio näkyy kuvassa 3. Mikäli käytössä on TSC tai ESC-järjestelmä, on edellä mainitun syklin voitava tapahtua ilman jarrupoljinta.

Silloin pelkkä pumpun paine tekee suoraan pyörälle tarvittavan jarrupaineen. Hydrauliohjausyksikkö (HCU) tai sähköhydraulinen ohjausyksikkö (HECU) ohjaa pääsylinteriltä tulevaa painetta jarrupiireihin. HCU sisältää ABS-venttiilit ja pumpun, sekä yksikköä ohjaavan ECU:n. ECU vastaanottaa tietoa eri antureilta, kuten pyörien pyörimisnopeusantureilta, kiertymisnopeusanturilta eli "yaw rate"-anturilta, ohjauspyörän asentoanturilta jne. Ohjauslogiikan avulla ECU ohjaa venttiilien toimintaa tavoitteenaan tuottaa jokaiselle pyörälle optimaalinen pito ja hallinta. Syötettäviä parametreja ohjausyksikölle voivat olla esim. edellä mainitut anturien signaalit, kytkimien ja katkaisijoiden toiminnot, moottorinohjaussignaalit ja jännite. (Heiðing & Ersoy 2011, 178—183.)



Kuva 3. Teves ABS Mk20-jarrujärjestelmä (Bosch 2002, 730)

EBD eli elektroninen jarruvoiman jakojärjestelmä säätää taka-akselin suurinta jarruvoimaa ABS:n paineenrajoitusventtiiliä hyväksikäyttäen. Venttiili estää taka-

akselin jarruvoiman kasvun (tai rajoittaa kasvua) tietyn arvon jälkeen. Taulukossa jokaisella kuormauksella jokaisessa jarrutuksen vaiheessa laadituista akselikohtaisista jarruvoimien arvoista yhdistetään ideaalinen jakokäyrä, jota ei jarrutuksessa tulisi ylittää. Venttiili katkaisee tai pienentää taka-akselin jarruvoiman kasvua niin, ettei tämä raja ylitä. Takajarruvoiman riippuvuus etujarruvoimasta on epälineaarinen. Sellaisiin ajoneuvoihin, joissa ei käytetä jarruvoiman jakojärjestelmää, on jarrujärjestelmiin suunniteltu etu- ja taka-akselien välille kuitenkin lineaarinen riippuvuussuhde. Tämä tarkoittaa sitä, että jarrujen jakosuhte ei ole koko aikaa optimaalinen ja saavuttaa ideaalipisteensä ennen EBD-järjestelmällä varustettuja jarruja. sivusuuntainen liike (ohjaaminen jarrutettaessa) aiheuttaa akselin molempien pyörien välillä pyöräkuorman muutoksen. Käytettäessä ESC:tä EBD-järjestelmän kanssa pyöräkohtainen jarruvoima voidaan optimoida ja ajettavuus sekä pysähtyvyys paranee. EBD ei välttämättä tarvitse mitään erillisiä fyysisiä osia toimiakseen, koska se käyttää ABS-järjestelmää hyödyksi. (Heißing & Ersoy 2011, 160—162, 183.)

TCS-luistonestojärjestelmä (tai ASR, anti slip regulation) voi olla yhdistetty toimimaan lukkiutumattoman jarrujärjestelmän kanssa (BTCS) tai moottorinohjauksen kanssa (MTCS) tai molempien kanssa yhdessä. TCS toimii myös elektronisena tasauspyörästäön lukkona parantaen takavetoisessa autossa dynaamista stabiliteettia ja etuvetoisessa autossa ohjauksen hallintaa. BTCS-toiminnolla TCS reagoi ns. μ -split-tilanteessa eli akselin toisen pyörän ollessa pienempikitkaisella alustalla. TCS rajoittaa vetovoimaa pyörän pyörintänopeusanturien avulla niin, että huonompikitkaisella pinnalla olevan renkaan pyörintänopeutta jarrutetaan niin paljon, ettei se pyöri tyhjä. Koska TCS voi toimia elektronisena tasauspyörästäön lukkona, on jarrutuksen ansiosta syntynyt momentti käytettävissä paremmin pitävälle pyörälle vetämiseen. MTCS auttaa säästämään jarruja säätämällä moottorin momenttia niin, etteivät pyörät pyöri tyhjä. (Heißing & Ersoy 2011, 184—185.)

ESC-ajonvakautusjärjestelmä yhdistää moniin elektronisiin järjestelmiin, kuten ABS, EBD ja TCS lisäksi auton kiertymisakselin keskelle sijoitetun aktiivisen

kiertymistunnistimen (YMC) (Heiðing & Ersoy 2011, 185). Kiertymisanturi voi olla joko pietsoelektrinen (gyrometri), mikromekaaninen (coriolis-anturi), tai ns. Äänirauta-anturi (Lindqvist 2011, 23). ESC-järjestelmän samankaltaisia nimityksiä ovat myös ESP (electronic stability program), VDC (vehicle dynamic control) tai DSC (dynamic stability control) (Heiðing & Ersoy 2011, 514). Jarrupääsylinterin paine, pyörien pyörimisnopeustieto ja ohjauspyörän kääntymistieto yhdistettynä muihin elektronisiin järjestelmiin mahdollistaa automatiikalle tarkan käsityksen kuljettajan toivomasta ajolinjasta. Z-akselin ympäri tapahtuva liike ja sivusuuntainen kiihtyvyytieto kertovat auton käytöksen. ESC yhdistää toivotun ajotilan ja auton todellisen käyttäytymisen ja korjaa ajotilaa halliten jopa kolmen pyörän nopeutta yhtäaikaisesti. Aliohjautumista korjataan pääasiallisesti jarruttamalla sisempää takapyörää. Yliohjautumista taas korjataan jarruttamalla ulompaa etupyörää. Jarrutuksesta syntyvä kiertomomentti korjaa auton asentoa. Lisäsovelluksena ESC:ssä voi olla aktiivinen kaatumisen esto (ARP, active rollover protection) joka aistii auton kallistumisen y-akselin ympäri ja aktivoi jarruja tarpeen mukaan korjatakseen tätä. ARP tarvitsee toimiakseen erillisen kallistusanturin (roll-sensor). (Heiðing & Ersoy 2011, 185—186.) Tietynlaista X- ja Y-suuntaista ajonvakautusta, jossa optimoidaan jokaisen pyörän pito, ja jota säädetään jarrujen ja vääntömomentin jaon avulla, kutsutaan Torque vectoring-järjestelmäksi (Heiðing & Ersoy 2011, 494). Nykyisin on kehitetty ESCII-tai ESC+-järjestelmää, joka integroi ohjauksen mukaan jarrujen hallintaan. Etenkin μ -split-tilanteessa tarvitaan jarrutuksen lisäksi ohjausta pitämään auto suorassa ajolinjassa. Esimerkiksi ESAS-superpositio-ohjausjärjestelmän avulla auto voi itse kääntää renkaita tarvittavaan vastaohjaukseen (tietyn astemäärän), kun kuljettaja esittää ”toiveen” ajolinjasta ratilla. Tulevaisuudessa tullaan tukeutumaan vahvasti ”x-by-wire”-tekniikkaan ja pyrkimään entistä täydellisempään ajonhallintaan liittämällä kaikki järjestelmät toisiinsa (networking). (Heiðing & Ersoy 2011, 190, 561.)

Jarruassistentti (BA tai BAS) on avustin, joka lisää jarrujärjestelmän painetta hätätilanteessa. Järjestelmä tunnistaa jarrupolkimen painamisnopeuden, ja elektroninen avustin ottaa huomioon myös auton ajonopeuden. Mekaaninen jarruassistentti (MBA) käyttää erikoisrakenteista jarrutehostinta, jossa

äkillisessä polkimen painalluksessa tehostimen osien inertiavoima avaa erillisen venttiilin, joka lisää jarrutehostusta ja saa aikaan maksimijarruvoiman nopeasti. Koska järjestelmä on integroitu jarrutehostimeen ja toimii, kuten jarrutehostin normaalisti, polkimen tuntuma säilyy ja jarruvoimaa voi säädellä polkimella normaalisti. Elektroninen jarruassistentti (EBA) käyttää hyväksi anturia, joka tunnistaa jarrupolkimen painamisnopeuden. Solenoidi avaa jarrutehostimessa tehostusventtiilin, kun jarrupolkimen nopeus ylittää tietyn arvon. Tätä ns. aktiivitehostusta hyödynnetään myös esimerkiksi ESC-järjestelmässä tehostamaan paineentuottoa etenkin kylmässä, kun ns. runout-piste, eli tehostuksen maksimipiste on matala johtuen pienestä tehostimen paine-erosta. Sitä voidaan hyödyntää myös adaptiivisessa vakionopeudensäätimessä (ACC) tuottamaan jarrutusta ilman polkimen toimintaa. Hydraulinen jarruassistentti (HBA) käyttää hyväksi ESC-järjestelmän pyöräsylintereille tuottamaa painetta. Painesensori tunnistaa täysjarrutuksen ja käynnistää hydraulipumpun sekä sulkee paineen takaisinsyöttöventtiilit nostaakseen järjestelmän painetta. (Heißing & Ersoy 2011, 177—178.)

Jarrutustapahtuma koostuu useista tekijöistä. Ihmisen reaktioaikoja ei tässä käsitellä, mutta itse jarrutuksen alkamishetkestä jarrumomentin saavuttamiseen on jarrujärjestelmässä viiveitä, kuten dynaamisen paineen siirtyminen jarruletkuissa, paineen kasautuminen letkujen elastisuuden vaikutuksesta, järjestelmän kitkahäviöt ja välityssuhteet, sekä jarrukenkien, -palojen ja satularakenteiden elastisuus. HCU tai aktiivinen alipainetehostin voi tuottaa paineen jarrujärjestelmään ilman jarrupoljinta. Dynaamista vastetta voidaan tehostaa jarruassistentin esipaineistustoiminnolla (pre-fill), jolloin esim. nopea kaasupolkimen nosto käynnistää jarrujärjestelmän esipaineistuksen ja minimoi jarrupalojen ja –levyn välisen raon. Tämä nopeuttaa jarrumomentin syntymistä. (Heißing & Ersoy 2011, 163—164, Daimler 2011, 1.)

4.3 Käyttöjarru

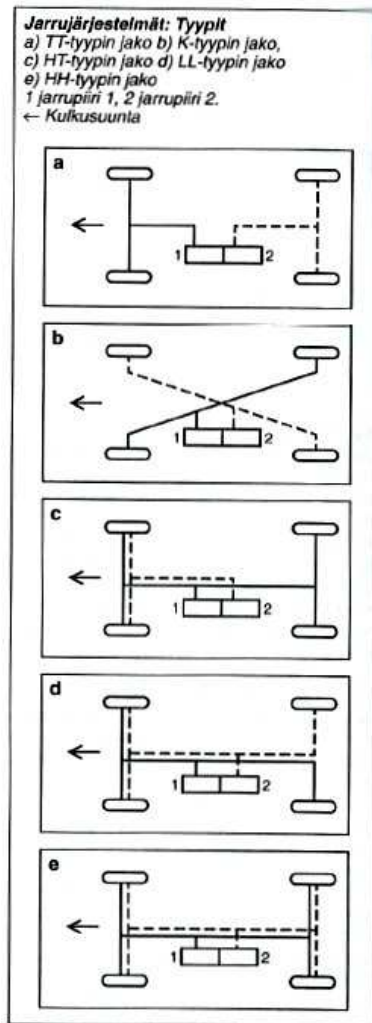
Käyttöjarru on raskasta kalustoa lukuunottamatta yleisesti hydraulinen kitkajarrujärjestelmä, joka on yleensä ottomootoriautoissa alipainetehostettu ja

dieselmootoriautoissa joko erillisellä pumpulla alipainetehostettu tai hydraulinen ylipainetehostettu. Suorasuihkutus-ottomootoriautoissa käytetään myös erillistä alipainepumppua moottorin riittämättömän alipaineen takia. Hydraulista tehostusjärjestelmää taas käytetään myös raskaissa henkilöautoissa, kuten panssaroiduissa limusiineissa. (Heißing & Ersoy 2011, 172—173.) Hydraulista tehostusta voidaan käyttää myös sähköautoissa puuttuvan moottorin alipaineen sekä tyypillisesti suuren massan takia. Siirtomekanismi voi olla joko hydraulinen, sähköhydraulinen tai sähkömekaaninen. Raskas kalusto suosii yleisesti jarrujärjestelmänään paineilmajarruja, joita ei tässä käsitellä. Käyttöjarrun vaatimuksena on, että käyttölaitteen (esim. toisen jarrupiirin) vikaantuessa poljinvoima ei saa ylittää tiettyä arvoa.

Jarrupolkimelta pyöräsynterille asti käyttöjarru koostuu tyypillisesti polkimesta, jarrutehostimesta, pääsynteristä, jarrulinjoista, HCU:sta tai HECU:sta (joka sisältää ABS:n solenoidiventtiilit, pumpun ja ECU:n, sekä TCS/ESC-venttiilit), jarruletkuista sekä pyöräsyntereistä. Pyöräsynterit tekevät kiristysvoiman levyjarruissa jarrusatulaan kiinnitettyjen palojen ja jarrulevyn välille, tai rumpujarrussa jarrurummun sisällä olevien kenkien ja jarrurummun välille.

4.3.1.1 Jarrupiirijaot

Käyttöjarrun tulee lain mukaan jakautua kahteen käyttöpiiriin, jotka ovat vikatilannetta huomioiden toisistaan riippumattomia. Erilaiset jarrupiirit näkyvät kuvassa 4. Periaate on, että toisen piirin vikaannuttua toista akselia pystytään vielä jarruttamaan. Heißing & Ersoy:n (2011, 159) mukaan yleisimmät jarrupiirijaot ovat etu/taka-akselijako sekä ristijako. Etu/takasuuntainen jako eli TT-jako tai ”black/white-split” tarkoittaa, että etuakselilla ja taka-akselilla on erilliset piirit.



Kuva 4. Jarrupiirijaot (Bosch 2002, 718)

TT-jaolla on useita etuja:

- Vikatilanteessa ei esiinny sivusuuntaisia voimia jarrutettaessa
- Taakse ei tarvitse vetää toista hydraulilinjaa (ellei käytetä TCS/ESC:tä)
- Voidaan käyttää pääsylinteriä, jossa jarruvoiman jako toteutetaan suoraan
- Mikäli etummainen piiri ylikuumenee ja aiheuttaa esim. kiehumisen seurauksena höyrylukon, voidaan taka-akselia jarruttaa edelleen normaalisti

(Heißing & Ersoy 2011, 159.)

Ristikkäisjako eli K-jako tai "X-split" jakaa piirit niin, että toiseen piiriin kuuluu esim. vasen etupyörä ja oikea takapyörä. Toiseen piiriin taas kuuluu oikea etupyörä ja vasen takapyörä. Vikatilanteessa molemmilta akseleilta voidaan jarruttaa yhtä pyörää ja etupyörän jarrutus on näin ollen aina käytössä. Tämä mahdollistaa jarrujen suunnittelemisen TT-piiriä pienemmäksi, mikäli auton massasta suurin osa sijoittuu etuakselille, sillä minimihidastuvuus saavutetaan aina paremmin, kuin esim. TT-jaossa pelkällä takajarrupiirillä. Vikatilanne aiheuttaa luonnollisesti sivusuuntaisen momentin autolle. Tätä taipumusta voidaan kompensoida akselistosuunnittelulla ja erityisesti tekemällä pyöräripustukseen negatiivinen olkapoikkeama, joka aiheuttaa jarruttavalle pyörälle vastakkaiseen suuntaan kääntävän ohjausmomentin.

Muita piirijakoja ovat vielä seuraavat:

- HT, missä ensimmäinen piiri käsittää kaikki neljä pyörää ja toinen piiri pelkät etupyörät
- LL, missä molemmat piirit käsittävät etupyörät, sekä toisen takapyörän
- HH, missä kaikille neljälle pyörälle on tuplapiiri

(Vesterinen 2010, Jarrut 1, 23)

HH-jako on kallis toteuttaa ja sitä voidaan käyttää raskaissa henkilöautoissa sekä kevyissä hyötyajoneuvoissa (Heißing & Ersoy 2011, 159).

4.3.1.2 Jarrupoljin

Jarrupoljin tai manuaalivaihteisissa autoissa kytkin- sekä jarrupoljinyksikkö on erillinen kiinteästi tuliseinään kiinnittyvä kokoonpano. Tätä kutsutaan "human-machine interface-" eli HMI-yksiköksi. Poljinkokoonpano kiinnitetään tuliseinään samoilla pulteilla, jotka kiinnittävät jarrutehostimen tuliseinän toiselle puolelle. Jarrupoljin on yleensä teräsvartinen, mutta nykyisin painon säästämiseksi polkimen varsi voi olla yhdistettyä muovivalua ja alumiinia tai muuta metallia.

Polkimen koko liikematkan tulee yleisesti olla enintään 150mm ja toimintamatkan täysjarrutukseen 80-90mm. Tarvittava täysjarrutuksen poljinvoima on yleensä 200-250N, mutta polkimen tulisi kestää noin 3000N voima. (Heiðing & Ersoy 2011, 174—175.) Poljintuntuma on normaalissa mekaanisessa yhteydessä kaksiosainen. Tuntuman tulisi olla mahdollisimman tarkka ja viiveetön. Ns. tyhjän matkan tulisi olla minimaalinen, koska se viivyyttää jarrutustapahtumaa. Kolariturvallisuus on jarrupolkimen tärkeä ominaisuus, sillä poljinkokoonpano yhdistää moottoritilan ja ohjaamon. Turvallisuuden parantamiseksi on kehitetty erikoisrakenteinen työntötanko, joka taittuu törmäyksessä, ja estää pääsylinterin ja tehostimen tunkeutumisen ohjaamoon. USA:ssa kehitettiin 1990-luvulla autokäyttöön jarrupoljin, jonka etäisyyttä voi säätää pituussuunnassa kuljettajan haluamalla tavalla. Kyseistä rakennetta esiintyy lähinnä SUV-luokan autoissa. (Heiðing & Ersoy 2011, 177.)

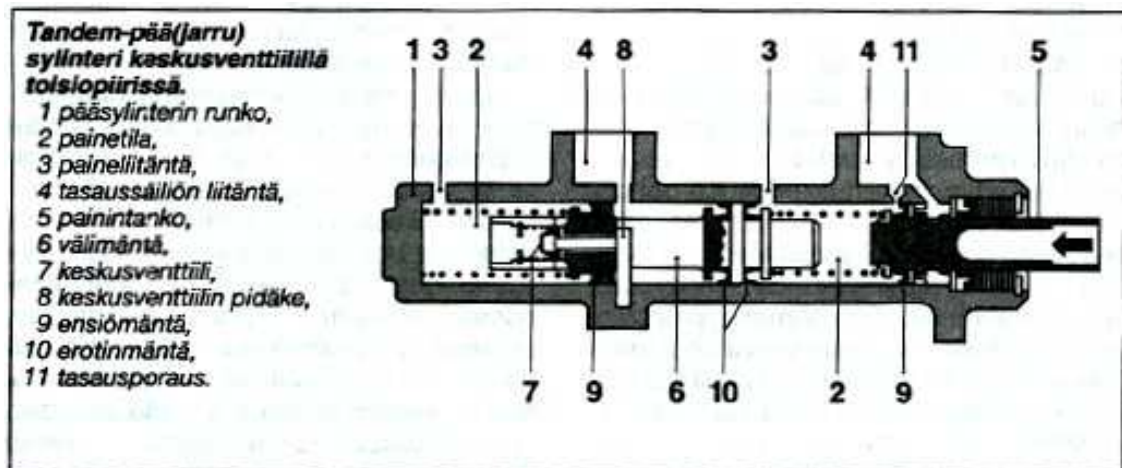
4.3.1.3 Jarrutehostin

Jarrutehostimista halvin ja yksinkertaisin ratkaisu on perinteinen ottomoottorin alipainetehostin. Painettaessa jarrupoljinta polkimelta tulevan tangon avustuksella, kalvolla kahteen osaan jaetun alipainekammion polkimen puoleinen osa täyttyy ilmalla ja jarrupääsylinterin puoleiseen osaan imeytyy alipaine. Syntynyt paine-ero tehostaa poljinvoimaa. Ns. Aktiivinen jarrutehostin, jota jo edellä sivuttiin, jakaa polkimelta tulevan työntötangon kahteen osaan mahdollistaen jarruvoiman säädön ilman polkimen liikettä. Polkimelta tulevan sekä pääsylinterille menevän tangon väliin voidaan esim. solenoidiventtiilillä saada aikaan aktiivinen tehostus tarvittaessa. Muun muassa jarruassistentti, ESC ja ACC voivat käyttää hyväksi aktiivista jarrutehostinta. Jos imusarjan alipaine on riittämätön jarrutehostimen toimintaan, kuten dieselmootoreissa tai suoraruiskutteisissa ottomoottoreissa, käytetään erillistä alipainepumppua alipaineen aikaansaamiseksi. Pumppu voi olla suoraan mekaanisesti moottorikäyttöinen, tai sähkökäyttöinen. Alipainetehostinta harvinaisempi jarrutehostintyyppi on hydraulinen tehostin. Sen etu alipainetehostimeen verrattuna on pienempi koko ja suurempi teho. Huonona puolena on huonompi poljintuntuma. Hydraulista tehostinta käyttävät esimerkiksi panssaroidut tai

muuten raskaat henkilöautot, joissa jarrutehon tarve on tärkeämpi, kuin poljintuntuma. (Heiðing & Ersoy 2011, 172—173.) Toisaalta poljintuntuma voidaan simuloida halutunlaiseksi EHB-järjestelmässä.

4.3.1.4 Jarrupääsylinteri

Kaksi erillistä jarrupiiriä vaativat yleisesti kaksiosaisen jarrupääsylinterin eli tandempääsylinterin (TMC, tandem master cylinder). Pääsylinteri muuttaa jarrutehostimen välittämän voiman hydrauliseksi paineeksi jarrujärjestelmään. Pääsylinteri yhdistää sarjaan kytkettynä kaksi kammiota. Pääsylinterin kanssa samassa yksikössä on myös jarrunesteen paisuntasäiliö, joka toimittaa tarvittaessa lisää nestettä piireihin, mikäli jarrupalat, tai –kengät kuluvat ja piirin nestetilavuus kasvaa. Paisuntasäiliö myös sallii nesteen lämpölaajenemisen ja estää vaahtoamista sekä ilman pääsyä piireihin. Eräs paisuntasäiliön tärkeimmistä tehtävistä on myös eristää pääsylinterin kaksi kammiota toisistaan, mikäli nestevuoto tyhjentää toisen piireistä. (Heiðing & Ersoy 2011, 173.) Tandem-pääsylinterin halkileikkaus nähdään kuvassa 5.



Kuva 5. Tandem-pääsylinteri (bosch 2002, 719)

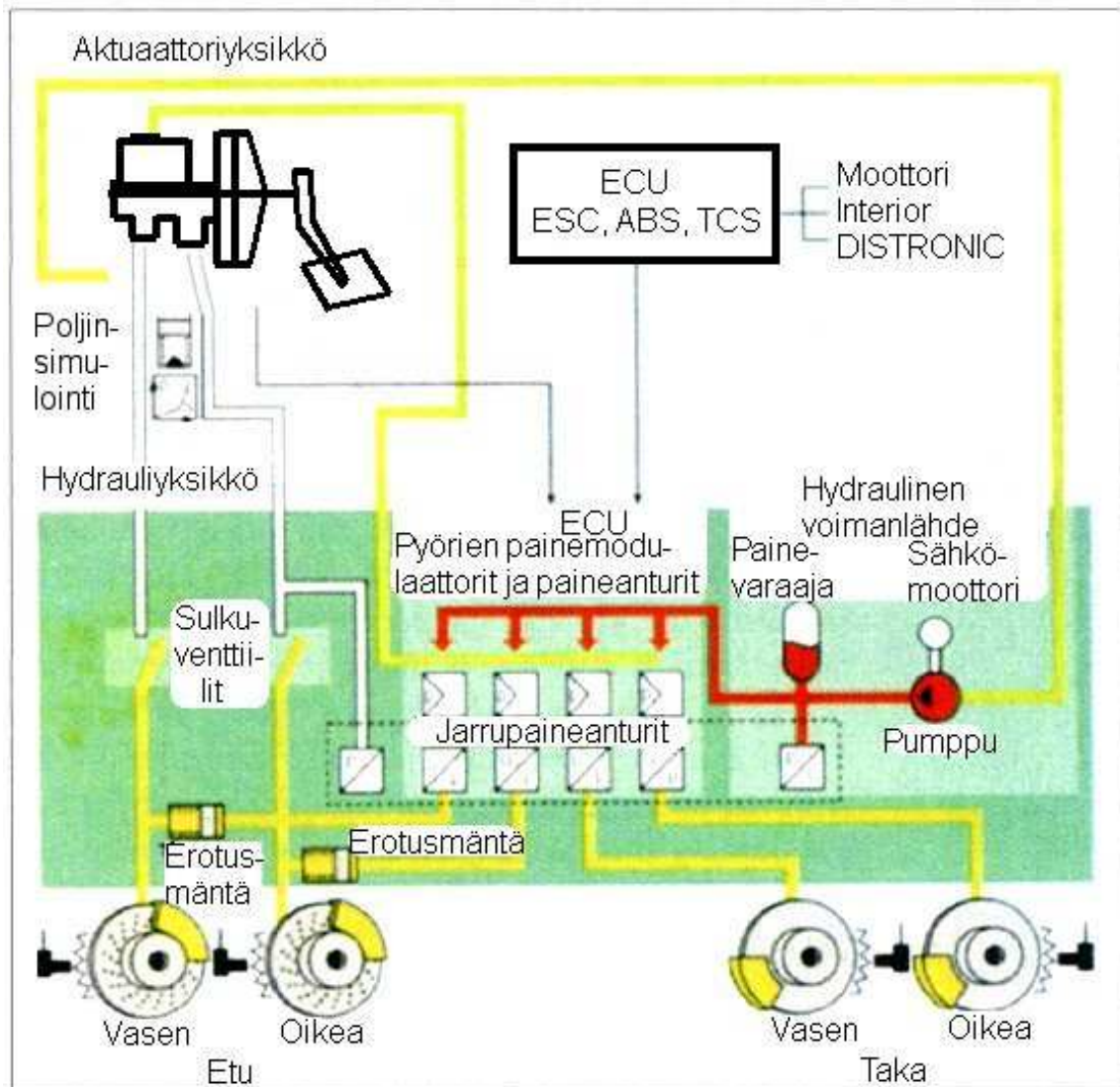
4.3.1.5 Jarrulinjat ja -letkut

Jarrulinjat ovat kiinteästi paikallaan pysyviä komponentteja yhdistäviä kaksiseinäisiä galvanoituja ja muovipinnoitteisia teräsputkia, joissa jarruneste liikkuu. Jarruletkut taas yhdistävät jarrupiiriin liikkuviin komponentteihin, kuten jarrusatuloihin. Letkut ovat teräspunosvahvistettuja kumiletkuja. Ns flex line-letkut ovat teräspunosvahvistettua PTFE-muovia ja eristävät normaalia linjaa tai letkua paremmin melua. Niitä käytetään esim. pääsylinterin ja HCU:n välissä melua eristämässä. Linjojen ja letkujen tehtäviä ovat hydraulisen paineen siirto ja värinöiden eristäminen jarrupiirissä. (Heißing & Ersoy 2011, 169, 171.)

4.3.2 Vaihtoehtoiset järjestelmät

Sähköhydraulinen (EHB) jarrujärjestelmä on niin sanottu ”brake-by-wire”-järjestelmä. Se koostuu polkimesta (johon simuloidaan aktuaattorin avulla haluttu tuntuma), HECU-yksiköstä sekä neljästä hydraulisesta pyöräjarruyksiköstä. Poljintuntuma voidaan mallintaa halutunlaiseksi. Anturit mittaavat polkimen liikettä sekä voimaa, joista HECU määrittää (yhdessä muun datan kanssa) ajotilanteeseen sopivat toivotun jarrutuksen mukaiset jarruvoimat joka pyörälle. Sähköhydraulinen järjestelmä on hiljaisempi ja kolariystävällisempi, kuin perinteinen hydraulinen järjestelmä. Se myös mahdollistaa jarrupolkimen aiempaa paremman ergonomiasuunnittelun. Tehostus tapahtuu hydraulisella ylipaineella, joka mahdollistaa perinteistä järjestelmää korkeamman jarruvoiman. Lisää etua järjestelmälle tekee pieni koko ja vapaa sijoiteltavuus, riippumattomuus moottorin alipaineesta sekä samojen kokoonpanojen yhteensopivuus muihin ajoneuvoihin. Erilaisten elektronisten järjestelmien, kuten ABS, ESC, BA, ACC integrointi onnistuu elektronisesti ilman lisäkomponentteja. Vikatilanteessa, mikäli ylipainesäiliö vikaantuu, säilyy sähköinen yhteys polkimelta edelleen ja hydraulipumppu tuottaa tarvittavan jarrupaineen järjestelmään. Jos taas sähköinen yhteys eli ”brake-by-wire” katkeaa, polkimen simuloitu tuntuma katoaa ja polkimen ja pääsylinterin välinen mekaaninen yhteys kytkeytyy. Jarruttaminen onnistuu tämän jälkeen mekaanisesti ilman sähkötehostusta. (Heißing & Ersoy 2011,

187—188.) Esimerkkinä EHB-järjestelmästä kuvassa 6 nähdään Mercedes-Benzin SBC (sensotronic brake control)-jarrujärjestelmä.



Kuva 6. Sähköhydraulinen jarrujärjestelmä (Mercedes-Benzin SBC-jarrujärjestelmä)

Yhdistetty sähkömekaaninen/sähköhydraulinen jarrujärjestelmä (EHC) on täysin sähkömekaanisen järjestelmän edeltäjä. Etupyörät ovat sähköhydraulisesti jarrutetut, ja takapyörät sähkömekaanisesti. Järjestelmä mahdollistaa taka-akselilla käyttö- ja seisontajarrun integroimisen samaan yksikköön. EHC:tä voidaan käyttää vielä tavallisella 12V sähköjärjestelmällä. (Heißing & Ersoy

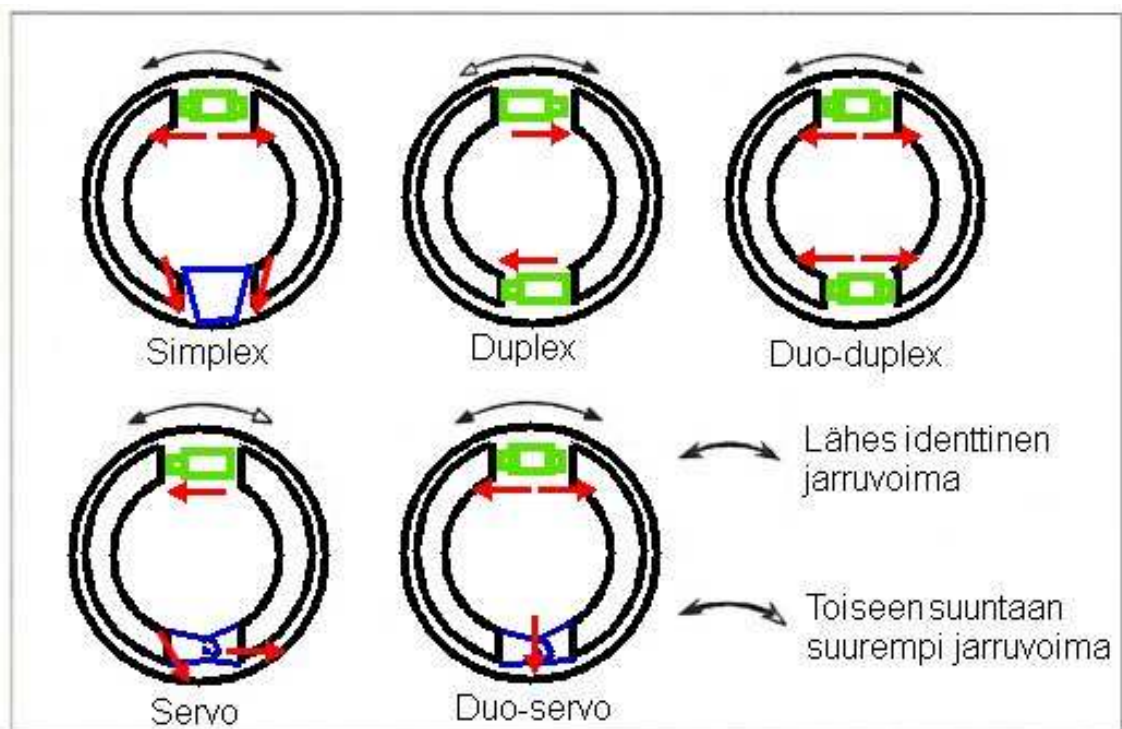
2011, 189.) Jarrupolkimelta täytyy edelleen olla lain mukaan mekaaninen yhteys pyöräjarruille, joten EHC-järjestelmässä se vielä toteutuu, koska etujarrupiiri on hydraulinen.

Täysin sähkömekaaninen jarrujärjestelmä (EMB) eli ”brake-by-wire” tai ”dry brake-by-wire” toimii täysin ilman jarrunestettä. Järjestelmä koostuu sähköohjatusta ohjausyksiköstä sekä neljästä sähkömekaanisesta pyöräjarruysiköstä. Poljin on täysin irrallaan järjestelmästä ja jarrutussignaali lähetetään sähköisesti jarruille. Anturit mittaavat polkimen asentoa ja voimaa (kuten EHB-rakenteessa) ja tiedot lähetetään jarruille. Järjestelmän etuja hydraulisiin verrattuna ovat parempi jarrudynamiikka ja hallittavuus, kolariturvallisuus, poljintuntuman sekä polkimen sijainnin vapaa säätö, äänettömyys sekä ympäristöystävällisyys jarrunesteen puuttuessa. Autonvalmistajaa auttavia tekijöitä ovat pieni pakkaustila, erilaisten lisäjärjestelmien helppo integroitavuus, riippumattomuus moottorin alipaineesta sekä komponenttien vähyys. Kuvassa (cfb fig 3-75) näkyy sähkömekaaninen pyöräjarruysikkö. EMB-järjestelmää ei ole vielä tuotannossa. Se vaatisi käytännössä autolta modernin 42V E/E-rakenteen. (Heißing & Ersoy 2011, 188—189.)

Hybridi- ja sähköautoissa sähkömoottori itsessään voi toimia generaattorina moottorijarrutustilanteessa ja tuottaa hidastuvuutta aina 0,3g:hen asti. Generaattori ja akkuteknologia rajoittavat energian talteenottoa moottorijarrutuksessa, mutta tulevaisuudessa tämä tekniikka voi kehittyä, ja ehkä vauhtipyörä- tai superkondensaattorisovelluksilla tai kehittyneemmillä akuilla tilanne muuttuu huomattavasti tehokkaammaksi. Jarrutuksen mukavuusalue on 0-0,3g, mutta jarruilta vaaditaan paljon suurempia hidastuvuuksia jo lainkin mukaan. Kuten edellä mainittiin, maksimihidastuvuutta rajoittava tekijä on käytännössä tien ja renkaan välinen kitkakerroin. (Heißing & Ersoy 2011, 162—163.)

4.3.3 Rumpujarru

Rumpujarru koostuu sylinterin muotoisesta jarrurummusta sekä kahdesta jarrukengästä, jotka kiristetään rummun sisäpintaa vasten pyöräsylinteri(e)n hydraulisella paineella. Jarrutuksen loppuessa palautinjouset vetävät kengät takaisin alkuasentoonsa. Rumpujarruja on useita tyyppiä riippuen kenkien kiinnityspisteistä. Eri tyypit voidaan nähdä kuvasta 7 ja niitä käsitellään omana lukunaan.



Kuva 7. Rumpujarrutyypit

4.3.3.1 Tyypit ja rakenne

Rumpujarrua käytetään usein, kun halutaan integroida käyttöjarru ja seisontajarru samaan kookonpanoon. Rumpujarruja käytetään henkilöautoissa enää taka-akselilla. Rummut valmistetaan usein valuraudasta (GI), mutta parempien ominaisuuksien tavoittelussa rummun ulompi rakenne voi olla alumiinivalua. Kehä, johon kengät osuvat, voi olla valurautaa,

alumiinioksidimatriisia tai keraamia. Alumiininen rumpu lämpenee helposti alumiinin lämmönjohtavuuden takia, ja kestää huonommin kuormitusta, kuin valurautainen. Alumiinirakennetta suosivatkin vain erittäin kevyet autot. (Heißing & Ersoy 2011, 169—170.)

Rumpujarrut kärsivät lämpenemisestä levyjarruja heikomman jäähdytyksen ja pienemmän jarrutustehonsa ansiosta. Jarru saattaa kokea ns. häipymisen kovan lämpökuorman alaisuudessa. Häipymistä voi aiheuttaa myös pyöräsylinteristä rumpuun vuotanut jarruneste tai sisään päässyt vesi.

Rumpujarrutyypeistä yleisimmät moderneissa henkilöautoissa ovat simplex tai duo-servo (Heißing & Ersoy 2011, 169.) Simplex-rumpujarru on yksinkertaisin ja halvin tyyppi. Yksi pyöräsylinteri levittää molempia kenkiä toisesta päästä ja aiheuttaa näin ollen yhtä hyvän jarruvoiman molempiin pyörän pyörimissuuntiin nähden. Tehostava kenkä tuottaa aina noin 65% ja laahaava kenkä 35% jarrutusvoimasta. Etummainen kenkä siis kuluu helpommin, kuin takimmainen. Kenkien toinen pää on nivelillä tuettu ja on yleensä säteissuuntaan uiva rakenne normaalissa henkilöautokäytössä. Tämä tasoittaa jarrukenkien kulumista. (Heißing & Ersoy 2011, 169.)

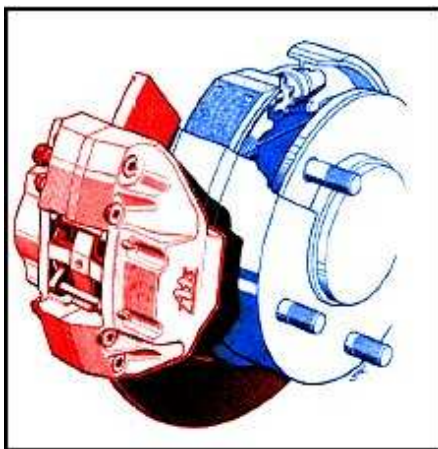
Duplex-rumpujarru sisältää kaksi pyöräsylinteriä. Kumpikin levittää yhtä kenkää toisesta päästä rumpua vasten. Molempien kenkien toinen pää on toisistaan riippumatta tuettu. Molempia kenkiä levitetään toisiinsa nähden vastakkaisista päistä, joten jarrumomentti on huomattavasti suurempi pyörän pyöriessä toiseen suuntaan (eteenpäin). Eteenpäin ajettaessa jarrutusvoima saadaan duplex-rakenteella simplex-rakennetta suuremmaksi, koska molemmat kengät toimivat ”itsetehostavasti”. Taaksepäin ajettaessa jarru taas toimii ”laahaavasti” ja teho on huomattavasti heikompi, kuin eteenpäin ajettaessa.

Duo-duplex-rumpujarrussa kenkien molemmissa päissä on sylinterit. Kengät tukeutuvat ainoastaan niihin, joten jarrutettaessa kengät asettuvat vapaasti rumpua vasten. Jarrutus on yhtä tehokasta molempiin pyörimissuuntiin ja kenkien kuluminen on tasaista.

Servo-rumpujarrussa on yksi ainoastaan toista kenkää kiristävä sylinteri. Molemmat kengät ovat uivasti kiinni toisissaan itsesäätyvällä nivelellä, ja se kenkä, jossa ei ole sylinteriä, on nivelellä kiinteästi kiinni toisesta päästään. Kun sylinteri kiristää jarrukenkää rumpua vasten, kenkä ”työntää” toista kenkää mukanaan rummun kehälle. Kyseessä on erittäin hyvin itsetehostava jarrutustapahtuma toiseen suuntaan, koska molemmat kengät ”kiilautuvat” kiinni rumpuun. Laahaussuuntaan jarruvoima on heikko, sillä molemmat kengät laahaavat. Itsesäätyvä välikappale kompensoi jarrukenkien kulumisesta aiheutuvaa kiristysmatkan kasvua.

Duo-servo on toinen yleisimmistä nykyaikaisista rumpujarrutyypeistä. Siinä on kenkien välillä servojarrun tapaan uiva nivel, joka mahdollistaa kenkien vapaan liikkeen rummun sisällä, mutta pitää ne kytkettynä toisiinsa. Molempien kenkien toisessa päässä on lisäksi sylinteri, joka kiristää molemmat kengät rumpua vasten. Pyörimissuunnasta riippumatta molemmat kengät kiilautuvat rumpua vasten ja jarrutustapahtuma on voimakkaasti itsetehostava kumpaankin suuntaan. Hyvän jarruvoiman ansiosta duo-servo on käytössä etenkin raskaissa autoissa, kuten pienet ja keskisuuret hyötyajoneuvot. Duo-servoa käytetään yleisesti seisontajarruna ”drum in hat”-rakenteessa, jossa on yhdistetty levyjarru ja rumpujarru. (Heiðing & Ersoy 2011, 169—170.)

Kuva 8 esittää tyypillisen ”drum in hat”-takajarruyksikön, jossa käyttöjarruna on levyjarru ja seisontajarruna rumpujarru.



Kuva 8. Drum-in-hat-yksikkö

4.3.4 Levyjarru

Levyjarru on hyvin pitkään toiminut etujarruna lähes kaikissa henkilöautoissa, nykyisin, etenkin tehokkaissa automalleissa levyjarrut ovat käytössä myös takapyörillä. Jarru koostuu levystä ja jarrusatulasta. Satulassa on pyöräsylinteri (tai kaksi), joka kiristää jarrupalat levyyn kiinni. Satula kiinnitetään pyörännapaan usein sallien satulan sivusuuntaisen liikkeen. Sivusuuntaiseen liikkumisvapauteen perustuen satulat jaetaan perinteisesti kahteen tyyppiin: kiinteä ja uiva. (Heiðing & Ersoy 2011, 164.)

4.3.4.1 Tyypit ja rakenne

Levyjarru on hyvin jäähdytetty rakenne, joten sen lämmönkesto on parempi, kuin rumpujarrulla. Lisäksi levyistä tehdään yleensä ilmapirralla jäähdytetyt. Jarrupalat kuluvat melko tasaisesti, koska niitä kiristetään kohtisuoraan levyn pintaa vasten. Jarrupalan vaihto onnistuu helpommin kuin rummuissa. Hydraulinen paine välittyy jarrupaloihin pyöräsylinterien kautta. Toisin, kuin rumpujarruissa, levyjarruissa ei ole mekaanista palautinjousta jarrupalaille, vaan sylinterin tiivistekumi toimii palauttavana ”jousena”, kun jarrutus lopetetaan ja hydraulinen paine sylinterissä laskee. Tämä löysää jarrupalat levystä ja estää ylimääräisen jarrutusmomentin syntymistä hieman vinoissa tai vipottavissa jarrulevyissä. Levyjarru on avoin rakenne, joten se on alttiimpi likaantumiselle, kuin rumpujarru. (Heiðing & Ersoy 2011, 165.)

Jarrusatula on usein valurautainen (pallografiittivalurautaa laatuluokkaa GGG50...60). Mikäli kevyempää rakennetta vaaditaan, voidaan käyttää kaksiosaista rakennetta, jossa sylinterin pesä on korkealujuuksista alumiinia ja toinen, levyn yli kaartuva komponentti on pallografiittivalurautaa. Jarrumännät ovat valurautaa (GI), terästä, alumiinia tai injektiovalettua muovia. (Heiðing & Ersoy 2011, 165.)

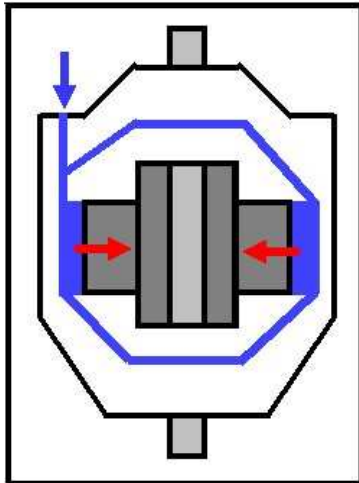
Jarrulevy on useimmiten terästä. Nykyisin käytetään pääasiassa perliittistä valurautaa (laatuluokkaa GCI 15...25). Kromi ja molybdeeni auttavat kulumisenkestossa ja estävät lämpöhalkeilua. Hiili auttaa lämmönkestossa.

Uudet C/SiC-levyt on tehty hiilikuidusta (C) ja keraamimatriisista (SiC). Etuina kuitulevyillä on kulumisenkesto (jopa 300 000km), keveys (jousittamatonta massaa), korkea lämpötilankesto ja ruostumattomuus. C/SiC-levyt ovat monimutkaisia valmistaa ja niitä käytetään urheiluautoissa (esim. Porschessa lisävarusteena) sekä mahdollisesti kalliissa luksusautoissa. (Heißing & Ersoy 2011, 168—169.)

Jarrulevy absorboi noin 90% jarrutuksessa syntyvästä lämpöenergiasta. Kiinteä jarrulevy on yksinkertaisin levyrakenne, mutta huonoin lämmönsiirtäjä. Kaksinkertainen jarrulevy voidaan jäähdyttää niin, että levyjen väliin tehdään ilmakehän. Ilma virtaa levyjen välistä sisäkehältä ulkokehälle vieden lämpöä mukanaan. Nykyisin henkilöautokäytössäkin yleistyvät uritetut tai reiätetyt jarrulevyt lisäävät jäähdytystehoa sekä jarruvastetta määrällä levyillä, mutta lisäävät ääntä ja ovat kalliita valmistaa. (Heißing & Ersoy 2011, 168.)

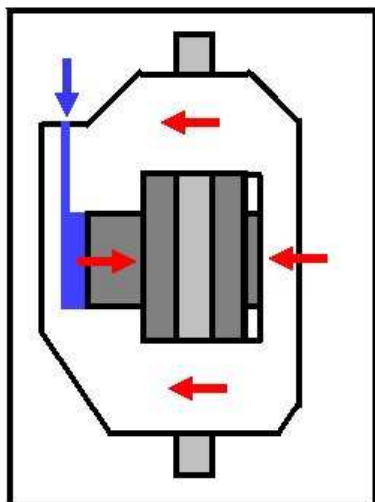
Jarrulevy kärsii lämmössä muodonmuutoksesta. Metalli tahtoo laajeta ja tämä aiheuttaa levyn taipumisen ulospäin. Levy ottaa tuolloin kiinni ulompaan jarrupalaan ja tästä aiheutuu värinä ohjauspyörällä sekä jarrupolkimella sekä matalataajuista ääntä. On olemassa kelluva jarrulevyrakenne, jossa itse levy liikkuu aksiaalisuunnassa vapaasti kiinteässä tuessaan. Tämä rakenne ehkäisee lämmöstä johtuvia ongelmia. Kelluvaa levyä käytetään kiinteän satulan kanssa suuritehoisissa autoissa sekä moottoripyörissä. (Heißing & Ersoy 2011, 168.)

Kiinteässä jarrusatularakenteessa on kaksi pyöräsylinteriä, jotka molemmat kiristävät oman puoleistaan jarrupalaa kohti levyä. Tätä rakennetta käytetään usein raskaissa takavetoisissa autoissa etupyörillä, koska siellä on saatavilla tarpeeksi tilaa. Satula on kahdesta puolikkaasta koostuva rakenne, jossa jarruneste ohjataan toiselle puolelle kanavia pitkin. Satula kuumenee jarrutuksessa, joten kanavat ovat alttiita kiehumiselle. Jäähdytys on tärkeä asia kiinteässä satulassa. Kiinteä satula on äärimmäisen jäykkä, joten muodonmuutos ja näin ollen jarrunestetilavuuden muutos sylinterissä on erittäin pientä. Kiinteä satularakenne esitellään kuvassa 9. (Heißing & Ersoy 2011, 166.)



Kuva 9. Kiinteä satularakenne

Uiva satularakenne on tilaa säästävämpi ratkaisu, kuin kiinteä. Näin ollen se voidaan suunnitella asennettavaksi ulommas, kuin kiinteä satula, mahdollistaen esim. negatiivisen olkapoikkeaman. Tässä rakenteessa on mäntä ainoastaan toisella puolella, ja kun kiristysvoima painaa saman puolen jarrupalaa kiinni levyyn, koko satularakenne siirtyy vastaavasti takaisinpäin vastavoiman ansiosta. Näin levyyn kohdistuu yhtä suuri kiristysvoima molemmilta puolilta. Jarrunestettä ei tarvitse viedä satulan yli tai läpi toiselle puolelle, joten se pysyy viileänä, eikä kiehumisvaaraa ole. Lisäksi osittain uiva satula voidaan suunnitella erittäin avoimeksi, joka lisää jäähdytystä entisestään. Toinen rakennevaihtoehto on, että levyn yli kulkee kaksi eri osaa: kiinteä kehys, johon uiva osa on kiinnitetty, sekä uiva ”kelkka”. Uiva osa liikkuu kuin raiteilla vapaasti sivusuunnassa. Jarrupalojen kulumisen on tasaista ja jarrutus on hiljainen. Tätä rakennetta hyödyntävät esim. FN- ja FNR-tyyppiset satularakenteet. Ne ovat suurille jarrulevyille suunniteltuja rakenteita, joissa levyn ylittävä osa on tehty mahdollisimman ohueksi. Uivan satulan männän takapäähän on asennettu nokka-akselia muistuttava aktuaattoriakseli, jolla kiristetään mäntää, kun jarrupalojen kulumista tapahtuu. Seisontajarru voi olla yhdistetty myös levyjarruun. Silloin tätä aktuaattoriakselia kierretään vaijerin välityksellä ja se kiristää jarrupalat levyyn kiinni. Uiva satularakenne esitetään kuvassa 10. (Heißing & Ersoy 2011, 166—167.)



Kuva 10. Uiva satularakenne

4.3.5 Vertailu

Rumpu- ja levyjarruja voidaan vertailla keskenään edellisten kappaleiden perusteella. Jarrutehon puolesta levyjarru on paljon rumpujarrua parempi ratkaisu. Se on avoimena rakenteena jatkuvasti jäähdyttävässä ilmavirrassa. Lisäksi levyistä saadaan helposti tehtyä entistä tehokkaammin jäähdyttäviä ilmakehien avulla. Jarrulevy poistaa kitkaa haittaavan veden melko hyvin ”keskipakoisvoimalla”, mutta on altis lialle ja ruostumiselle. Lian ja veden vaikutusta on mahdollista kuitenkin moderneissa BA-järjestelmissä vähentää ns. aktiivisella pyyhkimistoiminnolla, jossa automatiikka antaa pyöräsynterille eri sensorien (kuten lämpötila- ja sadetunnistin) määräämin väliajoin erittäin heikon jarruvoiman, joka käyttää jarrupalat kosketuksessa levyn pintaan puhdistaan tämän (Heißing & Ersoy 2011, 547). Auton etupyöriltä vaaditaan noin 70% pysäytysvoimasta. Koska levyjarrulla saavutetaan rumpua suurempi voima, ja koska siihen on helppo vaihtaa kuluvat jarrupalat (etujarrut kuluvat takajarruja nopeammin), on se ihanteellinen valinta etujarruksi. Rumpujarru taas on levyä halvempi ratkaisu. Nykyaikaiset rumpujarrut riittävät helposti pysäytysvoimansa puolesta takapyörille. Nopeissa autoissa ongelmaksi voi muodostua kuitenkin rajoitettu lämmönkesto ja häipymisilmiö. Rumpujarru ei ole yhtä herkkä ympäristön likaavalle vaikutukselle, kuin levyjarru. Lisäksi

rumpujarrun yhteyteen on helppo integroida seisontajarru. Tämän takia se on yhä edelleen suosittu ratkaisu takajarruksi. Kaikissa henkilöautoissa käytetään nykyisin levyjarruja etuakselilla. Taka-akselilla rumpujarru on yleisesti käytössä keskikokoisissa ja sitä pienemmissä autoissa. Nopeissa ja suurissa autoissa on levyjarrurakenne myös taka-akselilla.

4.4 Seisontajarru

Seisontajarru on nykyisinkin yleensä mekaaninen ”käsijarru”. Muita vaihtoehtoja ovat mekaaninen poljinkäyttöinen, tai sähköinen jarru, joka aktivoidaan kahvalla tai napista. Siirtomekanismi voi olla mekaaninen, sähkömekaaninen tai sähköhydraulinen. Itse jarru voi olla oma rumpunsa, käyttää hyödyksi käyttöjarrukenkiä ja -rumpua, tai levyjarrua.

Seisontajarrun suorituskyky tulee olla sellainen, että täyteen kuormattu M1-luokan auto on kyettävä pitämään paikallaan 18% mäessä. Jarrun käyttövoima ei saa ylittää tiettyjä lain määrittämiä arvoja.

4.4.1 Tyypit ja rakenne

Toistaiseksi yleisin seisontajarrumekanismi on mekaaninen ”käsijarru” (Heißing & Ersoy 2011, 175). Jarrukahva kiristää vaijerin välityksellä (lähes poikkeuksetta) taka-akselin jarrukengät rumpua vasten. Seisontajarru voi erillisen vivuston avulla käyttää hyväksi käyttöjarrua (rumpu tai levy), tai sillä voi olla kokonaan oma rumpu. Tässä tapauksessa kyseessä voi olla jo aiemmin mainittu ”drum in hat”-rakenne. Seisontajarrun integroimista levyjarruun käsiteltiin levyjarruja koskevassa kappaleessa. Automaattivaihteistoissa on myös käytössä voimansiirtoon (vaihdelaatikon toisioakseliin) vaikuttava parktoiminto (P). Joissakin raskaissa autoissa, (pakettiautot tai matkailuautot) käytetään myös seisontajarrua, joka vaikuttaa vaihteiston toisioakseliin.

Sähköinen seisontajarrumekanismi (EPB, electric parking brake) on yleistymässä kovaa vauhtia. Käyttölaitteena voi olla esim. vipu tai nappi. Mekaniikasta luopuminen vapauttaa seisontajarrun HMI-yksikön sijoittelua ohjaamossa ja säästää tilaa. Lisäksi sähköisesti on mahdollista toteuttaa

seisontajarru, joka ei aktivoidu ajoneuvon ollessa liikkeessä, vaikka kahvasta vedettäisiin. Aktuaattorit ovat itselukkiutuvia, joten seisontajarru pitää sen voiman, mikä siihen on aktivoitaessa kiristetty, vaikka virta katkaistaan. Järjestelmään on lisäksi helppo integroida erilaisia sähköisiä sovelluksia, kuten kiristysvoiman säätö, kulumisenilmaisin, turvalogiikka, diagnostiikka, hälytys, autosta poistuttaessa jarru ei ole päällä jne. Sähköisen käsijarrun voi toteuttaa joko sähkömoottorilla, joka toimii vaijeria kiristävänä ”jarrukahvana” (ns. cable puller) tai molemmilla pyörillä olevilla erillisillä sähkömekaanisilla aktuaattoreilla, jotka tekevät kiristysvoiman suoraan pyöräjarrulla. Sähköisesti seisontajarrua voi soveltaa toimimaan myös mäkiparruna (”hill holder”), joka pitää auton paikallaan mäkilähdössä kunnes auto lähtee eteenpäin. (Heißing & Ersoy 2011, 170, 175—176.)

4.4.2 Vertailu

Mekaaninen seisontajarru on halvin ja yksinkertaisin ratkaisu, mutta koska käyttövoima tulee kuljettajasta, on jarruvoima rajallinen. Tehostettu seisontajarru on toki mahdollinen ratkaisu. Nykytrendi on siirtyä kohti sähköistä järjestelmää, sillä näin pystytään seisontajarru liittämään osaksi täydellistä ajonhallintajärjestelmää, sekä monia lisäsovelluksia voidaan liittää seisontajarruun. Lisäksi vapaa HMI-yksikön sijoittelu ja vaijerivälityksen pakkaussuunnittelu on vapaata. Vaijerivälityksen pakkaussuunnittelu on vapaampaa. 2000-luvun alussa sähköisiä seisontajarruja käytettiin vain kalliissa autoissa, mutta nykyisin jo ylemmän keskiluokan autoissa voi olla sähköinen seisontajarru.

4.5 Lainsäädäntö

Jarruja koskevia standardeja laatii esim. ISO ja DIN.

4.5.1 YK:n normit (tulevat määrääviksi 2014)

ECE R13 (Braking on vehicles of categories M, N and O)

ECE R13-H (Braking of passenger cars M1)

-Jarruihin liittyvää termistöä (molemmissa ylläolevissa normeissa)

- Hyväksyntä (molemmissa ylläolevissa normeissa)
- Merkinnät (molemmissa ylläolevissa normeissa)
- Testaus (molemmissa ylläolevissa normeissa)
- Jarrujärjestelmän modifiointi ja hyväksynnän jatkaminen (molemmissa ylläolevissa normeissa)
- Jarrujärjestelmän ja lisäjärjestelmien vaatimuksia (specifications) (molemmissa ylläolevissa normeissa)

(United Nations Economic Commission for Europe)

4.5.2 EU-Direktiivi (kumoutuu 2014)

71/320/EEC (approximation of the laws of the Member States relating to the braking devices of certain categories of motor vehicles and their trailers)

- Jarrujärjestelmän määritelmät, rakenne- ja asennusvaatimukset
- Jarrujärjestelmän ominaisuudet (hydraulinen ja pneumaattinen)
- Jarrutestit ja jarrulaitteiden teho
- Testaus
- Hyväksyntä

Direktiivi 71/3203/EEC kumoutuu vuonna 2014 direktiivillä EC 661/2009

(General safety of vehicles). (European Commission)

4.5.3 USA:n lakivaatimukset

49 C.F.R Part 571- Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS), Subpart B §571.106 (Brake hoses)

- Merkinnät
- Suorituskykyvaatimukset (jarruletkut, kokoonpanot, ja sovitteet)
- Testaus

§571.116 (Motor vehicle brake fluids)

- Hydraulisen jarrujärjestelmän jarrunesteet
- Jarrunestesäiliöt ja niiden merkinnät

§571.135 (Light vehicle braking systems)

- Käyttö- ja seisontajarrujen vaatimukset
- Vastaavat ECE R13:a

(US Law. 49 C.F.R Part 571)

4.5.4 Kanadan lakivaatimukset

Motor Vehicle Safety Regulations (C.R.C.,c 1038), Part 2

Standard 105 (Hydraulic and electric brake systems)

- Standardia 135 vastaavat vaatimukset (Multipurpose vehicles, trucks, buses)

Standard 106 (Brake hoses)

- Merkinnät
- Suorituskykyvaatimukset (jarruletkut, kokoonpanot, ja sovitteet)

- Testaus
 - Standard 116 (Motor vehicle brake fluids)
 - Hydraulisen jarrujärjestelmän jarrunesteet
 - Jarrunestesäiliöt ja niiden merkinnät
 - Standard 135 (Light vehicle brake systems)
 - Käyttö- ja seisontajarrujen vaatimukset
 - Vastaavat ECE R13:a
- (Motor Vehicle Safety Regulations, C.R.C., c. 1038, Part 2)

5 JOUSITUS

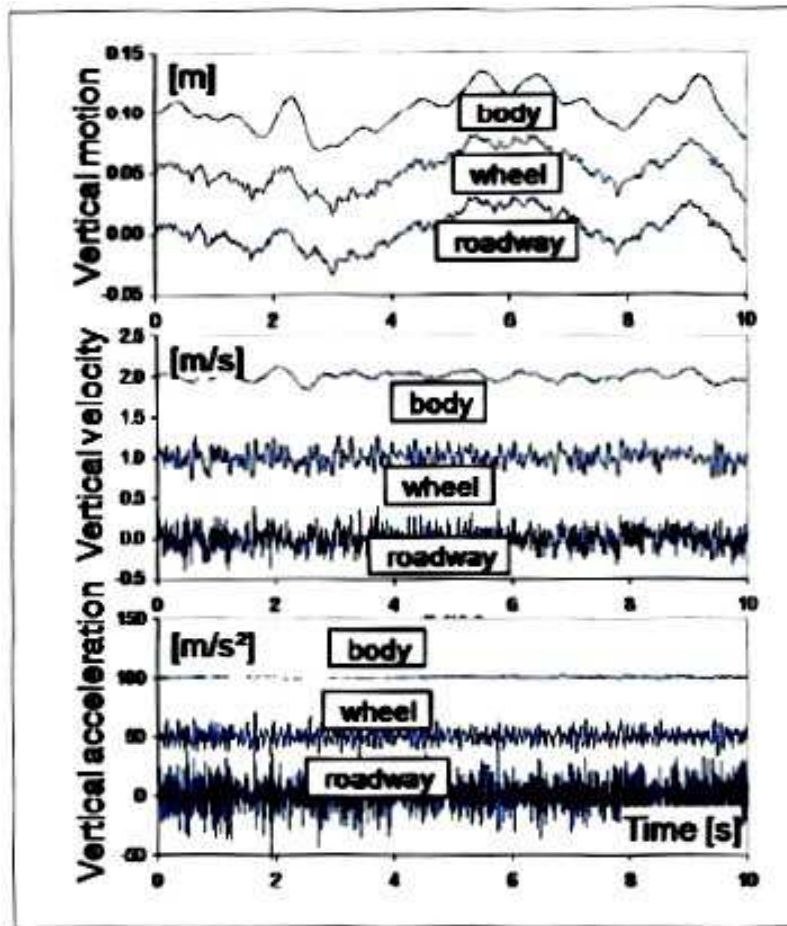
5.1 Historia

Ihmisen sietokyvyn ja ajomukavuuden takia yli 30 km/h nopeudet vaativat jonkinlaista jousitusta. Hevoskärryissä eristettiin jousitettu ja jousittamaton massa toisistaan ensimmäistä kertaa 900-luvulla ripustamalla matkustamo ketjujen varassa alustaan. Vaunun akseleilla oli elliptiset (kaksois)lehtijouset. 1700-luvulla lehtijousista kehitettiin itsevaimentavat. Ensimmäiset kierrejouset olivat vaunukäytössä jo 1703. Progressiiviset kierrejouset autokäytössä esiteltiin 1959 Lloyd Arabellassa. 1978 Opelin toimesta esiteltiin ensimmäinen muuttuvahalkaisijainen ”miniblock”-jousi. Jatkuvan materiaali- ja valmistusmenetelmien kehityksen ansiosta jouset ovat sittemmin muuttuneet yhä pienemmiksi. Pneumaattisia jousia käytettiin ensimmäisen kerran jo 1845 hevosvaunuissa ja hydropneumaattisia jousia jo 1816 George Stephensonin vetureissa. Autokäyttöön pneumaattiset jouset tulivat 1920-luvulla. Citroen tarjosi hydropneumaattisia jousia erikoisvarusteina (Traction avant) viimeisiin 15 CV-malleihin ja jakiovarusteina DS:ään 1955. Ilmajousia on käytetty 1930-luvulta lähtien ja ne ovat henkilöautokäytössä nykyisin lähinnä luksusautojen varusteita. (Heißing & Ersoy 2011, 3, 5, 226.)

5.2 Yleistieto

Jouset vaikuttavat autossa sekä ajomukavuuteen, että turvallisuuteen. Jousien kuuluu taata matkustajille mukava olo auton sisällä ja lisäksi suojata korirakenteita tien heräteiskuilta. (Heißing & Ersoy 2011, 421.) Ajoneuvossa

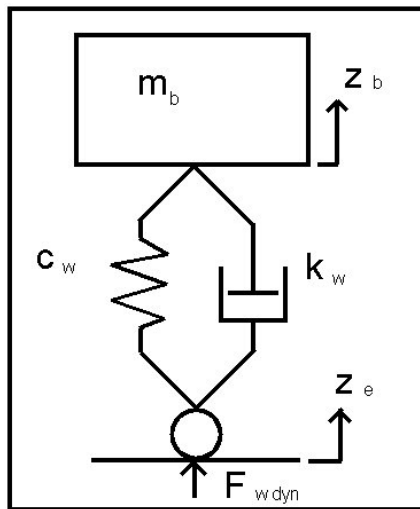
matkustaviin ihmisiin kohdistuvien mekaanisten ja akustisten värähtelyjen tutkimisessa käytetään termiä NVH (noise, vibration and harshness) (Heiðing & Ersoy 2011, 421). Kuvaajasta 4 nähdään jousituksen sekä penkin aiheuttama vaikutus heilahtelun välitykseen.



Kuvaaja 4. Tien herätteen aiheuttama kiihtyvyys (alinnä), pystynopeus (keskellä), ja pystysuuntainen liike (ylinnä) (Heiðing & Ersoy 2011, 79)

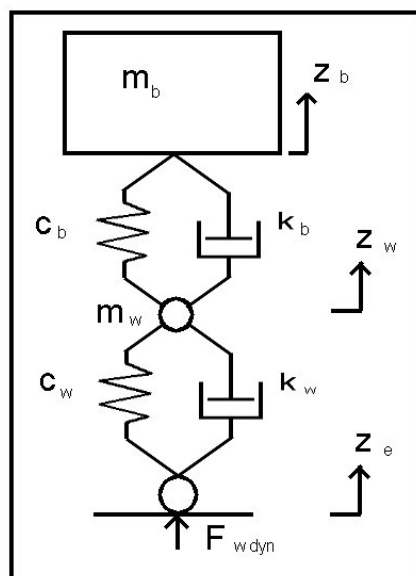
Jousituksen korkeussuuntaisessa laskennassa on useita eri malleja. Jokaista pyörää käsitellään jousittamattoman- ja jousitetun massan yhdistelmänä. Autoa voi tarkastella kokoautomallina (neljä pyörää ja jousitettu massa), puoliautomallina (etu- ja takapyörät sekä jousitettu massa) tai neljännesautomallina (jousittamaton massa ja jousitettu massa). Jokaista pyörää käsitellään jousittamattoman- ja jousitetun massan yhdistelmänä. Yksinkertaisuuden vuoksi tarkastellaan esimerkissä neljännesautomallia.

Jousituksen voi mallintaa yksimassasysteeminä, jolloin karkeasti jousi erottaa auton korin ja jousittamattoman massan. Kuva 11 esittää yksimassatarkastelua.



Kuva 11. Yksimassamalli: m_b =korin massa, z_b =korin joustoliike, c_w =jousen jousivakio, k_w =vaimentimen vaimennusvakio, $F_{w\text{dyn}}$ =pyörän dynaaminen voima, z_e =pyörän joustoliike

Kaksimassamallissa on eroteltu kori ja rengas omina massasysteemeinään (rengas ajatellaan kaasujousena). Kaksimassamalli näkyy kuvassa 12.

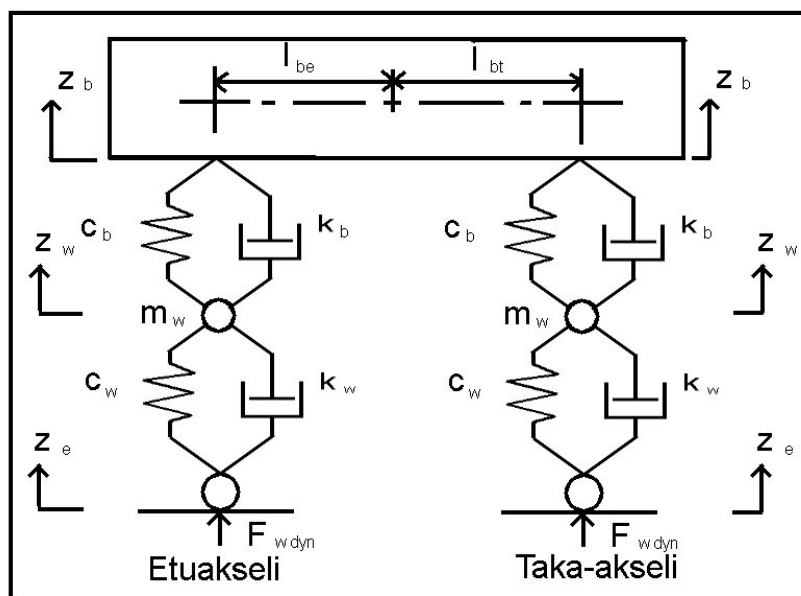


Kuva 12. Kaksimassamalli: m_b =korin massa, z_b =korin joustoliike, c_b =jousen jousivakio, k_b =vaimentimen vaimennusvakio, c_w =renkaan jousivakio,

k_w =renkaan vaimennusvakio, z_w =pyörän joustoliike, $F_{w\text{dyn}}$ =pyörän dynaaminen voima, z_e =renkaan joustoliike

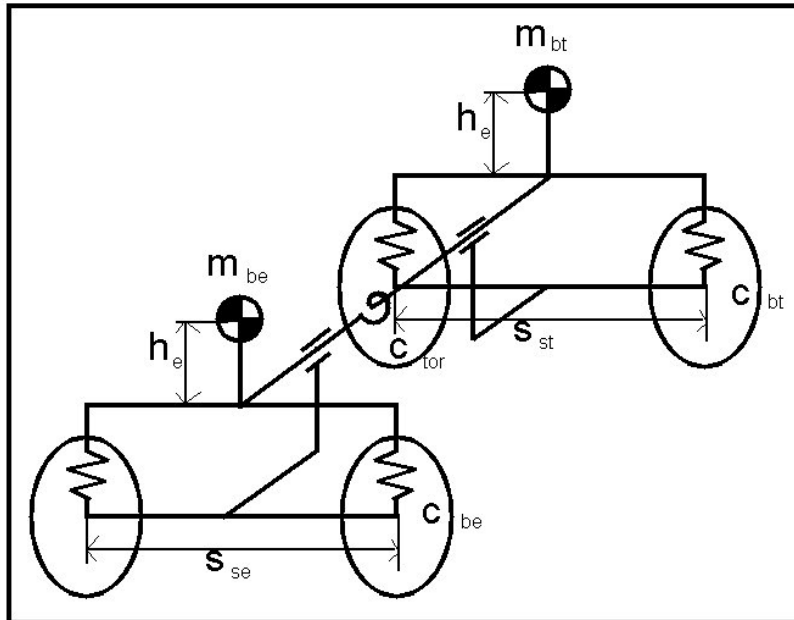
Jos tarkastelua halutaan laajentaa kuljettajaan asti, voidaan lisätä penkin joustava vaikutus mukaan samalla periaatteella (kolmimassamalli) (Heißing & Ersoy 2011, 74—76).

Kun auton massaa ei enää oleteta pistemäisenä, voidaan jousitusta tarkastella yksi- tai kaksiraidemallina, jossa auton halkileikkauksen suhteen otetaan huomioon pituussuuntaiset voimat. Jousitettu massa ajatellaan palkin muodossa ja jousittamattomina massoina ovat etu- ja taka-akseli. Etu- ja taka-akselin ominaistajuudet eivät saisi olla yhtenevät, sillä muuten auto suosii nyökkivää liikettä. Taka-akselin vaste täytyy olla nopeampi jotta tiestä tuleva heräte ei yleisimmillä nopeuksilla osu etuakselin kanssa vastakkaiseen heilahdusvaiheeseen. Kuva 13 esittää yksiraidemallia.



Kuva 13. Yksiraidemalli: b_e =etuakselin etäisyys painopisteestä, b_t =taka-akselin etäisyys painopisteestä, z_b =korin joustoliike, c_b =jousen jousivakio, k_b =vaimentimen vaimennusvakio, c_w =renkaan jousivakio, k_w =renkaan vaimennusvakio, z_w =pyörän joustoliike, $F_{w\text{dyn}}$ =pyörän dynaaminen voima, z_e =renkaan joustoliike

Kaksiraidemallissa huomioidaan yksiraidemallin lisäksi kallistusliike. Etu- ja taka-akselit voivat olla mallissa lisäksi x-akselin ympäri mallinnetulla vääntäjousella toisiinsa kytkettyjä. Kuva 14 esittää ko. tilannetta. (Heiðing & Ersoy 2011, 76—79.)



Kuva 14. Kaksiraidemalli: m_{be} =etuakselin painopiste, m_{bt} =taka-akselin painopiste, h_e = etuakselin painopisteen korkeus kallistusakselista, h_t = taka-akselin painopisteen korkeus kallistusakselista, c_{be} =etujousen jousivakio, s_{se} =eturaideväli, c_{bt} =takajousen jousivakio, s_{st} =takaraideväli c_{tor} =korin vääntäjykyys

5.3 Vaikutus ajo-ominaisuuksiin

Jousituksen päätarkoitus on lisätä ajomukavuutta. Ihmiseen ja autoon vaikuttavat värähtelyt kulkeutuvat tien herätteestä renkaan ja jousen kautta apurunkoon, apurungosta rungon kautta penkkiin, ja penkin kautta ihmiseen. Akustista värinää aiheutuu noin 100Hz taajuuksilla, heilahtelua noin alle 10Hz taajuuksilla. Niiden välillä on siirtymäalue (karkeusalue). NVH- ja ajomukavuustekijöihin vaikuttavat renkaan ja jousien lisäksi alustan nivelten joustavat elementit (puslat). Heiðing & Ersoyn (2011, 422) mukaan tehty ajomukavuuteen vaikuttavien taajuuksien ”kartta” nähdään taulukosta 1.

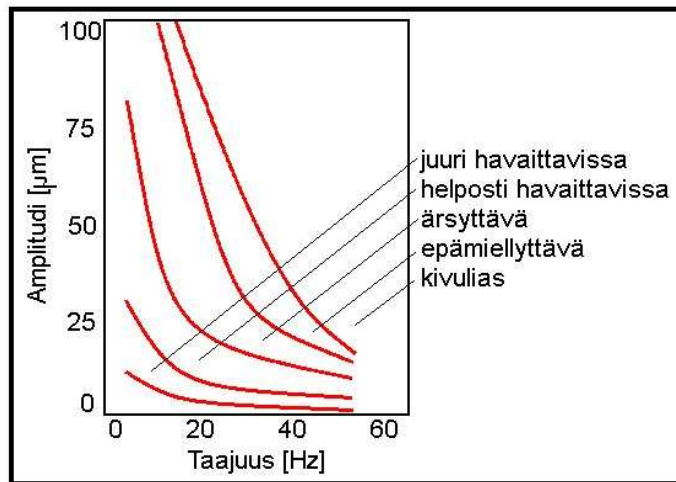
Värähtelyn luonne	Taajuus [Hz]		Herätteet		
	min	max	tienpinta	epätasapaino	moottori
korin värähtelyt	0,5	5	++		
maantiepomppu	2	5	++		
korin etu/taka kompensointi	4	10			++
ravistelu	7	15	++	+	
akselin etu/taka värähtely	10	15	++	+	
ferraria-efekti	8	20			++
rattiin välittyvät iskut	10	20		++	
vipotus (shimmy)				++	
kalina	7	25			
jarrujen "jurina"	15	25		++	
tutina	15	40			++
korin hurina	30	70	++	+	++
akselin karheus (harshness)	30	80	++		
vierintä	30	300	++		
voimalinjan melu	70	1000			++

Taulukko 1. Auton ajomukavuuteen vaikuttavia taajuuksia ja niitä aiheuttavat herätteet

Ihmisen värähtelynsietokykyä ei voida yksiselitteisesti määrittää, mutta suuntaa antava kuvaaja voidaan muodostaa sen perusteella, minkä taajuinen ja kuinka voimakas värähtely on ruumiillisesti havaittavissa tai siedettävissä. Myös värähtelyjen kestoaika vaikuttaa sietokykyyn. Käyriä esitetään Heiβing & Ersoyn (2011, 423) mukaan tehdyssä kuvaajassa 5. Ihmiskehon ominaisvärähtelytaajuudet, joita auton osien suunnittelussa tulisi välttää, on esitetty Heiβing & Ersoyn (2011, 423) mukaan tehdyssä taulukossa 2. Lisäksi yleisesti jatkuva noin 0,5-0,75Hz heilahtelu aiheuttaa pahoinvointia. Pystysuuntaisen värähtelyn lisäksi etenkin korkean painopisteen autoissa, (kuten SUV:t) on tärkeä huomioida erityisesti päähän kohdistuva kallistelu- ja nyökkimisliikkeiden tuottama värähtely. Akustinen värähtely vaikuttaa myös ajomukavuuteen, sekä ihmisen sietokykyyn. Autot tuottavat sisätilaan

äänenpainetta suunnilleen luksusautojen 58dB:stä economy-luokan 69dB:iin. (Heißing & Ersoy 2011, 421—426.)

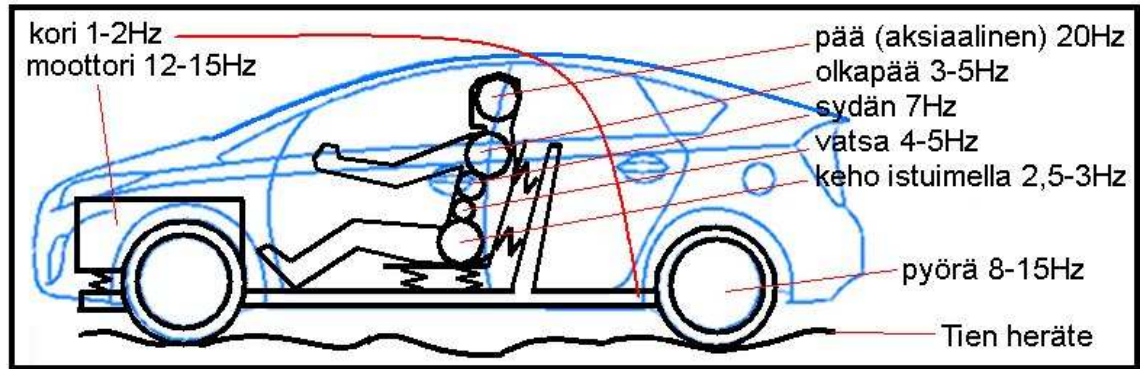
Ajomukavuus ja suorituskyky ovat yleensä toistensa vastakohtat. Auton ominaisuudet suunnitellaan sen markkina-alueen mukaan ja parametrien muuttamisella niitä voidaan hienosäätää toivottuun suuntaan. Kuva 15 esittää kuljettajaan kohdistuvien värähtelyjen yleiskaavion. Komponentteja, joilla värähtelyominaisuuksia voidaan säätää, ovat renkaat, jouset, vakaajat, iskun- ja värinänvaimentimet, alustaelektronikka, puslat, korin paikallinen ja yleinen jäykkyys, äänenvaimennusmateriaalit ja istuin. Hienosäätönä puslien vaihto on yleisin suositeltu menetelmä. (Heißing & Ersoy 2011, 421—426.) Liite 1 listaa auton suurpiirteisiä ominaisvärähtelytaajuuksia sekä herätteitä.



Kuvaaja 5. Ihmisen värähtelynsietokyky

Taajuus [Hz]	Ruumiinosa
~25	pää (aksaalinen)
18—200	pää (sivusuuntainen)
4—5	olkapää
~60	rinta
10—12	selkäranka
4—8	vatsa
16—30	kyynärvarsi
50—200	kämmen
~2	jalka

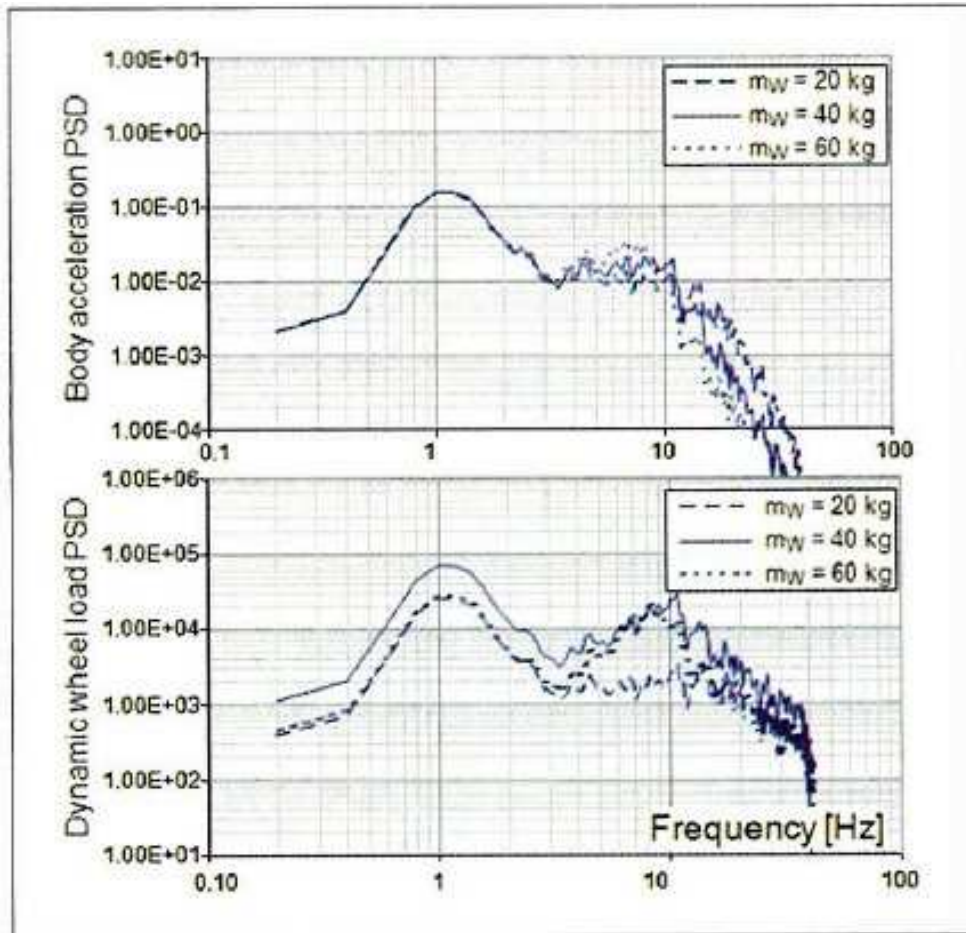
Taulukko 2. Ihmisruumiin osien ominaistaajuuksia



Kuva 15. Yleismalli kuljettajaan kohdistuvista värähtelyistä

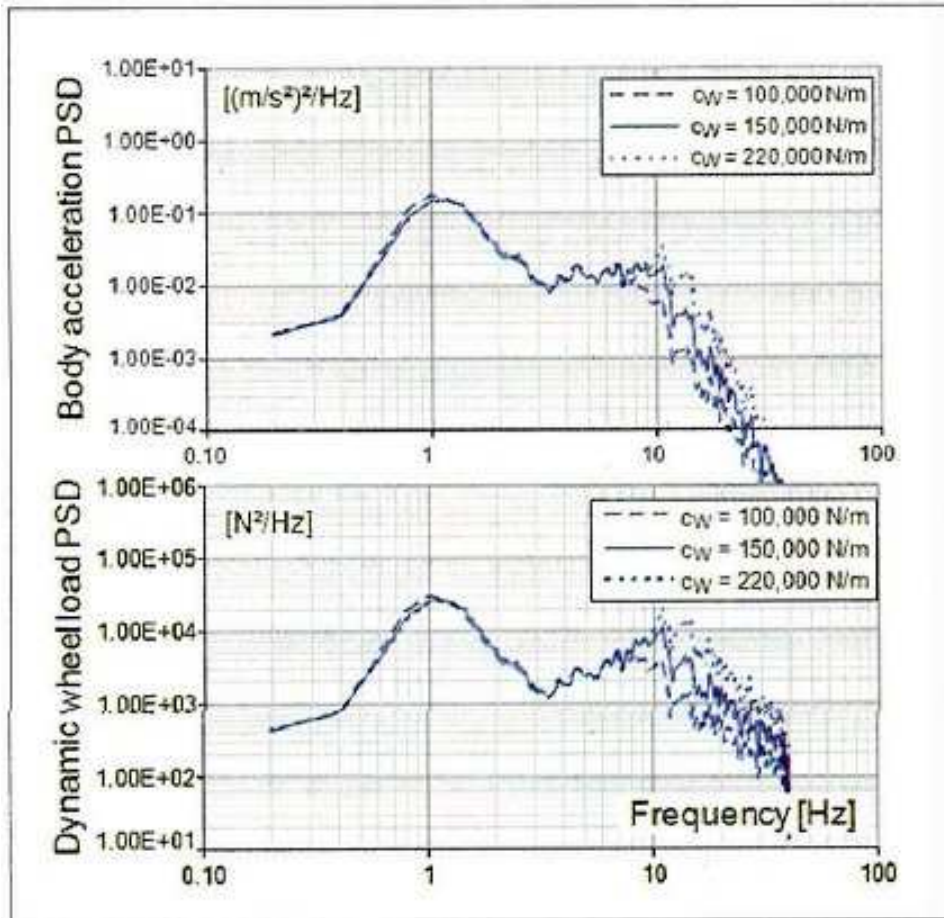
5.3.1 Suunnitteluparametrien vaikutus

Kaksimassamallia voidaan käyttää apuna suunniteltaessa ja säädettäessä korin värähtelyominaisuuksia. Auton korilla on käytännössä kaksi värähtelypiikkiä: jousituksen ominaistajuus sekä renkaiden ominaistajuus. Jousittamattoman massan vähentäminen vaikuttaa ajoturvallisuuteen ja ajotuntumaan parantavasti koska pyörä pysyy paremmin tiessä kiinni. Matkustamon mukavuuteen tämä ei vaikuta. Pyörän massan keventämisen vaikutus dynaamiseen pyöräkuormaan esitetään kuvaajassa 6. Ajoneuvon alustan suorituskyvyn kannalta tärkeä tavoite on pitää jousittamaton massa niin pienenä kuin mahdollista. (Heißing & Ersoy 2011, 67—69.)



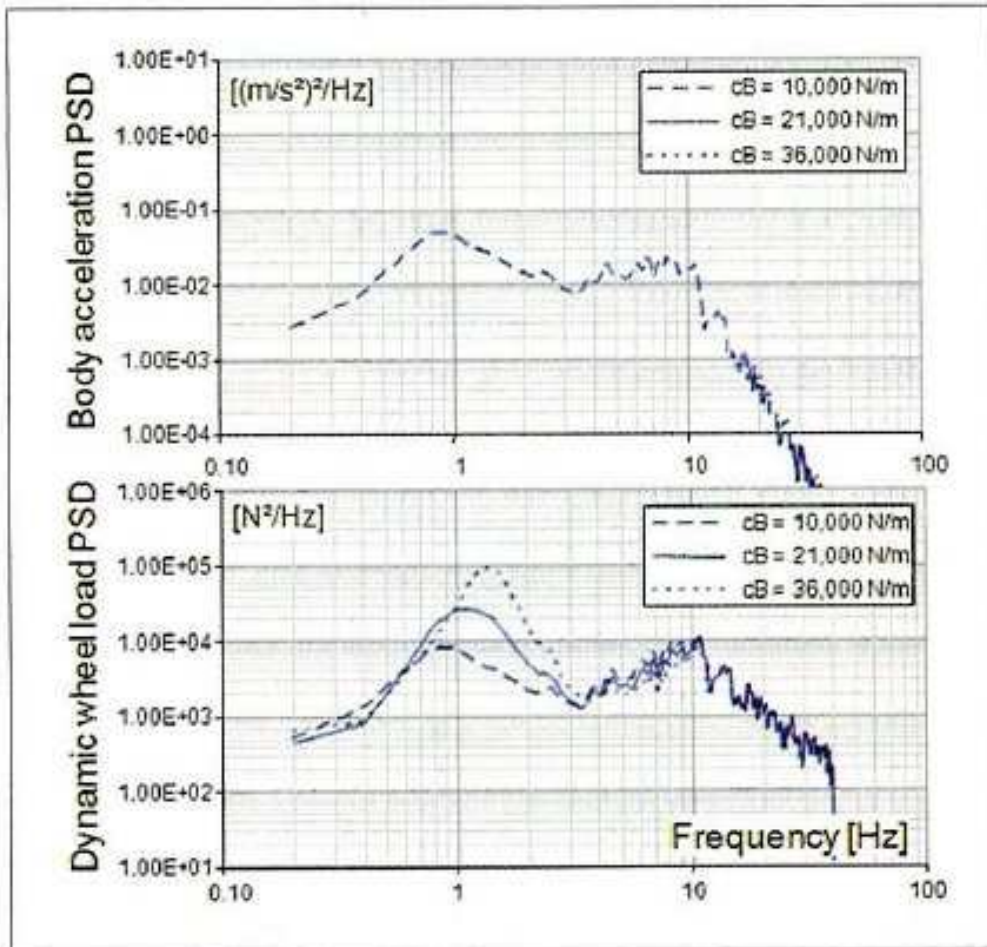
Kuvaaja 6. Jousittamattoman massan keventämisen vaikutus dynaamisiin pyöräkuormiin esimerkkitiennäällä (PSD) (Heißing & Ersoy 2011, 80)

Rengaspaineen vaikutus korin värähtelyyn on myös mitätön, mutta matala rengaspaine vähentää dynaamista pyöräkuormaa renkaan resonanssitaajuudella ja parantaisi näin ollen turvallisuutta ja ajettavuutta (kuvaaja 7). Toisaalta korkea rengaspaine parantaa ohjattavuutta, vähentää vierintävastusta ja parantaa polttoainetaloudellisuutta, joten rengaspaineen pudotus ei ole suositeltava vaihtoehto ajoturvallisuutta silmälläpitäen. (Heißing & Ersoy 2011, 67—69.)



Kuvaaja 7. Rengaspaineen vaikutus dynaamisiin pyöräkuormiin esimerkkietienpinnalla (PSD) (Heißing & Ersoy 2011, 80)

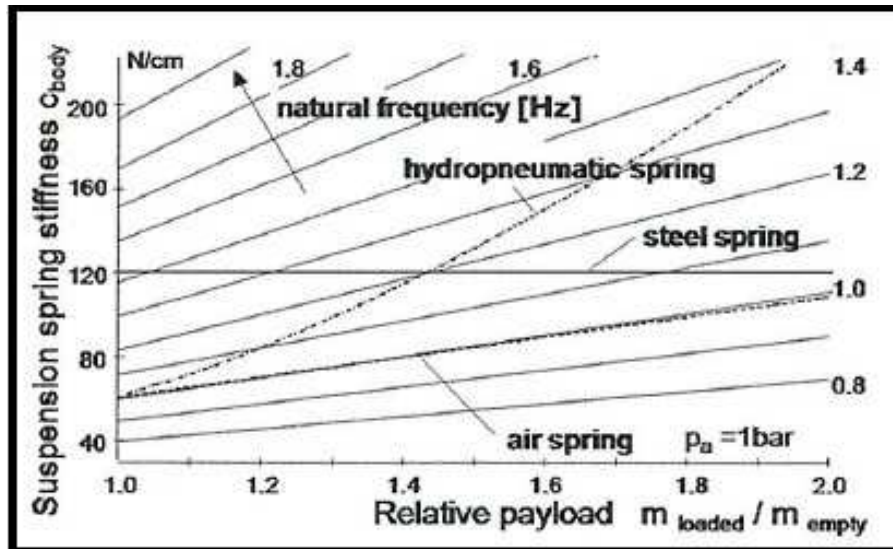
Jousen jäykistäminen vaikuttaa heikentäen ajomukavuutta nostamalla korin resonanssitaajuutta, mutta myös amplitudia. Pehmeä jousitus parantaa mukavuutta ja laskee korin ominaistaajuutta. Kuvaajan 8 mukaan myös dynaamiset pyöräkuormat laskevat jousitusta pehmentettäessä pienillä taajuuksilla. Ajettavuus tosin kärsii pehmeästä jousituksesta, koska nyökkimis- ja niausliikkeet sekä kallistelu ovat suuria. Lisäksi jousen liikematka ja lastauksen vaikutus liikematkkaan ovat rajoittavia tekijöitä pehmeydelle. Korkeilla taajuuksilla (kovilla ajonopeuksilla) jousen jäykistäminen parantaa turvallisuutta ja ajettavuutta. Liite 2 esittää jousituksen suunnittelusuureiden vaikutuksia. (Heißing & Ersoy 2011, 67—69.)



Kuvaaja 8. Jousivakion vaikutus dynaamisiin pyöräkuormiin esimerkkietienpinnalla (PSD). (Heißing & Ersoy 2011, 80)

Jousen joustojäykkyyttä sivuttiin renkaasta puhuttaessa. Jousivakio määritetään joustomatkan ja joustovoiman avulla $c = \frac{dF}{dz}$. Jousivoima välittyy pyörälle tuennasta riippuvalla välityssuhteella (jousen sijainti tukivarteen nähden). Välityssuhde on lähes aina alle 1, eli jousi sijaitsee korin tukipisteestä lyhemmän vipuvarren päässä, kuin pyörä. Jousisysteemin ominaisvärähtelytaajuus (resonanssitaajuus) määräytyy funktion $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$ mukaan, missä c on jousen jousivakio ja m jousitettu massa. Kuvaajasta 9 nähdään erilaisten jousien resonanssitaajuuksia. Ilmajousi on erikoistapaus, jonka ominaisuutena on lähes vakio resonanssitaajuus, koska siinä ilman

massaa muutetaan jousitetun massan muuttuessa. Vakioilavuuskaasujousella tai hydroelastisella jousella näin ei tapahdu. (Heißing & Ersoy 2011, 67—69.)



Kuvaaja 9. Eri jousityyppien ominaistajuuksien muutos kuormituksen muuttuessa (Heißing & Ersoy 2011, 69)

Bosch (2002, 676) listaa jousituksen suunnittelusuureiden vaikutuksia ajoneuvon pystyheilahteluun taulukossa 3.

Suunnittelu- suure	Vaikutus korin ominaistaajuus- alueella	Vaikutus keskitaajuus- aluoilla	Vaikutus jousituksen ominaistaajuuteen
Korin erittely Jousivakio	Suuri ajomukavuuteen	Kohtalainen ajomukavuuteen	Pieni käsittely- turvallisuuteen
kovempi	Taajuus ja amplitudi kasvavat, mukavuus vähenee		Taajuus kasvaa, amplitudi pienennee hieman
pehmeämpi	Taajuus ja amplitudi kasvavat, mukavuus kasvaa		Amplitudi lisääntyy hieman matalilla herätetaajuuksilla
Vaimennin vakiot	Merkittävä ajomukavuuteen		Merkittävä pyöränkuorman huojuntaan
suurempi (vaimennin kovempi)	Kiihtyvyys pienenee	Kiihtyvyys kasvaa	Kiihtyvyys kasvaa, dynaaminen pyöränkuorman huojunta vähenee
matalampi (vaimennin pehmeämpi)	Kiihtyvyys kasvaa	Kiihtyvyys pienenee	Amplitudi kasvaa hieman, pyöränkuorman huojunta kasvaa
Massa	Pieni vahvistus vaikutukseen tai pyöränkuorman huojuntaan; kun kuorma kasvaa, kiihtyvyyden vahvistusvaikutus pienenee. (Ajomukavuus on huono ja relatiivinen pyöränkuorman huojunta korkeampi ajoneuvon ollessa tyhjä kuin ajoneuvo kuormattuna).		
Pyörä- ja rengas- suureet Jousitus (renkaiden pehmentyessä)	Luonnollinen taajuus ja amplitudi eivät muutu juuri ollenkaan		Korin kiihtyvyyden ja pyörän- kuorman huojunnan luonnollinen taajuus ja amplitudi vähenevät karkeasti suhteessa renkaan pystysuuntaiseen jäykkyyteen
Vaimennus	Taajuus ja amplitudi eivät muutu renkaan vaimonnuksen muuttuessa		Korin kiihtyvyyden ja pyörän- kuorman huojunnan amplitudi vähenee minimaalisesti kovemmalla vaimennuksella
	Lämmön syntymisestä johtuen renkaan vaimennus tulisi pitää minimissä, jotta pehmeille renkaille voidaan sallia pitkä joustoliike		
Pyörän massa	Pyörän massan vähentäminen ei vaikuta juurikaan ajomukavuuteen		Pieni pyörän massa lisää käsittelyturvallisuutta

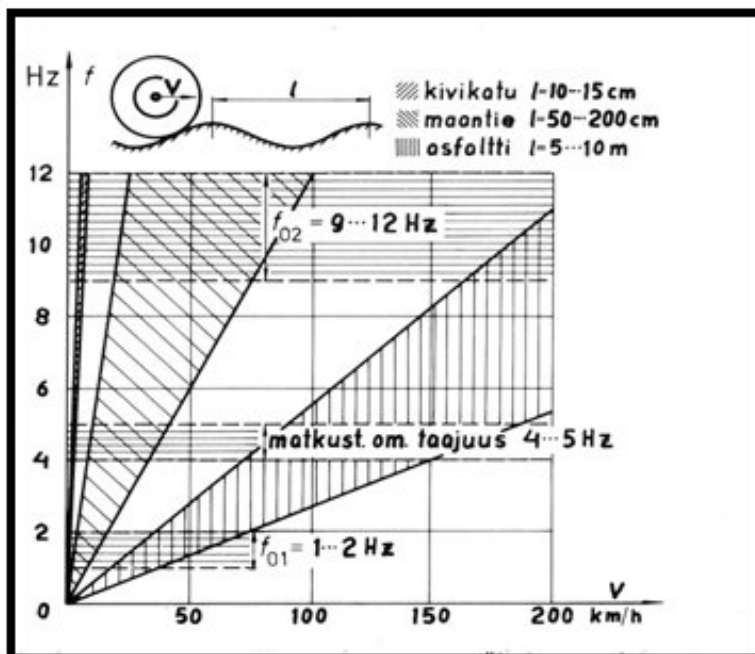
Taulukko 3. Jousituksen suunnitteluparametrien vaikutuksia pystyheilahteluun (Bosch 2002, 676)

Tienpinnan aiheuttama heräte vaihtelee yleensä 0-30Hz välillä ja on amplitudiltaan vaihtelevaa. Herätettä kuvataan yleensä matemaattisesti sinikäyrällä. Eri sinikäyrät kootaan yhteen ns. Fourier-sarjaksi (Fourier-analyysi), joka muodostaa realistisen matemaattisen mallin tien pinnasta. Lopputuloksesta voidaan koota taajuusspektri. Tien herätetaajuus ajan funktiona ei välttämättä ole yhtä tärkeä tieto, kuin se, mitä taajuuksia koetaan useimmin minkäkin tyyppisillä pinnoilla. Tienpinnan analysointi asteittain näkyy Heißing & Ersoyn (2011, 70) mukaisesti tehdyssä taulukossa 4. Kuva 16 esittää

tyypillisiä (ennen vuotta 1981 kerättyjä) tienpinnan herätetaajuuksia ajonopeudesta riippuen. (Heißing & Ersoy 2011, 70—73.)



Taulukko 4. Tien pinnan simulointimalli



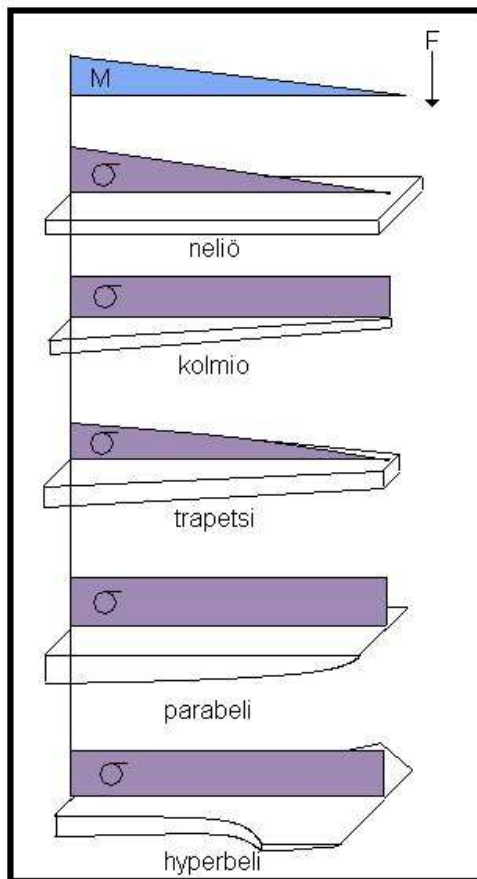
Kuva 16. Eriáisten tienpintojen heráteáajuuksia ajonopeuden mukaan (Laine 1981, 181)

Akselin resonanssitaajuus vaihtelee pääasiassa välillä 12-15Hz ja korin resonanssitaajuus 1-2Hz (Bosch, 2002, 677). Yleisesti korin ominaisvärähtelytaajuus pyritään pitämään noin 1Hz suuruisena. 2-10Hz värähtelyjä tulisi välttää ihmisen sietokyvyn perusteella. (Heiðing & Ersoy 2011, 86.)

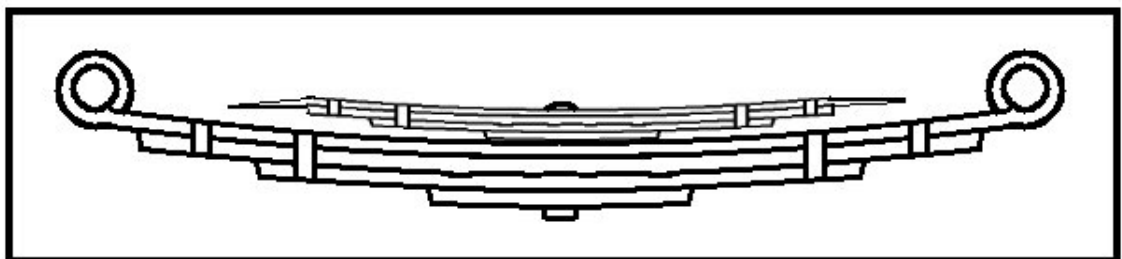
5.4 Tyypit ja rakenne

5.4.1 Lehtijousi

Vanhin jousiratkaisu on lehtijousi. Monikerroksiset lehtijouset ovat halvin ja äärimmäisen robusti sekä luotettava rakenneratkaisu. Lehtijousia löytyy nykyisin harvoin henkilöautoista, sen sijaan hyötyajoneuvot suosivat vielä niitä. Lehtijousen eräs etu on se, että jousi voi toimia yksinään akselin pituussuuntaisena tukielementtinä. Kevyissä tavarankuljetusautoissa (esim. VW Caddy) tai joissakin tila-autoissa (esim. Chrysler Voyager) käytetään yksilehtisiä jousia taka-akselilla. Monilehtisen jousen pakka on itsevalmentava rakenne, koska jokaisen levyn välinen suhteellinen liike aiheuttaa kitkavoimaa. (Heiðing & Ersoy 2011, 227.) Tätä kitkavoimaa voidaan säätää lehtien väliin asennettavilla kumi- tai muovikappaleilla. Pisimmän lehden päät on muotoiltu silmukoiksi ja ne laakeroidaan liukulaakereilla, kierretapeilla, tai kumiholkeilla runkoon (Vesterinen 2010, Jouset, 14). Lehtijousen muodolla on merkitys sen ominaisuuksiin. Kuvassa 17 näkyy erimuotoisten lehtien jännitys jakauma kiinnitetystä päästä vapaaseen päähän. Autossa lehtijousen jännitys on yleensä vakio koko joustomatalla. Progressiivisia lehtijousipakkoja käytetään hyötyajoneuvoissa suurimman mahdollisen hyötykuorman mahdollistamiseksi. Progressiivisuus tehdään käyttämällä toista jousipakkaa apujousena (kuva 18). (Heiðing & Ersoy 2011, 227—229.)



Kuva 17. Eri lehtijousirakenteiden jännitysjaakaumat



Kuva 18. Apujousi lehtijousessa

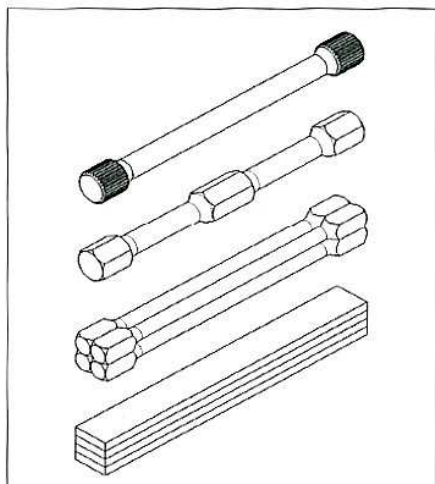
Lehtijousen materiaali on yleisesti teräs, mutta myös komposiittirakenne on lupaava sovellus etenkin kevyen kaluston tarpeisiin (esim. Henkilöautot ja perävaunut). Komposiittijousi on teräksistä kevyempi. Sen korroosionkesto on äärimmäisen hyvä ja hajotessaan se ei heti mene poikki, vaan synnyttää ensin

pitkittäisiä halkeamia. Lasikuitulehtijousi on käytössä esim. Chevrolet Corvetessa molemmilla akseleilla poikittain asennettuna.

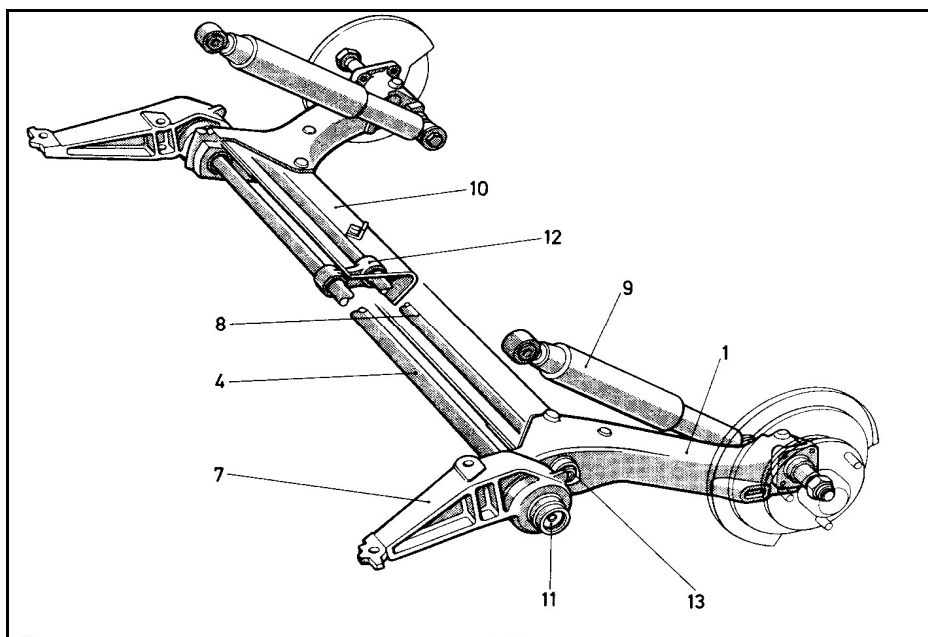
5.4.2 Vääntötankojousi

Lehtijousi käyttää hyväkseen metallin taivutusjännitystä, kun taas vääntöjousen toimintaperiaate on vääntösuuntainen leikkausjännitys. Leikkausjännitys on tasapaksulla tangolla vakio. Vääntöjousi on yleensä ympyrähalkaisijainen tanko- tai kierrejousi. Vääntöjousen työkyky on suurin mahdollinen, koska ainoastaan tangon keskiakseliin ei kohdistu jännitystä (Vesterinen 2010, Jouset, 55).

Vääntötankojousi on suora tanko, joka on molemmista päästään kiinteästi tuettu. Toinen pää kiinnitetään yleensä tukivarren juureen ja toinen pää runkoon. Tanko voi olla kiinteä tai ontto. Tankoja voi pakkausteknisistä syistä olla usea kappale samassa pakassa. Erilaisia rakenneratkaisuja nähdään kuvassa 19. Vääntötangon jännitystä voidaan pitää lineaarisena, mutta jos kyseessä on usean tangon pakka, tulee laskennassa huomioida puhtaan väännön lisäksi venymäjännitys, sillä pakan jokainen tanko ei voi olla vääntömomentin keskipisteessä. Jos kyseessä on levypakka, tulee levyjen välinen hystereesikitka huomioida, kuten lehtijousessakin. Vääntötankojousen ominaisuuksia hyödynnetään yleisesti kallistuksenvakaajana tai puolijäykän akselistorakenteen poikittaistukena, mutta vääntötankoja käyttävät myös henkilöautot ja pakettiautot lähinnä korkeussuuntaisen tilan säästämiseksi. (Heiðing & Ersoy 2011, 230—231.) Mikäli käytetään onttoa tankoa ja profiilista tehdään ympyrän sijaan U-muotoinen, saadaan vääntöjännitys pudotettua murto-osaan. Tämä ratkaisu on yleinen puolijäykän akselin yhdystukirakenteena. Tanko voi olla sijoitettu poikittais- tai pituussuunnassa, mutta myös vinottain tuetussa rakenteessa (semi-trailing arm) sitä voi jossain tapauksessa käyttää (Heiðing & Ersoy 2011, 230). Esimerkkikuvassa 20 nähdään poikittainen vääntöjousiratkaisu puolijäykässä takatuennassa.



Kuva 19. Vääntötankojaousia (Heiðing & Ersoy 2011, 230)



Kuva 20. Vääntötankojaousi (Vesterinen 2010, Jouset, 46)

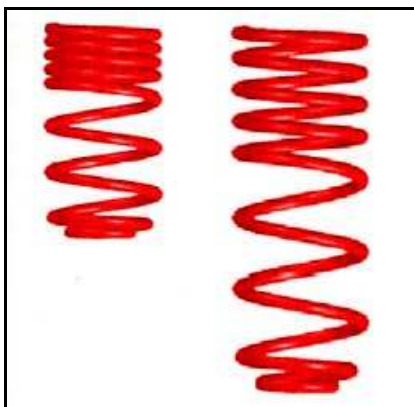
5.4.3 Kierrejaousi

Kierrejaousi on rakenteeltaan kierteen muotoon taivutettu vääntöjaousi. Se on vääntöjaousen yleisin sovellus ja yleisin henkilöautokäytössä oleva jousityyppi sen tehokkaan tilankäytön ja työkyvyn takia. Kierrejaousen huono puoli

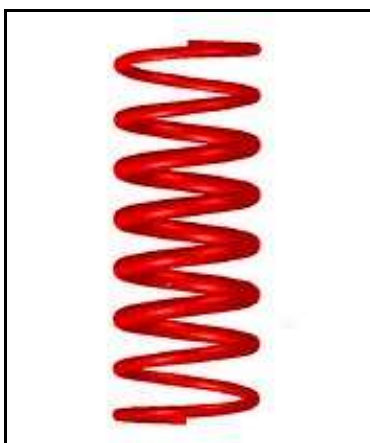
lehtijouseen verrattuna on, että se pystyy toimimaan ainoastaan pystysuuntaisena jousena, eikä tarjoa periaatteessa minkäänlaista tukea. Kierrejousi ei ole itsevaimentava rakenne, joten lisäksi pyörälle vaaditaan siis erilliset tukivarret sekä vaimennin. Kierrejousi on normaalisti lineaarinen jousi. Autokäytössä tavoitteena on progressiivisuus, ja onkin kehitetty useita ratkaisuja, joiden avulla tämä voidaan toteuttaa. Eräs ratkaisu on lehtijousen tavoin yhdistää kaksi kierrejousta joko rinnan tai sarjassa (kuva 21). Huomattavasti parempi ratkaisu on muuttaa yhden jousen mittoja. Kierteen nousua voidaan muuttaa, jolloin osa kierteistä pohjaa ennen muita aiheuttaen voiman jakautumisen pienemmälle määrälle kierroksia (eli ”lyhyemmälle vääntötangolle”) loppujoustossa (kuva 22). Kaksi muuta yleistä ratkaisua on muuttaa jousilangan halkaisijaa (kuva 23) tai kierteen halkaisijaa (kuva 24). Ns. Miniblock-jousi yhdistää kaikki kolme viimeistä ratkaisua. Muutettaessa yhden jousen ominaisuuksia säästetään painoa ja minimoidaan kustannukset. Ratkaisut, joissa osa kierteistä pääsee pohjaamaan, saattaa aiheuttaa ylimääräistä melua tai värinöitä sekä kuluttaa jousilangan korroosiosuojakerrosta. Koko materiaalin työkyvyn optimointi on tehokkainta muutettaessa jousilangan halkaisijaa tai kierteen halkaisijaa. Miniblock-jousella on etuina, että se mahtuu pieneen tilaan, sillä kierteet painuvat joustossa toistensa sisään, eivätkä kierteet kosketa toisiaan joustossa. Useiden henkilöautojen takajousituksessa käytetään miniblock-jousta ja erillistä vaimenninta, tai coilover-yksikköä. (Heißing & Ersoy 2011, 239—241.)



Kuva 21. Jousien sarjaan- ja rinnankytkennät



Kuva 22. Muuttuva kierteen nousu

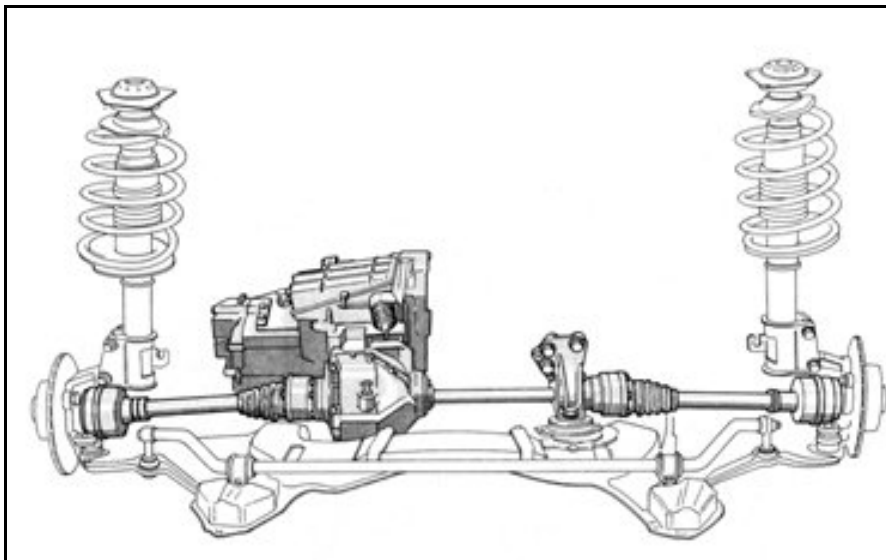


Kuva 23. Muuttuva jousilangan paksuus

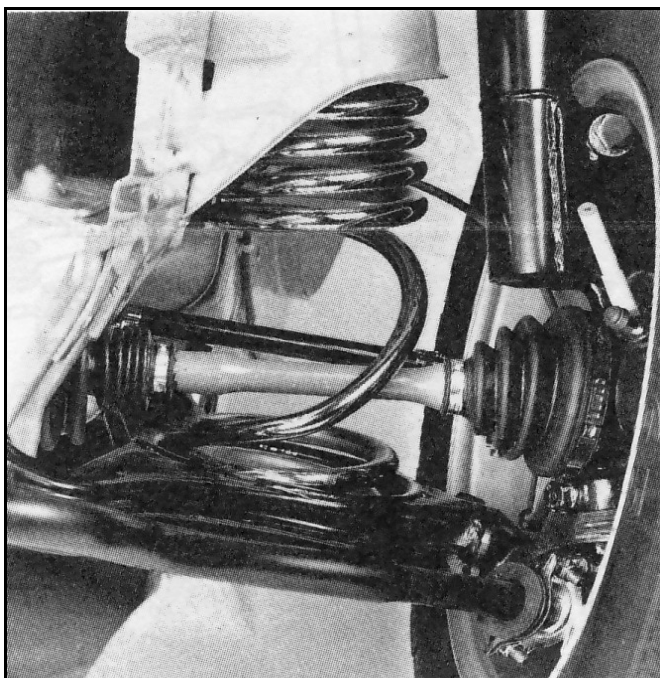


Kuva 24. Muuttuva kierteen halkaisija

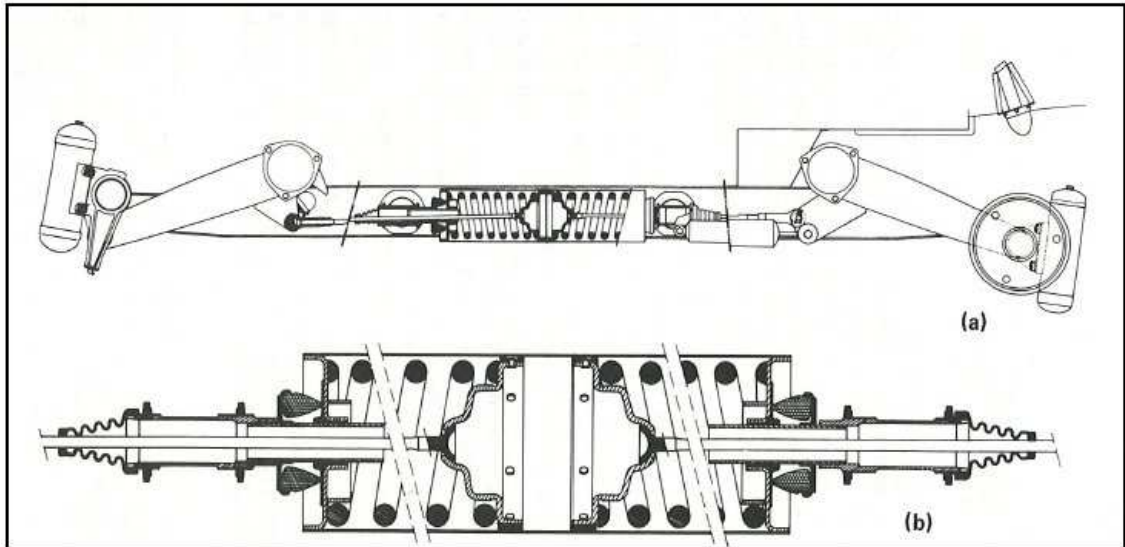
Erilaisia kierrejousisovelluksia nähdään kuvissa 25, 26 ja 27.



Kuva 25. Perinteinen joustintukiratkaisu, kierrejousi vaimennintolpan ympärillä (Reimpell ym. 2001, 49)



Kuva 26. Vetoakselia väistävä kierrejousi (Mercedes-Benz) (Vesterinen 2010, Jouset, 59)



Kuva 27. Citroën 2CV:n jousitus sivultapäin katsottuna. Pyörännapojen vierellä näkyvät massavaimentimet. (Bastow 1987, 247)

5.4.4 Kaasujousi

Kaasujousessa käytetään hyväksi kaasun kokoonpuristuvuutta tilavuudenmuutoksessa. Pehmeä jousi vaatii suuren tilavuuden. Kaasujousessa joustonopeus vaikuttaa jousivoimaan kaasun polytrooppisen tilanyhtälön

mukaan. Polytrooppinen tilanyhtälö on muotoa
$$F = \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{z}{h_t}} \right)^n \cdot p_1 - p_2 \right] \cdot A$$
,

missä

- p_1 = kaasun paine staattisella kuormalla
- p_2 = ulkoilman paine
- z = joustomatka
- h_t = teoreettinen jousen pituus

- A = jousen pinta-ala
- n = polytrooppivakio (1...1,4)

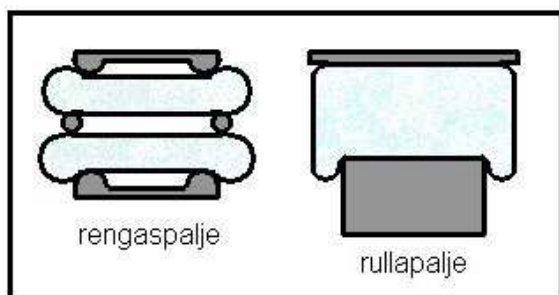
Nopeaa joustoa voidaan pitää adiabaattisena, jolloin polytrooppivakio on 1,4. Hidas jousto käsitellään isotermisenä, jolloin polytrooppivakio on 1. Kaasujousi jäykistyy jouston lisääntyessä, eikä sen ominaisvärähtelytaajuus ole vakio. Jäykkäminen kuorman alla rajoittaa sen käyttöä sellaisenaan henkilöautosovelluksissa. Yleensä kaasujousen rinnalla hyödynnetäänkin tasonsäätöä, jolla ominaistaajuus voidaan vakioida. (Vesterinen 2010, Jouset, 79—84.) Tasonsäätö voidaan toteuttaa joko muuttamalla kaasun määrää (ilmajousi) tai muuttamalla kaasun kokoonpuristuvuutta aiheuttavan nesteen määrää (hydroelastinen jousi). (Heißing & Ersoy 2011, 258).

Erikoistapaus kaasujousesta on ilmajousi. Ilmajousessa yhdistyy kaasujousi ja kumijousi. Ilmajousessa kaasun massa muuttuu. Tilavuus pidetään vakiona pumppaamalla kuormituksen kasvaessa jouseen lisää ilmaa. Vakiona pysyvä kaasun tilavuus muuttaa jousen jousivakiota kuorman mukaan ja pitää (korin)

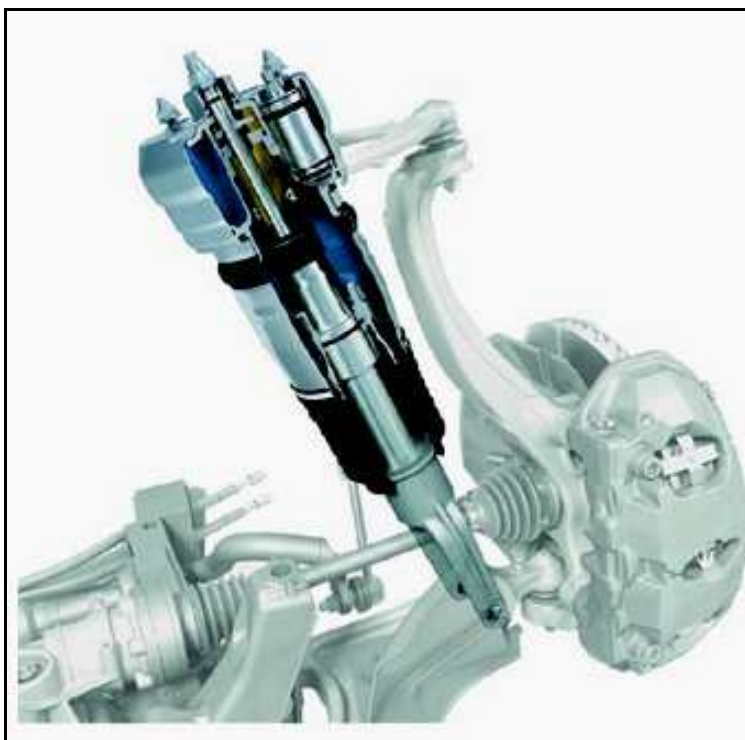
värähtelytaajuuden vakiona (koska $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$). Auton maavara säilyy vakiona

kaikilla kuormilla, koska tasonsäätö poistaa staattisesta kuormasta aiheutuvan joustomatkan. Ilmajousen hyviä puolia ovat ajomukavuus, tasonsäädön mahdollisuus ja pieni tierasitus. Ilmajousen kaksi rakennevaihtoehtoa ovat rengaspalje ja rullapalje (kuva 28). Raskas kalusto hyödyntää laajasti ilmajousia (koska niissä on paineilmajärjestelmä valmiiksi käytössä), mutta myös jotkin suuret luksushenkilöautot käyttävät ilmajousia. Paineilma otetaan tällöin huoltoasemalta tai se tuotetaan erillisellä kompressorilla. Yleisesti on järkevä sijoittaa ilmajousi ja vaimennin samaan yksikköön. Kuvassa 29 nähdään Audi A8:n etupyörän ilmajousi lähikuvassa. Kuva 30 esittää Porsche Panameran ilmajousijärjestelmää. Ilmajousen käyttö teräsrousen apujousena on henkilöautokäytössä yleisempi ratkaisu. (Vesterinen 2010, Jouset, 89-90, 104.) Ilmajousijärjestelmä on kallis toteuttaa, eikä sitä kannata nykyaikana tehdä, kuin luksusautoihin. Tulevaisuudessa on tarkoitus painottaa myös ilmavaimentimiin,

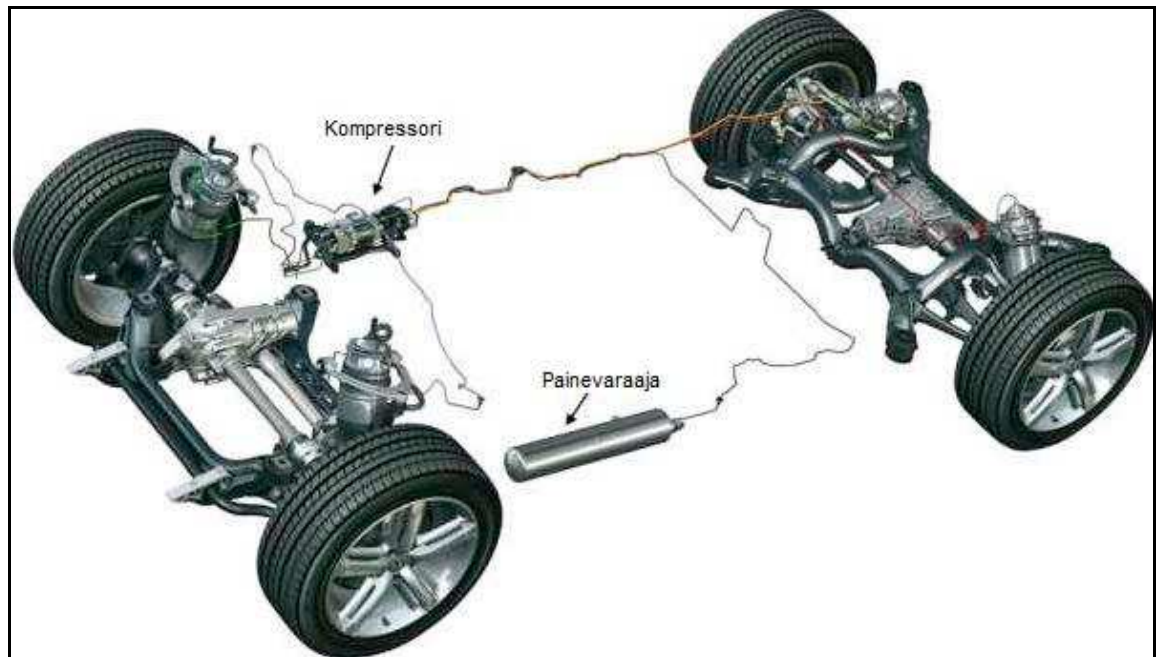
jotka voitaisiin helposti yhdistää ilmajousen kanssa samaksi yksiköksi. (Heißing & Ersoy 2011, 265—266.)



Kuva 28. Rengaspalje ja rullapalje



Kuva 29. Etuakselin ilmajousi-vaimenninyksikkö (Audi A8) (ATZ 09I2009 Jahrgang, 111)



Kuva 30. Ilmajousijärjestelmä (Porsche Panamera) (Saastamoinen 2011, 11)

Liite 10 esittää listan autoista, joihin on saatavilla tehdasvarusteisena ilmajousitus.

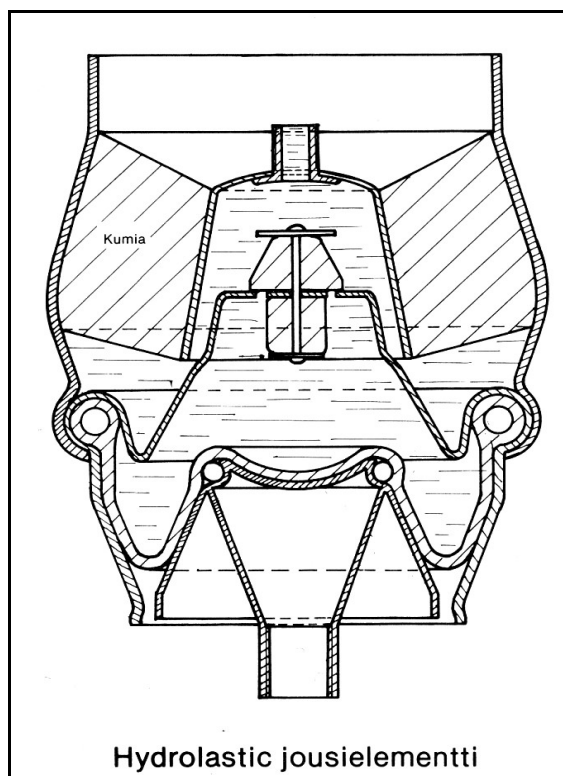
5.4.5 Kumijousi

Kumijousi toimii useimmiten pohjaamista suojaavana apujousena esim. perinteisen kierrejousen tai teleskooppi-iskunvaimentimen sisällä. Yleisin käyttökohte kumijouselle on nivelien kiinnitys- ja tukipuslana. Kumin joustomatka on erittäin lyhyt ja lämpötila vaikuttaa sen joustojäykkyyteen. Kumijoustusta käytetään joko leikkausjousena (vääntö) tai puristusjousena. Kumin hyvänä ominaisuutena on suuri työkyky pienessä tilassa. Eräs sovellus kumijouselle auton pääjousena onkin Axel Moultonin suunnittelema alkuperäisen Minin tilaa säästävä kumijousitus (kuvassa 31 esitetään jousielementti), jossa kumin pientä joustomatkaa hyödynnettiin pitkäväliitteisellä vivustolla. Kumijousi oli melko kovan tuntuinen ajaa.



Kuva 31. Kumijousielementti (Mini) (Vesterinen 2010, Jouset, 72)

Isossa Britanniassa on kumia käytetty pääjousena myös nestevälitteisenä. British Motor Corporation (BMC) kehitti Hydrolastic-jousituksen, jossa voima pyörältä siirtyy työntötangon välityksellä kalvomännälle, josta se jakautuu nesteen hydrostaattisen paineen avulla kumiselle jousielementille (kuva 32). Kumijousi toimii hydrolastic-jousessa sekä puristus- että leikkaussuunnassa.

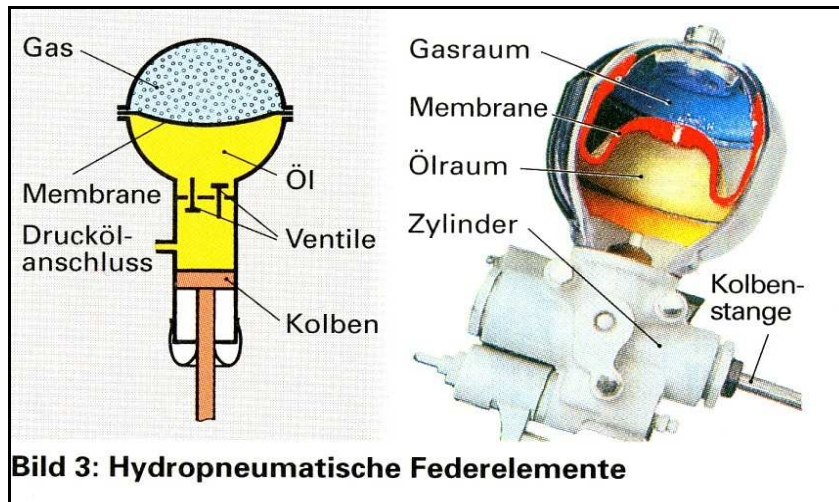


Kuva 32. Hydrolastic-jousielementti (BMC) (Laine 1981, 150)

Joustaessa kumin tilavuus pysyy vakiona, joten muodonmuutossuuntaa rajoittamalla pystytään lisäämään jousen jäykkyyttä. Kumi ei sovellu vetojouseksi. (Vesterinen 2010, Jouset, 70—76) Jatkuvan staattisen kuormituksen alaisena kumi kuoleentuu (Laine 1981, Autotekniikka osa 2, 144)

5.4.6 Hydropneumaattinen jousi

Hydropneumaattinen jousi välittää pyörältä tulevan joustoliikkeen nesteen ja kumisen kalvomännän välityksellä kaasun tilavuudenmuutostyöksi. Kaasun määrä on vakio, kuten kaasujousen tapauksessa (ja jousen jäykkyys voidaan laskea samalla tavalla). Hydropneumaattisessa jousessa kaasu toimii joustoelementtinä samalla tavalla, kuin hydrolastic-jousessa kumi. Neste toimii vaimentimena. Tasonsäätö hoidetaan hydraulipumpulla nesteen tilavuutta muuttamalla. Hydropneumaattista joustia käytetään usein taka-akselilla, koska se mahdollistaa tasonsäädön ja taka-akselin kuormaus vaihtelee etuakselia enemmän. (Vesterinen 2010, Jouset, 83.) Kuva 33 esittää tavallista hydropneumaattista jousiyksikköä. Ensimmäinen sarjavalmisteen auto, jossa hydropneumaattista joustia käytettiin joka pyörällä, oli 1950-luvun alun Citroën ID. Citroën on edelleen jatkanut hydropneumaattisen jousituksen käyttöä tähän päivään asti. Vesterinen (2010, Jouset, 85) lisää myös, että BMC kehitti edelleen hydrolastic-jousitusta hydropneumaattiseksi. Tässä Hydragas-jousessa etu- ja takaelementit olivat yhdistetty toisiinsa nestekanaavilla, jolloin etupään joustoliike siirsi nesteen painetta takapäähän nostaten tasonsäädön avulla takapään korkeutta. Tämä ominaisuus tasasi nyökkimisliikettä. Nykyisin ilmajousi tai itsepumppaava hydropneumaattinen ZF:n Nivomat ovat pitkälti korvanneet tavallisen hydropneumaattisen jousen luksusautoissa (Heißing & Ersoy 2011, 261).



Kuva 33. Hydro-pneumaattisen jousen toimintaperiaate (Vesterinen 2010, Jouset, 83)

5.5 Vertailu

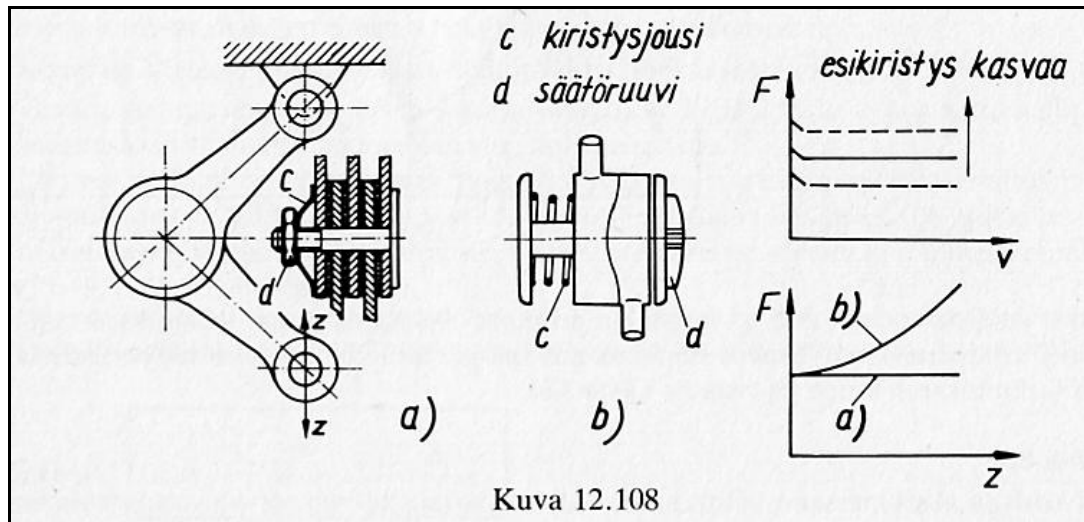
Yhteenvedon jousiratkaisuista voidaan sanoa, että tavallinen kierrejousi tulee hallitsemaan markkinoita pitkään sen hyvän työkyvyn, halvan hinnan ja yksinkertaisen rakenteen ansiosta. Se on integroitavissa iskunvaimentimen kanssa tarvittaessa samaan yksikköön. Lehtijousta käytetään laajalti hyötyajoneuvoissa. Lehtijousen tuennalliset ominaisuudet sekä matala tilantarve mahdollistavat suuren tavaratilan. Sovelluksia on muuallakin, kuin hyötyajoneuvokäytössä (etenkin kevyisiin autoihin soveltuvan komposiittitekniikan ansiosta). Vääntötankojousi on yksinkertainen rakenne, joka säästää korkeussuuntaista tilaa. Yleisin sovellus vääntötangolle on kallistuksenvakaajana toimiminen. Ratkaisu on yleinen myös pienien segmenttien autojen puolijäykässä taka-akselissa. Tällöin tanko on yleensä U-profiilinen putki. Kalliimpia ratkaisuja ovat tasonsäädöllä varustetut hydro-pneumaattiset ja ilmajouset. Järjestelmät vaativat erillisen pumpun ja sisältävät usein säädettäviä ominaisuuksia. Näillä saavutetaan huomattava etu myös ajomukavuudessa, mutta järjestelmät ovat kalliita ja kierrejousia sekä iskunvaimentimia raskaampia.

Liitteenä 3 esitetään eri jousityyppien ominaisuudet taulukkomuodossa.

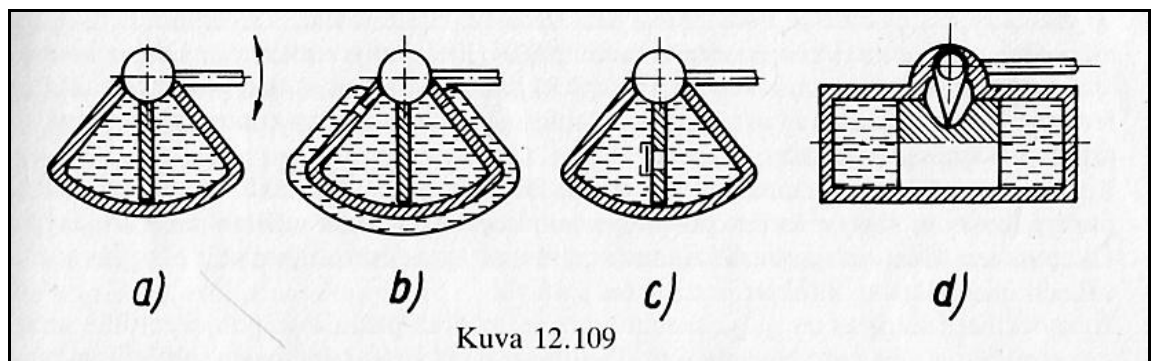
6 VAIMENTIMET

6.1 Historia

Ensimmäiset vaimentimet olivat hevosvaunujen itsevaimentavat lehtijouset. Varsinaiset erilliset vaimentimet käyttivät ensin hyväkseen nahka- tai asbestielementtien tuottamaa kuivaa mekaanista kitkaa (esim. Gabriel Snubber-vaimennin 1920-luvulta). Esimerkki mekaanisesta kitkavaimentimesta nähdään kuvassa 34. Jo 1900-luvun alussa ehdotettiin nestettä vaimennuselementiksi. Ensimmäiset nestevaimentimet hyödynsivät vipuvarren välityssuhdetta ohjaamaan heilahtelu nestesäiliöön (kuva 35). Ensimmäisen hydraulisen kaksiputkivaimentimen kehitti Amerikkalainen Monroe vuonna 1934. Euroopassa rakenne yleistyi 1950-luvulla. Ongelmina niissä olivat veden joutuminen öljyn sekaan, ja rajoitettu asennuskulma. Christian Bourcier de Carbon ratkaisi nämä ongelmat kehittämällä kaasujousta hyödyntävän yksiputkivaimentimen. Hans Bilstein osti oikeudet tähän tuotteeseen ja kehitti sen ensimmäisenä autokäyttöön Mercedes-Benzille vuonna 1953. Massaiskunvaimennin käytti hyväkseen massan hitautta heilahtelun vaimentamisessa. (Heißing & Ersoy 2011, 5.) Tunnettu massaiskunvaimenninta käyttänyt auto oli Citroen 2CV. Heißing & Ersoy (2011, 5) kertoo vielä, että säädettävät vaimentimet tulivat kuvaan mukaan 1980-luvulla Japanilaisen Kayaban kehittämänä. Euroopassa ensimmäisen tällaisen nopeuden mukaan säätyvän vaimentimen rakensi Boge Mercedekselle. Rakennetta kehitettiin myöhemmin proportionaaliventtiilikäyttöiseksi CDC-vaimentimeksi (continuously variable damper). (Heißing & Ersoy 2011, 5.)



Kuva 34. Kitkavaimennin (Laine 1981, 210)



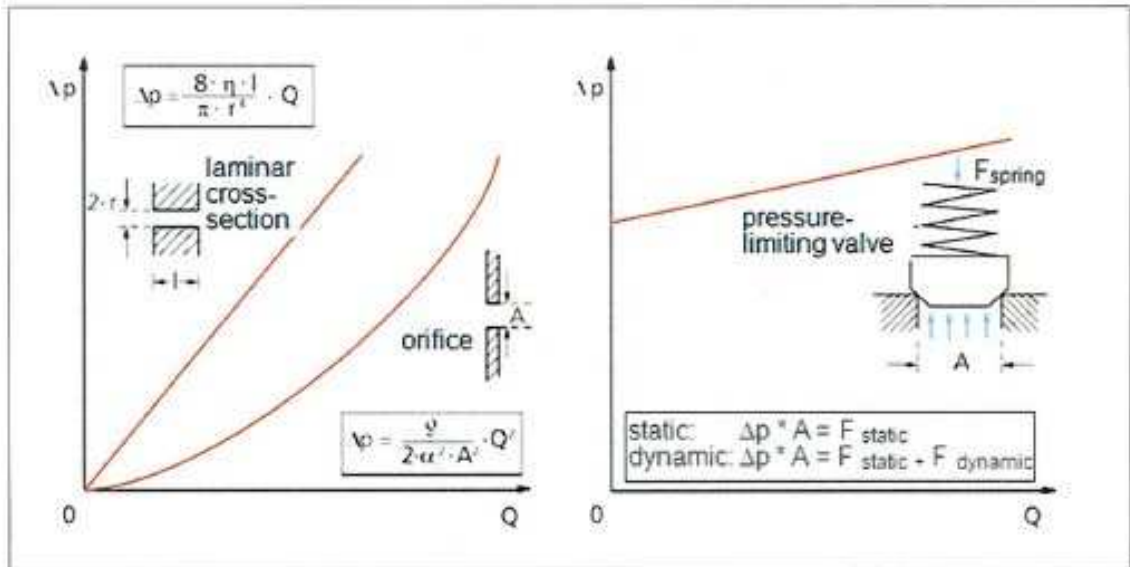
Kuva 35. Neste-vipuvaimentimia (Laine 1981, 211)

6.2 Yleistieto

Iskunvaimentimennin ei vaimenna iskua, vaan sen tehtävä on toimia heilahduksenvaimentimena, joka muuttaa (muuten liian hitaasti vaimenevan) heilahtelun lämmöksi. Nykyisin yleinen kierrejousi vaimentaa itsestään huonosti heilahtelua. Ajomukavuus vaatii vaimentimelta pehmeyttä, mutta turvallisuus ja suorituskyky taas kovuutta. Vaimentimen tulisi siis olla joustonopeuden mukaan säätävä rakenne. Yleisenä vaatimuksena vaimentimelle on, että jousittamattoman massan värähtely tulisi pitää mahdollisimman pienenä. (Heißing & Ersoy 2011, 69.) Vaimennusta käytetään monissa auton

rakenteissa, kuten puslissa, penkissä ja ohjauksessa värinöiden poistoon. Nykyisessä vaimentimessa vaimennustyön tekee nesteen (öljyn) viskositeetti sekä apujousen hystereesi.

Nykyisin vaimentimet ovat teleskooppirakenteisia putkivaimentimia. Männän liikkeessa putkessa neste virtaa tilasta toiseen eri paksuisten ja pituisten kanavien läpi. Erilaiset kanavat aiheuttavat erilaista vastusta. Vaimennuksen määrä saadaan näin riippumaan männän liikkumisnopeudesta ja nesteen viskositeetista. Putkivaimennin on yksinkertainen ja tilaasäästävä ratkaisu. Erikoisia progressiivisia rakenteita ovat magneettireologinen tai elektroeologinen ratkaisu. Kuvaaja 10 näyttää erimuotoisten virtauskanavien ja paineenrajoitusventtiilin vaikutuksen hydrauliseen resistanssiin virtausnopeuden muuttuessa. Rajoitusventtiileillä saavutetaan niin halutessa myös lineaarinen tai degressiivinen vaimennus (vaimennus vähenee joustonopeuden kasvaessa). (Heißing & Ersoy 2011, 266—269.) Painehäviö on pienen raon virtauksessa verrannollinen nesteen nopeuden neliöön, joten nopeudesta lineaarisesti riippuva vaimennusvoima toteutetaan avaamalla useassa vaiheessa eri kanavia (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivijousitus, 10). Kanavilla voidaan muuttaa myös vaimentimen puristusvaiheen (jounce tai compression) sekä palautusvaiheen (rebound) suhteellisia jäykkyyksiä. Heißing & Ersoy (2011, 275—277) käsittelee vielä erästä vaimentimen tärkeää osaa. Männän maksimiliikerataa suojaa (usein kuminen, muovinen, metallinen kierre- tai hydraulinen) pohjaamissuoja (compression- tai rebound-stop). Pohjaamissuojan on toimittava vaimentimen suojaamisen lisäksi myös apujousena täydentäen vaimentimen ominaisuuksia ja se on materiaalista ja mekaniikasta riippuen säädetty halutunlaiseksi.

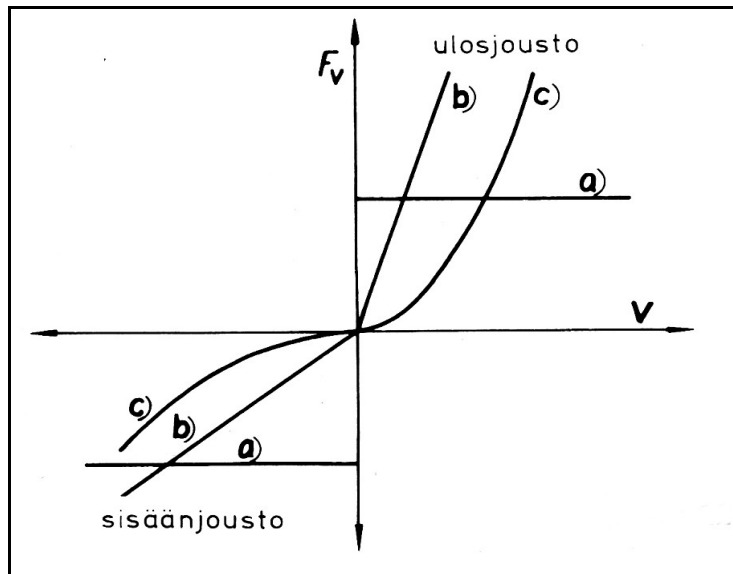


Kuvaaja 10. Virtauskanavan muodon sekä paineenrajoitusventtiilin vaikutus nesteen virtaukseen (Q) ja paineenmuutokseen (Δp) (Heißing & Ersoy 2011, 268)

Vaimentimen kiinnitys runkoon pitää olla sellainen, että se sallii akselistorakenteen kinematiikan rajoissa kiinnityskohtien liikkeen vaimenninta rasittamatta (kumipuslalla). Käytännössä putkivaimentimille on kaksi kiinnitystapaa, rengaskiinnitys ja tappikiinnitys. (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivivaimennus, 24.)

6.3 Vaikutus ajo-ominaisuuksiin

Alustan ajo-ominaisuuksien säätö tapahtuu useimmiten juuri vaimennusta säätämällä. Vaimennin ajatellaan matemaattisesti usein lineaarisena. Kuvaaja 11 esittää vaimennusvoiman riippuvuuden iskunopeudesta.



Kuvaaja 11. Iskunopeuden vaikutus vaimennusvoimaan: a=vakio, b=lineaarinen, c=progressiivinen (Laine 1981, 183)

Vaimennus ei ole välttämättä pyörällä suoraan riippuvainen vaimentimesta. Suhde voi muuttua akselistorakenteesta (vaimentimen välityssuhteesta) riippuen (Heißing & Ersoy 2011, 267).

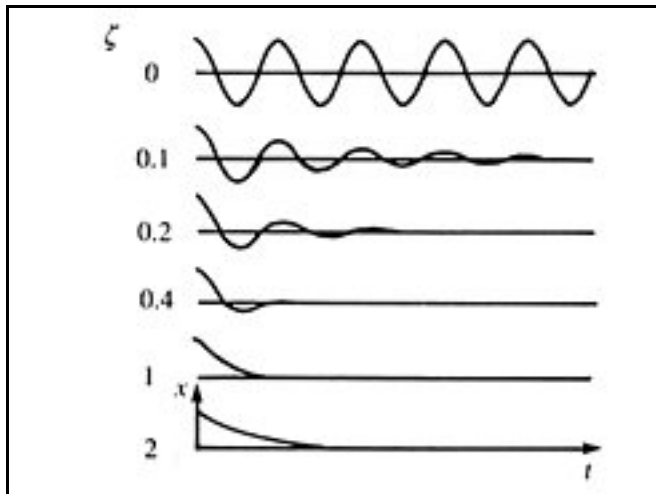
Vaimennuksen voimakkuuteen vaikuttaa vaimennuskerroin. Vaimennusvoima lasketaan lausekkeella $F = -v^n \cdot k$, missä

- $-v$ = vaimentimen pystysuuntainen nopeus (tien herätteestä tuleva)
- k = vaimennuskerroin
- n = vaimennuseksponentti (0,5...2, riippuu vaimentimen lineaarisuudesta tai progressiivisuudesta)

Värähtelysteemin suhteellinen vaimennus lasketaan kaavalla $D = \frac{k}{2 \cdot \sqrt{c \cdot m}}$

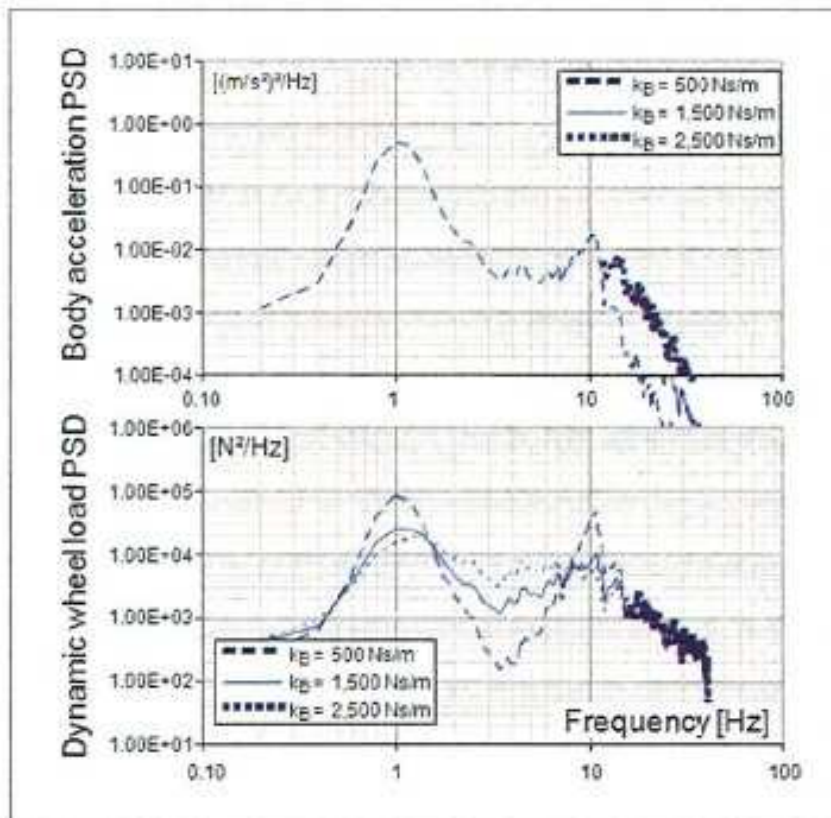
(missä c on jousivakio ja m on massa). Suhteellinen vaimennus määrittää auton heilahtelun vaimennuksen. Mikäli D on alle 1, on vaimennus alikriittinen, eli heilahdusliikkeitä tapahtuu herätteen jälkeen. Jos $D=1$, niin vaimennus on kriittinen. Tämä tarkoittaa, että heilahdusliike palaa nopeiten takaisin

neutraaliasemaan herätteen jälkeen. $D:n$ ollessa yli 1, on kyseessä ylikriittinen värähtely, missä hilahtus palautuu hiljaa tasapainoasemaansa, tai ei koskaan saavuta sitä. Kuvaaja 12 selventää asiaa. Katuautoissa suhteellinen vaimennus on yleisesti noin 0,3.



Kuvaaja 12. Suhteellisten vaimennuksien kuvaajia ajan funktiona (Vest 2010, Vaimentimet_Aktiivijousitus, 17)

Jousitusta käsiteltäessä tutkittiin eri parametrien vaikutusta korin värähtelyihin. Lisätään nyt yhdeksi parametriksi vaimennus. Voimistettu vaimennus pienentää dynaamisia pyöräkuormia ja korin resonanssiamplitudia korin ominaistajuusalueella. Tämän taajuusalueen ulkopuolella taas vaikutukset ovat päinvastaiset. Tästä johtuen staattiset vaimentimet voivat tarjota ainoastaan kompromissin ajomukavuuden ja suorituskyvyn välillä. (Heißing & Ersoy 2011, 81.) Kuvaajasta 13 nähdään vaimennusjäykkyyden vaikutus korin värähtelyominaisuuksiin.



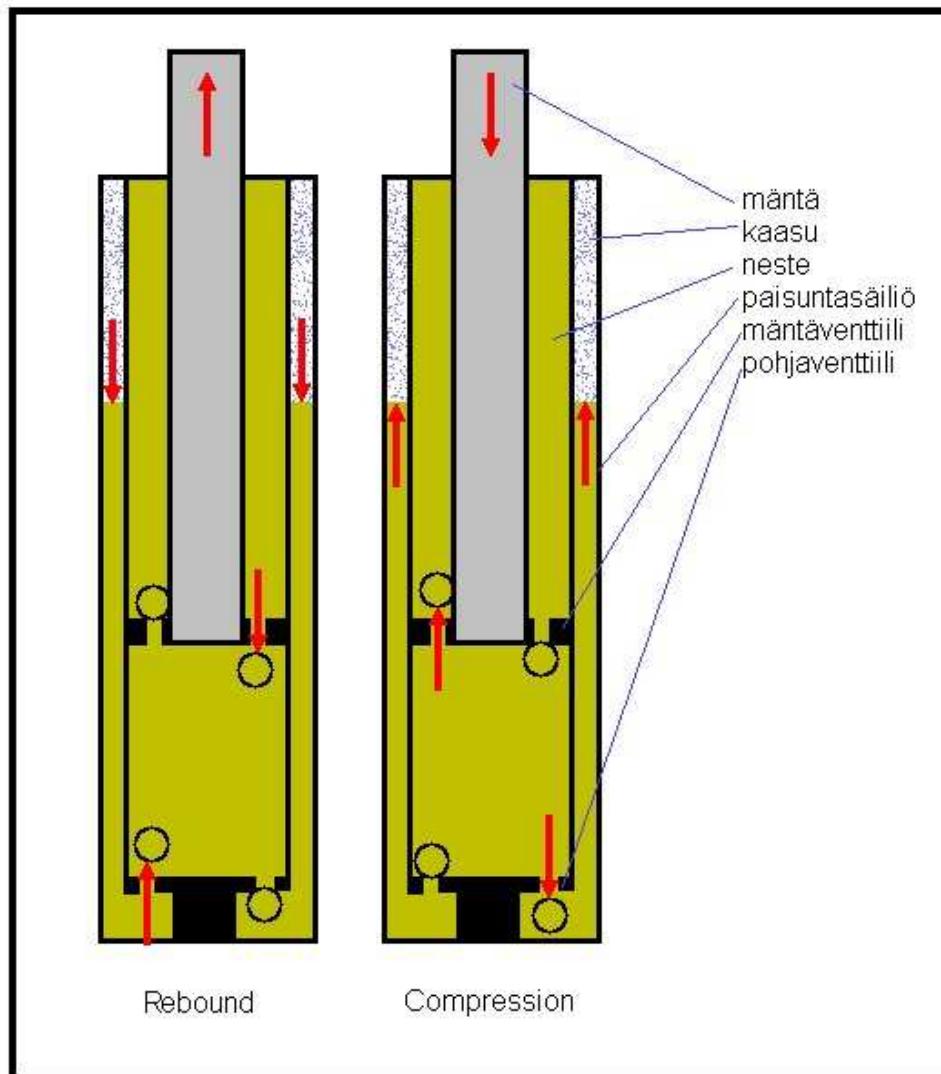
Kuvaaja 13. Vaimennusvakion vaikutus dynaamisiin pyöräkuormiin esimerkkietienpinnalla (PSD) (Heißing & Ersoy 2011, 81)

6.4 Tyypit ja rakenne

Kaksiputkivaimennin on putkivaimentimista vanhempi ratkaisu, jossa sylinteri (pääkammio) on ulomman putken (nestesäiliö) sisäpuolella. Ulomassa putkessa (nestesäiliössä) on öljyn lisäksi 1bar ilmassa tasaamassa männän liikkeen aiheuttamat öljyn liikkeet. Männän venttiilien lisäksi vaimentimella on sylinteriputken pohjassa pohjaventtiili, joka huolehtii sisä- ja ulkoputkien välisestä nesteenvaihdosta. Henkilöautokäytössä kaksiputkivaimentien halkaisija on tyypillisesti 22-36mm (raskaassa kalustossa jopa 70mm). Yleisesti vaimennus on lineaarista tai degressiivistä. (Heißing & Ersoy 2011, 270—271.)

Kuva 36 esittää kaksiputkivaimentimen toimintaperiaatteen. Kaksiputkivaimentimen kestoikä on yksiputkivaimenninta parempi, mutta se pitää asentaa likimain pystysuoraan. Joustintuessa voidaan käyttää

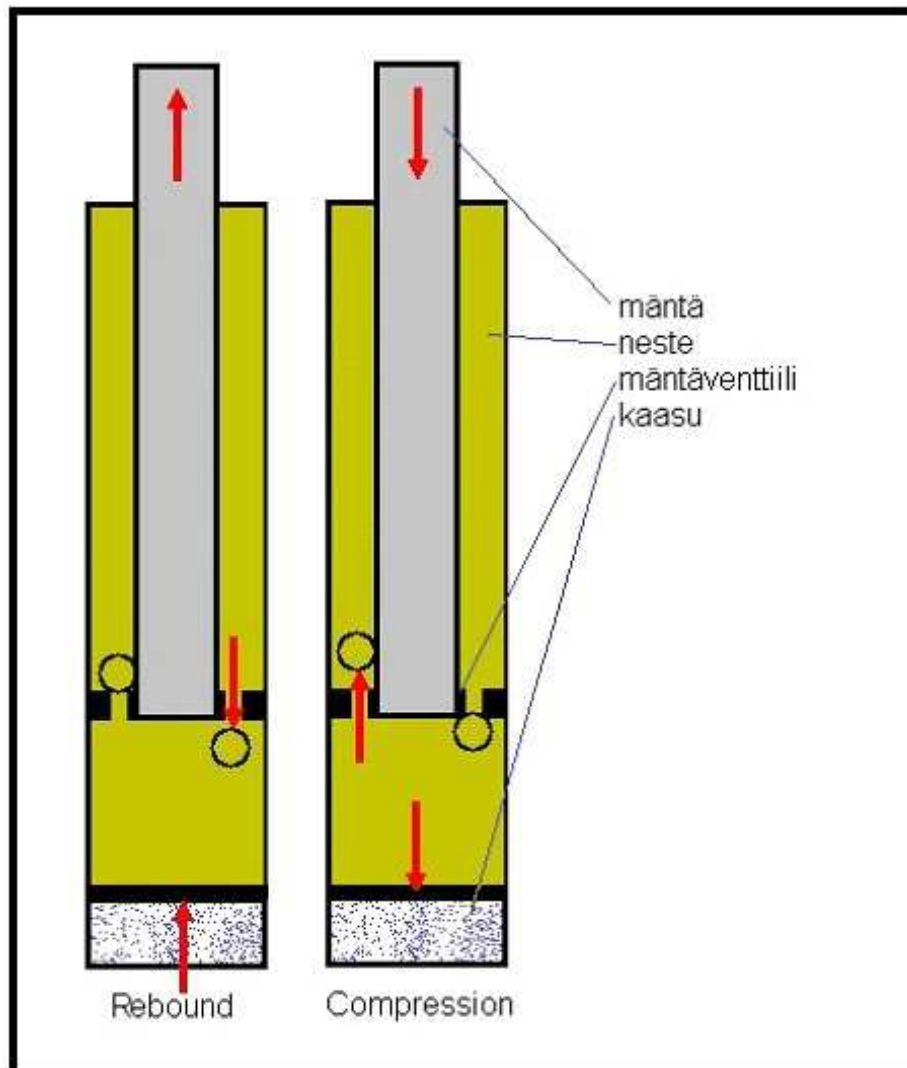
kaksiputkivaimenninta, jossa on lisäksi yksiputkivaimentimen kaltainen erillinen kaasumäntä (6-8bar paineella). (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivivaimennus, 11—14).



Kuva 36. Kaksiputkivaimentimen toiminta

Yksiputkivaimentimessa nimensä mukaisesti pääkammio ja nestesäiliö on samassa sylinterissä. Sisäänjousto- ja paluuvaimennusventtiilit (compression- ja rebound) on sijoitettu mäntään. Vaimentimessa pitää olla myös kaasujousi tasaamassa tilavuuden vaihteluita. 25-30bar ilmassa on erotettu sylinterin pohjaan erillisellä tiivistetyllä männällä. (Heiβing & Ersoy 2011, 271.) Vesterinen (2010, Vaimentimet_aktiivijousitus, 13) kertoo myös, että kaasu voi olla nesteen

seassa emulsiona, kunhan huolehditaan, ettei se pääse kavitoimaan. Kuvasta 37 nähdään yksiputkivaimentimen toiminta.



Kuva 37. Yksiputkivaimentimen toiminta

6.4.1 Vertailu

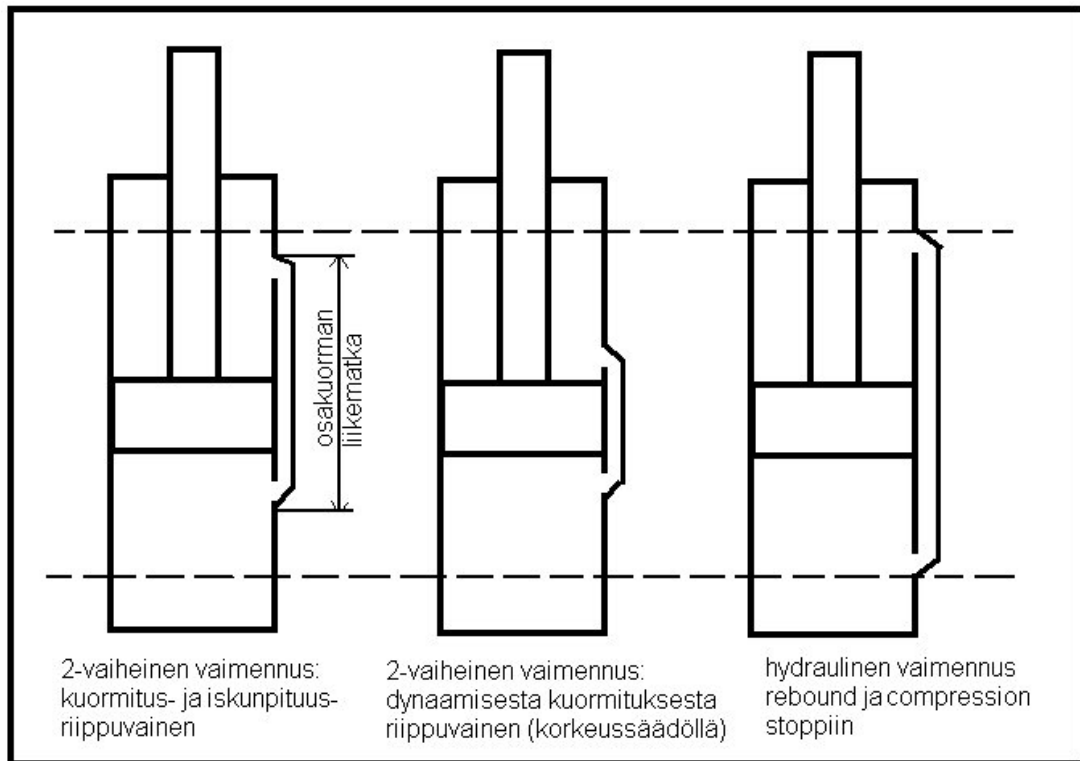
Yksiputkivaimentimen erotettujen kaasu- ja nestetilojen takia sen kavitointivaara on vähäinen. Se toimii paremmin lyhyillä liikkeillä, kuin kaksiputkivaimennin. Kaksiputkivaimentimeen taas pystytään suunnittelemaan paremmin halutunlainen vaimennusvoimajakauma, koska siinä compression- ja rebound-

venttiilit ovat eri paikoissa. Yksiputkivaimennin on pidempi ja ohuempi rakenne, mutta sen sijoittelussa ei ole erityisvaatimuksia, kuten kaksiputkivaimentimella. Yksiputkivaimennin on kaksiputkista kevyempi. Sitä käytetään pääasiassa euroopassa. Muuten kaksiputkivaimentimet hallitsevat nykyisin henkilöautokäytössä. Mikäli akselistorakenne on sellainen, että vaimentimelta halutaan sivu- tai pituussuuntaista pyörän hallintaa, tai sitä käytetään joustintukena, on kaksiputkivaimennin oikea ratkaisu. (Heißing & Ersoy 2011, 271—272.)

6.4.2 Erikoisrakenteet

Korkeilla taajuuksilla tapahtuvia pienen amplitudin (<5mm) värähtelyjä voidaan tasata ns. ASD-venttiilirakenteella. ASD-vaimentimessa (amplitude selective damping) vaimennusvoima on löysä pienillä amplitudeilla, mutta kasvaa amplitudin kasvaessa, jolloin pienet värinät eivät välity koriin. ASD-venttiili (joka säättää vaimennusvoimaa amplitudin mukaan) on sarjassa tavallisen pientä vaimennusvoimaa tekevän männänventtiilin kanssa. Pienen vaimennuksen venttiili liikkuu jousien varassa tietyn jousten salliman liikematkan ASD-venttiilistä riippumatta, jolloin pienet amplitudit pääsevät ASD-venttiilin ”ohi”. Kaksiputkivaimentimeen voidaan toteuttaa lisäksi liikkeen mukaan säätyvä vaimennus. Putken seinään voidaan tehdä kanava, joka sallii nesteen siirron männän ohi. Kanavan alku- ja loppupisteellä saadaan haluttu ”löysempi” liikematka rajattua (kuva 38). Kuvan ensimmäisen tyypin kuorman mukaan säätyvää rakennetta, jossa vaimennus kasvaa liikeradan päissä käytetään erityisesti parabelilehtijousitetuissa raskaan kaluston akselistoissa, mutta myös joissakin farmarihenkilöautojen taka-akselistoissa. Kuvan keskimmäisen tyyppistä vaimenninrakennetta käytetään tasonsäädön kanssa lähinnä ilmajousituksessa. C-tyyppisessä rakenteessa kanava on tarkoitettu koko normaalille vaimennusalueelle ja muuttuva vaimennusvoima päissä toimii pohjaussuojana. (Heißing & Ersoy 2011, 278—280.) Ruotsalainen Öhlins Racing AB on kehittänyt lähinnä Katu- ja ratakäyttöön tarkoitettuihin RT-vaimentimiinsa DFV-venttiilirakenteen (dual flow valve), joka sallii nopean jousto- tai palautusliikkeen läpäisyn venttiilissä tasoittaen joustoliikkeen teräviä

ääripäitä. Venttiilin toiminta mukautuu myös lämpötilanmuutoksiin ja huomioitaten nesteen viskositeetin muutokset.



Kuva 38. Kaksivaiheisia vaimennusratkaisuja

Vaimennin yhdistetään etenkin etuakselin tuennassa yleensä jousitukseen. Puhutaan coilover-yksiköstä, jossa kierrejousi asennetaan vaimentimen ympärille. Rakenne sopii sekä yksi- että kaksiputkivaimentimelle. Coilover-rakenne säästää tilaa ja helpottaa pakkaussuunnittelua. Mikäli rakenteeseen kohdistuu akselistokinematikasta johtuen vääntöä, voi jousen muotoilulla tai asennolla sekä puslilla vähentää näin syntyvää lisäkitkaa ja –rasitusta. Myös ilmajousi soveltuu ”coilover”-rakenteeksi. (Heiðing & Ersoy 2011, 272—273.) Yleinen erikoistapaus coilover-rakenteesta on joustintuki- eli ns. McPherson-tyyppinen rakenne. Joustintuen tulee edellä mainittujen voimien lisäksi tukea jarrumomentit, ohjausvoimat (toimii lähes poikkeuksetta etutuentana) sekä kallistuksenvakaajan voimat. (Heiðing & Ersoy 2011, 272—273.)

Tavalliset yksiputkivaimentimet voidaan yhdistää hydraulilinjilla toisiinsa ja hydropneumaattisen jousituksen tavoin vaimentimien välinen toispuoleinen joustoliike voidaan kompensoida.

ZF Sachs:n Nivomat on itsepumppaava tason säätävä jousi-vaimenninyksikkö. Se on usein taka-akselille (mekaanisen jousen rinnalle) asennettava hydropneumaattinen jousiyksikkö, jossa tasonsäätöön tarvittava hydraulinen paine pumpataan liikkeellelähdön jälkeen nopeasti tien herätteen avulla. Auton pysähtymisen jälkeen paine säilyy jonkin aikaa elementissä. Nivomat ei tarvitse ulkoista energianlähdettä ja se on vain hieman normaalia coilover-yksikköä suurempi rakenne, joten tavallinen vaimenninyksikkö voidaan korvata sillä helposti. Nivomatia on edelleen kehitetty käyttämään ulkoista sähkökäyttöistä pumppua paineen tuottamiseksi vaimentimeen. Järjestelmä vaatii jälkiasennetun korkeussensorin ja siihen voidaan integroida muita järjestelmiä tarvittaessa. Tämä ns. LBW (leveling-by-wire)-järjestelmä voidaan toteuttaa kaikille pyörille ja sillä voidaan suorittaa haluttuja alustan korkeussäätöjä. Koska Nivomat on vain osittain koria tukeva järjestelmä, sen täytyy siirtää jousituksen kiinnityspistettä mukanaan tasonsäädön onnistumiseksi. (Heißing & Ersoy 2011, 545.)

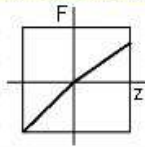

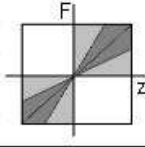
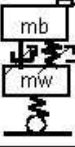
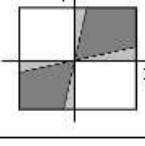

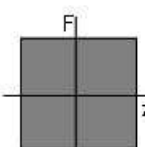
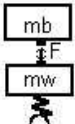
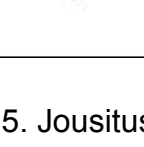
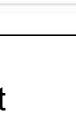
Magnetoreologinen (MRF) ja elektreologinen (ERF) vaimennin ovat erikoisrakenteisia putkivaimentimia. ERF-vaimentimessa nesteeseen ohjataan sähkövirta, joka aiheuttaa nesteessä olevien sähköisesti varautuneiden partikkelien asettumisen niin, jotta nesteen viskositeetti kasvaa. MRF-vaimentimessa luodaan magneettikenttä nesteeseen, jossa öljyn ja metallipartikkelien emulsiossa tapahtuu sama ilmiö. MRF-vaimentimen tunnettu tuotenimi on Delphi:n MagneRide. (Heißing & Ersoy 2011, 285—286.)

ZF Sachs:n CDC-vaimennin (continuous damping control) eli jatkuvasti säätävä vaimennin käyttää (joko sisäistä tai ulkoista) proportionaaliventtiiliä vaimennusvoiman säätöön. Vaimennusvoima on portaattomasti suoraan verrannollinen venttiilin sähköiseen ohjaussignaaliin. (Heißing & Ersoy 2011, 281—285.)

PDC (pneumatic damping control) eli pneumaattinen vaimennuksen ohjaus käyttää samantapaista rakennetta, kuin CDC-vaimennin. Rakenne sopii ilmajousituksen kanssa käytettäväksi valmiin paineilmalähteen takia. Vaimentimen jäykkyyttä säädetään ilmajousen kanssa lastauksen muuttuessa. Hyötyajoneuvoissa käytetään tätä järjestelmää, mutta myös esim. Audi hyödyntää sitä. (Heißing & Ersoy 2011, 286.)

6.5 Aktiivijousitus

Jousittamattoman massan minimointi sekä renkaan kehitystyö ovat rajallisia menetelmiä kehittää ajettavuutta. Mikäli ei haluta tehdä kompromisseja ajo-ominaisuuksien ja mukavuuden välillä ja halutaan alustan mukautuvan eri olosuhteisiin, on käytettävä ”aktiivijousitusta”. Aktiivijousitus on yleisnimitys säätyvästä alustanohjauksesta ja se oikeastaan jaetaan adaptiiviseen, semiaktiiviseen, hitaaseen aktiiviseen ja aktiiviseen (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivivaimennus, 40). Yleisesti vaimennus on säädettävä parametri (jousivoiman säätöä käytetään lähinnä ilmajousituksessa). ”Aktiivijousitukset” jaetaan alaluokkiin ulkoisen energiantarpeen sekä vasteajan perusteella. (Heißing & Ersoy 2011, 526.) Alaluokkien yleiset ominaisuudet Heißing & Ersoyn (2011, 527) mukaan taulukoituna nähdään taulukossa 5. Taulikon (z,F)-kuvaajista nähdään alustan toiminta-alue.

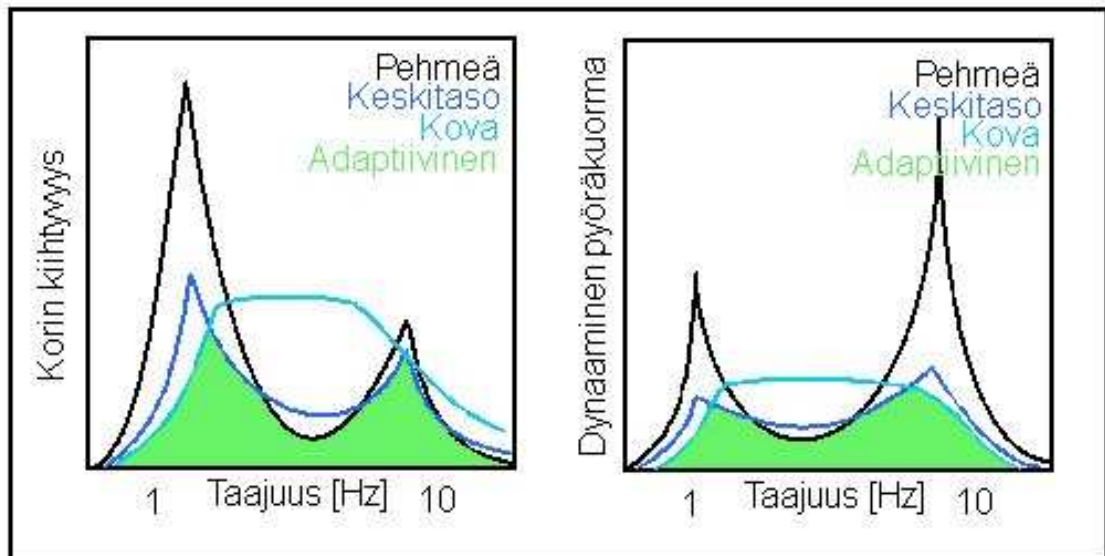
Järjestelmä	Tehollinen alue	Vasteaika	Tehonkulutus	Toimintaperiaate	Esimerkki
passiivinen					perinteinen jousitus
adaptiivinen		1s-25ms	matala		Jaguar x350 ACD2 Daimler ADS/ADSII Citroën Hydractive BMW EDC-K Audi CDC
semiaktiivinen		<10ms	matala		CDC skyhook-säädöllä (Lancia Thesis, VW Touareg, VW Phaeton) Volvo S60
hidas aktiivinen		>0,3s	keskitaso		Roll-stabilointi: Daimler ABC BMW Dynamic Drive Citroen Activa AFS
aktiivinen		<10ms	korkea		Lotus Active

Taulukko 5. Jousitusjärjestelmien kuvaukset

6.5.1 Adaptiivinen alusta

Adaptiivinen alusta tarkoittaa, että alustan jäykkyyttä voidaan muuttaa erilaisten kiinteiden asetusten välillä tai uusissa järjestelmissä kiinteissä perusasetuksissa (esim. Sport ja Comfort) voidaan jäykkyyttä säätää jatkuvasti tiettyjen arvojen välillä. (Heißing & Ersoy 2011, 526—527). Vaimennusvoiman säädön voi toteuttaa esimerkiksi sähköisesti vaihtuvilla männän vaimennusventtiileillä (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivivaimennus, 30). Adaptiivisen alustan ulkoinen tehontarve on pieni, mutta vasteaika herätteeseen on pitkä (1s...25ms) (Heißing & Ersoy 2011, 526—527). Solenoidisäätöisillä venttiileillä saadaan portaallista vasteaikaa pienennettyä ja proportionaaliventtiileillä voidaan toteuttaa portaaton säätö (Vesterinen Vaimentimet_aktiivivaimennus, 32). Itsemukautuva alusta voi käyttää hyväkseen kiihtyvyyssantureita, joiden signaalien perusteella järjestelmä valitsee sopivan alusta-asetuksen (esim. BMW:n ensimmäinen EDC, eli electronic damping control). Adaptiivisen

vaimennuksen säätömahdollisuudet pyöräkuormien ja kiihtyvyyksien perusteella nähdään kuvaajasta 14. (Heißing & Ersoy 2011, 527—528.)



Kuvaaja 14. Alustan eri jäykkyyksien kuvaajat korin kiihtyvyyden sekä dynaamisen pyöräkuorman suhteen, ja adaptiivisen alustan säätöalue (kuvaajat perustuvat neljännesautomalliin)

CDC-järjestelmässä säädetään proportionaalitekniikalla vaimentimen vaimennusvoimaa minimi- ja maksimiarvon välillä. Pyöräkuormanmuutokset pyritään minimoimaan ja vaimennuksesta tehdään degressiivinen. Järjestelmä aistii kiihtyvyydet etu- ja taka-akseleilla ja laskee vaimennusvoiman jokaiselle vaimentimelle erikseen. (Heißing & Ersoy 2011, 528.)

ThyssenKruppin ja Bilsteinin kehittämä ADSII-järjestelmä (adaptive damping system II) säättää vaimentimen painumis- ja palautusvoimaa skyhook-säätöstrategiaan perustuen. Järjestelmä tunnistaa z-suuntaisen kiihtyvyyden ja pystyy vaimentamaan korin resonanssitaajuuksia (noin 1 Hz). (Heißing & Ersoy 2011, 528—529.)

6.5.2 Semiaktiivinen alusta

Semiaktiivinen alusta ei pysty vielä täysin eliminoimaan mitään herätteistä johtuvia liikkeitä, mutta sillä pystytään vaikuttamaan kaikkiin niihin. Pienillä

iskunopeuksilla on saavutettava suuri vaimennusvoima ja suurilla nopeuksilla pieni voima. Tämä vaatii degressiivisen vaimennuksen. Semiaktiivinen alustansäätö saavuttaa vasteajan, joka on pienempi, kuin auton korin ja jousittamattoman massan saamat herätetaajuudet, joten tien epätasaisuudet voidaan suodattaa pois (Heiðing & Ersoy 2011, 527). Semiaktiivinen järjestelmä säätää ainoastaan vaimennusta.

Semiaktiivista alustaa voidaan säätää useilla ohjausmenetelmillä. Kaksi niistä ovat kynnysarvostrategia ja skyhook-strategia. Kynnysarvomenetelmä toimii kuten adaptiivisessa järjestelmässä säätäen vaimennusarvoja saatavien kiihtyvyystietojen perusteella. Myös nyökkäystä jarrutuksessa voidaan korjata lisäämällä järjestelmälle jarrupainetieto. (Heiðing & Ersoy 2011, 499, 529—530.)

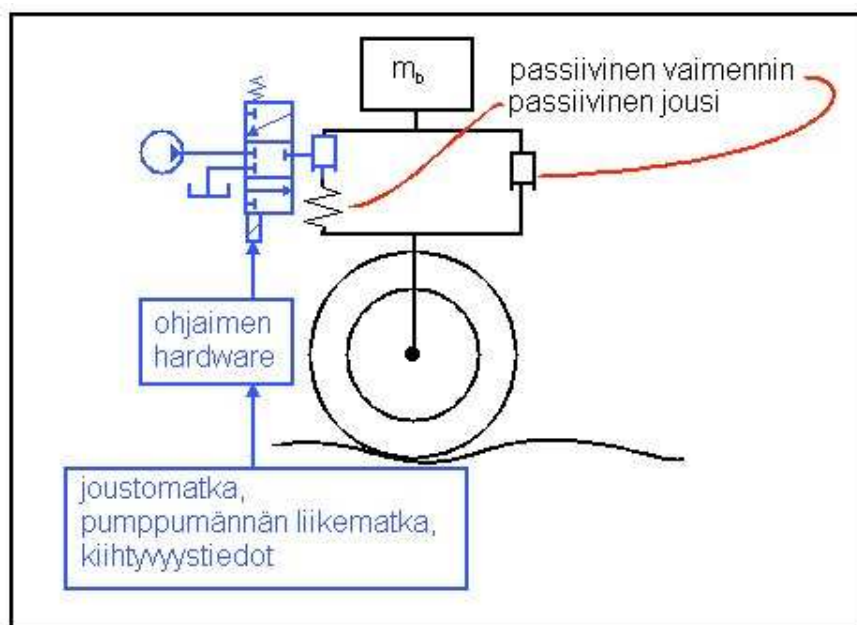
Skyhook-säädön tarkoituksena on eristää kori tiestä täysin (Heiðing & Ersoy 2011, 530). Korin ajatellaan ”roikkuvan taivaasta tulevissa koukuissa” ja korin ja pyörien välistä vaimennusta ohjataan siten, kuin vaimennus olisi taivaskoukkujen ja korin välillä (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivijousitus, 47). Järjestelmä vaatii edellisten lisäksi kiihtyvyyssanturin pyörälle. Skyhook säätää siis korin heilahtelua pyörien heilahtelunsäädön avulla. Vastaava ajatusmalli on ”groundhook-säätö”, jossa vaimennin ajatellaan tulevan maasta pyörälle. (Heiðing & Ersoy 2011, 530.)

6.5.3 Aktiivinen alusta

Aktiivinen alustarakenne pystyy oman energianlähteensä ansiosta estämään herätteistä aiheutuvia liikkeitä välittymästä korille. Korin ja pyörän välille tuotetaan voima, joka minimoi korin heilahtelua. (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivijousitus, 31, 43.)

Hidas aktiivinen säätö on toteutettu yleensä passiivisen jousielementin rinnalle pneumaattisesti tai hydraulisesti. Ulkoinen tehontarve on pienempi (noin 7kW (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivijousitus, 51)), kuin täysin aktiivisessa säädössä, mutta suurempi, kuin adaptiivisessa tai semiaktiivisessa. Vasteaika

ei kykene eliminoimaan kaikkea värähtelyä. Hidasta aktiivista säätöä käytetään tasaamaan matalataajuisia kallistus/nyökkäys- tai pystysuuntaisia heilahteluja. (Heißing & Ersoy 2011, 527). Kuvassa 39 nähdään passiiviseen jousitukseen kytketty hydraulinen aktiivisäätö (Daimlerin ABC-järjestelmä vuodelta 1999).



Kuva 39. Active Body Control-järjestelmä (Daimler)

Täysin aktiivinen säätö pystyy tuottamaan korin ja pyörän välille voimia, jotka ovat riippumattomia joustoliikkeistä. Voima tuotetaan hydraulisesti tai sähköisesti, ja vaimennusta ohjataan jousittamattoman ja jousitetun massan liiketiedoilla. Hydraulisen ja sähkömekaanisen järjestelmän ominaisuuksia on esitelty taulukossa 6. Täysin aktiivisen järjestelmän ulkoinen tehontarve on jopa 20kW ja toimitataajuus 20-60Hz. Toimintataajuutta korkeammat värähtelyt välittyvät suoraan korille, koska toimilaite on korissa kiinni. Erilaisia toteutuksia aktiivialustasta on mm. BOSE:n kehittämä sähkömagneettinen konsepti sekä Daimlerin kehitteillä oleva eABC (electronic active body control). (Vesterinen 2010, Vaimentimet_aktiivijousitus, 53—56.)

Vahvuudet	Hydraulinen	Sähkömekaaninen
	hyvä hyötysuhde	vähän komponentteja
	sarjatuotannossa	helppo asentaa
		kuormituksesta riippuva tehonkulutus
Heikkoudet		kuiva järjestelmä, halpa
	mitoitettu tyhjäkäyntiteholle, joten suuri tehoylijäämä normaalitoiminnassa	korkea tehonkulutus suurella kuormituksella
	monimutkainen jäähdytys/letkusto	huono hyötysuhde tietyissä olosuhteissa
	ympäristölle haitallisia aineita	

Taulukko 6. Hydraulisen ja sähkömekaanisen järjestelmän vertailua

ZF Lemförderin ASCA-järjestelmä (active suspension via control arm) säätää alustaa kolmen liikkeen vapausasteen suhteen (kallistus/nyökkäys sekä pystysuuntainen liike). Järjestelmä on osittain tukeva ja vaatii näin ollen erillisen tuennan, mutta passiivisia vaimentimia sekä vakaimia ei tarvita. Akselin molemmat pyörät voidaan näin ollen eristää toisistaan parantaen mukavuutta ja esim. maastoajo-ominaisuuksia. Tehontarve on noin 1,2kW pyörää kohden. (Heißing & Ersoy 2011, 536—537.)

Kuten aiemmin mainittiin, BOSE on kehittänyt aktiivijousituksen, joka tukeutuu sähkömagneettisten aktuaattorien ohjaamiin lineaarimoottoreihin, jotka reagoivat nopealla vasteajalla. Tämän järjestelmän ulkoinen tehontarve normaaliajossa on jopa alle 1kW. Ratkaisuun on yhdistetty vääntötankojousi mekaaniseksi passiiviseksi jouseksi, koska BOSE:n aktiivijousitus ei kykene itsellään tukemaan kokonaan pyöräkuormia. (Heißing & Ersoy 2011, 535.) Täysin aktiivista alustaa ei ole tällä hetkellä sarjatuotantoautoissa korkean ulkopuolisen tehontarpeen sekä kustannusten takia. Lotus kehitti aktiivialustan jo 1980-luvulla, mutta se ei ole ollut koskaan sarjatuotannossa. Tekniikkaa käytettiin kyllä Infiniti Q45:ssa vuonna 1991, mutta alusta ei toimiminut autossa aktiivisena, koska pyöriä ei järjestelmällä pystytty nostamaan (ainoastaan painamaan alaspäin). BOSE haluaa pysyä itse teknologiansa takana, eikä myy

sitä autonvalmistajille, mutta etsii silti yhteistyötä aktiivialustan saattamiseen tuotantoon. (Csere 2004, 1.)

7 KALLISTUKSENVAKAUS

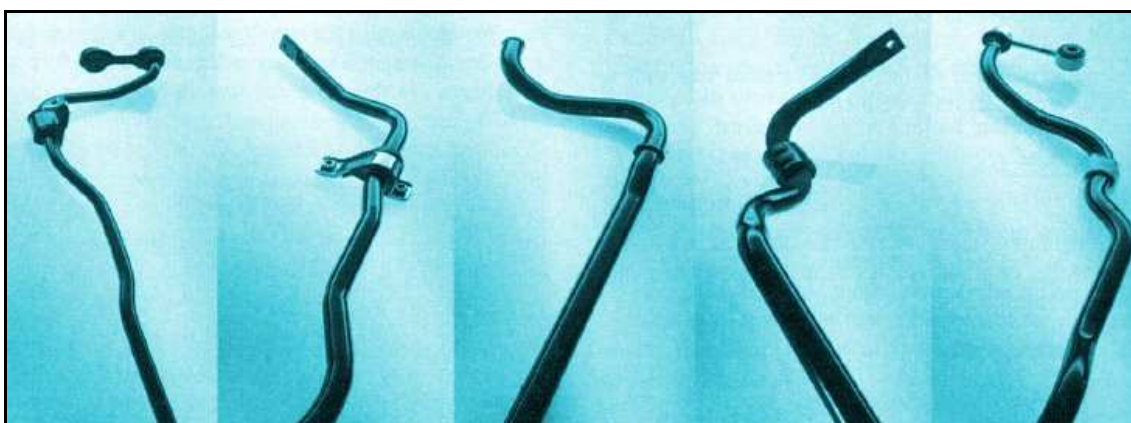
7.1 Vaikutus ajo-ominaisuuksiin

Vääntötankojousen yleisin sovellus alustassa on kallistuksenvakaaja. Vakaajaa käytetään erillisjousitetulla akselilla yhdistämään akselin molempien pyörien tuennat toisiinsa ja tasaamaan pyöräkuormien muutoksia eli ”jäykistämään alustaa sivusuunnassa”. Vakaaja ainoastaan tasaa kallistussuuntaisia dynaamisia pyöräkuormia, eikä näin ollen kannan ollenkaan staattisia pyöräkuormia. (Heiðing & Ersoy 2011, 231.)

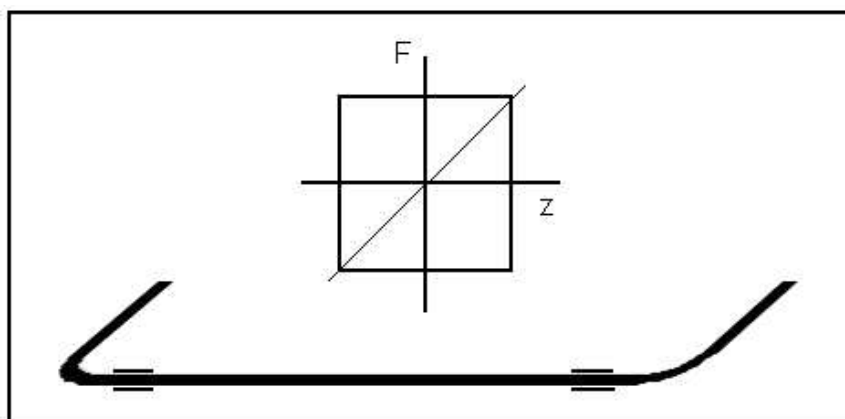
7.2 Tyypit ja rakenne

Yleisin vakaajarakenne on passiivinen terästanko, joka on taivutettu laajaksi litteäpohjaiseksi U-muodoksi. U:n pohja eli vakaajan keskikohta on tuettu apurunkoon kumipuslilla ja vakaajan päät on nivelöity joko olkakappaleelle (ohjaavalla akselilla) tai tukivarsille yhdystankojen eli ”koiranluiden” avulla. Vakaajan muoto voi vaihdella pakkausvaatimusten mukaan, mutta tarkoitus olisi pitää taivutusten määrä minimaalisena. Näin tangon ominaisuudet voitaisiin täysin hyödyntää. Kuva 40 esittää erilaisia vakaajatangon ja tangon päiden muotoja. Taivutussäde tulisi olla mahdollisimman suuri. Taivutuksen minimiarvona voidaan pitää 1,5 kertaa tangon halkaisijaa. Putken käyttö kiinteän tangon sijaan säästää painoa noin 45% samoilla jäykkyysominaisuuksilla. (Heiðing & Ersoy 2011, 232.) Passiivisessa rakenteessa ”löysä” vakaaja tuottaa ajomukavuutta, mutta ”jäykkä” vakaaja lisää kallistusstabiliteettia. Rata-autoissa (joissa jousitus on erittäin jäykkä ja tuennan liikematka pieni, sekä auton painopiste matala) voidaan vakaaja jättää pois vetävältä akselilta, jotta vetävät pyörät pysyisivät mahdollisimman hyvin

kiinni tiessä. Joissakin tapauksissa voidaan jopa käyttää ”ristiinkytettyä” vakaajaa, jossa ulkokaarten puoleisen pyörän painuminen välittyy z-muotoisen tangon kautta sisemmälle pyörälle painaen tätä alaspäin. Tällä tehostetaan pyörien tiessä pysymistä entisestään. Ristikkäinen vakaaja vaikuttaa myös apujousena kovilla nopeuksilla lisääntyvän negatiivisen nosteen eli downforcen tuodessa lisää painoa akselille. Ratkaisua käytetään esim. McLarenissa. Passiivisen vakaajan joustomatkan suhde vakausvoimaan nähdään kuvasta 41.



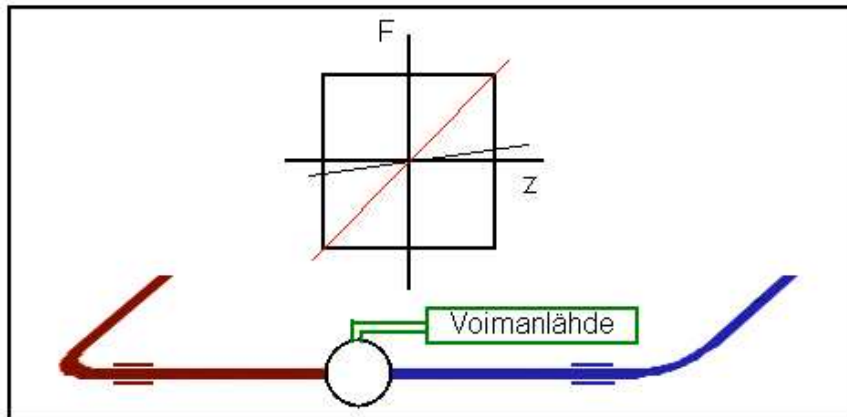
Kuva 40. Vakaajatankojen muotoja (Heißing & Ersoy 2011, 232)



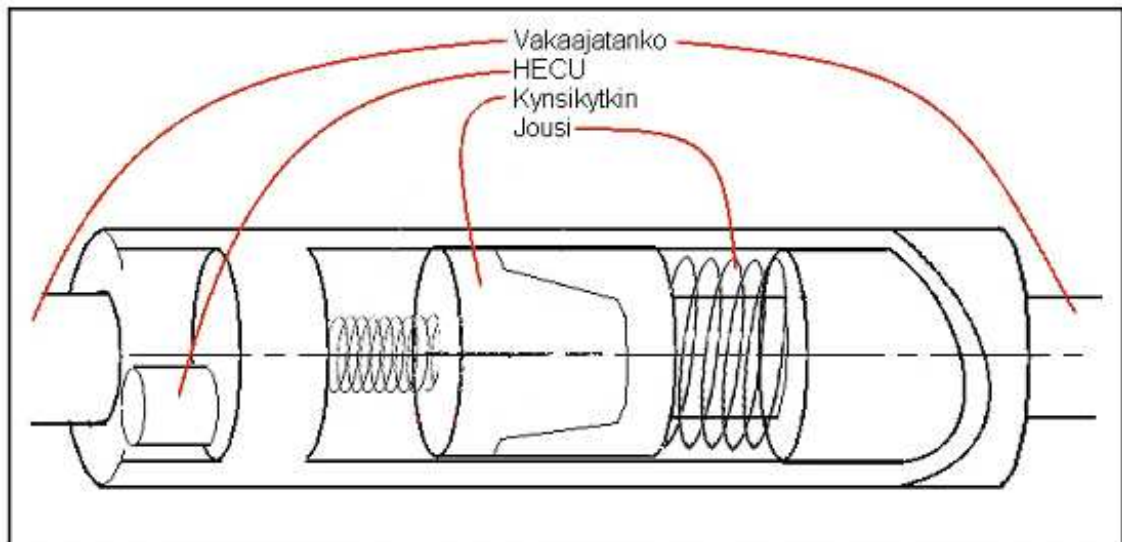
Kuva 41. Passiivinen vakaaja

Kytkevä off-road-vakaaja on keskeltä katkaistu tanko, johon on yhdistetty kynsikytkimellä (dog clutch) toteutettu kvasistaattinen jäykkyyssäätö. Jäykkyyttä vaihdellaan vähintään kahden arvon (kiinni ja irti) välillä. Off-road-vakaaja toimii

korin resonanssitaajuutta matalammalla taajuudella, eikä siis kykene mukautumaan ajotilan mukaisiin muutoksiin. Ulkoinen energiantarve on pieni, koska energiaa tarvitaan ainoastaan irtikytkeytymiseen (maastoajossa). Kaavio kytkettävästä off-road-vakaajasta nähdään kuvassa 42. Esimerkkinä rakenteesta on ZF Lemförder:n AOS:n (adaptive off-road stabilizer) kaavio (kuva 43). (Heißing & Ersoy 2011, 255.)

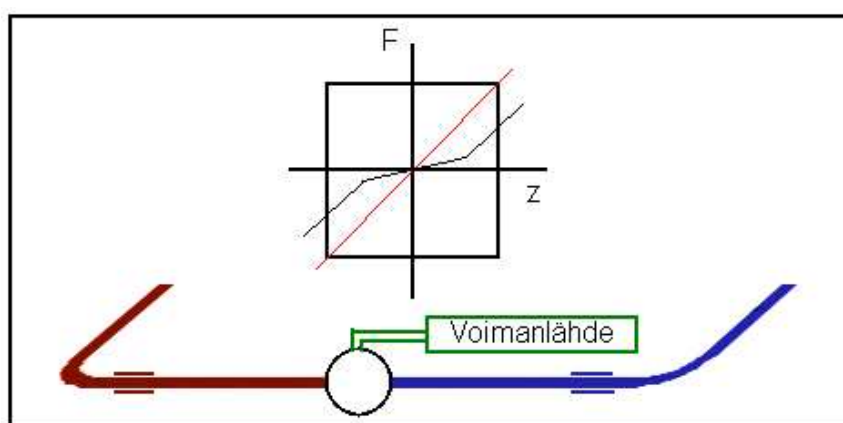


Kuva 42. Kytkettävä off-road-vakaaja



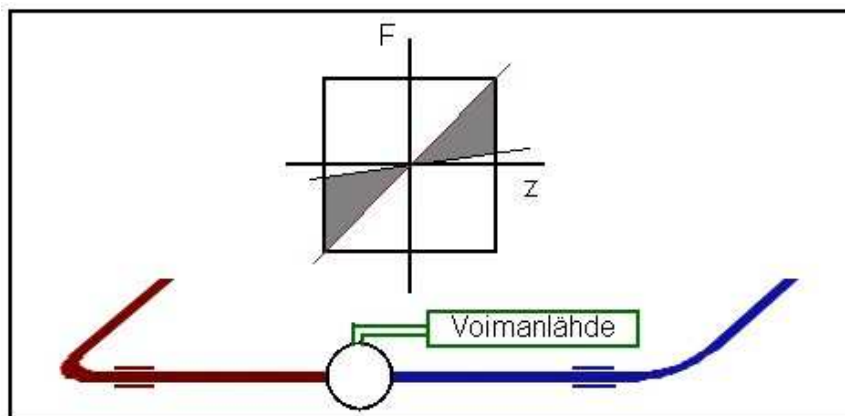
Kuva 43. ZF Lemförder:n AOS (adaptive off-road stabilizer) Kynsikytkin irrotetaan hydraulipaineella.

Kytkevä on-road-vakaaja on toimintaperiaatteeltaan off-roadia vastaava. Jäykkyyttä säädetään vähintään kahden arvon välillä. ”Löysä” asetus lisää ajomukavuutta ja ”jäykkä” turvallisuutta ja ajettavuutta. Toimintataajuus on sama, kuin korin resonanssitaajuus, joten kytkentä toimii ajon aikana. Kytkevä on-road-vakaajaa ei ole tällä hetkellä käytössä missään tuotantoautossa. Kaavio vakaajasta nähdään kuvassa 44. (Heißing & Ersoy 2011, 255.)



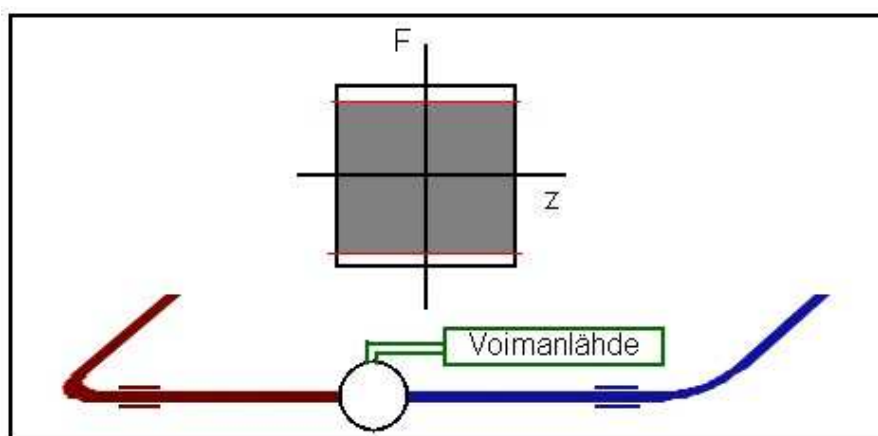
Kuva 44. Kytkevä on-road-vakaaja

Semiaktiivinen vakaaja toimii suuremmalla taajuudella, kuin kytkevä vakaaja. Se pystyy mukautumaan ajotilanteen mukaan raja-arvojen välillä mihin tahansa jäykkyyssarvoon. Joustojäykkyyttä säätämällä rakenne voi toimia semiaktiivisena kallistuksen vaimentimena pienentäen kallistuskihtyvyyksiä ja oskillointia, sekä vaikuttaa akselin ominaisohjaukseen. Tätä tarkoitusta varten on korin resonanssitaajuus huomioitava vakaajaa valittaessa. Semiaktiivivakaajan kaavio nähdään kuvassa 45. (Heißing & Ersoy 2011, 255—256.)

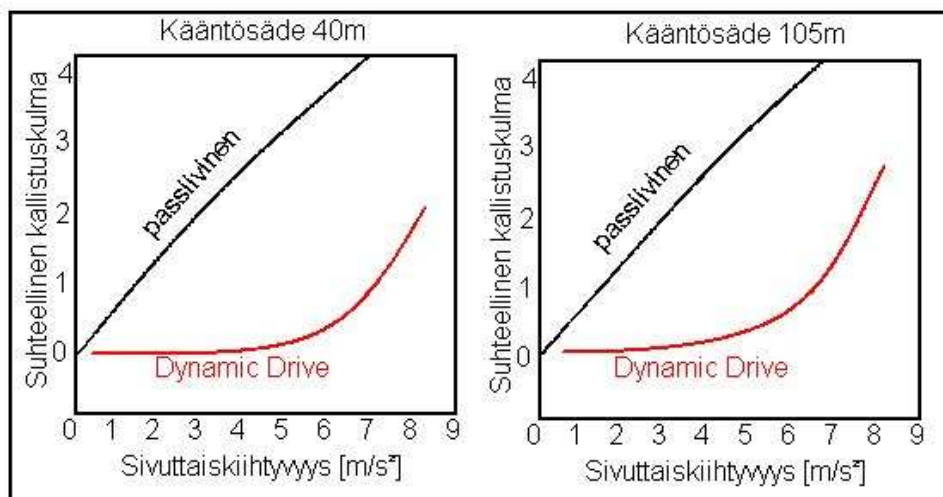


Kuva 45. Semiaktiivinen vakaaja

Aktiivinen vakaaja voi tuottaa voimia korin ja tuennan välillä. Kallistelua voidaan poistaa kiertämällä vakaajaa sähköhydraulisen aktuaattorin avulla. Suoralla tiellä vakaus voidaan poistaa ajomukavuuden maksimoimiseksi. Muokkaamalla dynaamisia pyöräkuormia voidaan vaikuttaa auton ominaisohjaukseen (yli- tai aliohjautuvuus), kun kuormia muutetaan etu- ja taka-akselin välillä (esim. Taka-akselin vakaajaa löysennettäessä autosta tulee aliohjaava, ja toisinpäin). Kaavio aktiivivakaajasta nähdään kuvassa 46. Aktiivivakaajaa käytti ensimmäisenä BMW vuonna 2002. Useilla valmistajilla on erilaisia aktiivivakaajajärjestelmiä. Dynamic Drive-järjestelmän vaikutus kallisteluun nähdään kuvaajassa 15. (Heißing & Ersoy 2011, 257, 501, 520.)



Kuva 46. Aktiivinen vakaaja



Kuvaaja 15. BMW:n aktiivivakaajiin perustuvan Dynamic Drive-järjestelmän vaikutus korin kallisteluun

Yhdystangot (ns. koiranluut) voivat joutua välittämään jopa 6kN voimia. Kiinnitys olkakappaleelle on suotavaa suurimman vipuvarren (ja pienemmän rasituksen) saavuttamiseksi. Mikäli tämä ei ole pakkauksen puitteissa mahdollista toteuttaa, tulee kiinnitys olla tukivarressa. Tässä tapauksessa on huomioitava yhdystankoihin kohdistuvien voimien kasvu vipuvarren pienennyttyä. Mikäli tangon nivelten liikematka on alle 10° , voidaan nivelinä käyttää kumipuslia. Mikäli liikematka on yli 10° , käytetään palloniveliä. Yhdystanko on usein 7-12mm halkaisijaltaan oleva terästanko, mutta myös muovisia, lasikuitukomposiittisia sekä kevytvalutankoja voidaan käyttää painon minimoimiseksi. Yhdystangot eivät ole turvallisuuskriittisiä komponentteja, mikä vapauttaa niiden suunnittelua. (Heißing & Ersoy 2011, 234—236.)

8 AKSELISTORAKENTEET

8.1 Historia

Noin vuonna 2700eKr Sumerialaisissa vaunuissa oli puiset pyörät kiinnitetty kiinteällä akselilla jousittamattomasti koriin. Seuraavat askeleet akselistorakenteissa olivat elliptisten lehtijousien käyttö sekä ohjaavan

etuakselin kehittyminen kiinteästä keskeltä nivelöidystä erillisiin olka-akselillisiin (Motorwagen Wartburg 1989). Pallonivelen patentoi Fritz Faudi vuonna 1922. Huoltovapaa pallonivel esiteltiin 1952 ja se korvasi olkatapin (king pin) olkakappaleella (wheel carrier) yksinkertaistaen akselistosuunnittelua. Ensimmäisiä erillistuentoja olivat VW Beetlen ”swing-axle” heiluritaka-akseli ja 1933 M-B Typ380:n kahden kolmiotukivarren-, eli ”double-wishbone”-tuenta. Monokokkirakenne esiteltiin Opelissa 1934. Tämän uudistuksen myötä alettiin yleisesti puhua akselin sijaan pyörätuennasta. Erillinen tuenta kehittyi edelleen ja pitkittäistukivarsi eli ”trailing arm” tuli vetäväksi taka-akselirakenteeksi. Sitä seurasi monivarsituenta. Ensimmäinen puolijäykkä taka-akseli oli Audilla 1975. Kumipuslat tulivat ensin moottorin eristämiseksi rungosta USA:ssa vuonna 1930-luvulla nimellä Floating power. Myöhemmin niitä alettiin käyttää akselistorakenteissa NVH-ominaisuuksien parantamiseen. Termi ”elastokinematiikka” alkoi esiintyä insinöörien keskuudessa vuonna 1955. Nykyisin puslien avulla säädetään jo ajo-ominaisuuksia. (Heißing & Ersoy 2011, 2—3, 6.)

8.2 Yleistieto

Pyörätuennan perusvaatimukset voidaan listata esim. seuraavasti:

1. Pyörän asento ei muutu
2. Raidevälin muutoksen pysyminen pienenä
3. Camber-kulman muutoksen hallinta
4. Akselivälin muutoksen hallinta

(Laine 1981, Autotekniikka osa 2, 220)

Kappaleella on yleisesti kuusi vapausastetta: kolme liikesuuntaa ja kolme pyörähdyssuuntaa x,y,z-koordinaatistossa. Yksi päistään nivelöity tukivarsi kiinnittää yhden vapausasteen (tukivarren suuntainen liike). Kolmiotuki kiinnittää kaksi liikesuuntaa. Erilaisilla nivelillä voidaan liikesuuntia rajoittaa lisää. (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 8—13.)

Tuentoja voidaan luokitella eri ominaisuuksien mukaan. Eräs selkeä tapa on luokitella tuenta jäykkään, puolijäykkään, ja erillistuentaan. Toinen selkeä luokittelu on etu- ja taka-akselistotuennat. Vapausasteiden rajoituksen mukaan voidaan luokitella myös taso-, pallo-, ja avaruustuenta. Tasotuennassa (esim. trailing arm tai semi trailing arm) sallitaan kaksi liikesuuntaa. Pallotuennassa (esim. double wishbone) pyörän liikerata määritetään pallopinnalla. Avaruustuennassa (esim. monivarsituenta) pyörän liikeakseli muuttuu jatkuvasti ja kinematiikkamallinnus luodaan osion 7.2.1. mukaisten parametrien avulla. (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 19—21.) Tasotuennassa voidaan säätää kolmea parametriä, pallotuennassa neljää, ja avaruustuennassa viittä (Heiðing & Ersoy 2011, 395.)

Heiðing & Ersoy (2011, 384—385) taulukoi akselistorakenteen suunnittelun mahdollisuuksia. Kyseiset asiat on koottu taulukoihin 7 ja 8.

Akselityyppi	Akseli		Pyöräntuenta		
	Jäykkä	Puoli-jäykkä	taso	pallo	avaruus
Suunnittelumahdollisuudet	-	0	0	+	++
Pitkittäisjousto	-	-	0	+	++
Valmistuskustannukset	+	+	0	-	--
Tilankäyttö	--	0	0	0	+
Kokonaispaino	-	+	0	+	+
Toimivuus	++	0	0	-	-
Ajo-ominaisuudet	-	0	0	+	++
Ajomukavuus	--	0	0	+	++

Taulukko 7. Eri akselistorakenteiden ominaisuuksia (0=ei mahdollista)

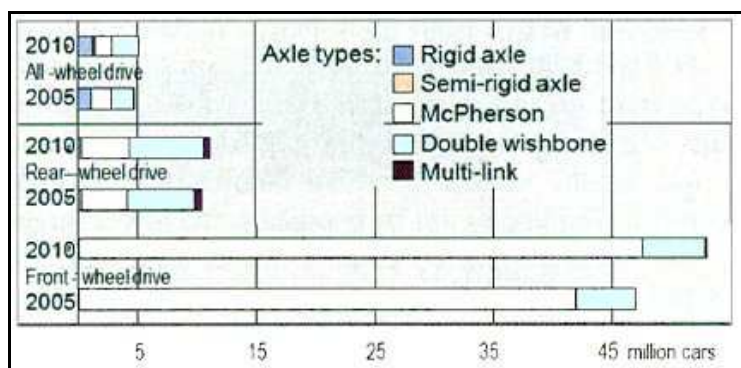
Luokitus- peruste	Jäykkä- akseli			Puoli- jäykkä	Erillisjousitus													
	lehtijousi	niveltuki+ kierrejousi			niveltuki	niveltuki					niveltuki+ liikutuki							
tuen tyyppi	1	2	1	1	1	2	3	4	5	3	4							
tukien määrä	1	2	1	1	1	2	3	4	5	3	4							
Tuen suunta	pitkittäin	pitkittäin		vino	pitkittäin	pitkittäin	vino	poikittain	vinosti	poikittain	avaruudessa	avaruudessa	poikittain	poikittain	avaruudessa			
Lisä ominai- suuksia	jousi kiinnityselimenä	kolmiotuki	panhard	watt tuki	aisatuki	vääntö	kytketty	yhdistetty	suora	kolmio	suora	trapetsi	poikittainen kaksois	poikittainen kaksois	avaruus	3-piste	joustintuki	joustintuki
No:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Taulukko 8. Akselistotyyppien rakenne

Heißing & Ersoy (2011, 417) on kerännyt liitteenä 4 olevan akselistorakenteiden suunnittelumatriisiin.

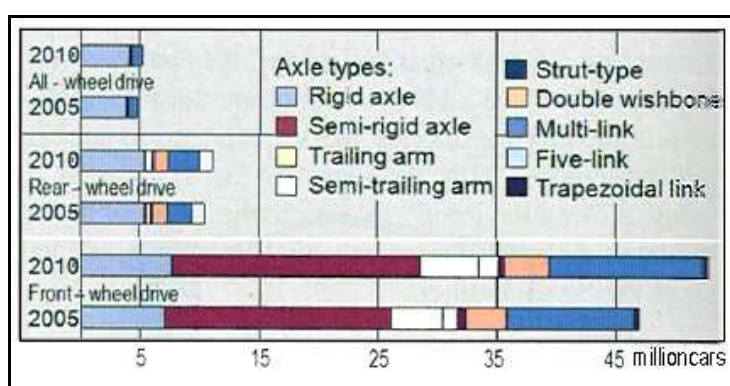
Etuakselin vaatimukset tuennan osalta eroavat taka-akselista jonkin verran. Voimat on kyettävä ottamaan vastaan, sekä on pystyttävä takaamaan mahdollistamaan vakaa ajo eristäen samalla värinät ja melu rungosta. Ohjaustuntuma pitäisi olla tarkka, eikä vedon muutoksissa saisi aiheutua ainakaan liikaa ohjausmomenttia tilanteessa, jossa saman akselin eri pyörien alla vaikuttaa eri kitkakerroin (μ -split-tilanne). Ohjauskinematiikka täytyy olla mahdollista, Ackermann-ehdon tulisi täytyä vaadittavalla tarkkuudella, raideväli- ja avaruusmuutokset joustossa tulisi minimoida ja toleranssit tulisi olla pieniä. Raidetangon optimaalinen sijainti olisi alatukivarsien tasalla tuennan etupuolella, tai alatukivarsien yläpuolella tuennan takapuolella. Tällöin joustoliikkeessä saavutetaan avaruutta, ei haritusta, koska raidetangon päät vetävät pyöriä kiinnityskohdastaan hieman sisäänpäin. Kuvaaja 16 näyttää

vuosina 2005 ja 2010 valmistettujen autojen etuakselituennat vetotavasta riippuen. (Heiðing & Ersoy 2011, 410—413.)



Kuvaaja 16. Etuakselitotuntojen jakauma vuosina 2005 ja 2010 (Heiðing & Ersoy 2011, 411)

Taka-akselin vaatimukset ovat hieman etuakselia löysemmät. Takavetoisen auton tapauksessa kuitenkin takatuennalla on suuri merkitys, sekä myös muuttuvan lastausen aiheuttamassa kinematiikan muutoksessa. Myös saman auton eri korimallien väliset erot tulisi pystyä hoitamaan niin pienillä takatuennan muutoksilla, kuin mahdollista. Kuvaaja 17 näyttää, että vuosina 2005 ja 2010 taka-akselistorakenteiden jakauma on paljon laajempi, kuin etuakselistorakenteiden. (Heiðing & Ersoy 2011, 414—416.)



Kuvaaja 17. taka-akselitotuntojen jakauma vuosina 2005 ja 2010 (Heiðing & Ersoy 2011, 414)

Saksalaiset tutkimukset ovat osoittaneet vuosien 1985-1995 sekä vuosien 2000 ja 2005 Saksan alle 1300kg omamassaisten autojen rekisteröintitilastoista, että:

- Nelivetoisten autojen osuus on noussut 4,5%:sta 6,5%:iin.
- Etuvetoisten autojen osuus on 76,5%.
- Joustintukiakselit ovat yleisin rakenne (78%). Taka-akselilla niitä ei ole enää, kuin 1,2%:ssa.
- Puolijäykän taka-akselin osuus on pudonnut vuoden 1995 35%:sta vuoden 2005 31%:iin.
- Double-wishbone-etutuennan suosio kasvoi huomattavasti vuosien 1985 ja 1995 välillä, mutta on sittemmin romahtanut 7,5%:iin.
- Jäykät akselit ovat vähentäneet suosiotaan. Etuakseleista jäykkiä on 1,2% ja taka-akseleista 22,5%.
- Trailing arm- ja semi trailing arm-takatuennat ovat vähentyneet vuoden 2003 12,3%:sta vuoden 2005 10,2%:iin.
- Double-wishbone-takatuennan suosio on kasvanut 6,1%:sta 8%:iin etenkin ei-vetävillä taka-akseleilla.
- Monivarsituenta taka-akselilla kasvatti huomasti suosiota 1985-1995, ja on pysynyt sittemmin suunnilleen vakiona 25%:ssa.

Tulevaisuudessa voidaan ennustaa kustannuspaineiden alla usean OEM:n käyttävän samoja muutamia ulkopuolisen valmistajan tuentatyyppejä. Tuennan osuus auton valmistuksen kokonaiskustannuksista voi laskea. Joustintukituenta jatkaa hallitsevana etutuentatyyppinä etenkin pienten autojen segmenteissä. Monivarsituenta hallinnee kalliimpien autojen segmenttejä, ja muiden tuentatyyppien merkitys vähenee. Hybridi- ja sähköautot tuovat uusia haasteita pyörätuontoihin (etenkin napamoottorien mahdollisessa käytössä). Luultavasti kuitenkin seuraavan 20 vuoden aikana ei erityisen suuria muutoksia tuentarakenteissa nähdä. (Heißing & Ersoy 2011, 418—420.)

8.2.1 Rakenteet

Tuennan komponenttien tehtäviä ovat:

- Varma, viiveetön, matalavastuksinen voimien välittäminen pyörältä alustalle
- Pyörän paikallaanpito suhteessa alustaan ja tiehen kaikissa ajotilanteissa vaikuttamatta auton ajosuuntaan
- Sallia etupyörien ohjauskinematiikka
- Sallia riittävä jousto ja vaimennus pyörältä korille
- Minimoida pituus- ja sivusuuntaisten voimien välittyminen ohjausjärjestelmään
- Sallia riittävä elastokinematiikka toivotun itseohjautuvuuden (yli- tai aliohjautuvuus) saavuttamiseksi

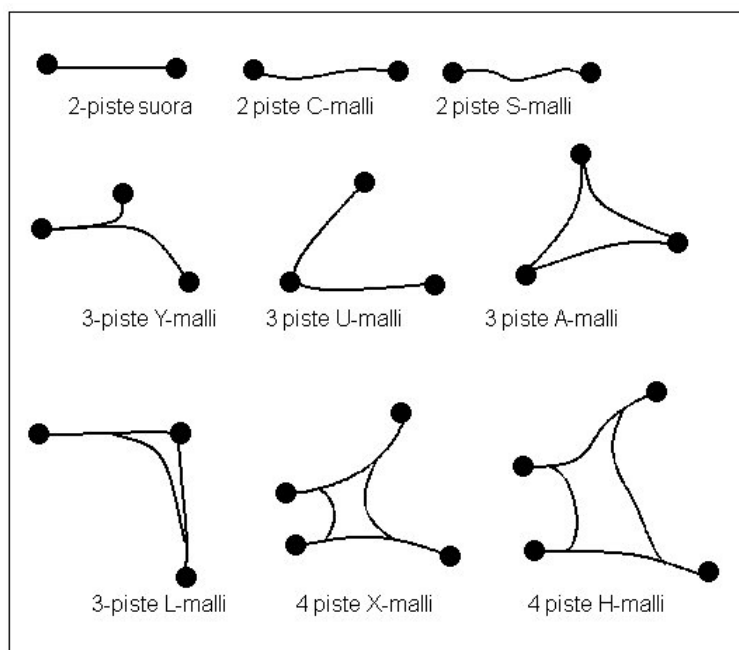
(Heißing & Ersoy 2011, 287—293.)

Tukivarret kiinnittävät olkakappaleet apurunkoon tai runkoon. Tukivarsi on yleensä jäykkä, mutta myös joustavia rakenteita on (esim. lehtijousi, trailing blade, tai Weissach-akselin poikittaistuki). Tuki on lähes aina terästä tai alumiinia, mutta komposiitti- tai hybridirakennekin (teräs ja muovi) on mahdollista. Noin puolet tukivarsien painosta lasketaan jousittamattomaan massaan. Alumiinisilla tukivarsilla on saavutettu BMW:llä ja Audilla noin 30% painonsäästö teräkseen verrattuna. Tukivarsien materiaalivalintaa on tutkittu taulukossa 9. Mikäli tukivarsi tuetaan molemmista päistään pallonivelellä, voi siihen aiheutua huojumisliikettä. Tämä eliminoidaan korvaamalla toinen nivel esim. kumipuslalla. Yleisesti yli 200mm pituisissa varsissa täytyy ottaa lujuuslaskennassa huomioon nurjahtamismahdollisuus. Taivutetussa tukivarressa tulee huomioida vääntöjännitys. Erilaisia tukien muotoja esitellään kuvassa 47. Tukivarren, joka ei kanna auton painoa (control arm), tarkoituksena on ottaa vastaan lähinnä vaakasuuntaisia voimia, ja nivelten rakenne on niissä tärkeä. Tukivarteen, jonka kautta auton paino välittyy pyörälle (support link), on

kiinnitetty jousi, vaimennin, tai kallistuksenvakain. Tällöin on tukivarren rakenteessa otettava huomioon taivuttava kuormitus. Nivelissä on myös huomioitava korkeussuuntainen kuormitus. Käytännössä tämä tarkoittaa, että tukivarsi on oltava vahvempi, ja nivelten oltava suuremmat ja vahvemmat. Aputukivarret (auxiliary link) yhdistävät tukivarsia toisiinsa tai olkakappaleeseen (esim. BMW:n 1980-luvun takatuennan integral link, jolla muutetaan semi trailing arm-tuenta avaruustuennaksi). (Heißing & Ersoy 2011, 287—293.)

	etu ylempi	etu alempi	taka ylempi	taka alempi
teräslevy	x		x	x
harmaa valurauta	x	x	x	x
terästäe	x	x	x	x
hydroform teräsputki		x		
alumiinitae	x	x	x	x
Cobapress alumiinitae	x	x	x	x
puristusmuotti- alumiinivalu	x	x		
(perm. mold) alumiinivalu				x

Taulukko 9. Tukivarsien materiaaleja



Kuva 47. Tukivarsien muotoja

Liite 5 esittää valmistusmenetelmän valintataulukot kahden ja kolmen pisteen tukivarsille. Neljän pisteen tukivarressa, joka ottaa vääntöä vastaan, täytyy olla suljettu ontto keskiosa jäykisteenä (Heiðing & Ersoy 2011, 298).

Tukivarsien niveltyyppejä ovat yleisesti pallonivel ja kumipusla. Pallonivelen vapausasteiden tarkoitus esitetään kuvassa 48. Pallonivel voi olla radiaalisesti kuormitettu (control arm) tai aksiaalisesti kuormitettu (support link). Kumipuslan hyviä puolia palloniveleen verrattuna ovat hyvä korroosionkesto ja hetkellisen ylikuormituksen kesto, äänen- ja värinänvaimennus sekä kustannustehokkuus. Huonoja puolia ovat joissakin tapauksissa epäsuotava jousto sekä rajoittunut kiertoliikematkka ($\pm 25^\circ$). ”Kardanikulma” eli puslan kiinnitysakselin ja tukivarren kiinnitysakselin välinen kulma rajoittuu noin viiteen asteeseen. Kumipusla voi olla radiaalisesti, tai aksiaalisesti sekä radiaalisesti tuettu. Puslalla voi myös luoda tuennalle ominaisohjausta esim puolijäykälle akselille. Nivelenä voidaan myös käsittää joustintuen iskunvaimennin, joka sallii aksiaalisen liikkeen sekä kiertoliikkeen. (Heiðing & Ersoy 2011, 302—321.)



Kuva 48. Pallonivelen liikkeen vapausasteet

Apurunkoa käytetään erillistuennassa. Se eristää alustan korista. Se on kiinnitetty yleensä 2-6 kohdasta puslilla (tai ilman) kiinni korirakenteisiin vaimentaen värinää ja melua. Apurunko on myös auton valmistamisen kannalta tärkeä elementti. Se kiinnittää osan pyörätuennoista valmiiksi säädetyksi paketiksi, joka voidaan asentaa runkoon. Apurunko tuo Heiðing & Ersoy:n arvion mukaan auton kustannuksiin lisää noin 25-100€ ja painaa noin 10-30kg, mutta nykyisin apurunkoa käytetään käytännössä aina mukavuus- ja asennussyistä. Apurungon on tärkeä olla sivusuunnassa jäykkä. Materiaalina voi olla teräs tai alumiini. Epätasaisella alustalla ajo aiheuttaa apurunkoon suuria paikallisia kuormituksia, ja hitsatuissa apurungoissa hitsisauman kesto on tärkeää. Apurungon suunnittelutaulukko on esitetty liitteessä 6. (Heiðing & Ersoy 2011, 322—324.)

Olkakappale kiinnittää pyörän, laakeroinnin, jarrun ja pyörännavan tukivarsiin. Materiaalina voi olla teräs tai alumiini. (Heiðing & Ersoy 2011, 325—328.)

Hybridikäytössä tai sähköauton kyseessä ollessa napamoottori on eräs voimansiirron mahdollisuus. Tämä rakenne kuitenkin lisää huomattavasti jousittamatonta massaa huonontaen ajo-ominaisuuksia ja turvallisuutta. Mikäli painoa saadaan pois tarpeeksi, voidaan napamoottoria käyttää polttomoottorin rinnalla ei-vetävien pyörien pyörittämiseen. Näin saavutetaan esim. etumoottoriselle etuvetoautolle nelivedon hyvät ominaisuudet ilman ylimääräistä voimansiirtolaitteistoa taakse. Torque vectoring-järjestelmä on myös helppo toteuttaa tällä rakenteella. Hyvä puoli napamoottoreiden käytössä on tilan vapautuminen esim. matkustaja- tai tavarankuljetustarkoitukseen. Vaihtoehto voisi siis olla sovelias, mikäli halutaan saastuttamaton suhteessa suuren kuljetuskapasiteetin auto, jossa ajo-ominaisuuksilla ei ole suurta merkitystä (esim. A/B-segmentin kaupunkiauto). (Heiðing & Ersoy 2011, 571.)

8.2.2 Kinematiikka

Akselistorakenteiden kinematiikka suunnitellaan ennen varsinaisten osien valintaa ja se käsittää kaikkien nivelien ja varsien liikkeet (joustossa ja ohjauksessa). Kinematiikka perustuu tässä ISO 88551.3/DIN 70000-

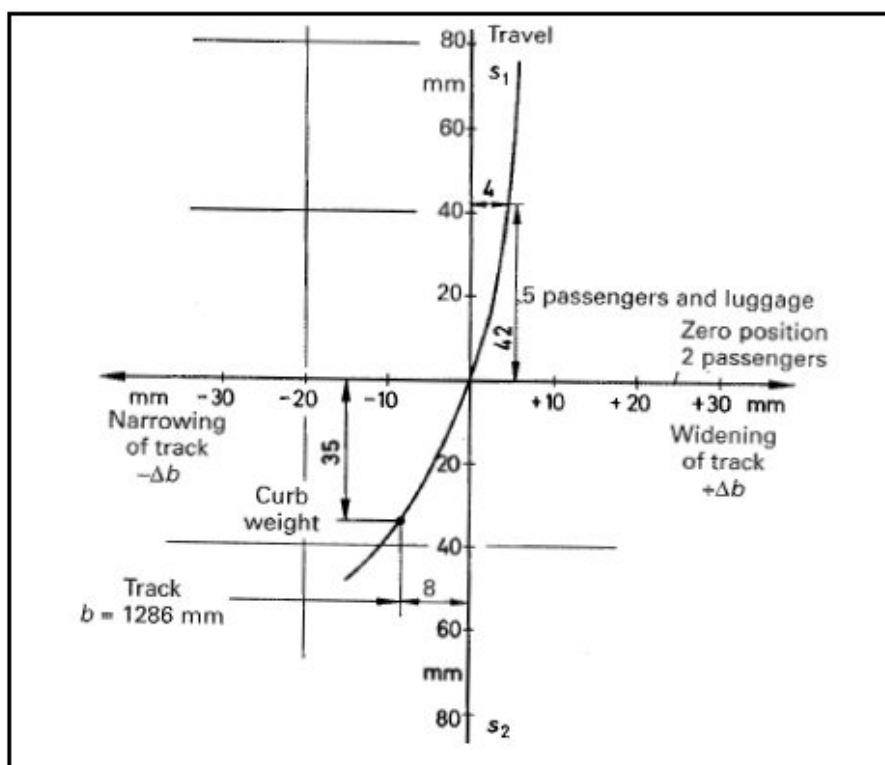
koordinaatistoon. Koordinaatiston keskipisteenä on etuakselin keskipiste tien pintaan projisoituna. Nyökkäys- ja niauskeskiöiden laskenta jne. vaatii lisäksi tiedon painopisteen sijainnista, akselipainot, jarruvoimien jaon ja voimajakauman (nelivetoisessa autossa). (Heiðing & Ersoy 2011, 18.) Kinemaattisen suunnittelun tavoitteena on esittää kaikki kinemaattiset pisteet (hard points), jotta tukivarsien pituudet voidaan määrittää (Heiðing & Ersoy 2011, 20).

Kinematiikan suunnittelun parametrejä ovat ainakin akseliväli, raideväli, painopiste, kallistus- nyökkäys- ja niauskeskiöt ja kallistusakseli, joustomatka, aurauskulma, camber-kulma, caster-kulma ja -jättämä, KPI-kulma, kääntöakseli, olkapoikkeama, kiihdytysvoiman ja jarrutusvoiman vääntövarret, ohjauskulma, sortokulma ja Ackermann-kulma. (Heiðing & Ersoy 2011, 18—27.)

Akselivälin (etu- ja takarenaan kosketuskohtien välinen etäisyys) kasvattaminen lisää matkustamotilaa, parantaa turvallisuutta ja ajomukavuutta. Välin lyhentäminen parantaa kaarreajo-ominaisuuksia. Tyypillisesti akseliväli on noin 60-70% auton pituudesta ja arvot henkilöautolla ovat välillä 2100-3500mm. Yleisesti akseliväli tulisi suunnitella mahdollisimman pitkäksi. Akselivälin muutosta tapahtuu joustossa tuennasta riippuen. Tämä auttaa tasoittamaan pituussuuntaisia heilahduksia, sekä lisää joustomatkaa ja ajomukavuutta. Toisaalta pyörän kulmanopeus vaihtelee, ja tästä voi aiheutua värinöitä voimalinjaan sekä virhesignaaleja ABS-antureille. Jarrutettaessa saattaa esiintyä pyörän hyppelyä. (Heiðing & Ersoy 2011, 18—19.)

Raidevälin (saman akselin renkaiden kosketuskohtien keskipisteiden välinen etäisyys) leventäminen lisää matkustamo- ja moottoritilaa, parantaa ajovakautta ja vähentää kallistelutaipumusta. Tyypillisesti raideväli on noin 80-86% auton leveydestä ja arvot välillä 1200-1700mm. Raideväli ei välttämättä ole sama molemmilla akseleilla. Jäykällä akselilla ei raidevälin muutosta tapahdu, mutta erillistuennassa muutosta aiheutuu joustoliikkeessä. Tästä aiheutuu pyörän sivusuuntainen liukuminen tien pintaan nähden. Syntyvä sivusuuntainen voima heikentää suuntavakautta ja vierintävastus kasvaa. Raidevälin muutokset tulisi minimoida, ja yleisesti muutosarvot ovat alle 20mm. (Heiðing & Ersoy 2011,

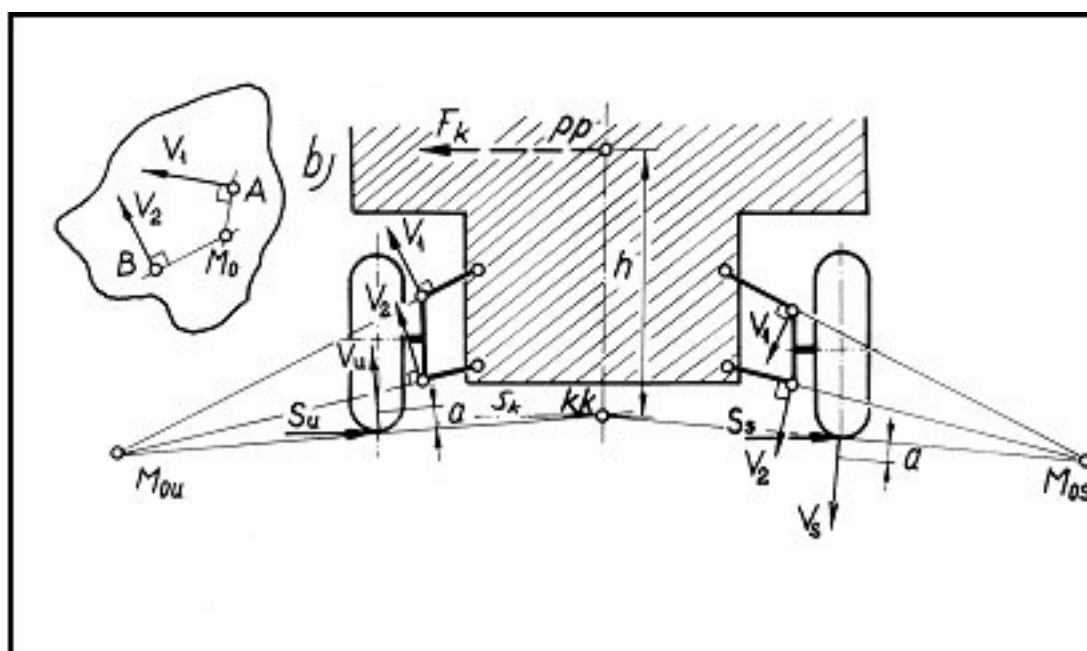
19.) Raidevälin muutosta kuvataan piirroksella, jossa x-akselilla on raidevälin muutos ja y-akselilla joustomatka (kuva Reimpell 2001, 157). Lähtötilanteena on ISO 2958:n mukainen auton suunnittelukuormitus. (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 29.)



Kuvaaja 18. Raidevälin (track) muutos ulos- ja sisäänjoustossa (Travel) esimerkkituennassa. (Reimpell 2001, 157)

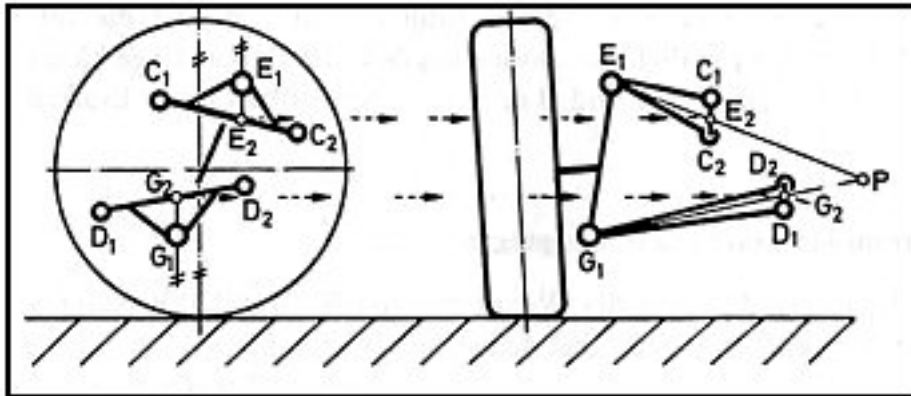
Yleisesti auton painopiste (CG) tulisi suunnitella niin alas, kuin mahdollista. Tämä parantaa ajettavuutta ja turvallisuutta. Kallistus/nyökkäyssuuntaiset kallistelut vähenevät ja pyöräkuormien muutokset vähenevät. Poikkeustapauksena korkealla painopisteellä voidaan saavuttaa suuri akselipainon muutos kaltevalla tasolla pidon parantamiseksi (esim. off-road-autoissa). Yleisesti painopisteen sijainti on noin kuormaamattomana 1000-1750mm etuakselin takapuolella 300-750mm tien pinnan yläpuolella. Painojakauma on yleisesti välillä 44:56-56:44. Tavoitepainojakauma ajodynamiikan kannalta olisi 50:50. (Heißing & Ersoy 2011, 20.)

Usein tuenta sallii 3-ulotteisen pyörän liikkeen. Kallistuskeskiö on piste, jonka ympäri auton korin kallistussuuntaisen liikkeen katsotaan tapahtuvan. Jäykällä akselilla pyörän liikennapaa ei voida määrittää, joten kallistuskeskiö on akselin keskipisteessä. Erillistuennassa kallistuskeskiön paikka muuttuu jouston aikana. Kallistuskeskiön liikettä voidaan hallita tuennan geometrialla, ja liikettä voidaan käyttää hyödyksi kallistelun hallinnassa. Tasajoustossa kallistuskeskiö saadaan auton keskilinjan avulla määritettyä kuvan 49 mukaan tukivarsien jatkeiden leikkauspisteestä (pyörän liikennavasta) renkaan kosketuskohdan keskipisteeseen vedetyn linjan leikatessa auton keskitason. (Heiðing & Ersoy 2011, 20.) Esimerkkinä double-wishbone-tuennalle voidaan kallistuskeskiö määrittää Kennedyn teoreemalla.



Kuva 49. Hetkellinen kallistuskeskiö erillistuennassa (kk) (Laine 1981, 222)

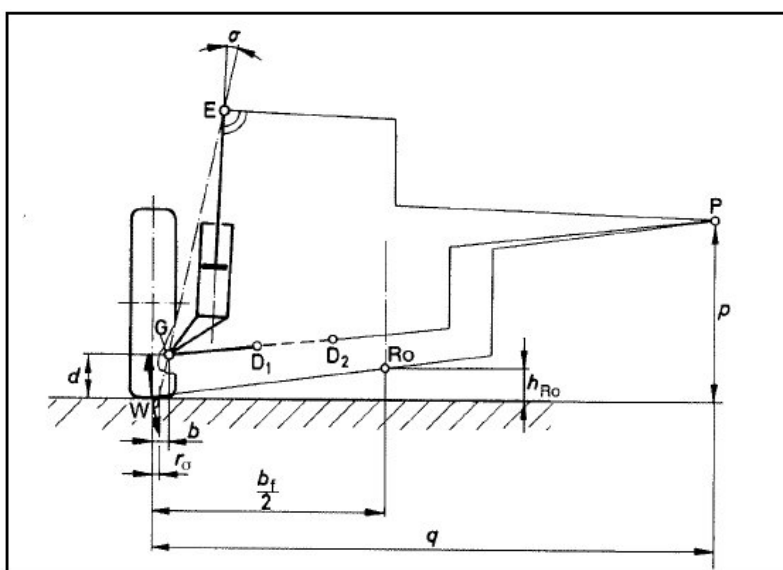
Vinoissa tukivarsissa tarvitaan lisäksi tukivarsien jatkeiden määrittämiseen kuvan 50 mukainen poikkileikkauskaavio.



Kuva 50. Vinojen tukivarsien keskikohta ja pyörän liikenapa (Reimpell 2001, 167)

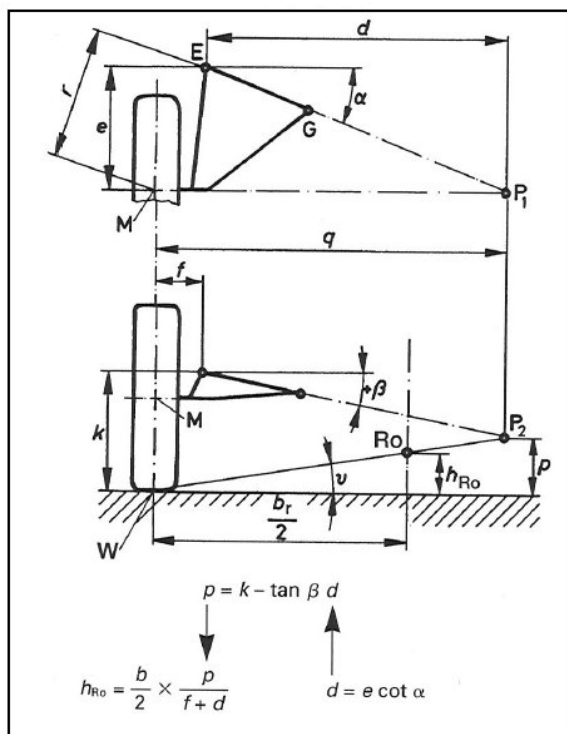
Pyörän liikenapa voi sijaita joko auton sisä- tai ulkopuolella. Kallistuskeskiö leikkaa auton keskilinjan ainoastaan tasajoustossa. Mikäli kallistuskeskiötä tarkastellaan kaarreaajossa, on kallistuskeskiö silloin pyörien liikenapojen ja renkaiden kosketuskohtien välisten linjojen leikkauspiste. (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 39—43.)

Joustintuen tapauksessa ylempi tuennan linja katsotaan vaikuttavan kohtisuoraan vaimenninelementin yläkiinnityskohdasta (kuva 51) (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 43).

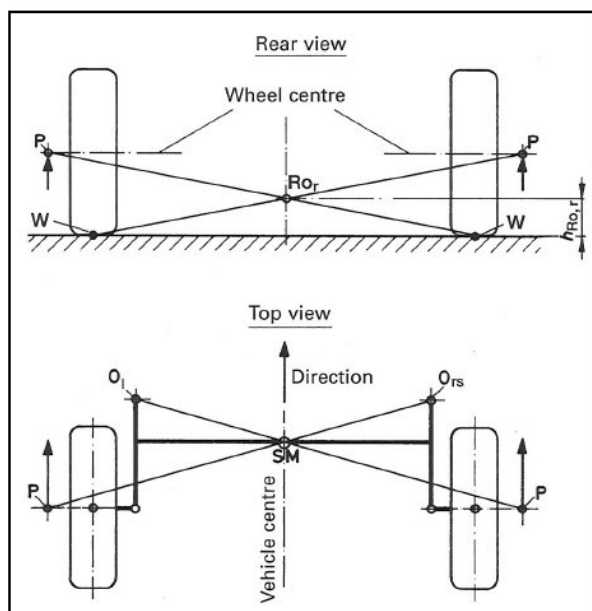


Kuva 51. Pyörän liikenapa joustintukituennassa. (Reimpell 2001, 169)

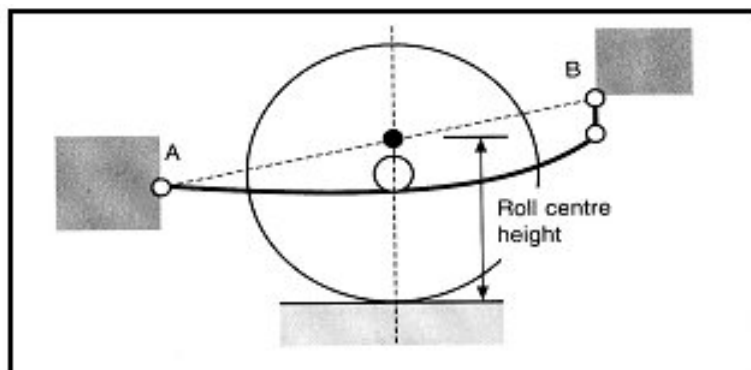
Taka-akselistojen yleisten tuentatyyppien kallistuskeskiöiden määrittämisestä nähdään esimerkkejä seuraavissa kuvissa.



Kuva 52. Vinoheilurin kallistuskeskiön määrittäminen (Reimpell 2001, 172)



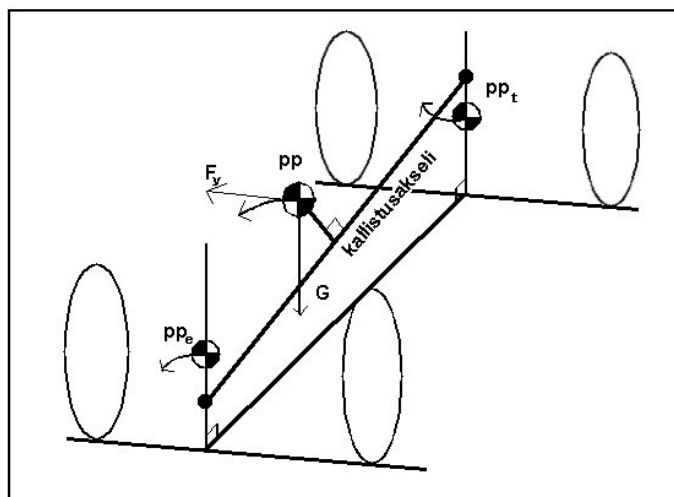
Kuva 53. Puolijäykän tuennan kallistuskeskiö (Reimpell 2001, 173)



Kuva 54. Lehtijousen kallistuskeskiön korkeus (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 49)

Kallistutkeskiö voi sijaita myös maan pinnan alapuolella. Kallistuskeskiön tyypillisiä arvoja auton neutraaliasennossa ovat etuakselille 80-250mm ja takaakselille 0-130mm. Lähellä auton painopistettä sijaitseva kallistuskeskiö vähentää kallistelua, ja olisi henkilöautossa tavoiteltava ratkaisu. (Heiðing & Ersoy 2011, 22—23.) Kallistusmomentti jaetaan kahteen osaan: geometrinen kallistus ja elastinen kallistus. Katuautoissa jousituksen elastisuuden vaikutuksesta pyritään minimoimaan geometristä momenttia aiheuttava kallistuskeskiön ja painopisteen välinen momenttivarsi, kun taas rata-autoissa pyritään päinvastaiseen ratkaisuun. Geometrinen kallistusmomentti syntyy momenttivarren ja ”keskipakovoiman” tulosta, ja antaa välittömän palautteen ajotilasta. Elastinen momentti seuraa viiveellä joustoliikkeistä johtuen. Elastinen momentti antaa katuautossa tuntumaa auton ajotilasta ja pidon rajasta. Rata-autoissa jäykän alustan ansiosta tämä elastisuus on äärimmäisen pieni, joten kuljettaja saa välittömästä geometrisesta momentista parhaiten välittömän tiedon renkaan pidosta, ja pystyy näin ollen aistimaan luistorajan.

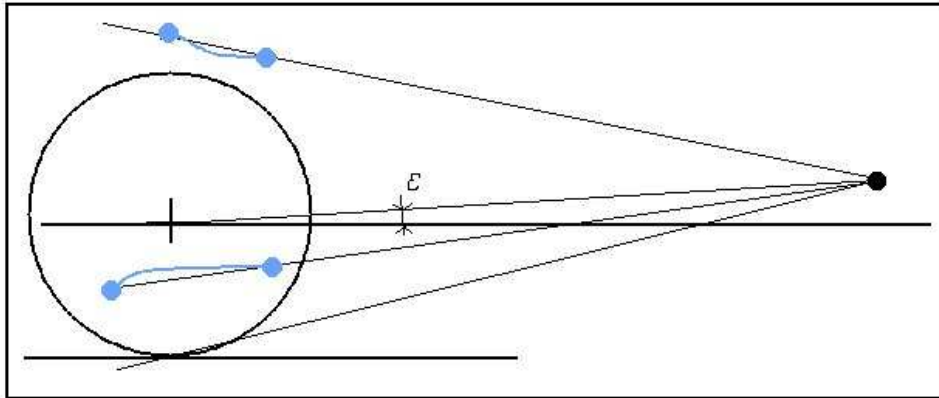
Auton kallistusakseli, jonka ympäri korin kallistusliike tapahtuu, leikkaa molempien akselien kallistuskeskiöt (kuva 55). Tyypillisiä kallistusakselin asentoarvoja ovat auton neutraaliasennossa 0-6°.



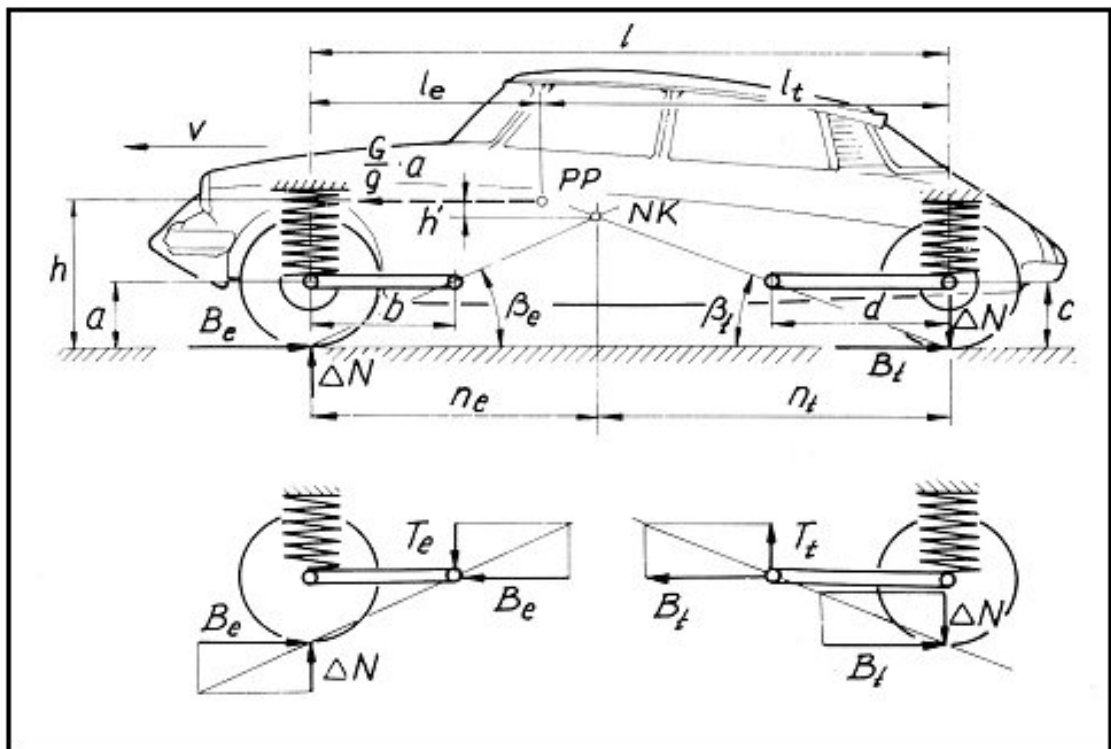
Kuva 55. Kallistusakseli

Joustomatka (s tai z) mitataan neutraaliasennosta auton painon ollessa pyörillä (joko tyhjänä tai kahdella matkustajalla). Tyypillisiä arvoja joustomatkaille ovat sisäänjoustossa 60-100mm ja ulosjoustossa 70-120mm. Mukavuutta tavoittelevissa luksusautoissa ja etenkin SUV- ja off-road-autoissa joustomatkat ovat suuremmat. Mitä pienempiä joustomatkat ovat, sitä pienempiä kinemaattisten parametrien muutokset ovat. (Heißing & Ersoy 2011, 21.)

Vinojoustokulma (ϵ) kuvaa nyökkäysliikkeen estoa. Pyörällä on tuennasta riippuva pituussuuntainen liikekeskiö (kuva 56), jonka tulisi olla mahdollisimman lähellä auton painopistettä nyökkäyksen estämiseksi (anti-dive). Anti-dive (X_{BR}) riippuu akselivälistä, painopisteen korkeudesta ja jarruvoiman jakosuhteesta. Sen arvo lasketaan nyökkäyskeskiön korkeuden ja painopisteen korkeuden välisestä suhteesta, ja se saa tyypillisesti neutraaliasennossa arvoja 60-70%. Anti-lift (X_{AC}) eli niauksen esto on nyökkäyksen estoa vastaava tapaus kiihdytyksessä, ja se saa tyypillisesti arvoja 60-80%. Nyökkäyskeskiön määrittäminen nähdään kuvassa 57. Niauksen estoa voi auttaa etutuennan negatiivisella vinojoustolla, sekä takatuennan positiivisella vinojoustolla. (Heißing & Ersoy 2011, 23—24.) Mikäli nyökkäyskeskiö on korin painopisteen korkeudella, auto ei nyöki (anti-dive=100%).



Kuva 56. Vinojoustokulma



Kuva 57. Nyökkäyskeskiön määritelmä (Laine 1981, 268)

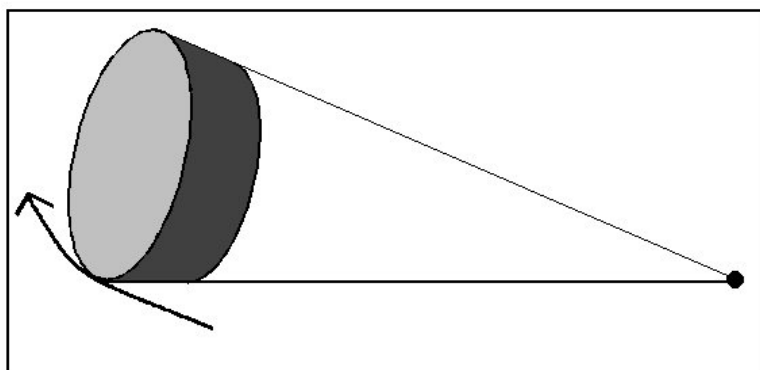
Auraus (δ) (renkaan vierintäsuunnan ja auton x-akselin välinen kulma) mitataan tässä kulmaminuutteina. ISO 612/ DIN70000:n mukaan auraus (toe in) on positiivista ja haritus (toe out) negatiivista. Tyypillisiä arvoja ovat kulmaminuutteina mitattuna:

- Ei-vetävä etuakseli 0'->+30'
- Vetävä etuakseli -30'->+20'
- Taka-akseli enintään -20'->+20'

Kaikki auraus tai haritus aiheuttaa sortoa ja kitkavoimaa. Renkaan kulumisen ehkäisemiseksi sekä polttoainetalouden parantamiseksi tulisi auraus ja haritus minimoida. (Heißing & Ersoy 2011, 21—22.) Auraus muuttuu kiihdytyksessä ja jarrutuksessa riippuen tuentatyyppistä ja siitä, onko akselilla vetoa vai ei. Vetävän akselin auraus lisääntyy kiihdytyksessä. Ei-vetävän akselin haritus puolestaan kasvaa kiihdytyksessä. Jarrutuksessa tai lift-off-tilanteessa tapahtuu päinvastoin. Nämä asiat tulisi huomioida akselistosuunnittelussa, koska niillä on suuri vaikutus akselin ominaisohjaukseen. Auraus lisää akselin stabiiliteettiä. Lisäksi auraus aiheuttaa keskittävää ohjausvoimaa kaarteessa, koska ulkorengaaseen (sortavampaan renkaaseen) kohdistuu suurempi vierintävastus. Momentin vaikutus on ohjausta keskittävä, mikäli kääntöakseli sijaitsee pyörän sisäpuolella.

Kääntöakselin sivukallistuma, eli camber-kulma (γ) (kulma ohjausakselin projektion pystysuoralle auton pitkittäiselle tasolle ja pystysuoran välillä) pitäisi pysyä $+2^\circ$ ja -2° välissä neutraaliasennossa. (Käytännössä katuautojen camber on suurimmillaan noin $1,5^\circ$.) Kulma on positiivinen, kun renkaan yläpää on ulompana, kuin alapää. Kaarreaajossa negatiivinen camber ulkorengaalla parantaa sivusuuntaisten voimien siirtoa. Raja-arvoja suuremmat kulmat aiheuttavat renkaan kulumista ja vierintävastusta. Suoraan ajettaessa camber tulisi pysyä lähellä nollaa, jopa hieman positiivisena, jotta ohjausvärinät olisivat pieniä. Camber-kulma aiheuttaa sivusuuntaista ohjausvoimaa kuvan 58 mukaisella tavalla. Kuvassa esitetään pyörän liikekeskiö kartion mallisen kappaleen tavoin. Pyörä pyrkii camber-kulmasta riippuen pyörimään liikekeskiönsä ympäri. Tämän ansiosta positiivinen camber keventää ohjausta, mutta saa liiallisena aikaan epästabiilia käytöstä. Negatiivinen camber tuo suuntavakautta, mutta tekee ohjauksesta raskaan. Käännettäessä kaarteeseen sisäpyörän positiivinen camber, sekä ulkopyörän negatiivinen camber (toivottu

tilanne) saadaan aikaan KPI-kulmaa sekä caster-kulmaa lisäämällä. (Heißing & Ersoy 2011, 22.)

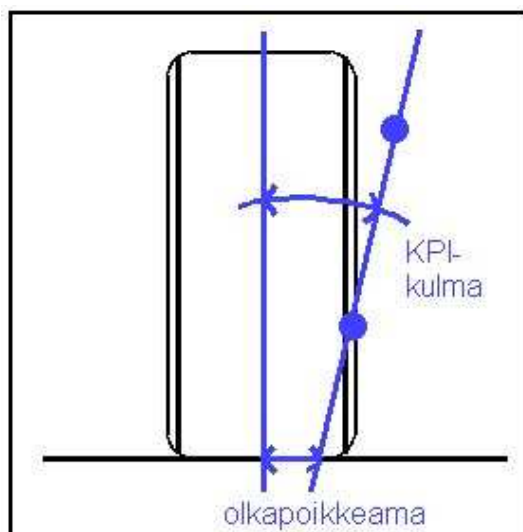


Kuva 58. Camber-kulman aiheuttama liikenapa

Ohjaavalla akselilla tulee olla yksi vapausaste enemmän, kuin ei-ohjaavalla. Kääntöakselin eli kingpin-akselin sijoituksella ja kulmilla muutetaan ohjausominaisuuksia. KPI-kulma (kingpin inclination, σ) on kulma ohjausakselin projektion pystysuoralle auton poikittaiselle tasolle ja pystysuoran välillä. Kulma on positiivinen, kun kääntöakselin yläpää on alapäätä sisempänä. Tyypillisiä arvoja ovat:

- Etumoottori, ei-vetävä akseli 5-9°
- Takamoottori, ei-vetävä akseli 5-13°
- Etumoottori, vetävä akseli 8-16°

KPI- ja Camber ovat ohjausakselin pystysuuntaisen kallistuman komponentteja. KPI-kulma vaikuttaa caster-muutokseen ja määrittää olkapoikkeaman (scrub radius, r_s), joka vaikuttaa jarrutuksessa syntyvän ohjausmomentin vipuvarteen. Olkapoikkeama on tien pinnassa oleva etäisyys kääntöakselin jatkeelta pyörän kosketuspinnan keskipisteeseen. Olkapoikkeama on positiivinen, kun kääntöakseli leikkaa tien pinnan renkaan keskikohtaa sisempänä. Tyypillisiä arvoja ovat -20-+80mm. KPI-kulma ja olkapoikkeama esitetään kuvassa 59. (Heißing & Ersoy 2011, 24—25.)



Kuva 59. KPI-kulma ja olkapoikkeama

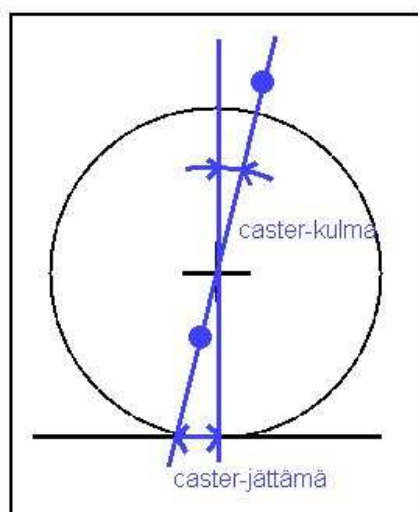
Kääntöakselin takakallistuma eli caster-kulma (τ) on x,z-akselin tietä vastaan kohtisuoran linjan ja kääntöakselin välinen kulma. Arvo on positiivinen, kun kääntöakseli kallistuu taaksepäin. Caster vaikuttaa ohjauksen keskittämiskohtisuoraan voimaan, sillä suurilla caster-kulmilla pyörä alkaa nousta ”kantilleen” tehden työtä painovoimaa vastaan. Caster-kulma lisää etuakselin sivusuuntaisen voiman välityskykyä. Taka-akselilla ei puhuta caster-kulmasta. Tyypillisiä caster-arvoja ovat:

- Etumoottori, takaveto 1-10°
- Takamoottori, takaveto 3-15°
- Etumoottori, etuveto 1-5°

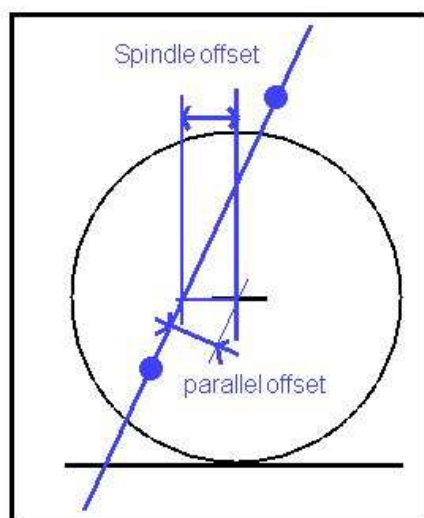
Caster yhdistettynä KPI-kulmaan saa aikaan lisää ohjausta keskittävää voimaa, kun olkapoikkeaman ansiosta sisäkaarteeseen puoleinen pyörä joutuu nostamaan pyörätuenta ylöspäin taipuessaan kääntöakselin ympäri. Tämän ilmiön voi havaita pyörittäessä rattia paikallaan ollessa. Auton toinen etukulma laskee hieman, ja toinen etukulma nousee.

Caster-jättämä (caster trail, n) on etäisyys tien pinnassa kääntöakselin jatkeen ja pyörän pystyakselin välillä. Se on positiivinen, kun etäisyys muodostuu renkaan etupuolelle. Tyypillisiä arvoja ovat ilman ohjaustehostusta 0mm ja

ohjaustehostuksen kanssa 10-40mm. Kuva 60 esittää caster-kulman ja caster-jättämän muodostumisen. Kääntöakselille kohtisuora etäisyys kääntöakselilta pyörän keskiöön (spindle offset l_{sp}) on positiivinen, kun etäisyys on pyörän etupuolella. Tyypillisesti arvot ovat 35-65mm. Spindle offsetin ansiosta caster-jättämä voi määräytyä caster-kulmasta riippumatta. Spindle offset havainnollistuu kuvassa 61. Caster-jättämä vaikuttaa ohjauksen keskittämiseen huomattavasti, ja lisäksi nyökkäys- ja niausherkkyyteen tukipisteen muutoksen ansiosta. (Heißing & Ersoy 2011, 25—26.)



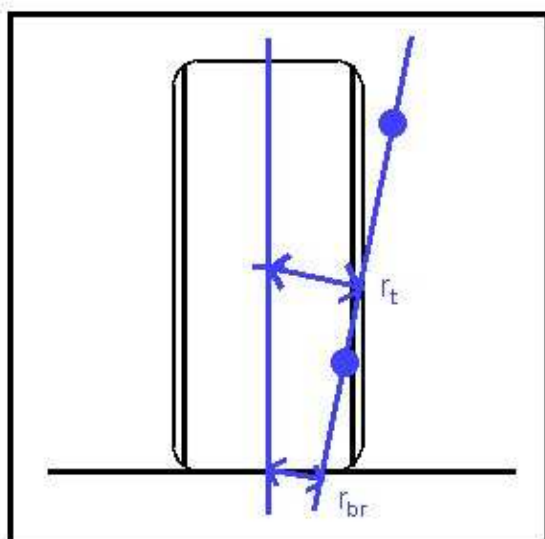
Kuva 60. Caster-kulma ja caster-jättämä



Kuva 61. Spindle offset ja parallel offset

Renkaan elastisuus aiheuttaa mekaanisen caster-jättämän lisäksi pneumaattisen jättämän. Pneumaattinen ja mekaaninen jättämä yhdessä määrittävät ohjausta keskittävän momentin (aligning torque) varren.

Momenttivarret, jotka muodostuvat kääntöakseliin nähden kohtisuoran linjan leikatessa pyörän pystyakselin, vaikuttavat jarrutuksessa ja kiihdytyksessä aiheutuviin ohjausmomentteihin. Jarrumomentti aiheutuu pyörän kehälle. Se tuottaa vaikutusvarren r_{br} kautta ohjaavan momentin. Differentiaali aiheuttaa vetoakselin kautta kiihdytyksessä (tai moottorijarrutuksessa) ohjaavan momentin pyörän keskiön ja kääntöakselin välisen vipuvarren r_t avulla. Etenkin tehokkaissa etuvetoisissa autoissa tämä etäisyys voi aiheuttaa kiihdytysvetelytaipumusta, sekä mutkassa ohjaustaipumusta. Kuva 62 esittää jarrumomenttivarren (braking disturbance force lever arm, r_{br}) sekä keskiön kääntöetäisyyden (acceleration disturbance force lever arm, r_t). Kiihdytysmomenttivarren tyypillisiä arvoja on 10-50mm (Heißing & Ersoy 2011, 26).



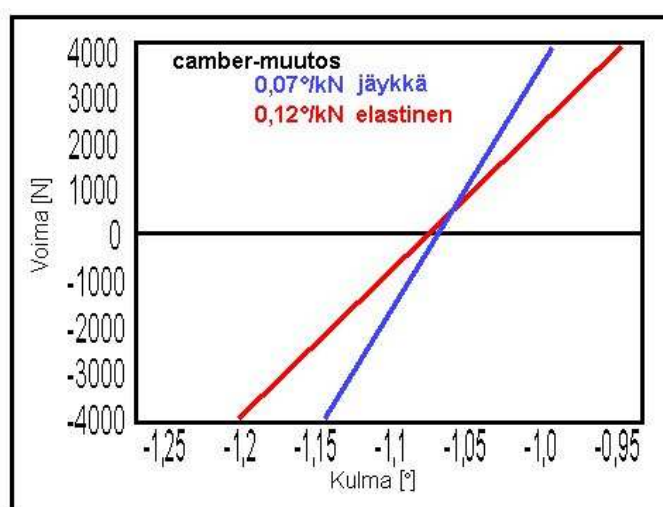
Kuva 62. Braking disturbance force lever arm, r_{br} ja acceleration disturbance force lever arm, r_t

Liite 7 esittää muutaman eurooppalaisen auton tyypilliset alustan kinemaattiset arvot. Liite 8 esittää kinematiikkasuunnittelun tavoitearvoja nelivetoiselle

suurehkolle autolle, jossa etutuentana on joustintuki ja takatuentana monivarsituenta.

8.2.3 Elastokinematiikka

Ajomukavuus vaatii jäykän kinematiikan lisäksi tuennalta pituussuuntaista liikettä jopa $\pm 25\text{mm}$, joten kinemaattisen mallinnuksen jälkeen on syytä tarkastella elastokinematiikkaa. Kumipuslat tuottavat suurimman osan tästä joustosta. Pieni osa joustosta tulee myös tukivarsien ja apurungon elastisista muodonmuutoksista niitä kuormitettaessa. Puslilta ei kuitenkaan sallita sivusuunnassa läheskään yhtä suurta liikettä, kuin pituussuunnassa. Elastokinemaattisen optimoinnin tavoitteena on ohjata muodonmuutosta aiheuttavat voimat halutuiksi liikkeiksi. Elastokinematiikka sisältää paljon ajotilanteesta riippuvia parametrejä kinematiikan lisäksi, joten sen laskenta vaatii epälineaaristen muuttujien huomiointia (FEM-analyysi). Kuvaaja 19 osoittaa elastokinematiikan tärkeyden. Kuvassa esitetään camber-kulman muutos olkakappaletta tarkasteltaessa sekä kinemaattisesti, että elastokinemaattisesti. Kulmien muutosten ero on 45%. Puslien ikääntyminen vaikuttaa alustan elastokinematiikkaan, kun elastisuus katoaa ajan myötä kumin kuoleentuessa. (Heiðing & Ersoy 2011, 31—32.) Elastokinematiikan tehtäviä tukivarsien puslissa on mm. muuttaa auruusta kiihdytyksessä ja jarrutuksessa.



Kuvaaja 19. Simuloitu camber-muutos pelkän kinematiikan, sekä kinematiikan+elastokinematiikan kanssa

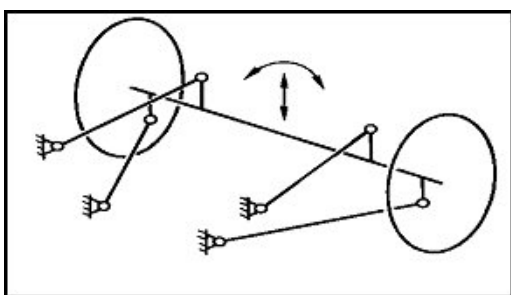
Elastokinematiikan laskeminen on hankalaa ja autonvalmistajat luottavat usein kilpailijavertailuihin tai aiemmin hyväksi havaittuihin arvoihin. Näin toimitaan myös pyörätuntojen valinnassa. (Heißing & Ersoy 2011, 32).

8.3 Jäykkä tuenta

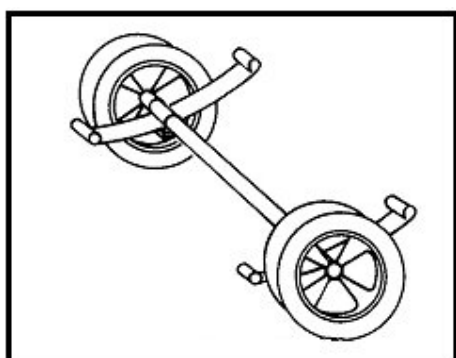
Jäykkä tuenta tarkoittaa tuentatyyppiä, jossa akselin molempien pyörien liike on täysin toisistaan riippuvainen.

8.3.1 Jäykkä akseli

Jäykälle akselille sallitaan kaksi kinemaattista vapausastetta: pystysuora liike ja kallistusliike. Tämä voidaan toteuttaa esim. neljällä nivelsauvalla (kuva 63) tai lehtijousilla (kuva 64). (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 8—13.)



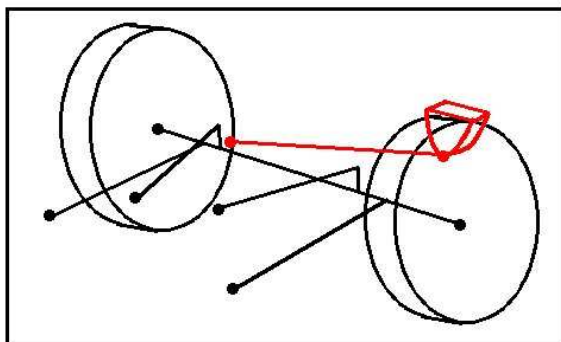
Kuva 63. Neljän nivelsauvan jäykkä tuenta (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 12)



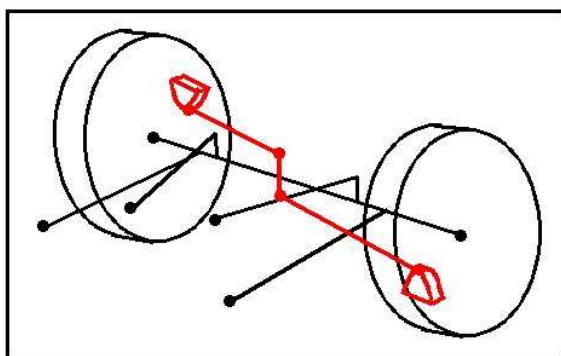
Kuva 64. Lehtijousitettu jäykkä tuenta (Reimpell ym. 2001, 26)

Jäykkää akselia ei juuri käytetä etuakselina, paitsi joissakin off-road-autoissa. Hyötyajoneuvot ja off-road-autot käyttävät kuitenkin yhä yleisesti jäykkää taka-akselia. Jäykkä akseli on äärimmäisen robusti rakenne, halpa ja yksinkertainen, ja se soveltuu suurille kuormituksille. Pyörien kulmat pysyvät joustoliikkeessä vakiona, sekä suuret joustoliikkeet ja maavara ovat mahdollisia (off-road-ajoa huomioiden). Säädettyävyttä ei jäykässä akselissa ole, joten ajo-ominaisuudet ovat rajalliset. Jäykkään akseliin voidaan siis säätää kiinteät asetukset valmistettaessa. Vetävää jäykkää akselia kutsutaan nimellä ”live axle”, ja ei-vetävää nimellä ”dead axle”. Vetävälle jäykälle akselille on helppo ja halpa toteuttaa voimansiirto nivelten puuttumisen ja valmiin differentiaalisen asennuspaikan ansiosta. (Heißing & Ersoy 2011, 385—386.) Joustoliikkeen mukana liikkuva jäykkä akseli vaatii paljon tilaa korkeussuunnassa, eikä takapyörien väliin voida tehdä kovinkaan matalaa tavaratilaa (Reimpell ym. 2001, 3). Vetävä jäykkä akseli, jossa on differentiaali kiinni, kärsii väännön aiheuttamasta pyöräkuormien muutostaipumuksesta. Kaarreaajossa toiseen suuntaan käännettäessä jalan nostaminen kaasulta voi aiheuttaa ylioheavaan momentin, kun pyöräkuormat muuttuvat. (Vesterinen 2010, Akselistorakenteet, 9)

Kierrejousilla (usein myös lehtijousilla) tuettu jäykkä akseli tarvitsee sivuttaisliikettä estävän tuen. Tällaisia suoravientitukia ovat esim. Panhard-tanko (kuva 65) tai Watt-vivusto (kuva 66). Mikäli pitkittäistukien laakerit pääsevät joustamaan, akselin taakse asennettu Panhard-tanko voi aiheuttaa aliohjautumista, ja etupuolelle asennettu yliohjautumista. (Vesterinen 2010, Pyörätuenta, 96)



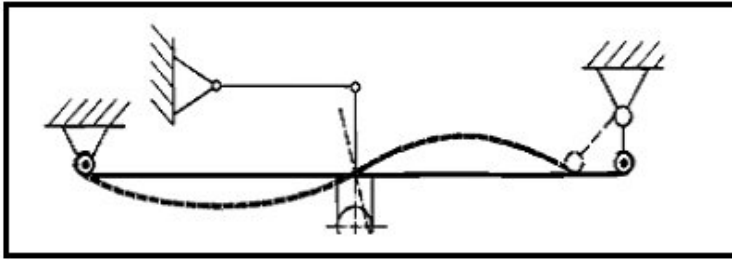
Kuva 65. Panhard-tanko



Kuva 66. Watt-vivusto

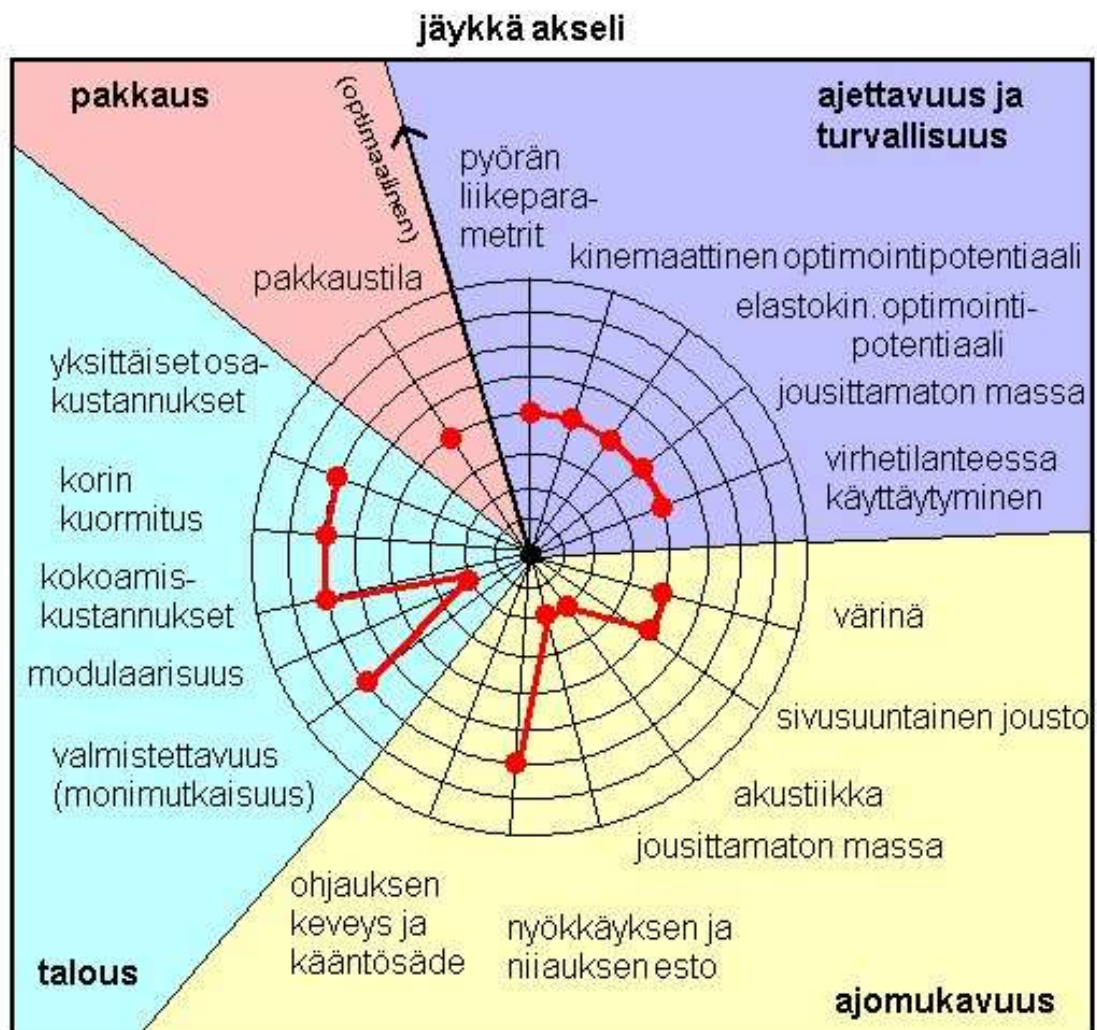
Lehtijousessa jousipakan asennuskulmaa muuttamalla voidaan vaikuttaa akselin ominaisohjaukseen. Jos jousipakan takapään kiinnityspiste on etupäätä korkeammalla, akseli liikkuu joustossa eteenpäin ja akselista tulee näin ollen yliohejaava. Mikäli kiinnityspisteiden pystysuuntainen sijainti on toisinpäin, akselista tulee aliohejaava (toivottava ratkaisu). Usein takimmainen kiinnityspiste on nivelöity. Tämä mahdollistaa joustossa syntyvän pituussuuntaisen liikkeen vapauden.

Eräs lehtijousen ongelma etenkin vetävälle akselille sijoitetulla yksilehtisellä jousella on akselin vääntömomentti. Momentti kiertää jouta ja aiheuttaa värähtelyä. Tätä taipumusta voidaan ehkäistä tukemalla akselin ja jousen kiinnityspiste kiertoliikettä estävällä tuennalla (kuva 67). (Vesterinen 2010, Jouset, 29.)



Kuva 67. Lehtijousen kiertoliike ja tuen vaikutus (Vesterinen 2010, Jouset, 29)

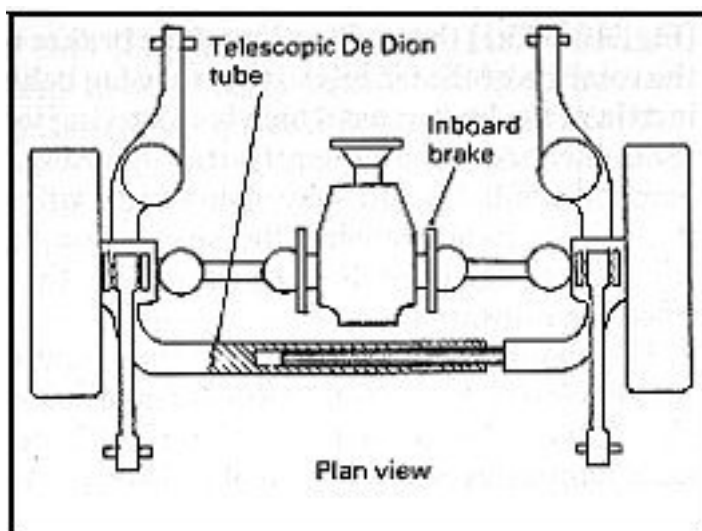
Jäykän akselin ominaisuudet nähdään Heiðing & Ersoy:n (2011, 386) mukaan tehdyssä kuvaajassa 20.



Kuvaaja 20. Jäykän akselin ominaisuudet

8.3.2 De Dion

De Dion-akseliston rakenne on ranskalaisen De Dion-Bouton-autonvalmistajan 1930-luvulla käyttämä jäykkä tuenta nimenomaan vetävälle akselille. U-muotoinen jäykkä akseli on kiinnitetty apurunkoon. Tämä ratkaisu mahdollistaa suuren tilan keskelle tuentaa voimansiirtoa varten, sekä minimoi jäykän akselin jousittamattoman massan. Ratkaisu oli yleisesti urheiluautokäytössä ennen erillistuennan kehittymistä, mutta nykyisinkin ratkaisua on käytetty hieman jatkojalostettuna esim. Smartissa. (Vesterinen 2010, Akselistorakenteet, 11.) Erittäin kevyissä rata-autoissa tasaisella alustalla hyvin säädetyllä De Dion-tuennalla voidaan kilpailla jopa erillistuennan kanssa (The suspension bible 2012, 1). Joustossa raideväli pyrkii muuttumaan (johtuen nivelletystä vetoakselistosta ja kiinteästi paikallaan pysyvistä differentiaalista). Jäykkä akseli kuitenkin pyrkii estämään tämän. Ratkaisuna voidaan käyttää teleskooppimaista akselia, joka sallii pienen raidevälinmuutoksen. Toinen vaihtoehto on käyttää jäykkää De Dion-akselia ja liukuvia vetoniveliä. Normaali De Dion-tuenta teleskooppiakselilla näkyy kuvassa 68.



Kuva 68. De Dion-akselin kaavio (Autozine 2011,1)

8.3.3 Aisatuenta

Aisatuennassa akseli on kiinnitetty yhdestä pisteestä runkoon kiinni. Ratkaisu oli vanhoissa henkilöautoissa yleinen (aisana toimi kardaanin suojatunneli). Nykyisin ratkaisua käytetään lähinnä linja-autoissa ilmajousitetulla taka-akselilla, mutta esim. Mercedes-Benzin A- ja B-malleissa on aisatuettu taka-akseli (kuva 69). Akselia voidaan parantaa keskilaakerin puslalla, jolloin pitkittäisten tukien vaikutuksesta akselista tulee aliohjaava. (Vesterinen 2010, Akselistorakenteet, 12—14.) Keskinivel tulisi sijaita mahdollisimman korkealla auton nyökkimisen kompensoimiseksi. Tuenta vaatii sivuttaistuen (esim. Wattvivuston). (Heißing & Ersoy 2011, 389.) Lancia Y 10 ja Fiat Panda käyttivät tätä tuentatyyppiä nimellä Omega-akseli (Reimpell ym. 2001, 60).

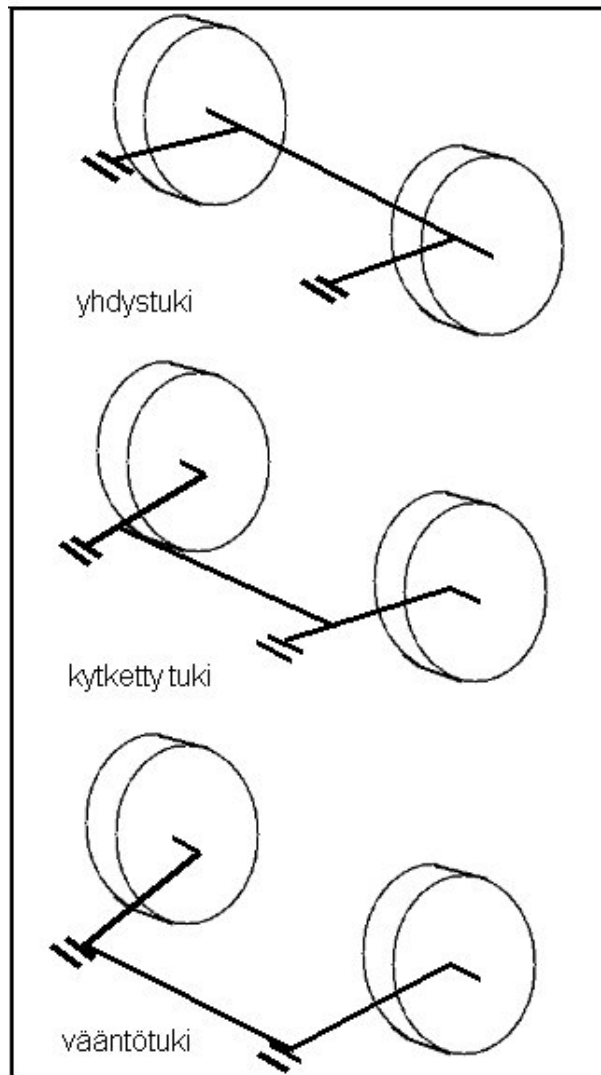


Kuva 69. Mercedes-Benz A-mallin takatuenta (Heißing & Ersoy 2011, 389)

8.4 Puolijäykkä tuenta

Puolijäykkä tuenta hyödyntää vääntötankojousta saman akselin pyorien yhdistämiseen. Kyseessä on jäykän kaltainen tuentatyyppi, jossa sivuttaistuki joustaa kiertosuunnassa. Ratkaisu on yhä yleinen C-segmentin ja pienempien etuvetoisten autojen takatuentana, mutta jotkin autonvalmistajat ovat alkaneet luopua siitä ajo-ominaisuuksien parantamisen toivossa. Esimerkiksi Ford, VW, Audi, Alfa Romeo ja Peugeot eivät ole enää käyttäneet uusissa autoissaan puolijäykkää tuentatyyppiä. (Heißing & Ersoy 2011, 391.)

Puolijäykkä tuenta voidaan jakaa kolmeen tyyppiin: vääntötuki, kytketty tuki ja yhdistytuki (kuva 70). Kallistuksenvakaajaa ei puolijäykässä tuennassa tarvita, koska vääntösuuntainen tuenta hoitaa saman asian. Heißing & Ersoy:n (2011, 390) mukaan yleisiä vääntötankotyypppejä ovat U- tai V-profiilit, ja paras ratkaisu on suora putki, joka on auton keskilinjan läheltä prässätty C-profiiliseksi. Vesterinen (2010, Akselistorakenteet, 19) lisää vielä tuennan ominaisuuksista, että lähellä pitkittäistuen nivelpistettä oleva sivuttaistukipalkki voi aiheuttaa aurauksen muutosta. Tätä ylioheutta aiheuttavaa muutosta voidaan hallita pitkittäistuen laakerin rakenteella tai asennuskulmalla.



Kuva 70. Puolijäykät perustuentatyyppit yhdystangon asemasta riippuen

8.4.1 Vääntötuki

Vääntötukiakselissa sivuttaistukitanko on lähellä pyörien keskiötä ja tuennan ominaisuudet ovat lähellä jäykkää tuentaa (Vesterinen 2010, Akselistorakenteet, 17). Ratkaisu on vanhin puolijäykkä tuentatyyppi, ja se oli ensimmäisenä käytössä 1969 Audi 100-mallissa (Heißing & Ersoy 2011, 391).

8.4.2 Kytetty tuki

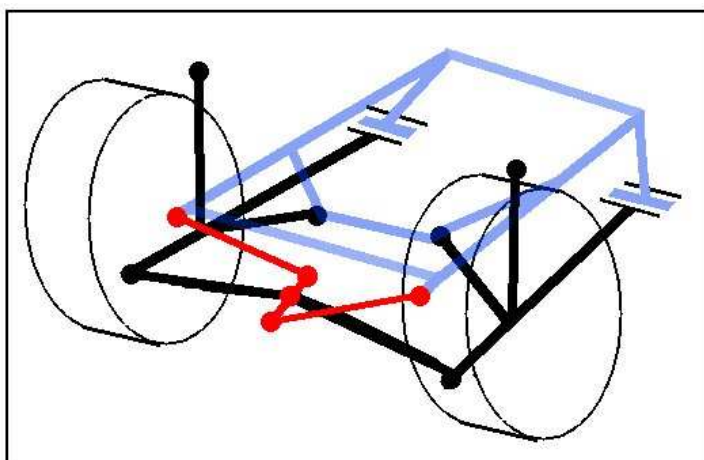
Kytetyssä tuessa sivuttaistukitanko sijaitsee tukivarsien puolivälin paikkeilla. Tuennan ominaisuudet ovat vääntötuennan ja yhdystuennan välimaastosta. (Heiðing & Ersoy 2011, 392.)

8.4.3 Yhdystuki

Yhdystuessa sivuttaistukitanko sijaitsee pitkittäistukien nivelpisteessä ja tuennan ominaisuudet ovat lähellä pitkittäistuettua rakennetta (Vesterinen 2010, Akselistorakenteet, 17). Kytetty tuki kärsii muita enemmän kaarteiden ulomman pyörän haritusvaikutuksesta (johtuen pyörän sivuttaistuen puutteesta). Tätä kompensoidaan tukivarsien laakeroinnin puslilla. (Heiðing & Ersoy 2011, 391.)

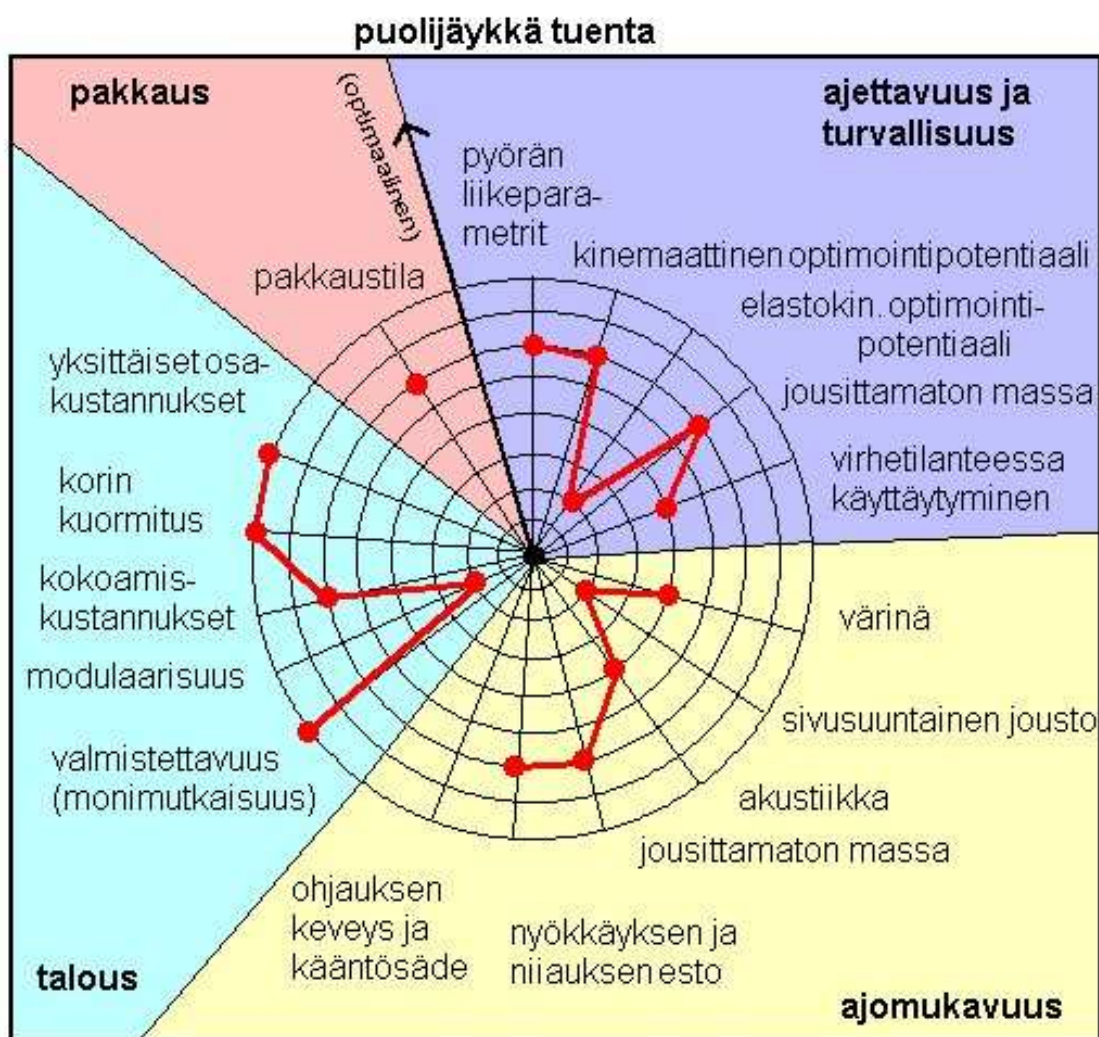
8.4.4 Dynaaminen puolijäykkä tuenta

Kolmen perustyyppin lisäksi Magna Steyr kehitti vuonna 2001 dynaamisen puolijäykkän tuennan korvaamaan vetävän akselin jäykän tuentatyyppin. Rakenne nähdään kuvassa 71. Pyörät tuetaan pitkittäis- sekä sivuttaistukivarsilla erillistuennan tapaan, mutta tuennat yhdistetään päistään nivelöidyllä tangolla toisiinsa. Sivusuuntaista tukea tehostetaan Watt-vivustolla. Tuenta käyttäytyy jäykän tuennan tavoin ja mahdollistaa korkean kallistuskeskiön. (Heiðing & Ersoy 2011, 392.)



Kuva 71. Magna Steyrin dynaaminen puolijäykkä takatuenta

Puolijäykän tuennan etuja ovat yksinkertainen rakenne, pieni tilantarve, helppo asennettavuus, vääntötangon toimiminen kallistuksenvakaajana, pyöräkuormien minimointi, pieni raidevälin muutos, kuormasta riippumaton ominaisohjaus sekä hyvä niiauksenesto. Huonoja puolia ovat vääntötangon kiinnityskohtiin kohdistuvat rasitukset (mahdollinen hitsin repeäminen), yliohjaava ominaisohjaus (mikäli oikeanlaisia puslia ei käytetä), huono sivuttaisvoimien kesto, ja huono ajo-ominaisuuksien säätömahdollisuus. Puolijäykä tuenta ei erikoistapausta lukuunottamatta sovellu vetävälle akselille, eikä korkeille kuormituksille hitsisaumojen keston takia. Puolijäykän akselin ominaisuudet nähdään Heiðing & Ersoy:n (2011, 390) mukaan tehdyssä kuvaajassa 21. (Heiðing & Ersoy 2011, 390—391; Reimpell ym. 2001, 28—30.)



Kuvaaja 21. Puolijäykän tuennan ominaisuudet

8.5 Erillistuenta

Pyörälle sallitaan pääasiassa yksi kuudesta vapausasteesta (pystysuora liike). Tarvittavien tukien määrä riippuu niiden kinemaattisista ominaisuuksista. Kahden pisteen tuki kiinnittää yhden vapausasteen. K.o. tukia tarvitaan siis viisi kiinnittämään viisi vapausastetta. Kolmen pisteen tuki ("wishbone") kiinnittää kaksi vapausastetta. Niitä tarvitaan siis kaksi, sekä yksi kahden pisteen tuki ("double-wishbone"-tuenta). Neljän pisteen tuki ("trapetsituki") kiinnittää neljä vapausastetta. Tämän lisäksi tarvitaan vielä yksi kahden pisteen tuki ("two-link-tuenta"). Liikutuki (käytännössä iskunvaimennin) voi toimia kaksi vapausastetta kiinnittävänä tukena. Myös yhden viisi vapausastetta kiinnittävän tuen käyttö on mahdollista. Tätä vaihtoehtoa sovelletaan useimmiten taka-akselilla. Tuenta voidaan toteuttaa erilaisilla pitkittäis- poikittais-, tai vinoheilureilla. (Heißing & Ersoy 2011, 393—395.)

Erillisjousituksen suosio on kasvamassa ja sillä on useita etuja muihin tuentatyyppeihin verrattuna: kevyt jousittamaton massa, pyörän liike ei vaikuta toisen pyörän liikkeeseen, paljon kinemaattisia sekä elastokinemaattisia säätömahdollisuuksia, sekä värinöiden ja akustiikan eristys on yksinkertaista. Huonoja puolia ovat heikot off-road-ajo-ominaisuudet johtuen maavaran puutteesta, kallistuksenvakaajan tarve, sekä jäykkään akseliin verrattuna vähemmän robusti rakenne. (Heißing & Ersoy 2011, 395.)

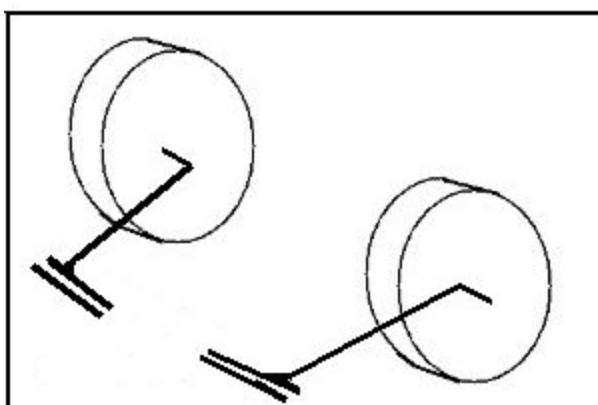
8.5.1 Heilurituenta

Taka-akselin yksittäisen tukivarren erillistuentoja ovat pitkittäisheiluri (trailing arm), vinoheiluri (semi trailing arm), sekä poikittaisheiluri (swing axle). Tuen täytyy olla jäykkä, ja ottaa vastaan x- ja y-suuntaiset kuormat. Voimien suuruudet voidaan minimoida pidentämällä tukivarsia. (Heißing & Ersoy 2011, 395—396.)

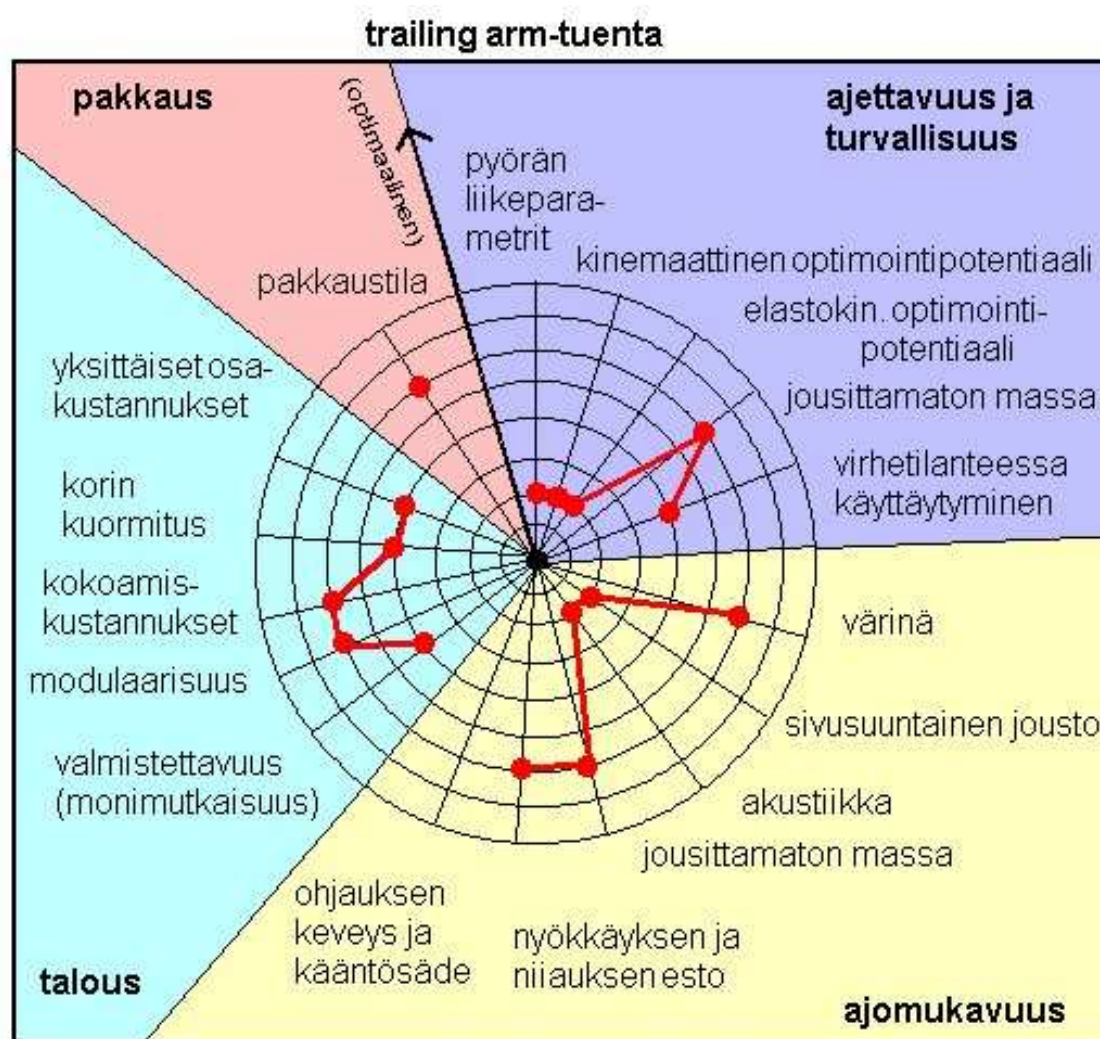
Poikittaisheiluri (swing axle) ei kykene ottamaan vastaan x-suuntaisia voimia, joten se vaatii erillisen pitkittäistuen toimiakseen. Kyseessä on siis oikeastaan

kahden tuen rakenne. Esim. VW Beetlen vetävällä taka-akselilla oli swing-axle-tuenta. Tuennan etu on, että poikittaisen tuen pituus pysyy vakiona ja vetoakseleissa voidaan käyttää ristiniveliä. Haittoina on sivuvoimasta aiheutuva koria nostava voima sekä camberin lisääntyminen ja mahdollinen tukivarren taittuminen auton alle kaarteessa. Korin kallistuessa tuennalle on myös ominaista tuottaa ulkokaarteeseen päin camberia molempiin pyöriin, joka lisää akselin yliohjautuvuutta. Rakenne on yksinkertainen ja halpa, mutta ei enää nykyisin käytössä. (Heiðing & Ersoy 2011, 398—399.)

Pitkittäisheilurin (trailing arm) tulee olla rakenteeltaan äärimmäisen kestävä, jotta sivusuuntaiset voimat eivät aiheuttaisi vääntymistä. Tuenta mahdollistaa pienen pakkaustilan. Jousto-ominaisuuksia voidaan säätää tukivarren pituudella. Nivelten elastisuudesta johtuen tuennalle on ominaista ulomman pyörän haritus kaarteessa. Molemmat tuet voidaan kiinnittää toisiinsa kiinteällä sivuttaispalkilla, jolloin tuennasta tulee jäykempi. Rakenne muistuttaa puolijäykkää tuentaa, mutta kiinteä poikittaistuki ei ole liitetty heilureihin. Kallistuksenvakaaja tarvitaan tasaamaan pyöräkuormat. Kuvassa 72 on esitetty mm. 1997 Mercedes-Benz A-mallissa takatuentana toimiva trailing arm-tuenta. Tuennan etuja ovat yksinkertainen rakenne, sekä pieni pakkaustila. Tukivarsien väliin voidaan sijoittaa suuri tavaratila, tai polttoainetankki. Huonoja puolia ovat matala kallistuskeskiö (0), yliohjautuvuus (ilman erityisiä rakenteita), sekä stabiliteetti suoraan ajettaessa. Trailing arm-tuennan ominaisuuksia on esitelty kuvaajassa 22 Heiðing & Ersoy:n (2011, 307) mukaan. (Heiðing & Ersoy 2011, 396—397; Reimpell ym. 2001, 15.)



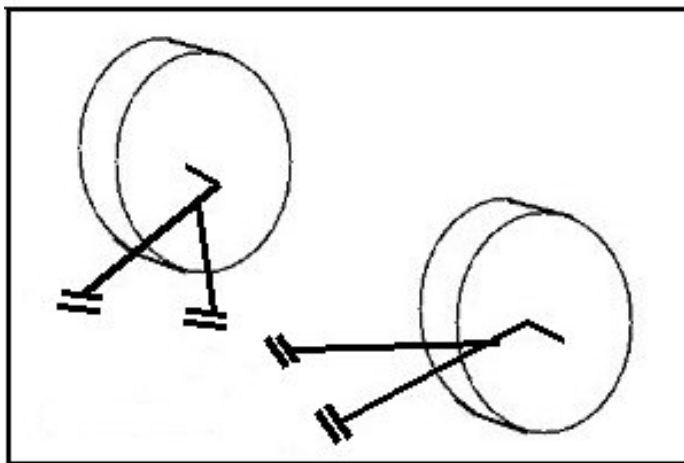
Kuva 72. Trailing arm-tuenta



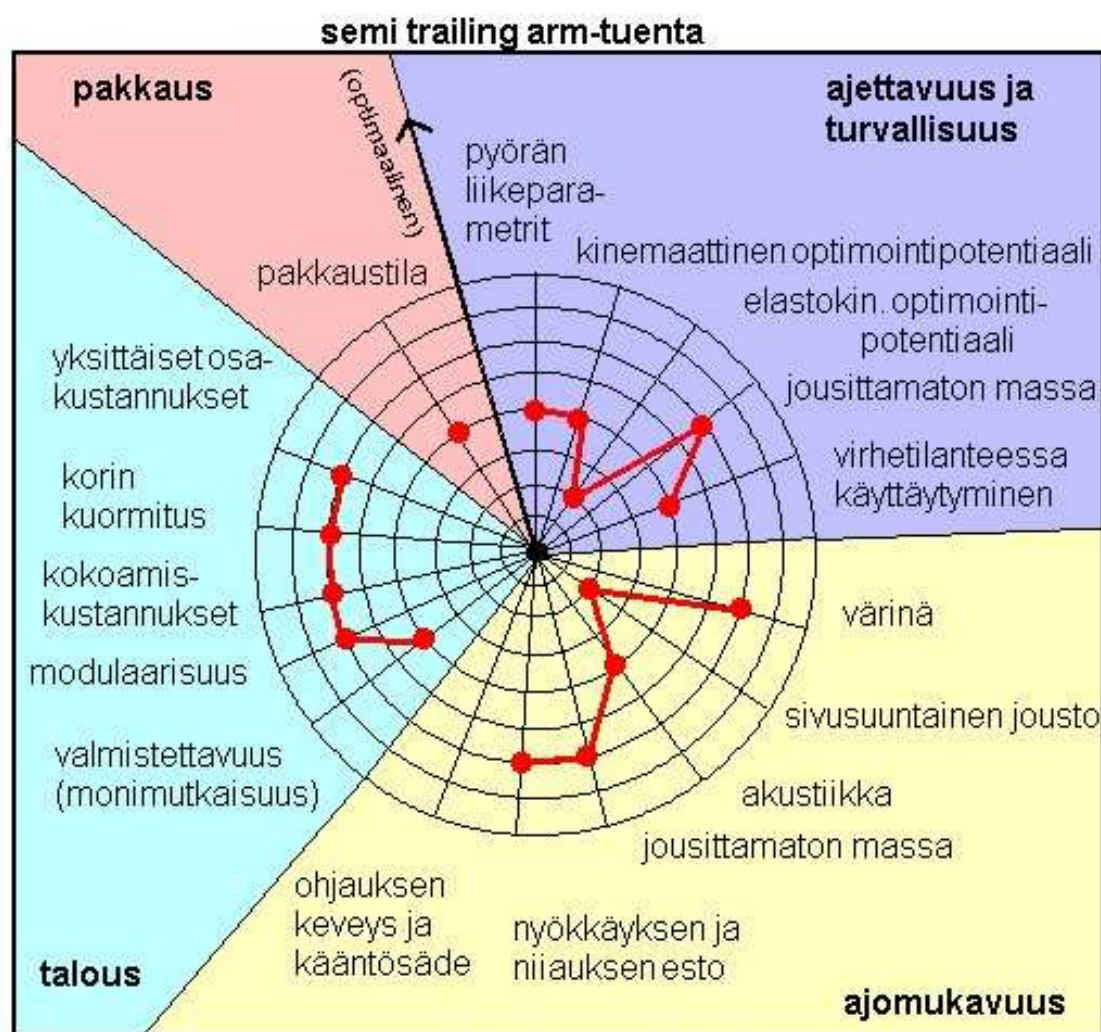
Kuvaaja 22. Trailing arm-tuennan ominaisuudet

Vinoheiluri (semi trailing arm) on yksittäisen tuen rakenteista paras ottamaan vastaan x- ja y-suuntaisia voimia ja tarjoaa pitkittäis- ja poikittaisheilurien hyvät ominaisuudet ilman suuria heikkouksia. Rakennetta käytetään etupäässä takavetoisissa autoissa. Kuvasta 73 nähdään vinoheilurirakenne. Yleisiä asennuskulmia ovat vaakasuuntainen asennuskulma $\alpha=10-25^\circ$ ja pystysuuntainen kulma $\beta \leq 5^\circ$. Kulmia säätämällä ja tukivarsien pituutta muuttamalla saavutetaan haluttu kinematiikka. Esimerkiksi kulmaa α

pienentämällä tai kulmaa β suurentamalla nyökkäyksenesto paranee. Kulmilla säädettäviä parametrejä ovat kallistuskeskiön korkeus, liikekeskiön sijainti, camber ja auraus. Semi trailing arm-tuennan etu on kinematiikan melko vapaa optimointi ja voimien vastaanottokyky. Huonoja puolia ovat mahdollinen sivuvoiman aiheuttama haritus, suuret camber-muutokset, camberin ja aurauksen riippuvuus toisistaan, tukivarsien vaatima tila, sekä puslien tarve ajomukavuuden tuomiseksi. Semi trailing arm-tuennan ominaisuuksia on esitelty Heiðing & Ersoy:n (2011, 398) mukaan kuvaajassa 23. (Heiðing & Ersoy 2011, 397; Reimpell ym. 2001, 17—18.)



Kuva 73. Semi trailing arm-tuenta



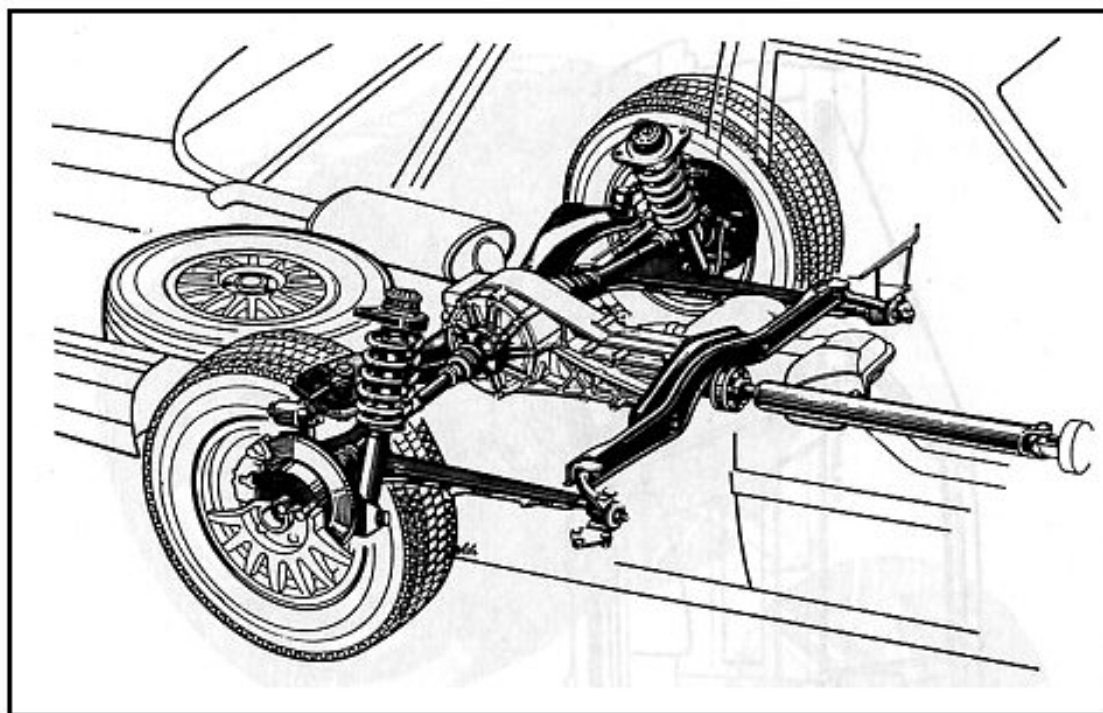
Kuvaaja 23. Semi trailing arm-tuennan ominaisuudet

Mikäli semi trailing arm-tuentaan lisätään erillinen aputukivarsi ulomman varren ja apurungon väliin, saadaan tasotuentaan lisättyä ruuvimainen y-suuntainen liike. Tämä mahdollistaa lisää kinemaattisia parametrejä säädettäväksi. Rakenne nähtiin 1981 BMW:n 5-sarjan takatuennassa. (Heißing & Ersoy 2011, 398.)

8.5.2 Trapetsi- ja double wishbone-tuennat

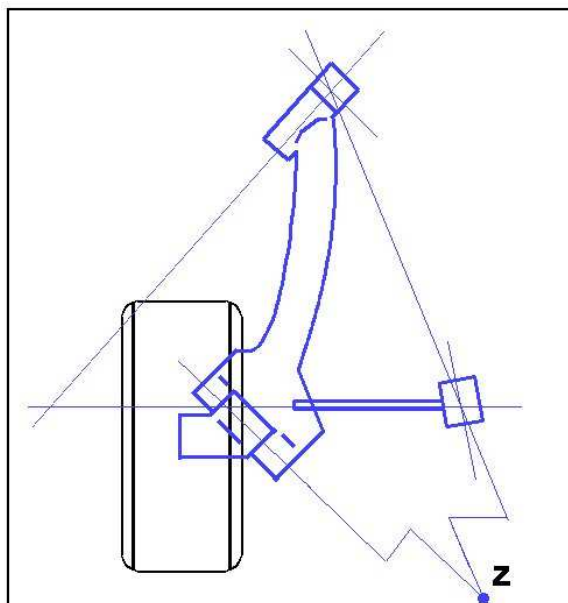
Yksi trapetsituki voidaan sijoittaa alatukivarreksi kantamaan sivu- ja pitkittäissuuntaiset voimat. Lisäksi esim. coilover-yksikkö voi toimia camberia säätävänä tukena. Tällainen rakenne esiteltiin Audi 100 Quattron takatuentana

vuonna 1984 (kuva 79). Trapetsi minimoi aerausmuutokset pitkällä nivelvälillään, sekä ottaa vastaan jarrutuksen ja kiihdytyksen aiheuttamat väännöt. Rakenne on hyvin tilaasäästävä. (Heiðing & Ersoy 2011, 399.)



Kuva 79. Trapetsituenta (Reimpell ym. 1988, 72)

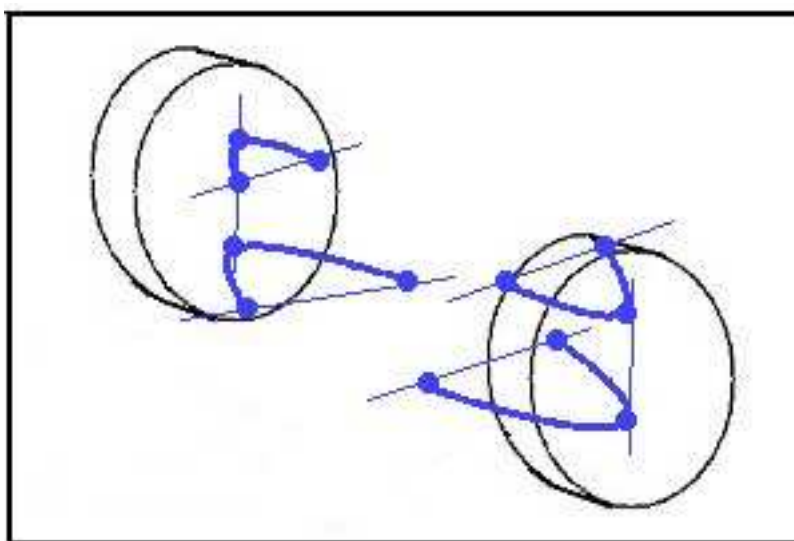
Porschen Weissach-akseli on erikoinen "passiivisesti ohjaava" taka-akselin trapetsituentatyyppi. Alatuon etummainen varsi on nivelöity ja elastisesti liikkuva apurungon nivelpisteestään. Normaalisti semi trailing arm-tuennan taipumuksena on tuottaa yliohjausta jarrutuksessa tai "lift-off-tilanteessa". Weissach-akselin tukivarren nivel aiheuttaa jarrutuksessa aerausta tukivarteen kohdistuvan vetojännityksen vetäessä niveltä suoraksi. (Heiðing & Ersoy 2011, 399.) Tuennasta saadaan näin pallotuenta. Ylätukivartena toimii yksi elastinen poikittaissuuntainen tuki. Kuva 80 selventää rakennetta. Trapetsituen akselit leikkaavat pisteessä z. Pyörän liikenapa vaihtelee ominaisohjauksen mukaan. (Vesterinen 2010, Akselistorakenteet, 37).



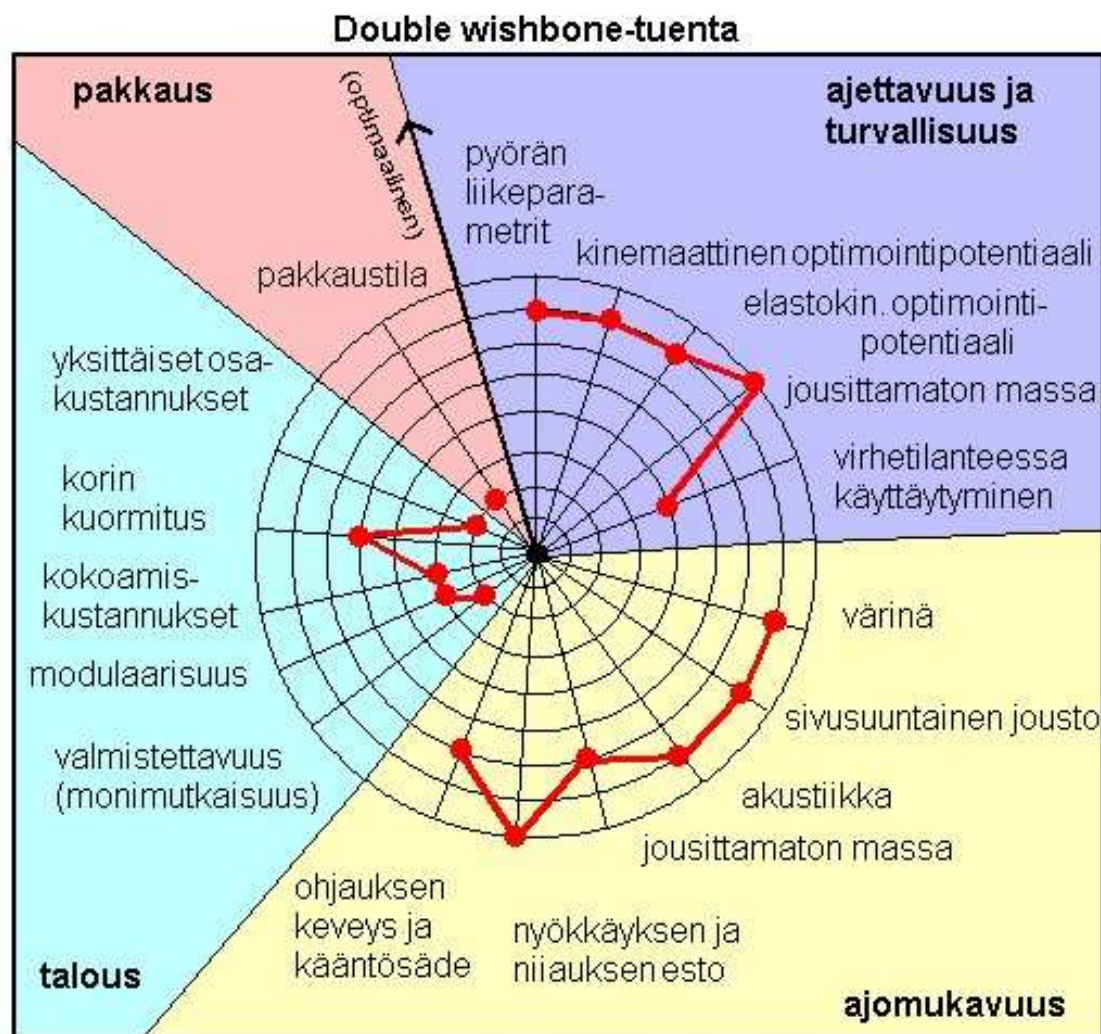
Kuva 80. Weissach-akseli

Double wishbone-tuennassa pyörä on kiinnitetty kahdella kolmiotukivarrella sekä yhdellä kahden pisteen tuella. Kolmiotuet tulisi olla pallonivelellä nivelöity olkakappaleeseen, sekä jäykällä puslilla apurunkoon. Puslat tulisi olla suorassa rungon puoliseen kiinnitysakseliin nähden, jotta puhdas kinematiikka olisi mahdollista. Ajomukavuuden takia apurungon puslat voivat olla pehmeämmät, kuin tukivarsien puslat. Hard pointien sijainnilla säädetään tuennan parametrit. Usein ylätuki on alatukea lyhempi. Tällaisen tuennan nimitys on SLA (short long axle). Tässä rakenteessa camber-muutos sekä raidevälin muutos joustossa on pieni. Ratkaisu on myös pakkaustehokas, koska lyhyempien ylätukien väliin jää suurempi tila moottorille tai tavaratilalle. Lyhyt ylätukivarsi "vetää" joustossa pyörään negatiivista camberia, mikä parantaa kaarreajoa. Ylä- ja alatukivarret voivat olla asennettu kulmaan toisiinsa nähden mahdollistaen lisää kinemaattisia säätömahdollisuuksia. Kallistuskeskiön paikka vaihtelee joustossa, ja sijoittuu yleensä lähelle maanpintaa, jotta raidevälinmuutokset voidaan minimoida. Kääntöakselin (king pin axis) paikan suunnitteluun on kaksi perusperiaatetta: "short spindle" ja "long spindle". Short spindle-rakenteessa tukivarsien pyörän puoleiset nivelet tuodaan vanteen sisälle. Kääntöakseli muodostuu niiden väliin. Long spindle-rakenteessa ylempi nivel tuodaan pyörän

yläpuolelle jatkettulla olkakappaleella. Jälkimmäisessä ratkaisussa tuennan kinematiikka paranee. Rakenne vaatii monimutkaisen olkakappaleen. Etuja tässä ovat parempi ohjausgeometrian suunnittelu (esim. nollapisteohjaus), pienemmät ylätukivarteen kohdistuvat voimat, sekä se, että ylätukivartta voidaan tuoda kokonaan ulospäin pakkauksen tehostamiseksi. Jousi- ja vaimennusvoimat tuodaan double-wishbone-tuennassa tukivarsille, mikä aiheuttaa niihin taivutusmomenttia. Jousi- ja vaimenninelementti tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle olkakappaletta. Double wishbone-tuenta mahdollistaa erittäin vapaan kinematiikan suunnittelun, on sivusuunnassa jäykkä, sekä sillä saavutetaan suuri mukavuus ja äärimmäisen hyvät ajo-ominaisuudet. Huonoja puolia ovat korkeat kustannukset, pakkaustila sekä suuret voimat nivelpisteissä. Apurungon käyttö on välttämätöntä. Double-wishbone-tuenta nähdään kuvassa 81. Double-wishbone-tuennan ominaisuuksia on esitelty Heiðing & Ersoy:n (2011, 401) mukaan kuvaajassa 23. (Heiðing & Ersoy 2011, 400—401.)



Kuva 81. Double-wishbone-tuenta (SLA-tyyppi)



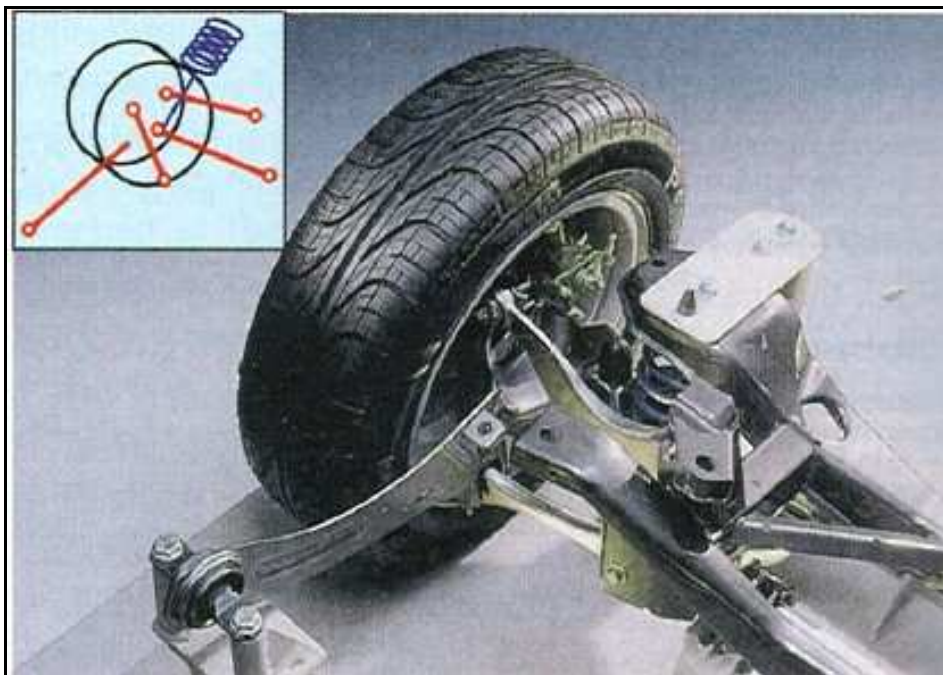
Kuvaaja 23. Double wishbone-tuennan ominaisuudet

8.5.3 Monivarsituenta

Monivarsituennasta puhutaan, kun tuennassa käytetään jonkin, tai kaikkien trapetsi- tai wishbone-tukien sijasta kahden pisteen tukia. Tukivarsiin ei kohdistu monivarsituennassa taivutusmomenttia. Monivarsituennassa on joko neljä tai viisi tukivartta. Erillisillä tukivarsilla saavutetaan vapaa kinematiikan suunnittelu, mutta lisätään valmistuskustannuksia, sekä ajan myötä väljäntyviä niveliä. (Heißing & Ersoy 2011, 402—403.)

Jos kolmiotukivarsi korvataan kahdella kahden pisteen tukivarrella, voidaan toisesta tukivarresta tehdä sivusuuntaisia voimia vastaanottava erittäin jäykkä

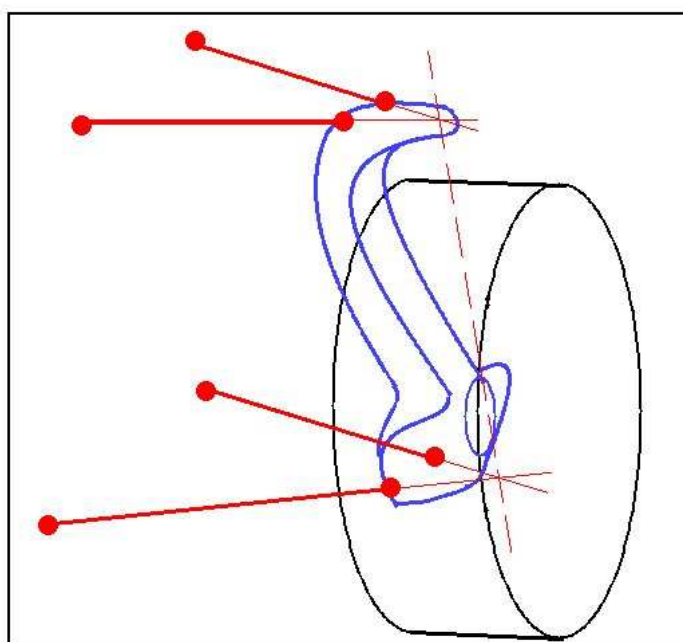
tuki. Toinen tukivarsi taas voidaan liittää pehmeämmillä puslilla diagonaalisesti apurunkoon ottamaan pehmeämmin vastaan voimia ja parantamaan ajomukavuutta. Esimerkiksi näin voidaan monivarsituennalla parantaa ominaisuuksia kolmiotukeen verrattuna. Jokaisen puslan ominaisuuksilla voidaan hienosäätää alustan ominaisuuksia. Monivarsituennan toteutukseen on paljon erilaisia tapoja, joita tässä ei voida kaikkia käsitellä. Eräs tapa on korvata alempi kolmiotukivarsi tai trapetsituki kahdella tukivarrella. Toinen tapa on kokonaan kahden pisteen tukivarsilla tuettu alusta. Esim. Ford Focusin takatuennassa 1999 ensimmäisenä käytetty ns. trailing blade-tuenta koostuu yhdestä pitkittäistuesta (joka ottaa vastaan ainoastaan pituussuuntaista kuormaa) ja kolmesta poikittaistukivarresta. Trailing blade-nimitys tulee pitkittäistuen ohutprofiilisesta muodosta, joka elastisten ominaisuuksiensa ansiosta sallii tietyn määrän aeraus- ja camber-kulmien muutosta. Kuva 82 esittää kyseistä trailing blade-takatuenta. 1986 Honda Accordin takatuenta oli vastaava rakenne, mutta levymäisen profiilin sijasta pitkittäistukena toimi pallonivelöity tanko. 1960 Chevrolet Corvetten takatuenta koostui kahdesta pituussuuntaisesta tukivarresta ja kahdesta poikittaissuuntaisesta. Jousituksena toimi molemmille pyörille kulkeva poikittainen lehtijousi. Pitkittäistuet kiinnitettiin suoraan auton runkoon, mikä aiheutti ainakin auton kokoamisvaiheessa ylimääräistä työtä, sekä heikensi NVH-ominaisuuksia. Pitkittäistuen voi korvata semi trailing-tyyppisellä tuella, jolloin kaikki tukivarret voidaan kiinnittää apurunkoon, kuten esimerkiksi 1998 Volvo S80:ssä. (Heißing & Ersoy 2011, 402—405.)



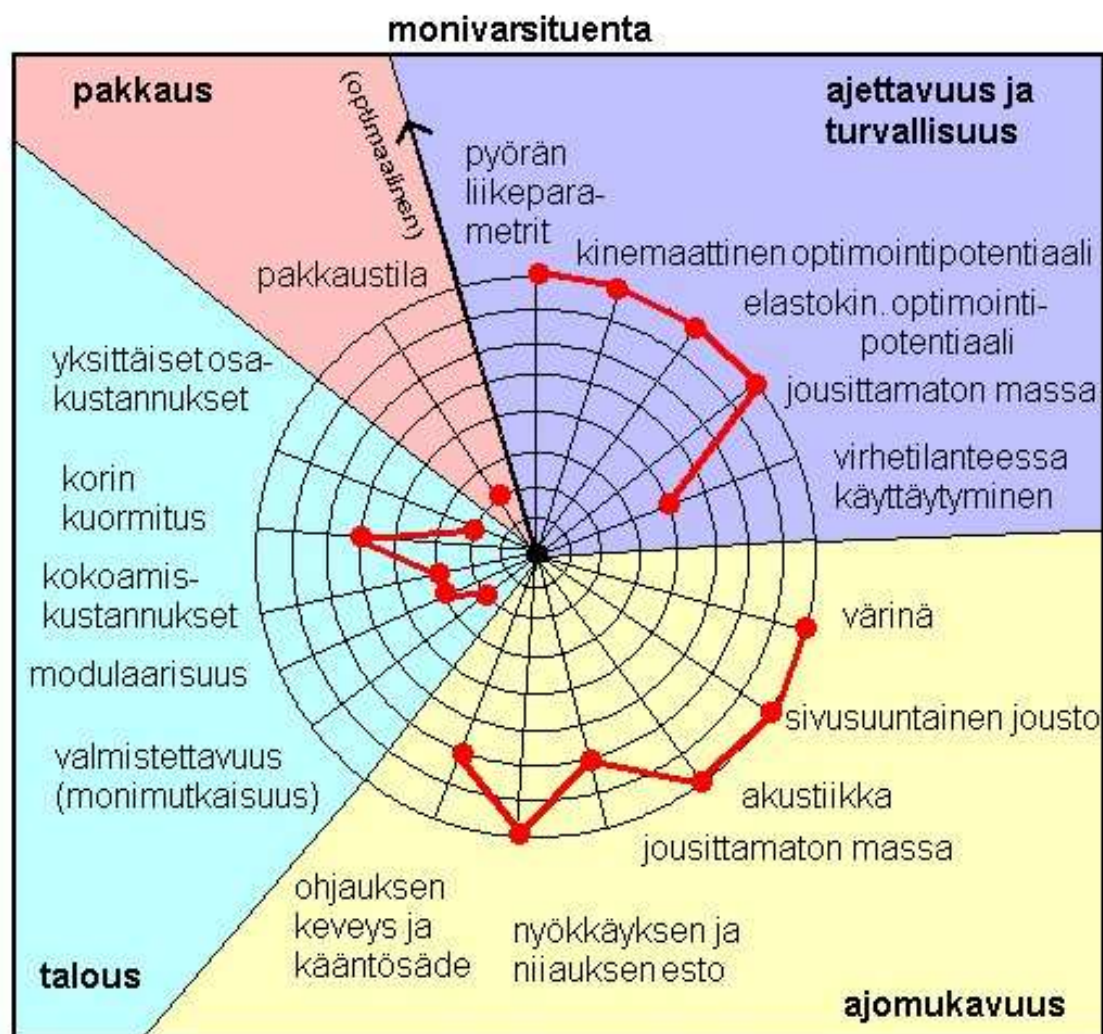
Kuva 82. 1999 Ford Focusin trailing blade-takatuenta (Heiðing & Ersoy 2011, 404)

Viiden tukivarren tuennalla saavutetaan vapain kinematiikan säätö. Etuakselilla voidaan toteuttaa Fritz Oswaldin 1958 kehittämä imaginäärinen kääntöakseli, eli akseli voidaan sijoittaa vapaaasti x-,y-, ja z-suunnissa. Ainakin Audi soveltaa tätä tekniikkaa Quadralink-etutuennassa ja BMW käytti imaginääristä kääntöakselia joustintuen kanssa 7-sarjassa jo 1977. Audi on jatkanut tämän tekniikan kanssa A4-, A6- ja A8-malleissa onnistuneesti (kuva 83). Takatuennassa viiden tukivarren avulla saavutetaan tarkka kinematiikka ja ominaisohjauksen suunnittelu. Viiden varren tuenta sallii myös hyvin tilaa vetoakseleille. Pakkaustila, korkeat kustannukset, sekä monien puslien värähtelyt ovat huonoja puolia. Myös pitkittäissuuntainen jousto on viiden tukivarren tilanteessa hankala toteuttaa. Monivarsituenta vaatii aina apurungon käyttöä. BMW kuvaa optimaalista viiden tukivarren tuentaa seuraavasti: Kaksi tukivartta tulisi olla tuennan ylätasossa, sekä kaksi tukivartta tuennan alatasossa. Viides varsi tulisi olla pyörän keskitasolla takana noin 3-10° poikittaisessa kulmassa ylhäältä katsottaessa. Tämä rakenne mahdollistaa pitkän viidennen varren käyttöä, mikä vähentää sen toleranssiherkkyyttä ja

vääntörasitusta, ja mahdollistaa näin ollen halpojen kumipuslien käytön pallonivelten sijaan. Pakkaustilan tehostamiseksi ylätukivarret tulisi sijoittaa coilover-yksikön etupuolella. Ylätukivarret eivät saisi sijaita täysin samalla tasolla. (Sama pätee alatukivarsiin.) Ylä- ja alatukivarsien ulommat päät pitäisi olla toisiinsa nähden sivusuunnassa eri pituudella (ts. niissä tulisi olla ”offsettiä”). Näiden vaatimusten avulla saavutetaan optimaalinen KPI-kulma (short spindle-tapauksessa). Monivarsituennan ominaisuuksia on esitelty kuvaajassa 24 Heißing & Ersoy:n (2011, 402) mukaisesti. (Heißing & Ersoy 2011, 406—407.)



Kuva 83. Imaginäärinen kääntöakseli



Kuvaaja 24. Monivarsituennan ominaisuudet

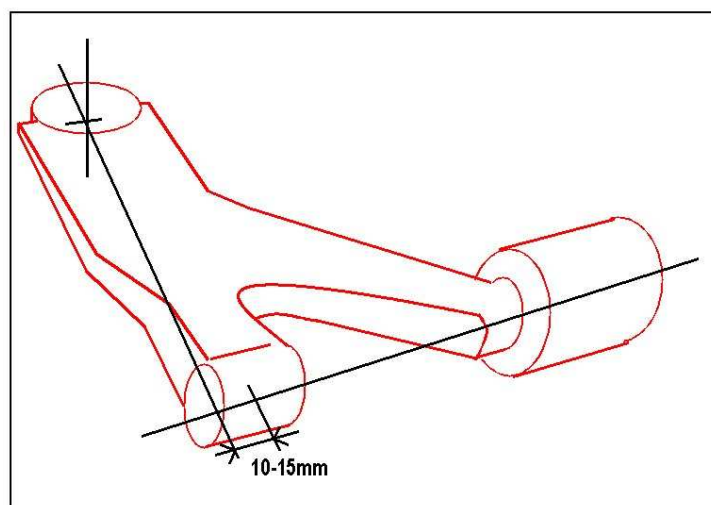
8.5.4 Joustintukituenta

Joustintukirakenteen patentoi Fiat vuonna 1924. Fordin suunnittelija Earl S. McPherson kuitenkin kehitti ensimmäisenä 1949 sarjatuotannossa käytetyn joustintukituentatyyppin. Tämän tyyppisestä tuennasta käytetäänkin usein yleisnimitystä McPherson-tuenta, vaikka nykyiset joustintukirakenteet eivät olekaan McPhersonin patentin mukaisia (McPhersonin patentissa oli joustintuen lisäksi poikittainen tukivarsi, ja kallistuksenvakaaja toimii pituussuuntaisena tukivartena). Vaikka rakenne kehitettiin jo aikaisin, se yleistyi vasta 70-luvulla. Tämä tuentatyyppi käsitellään erikseen, koska se hyödyntää muista

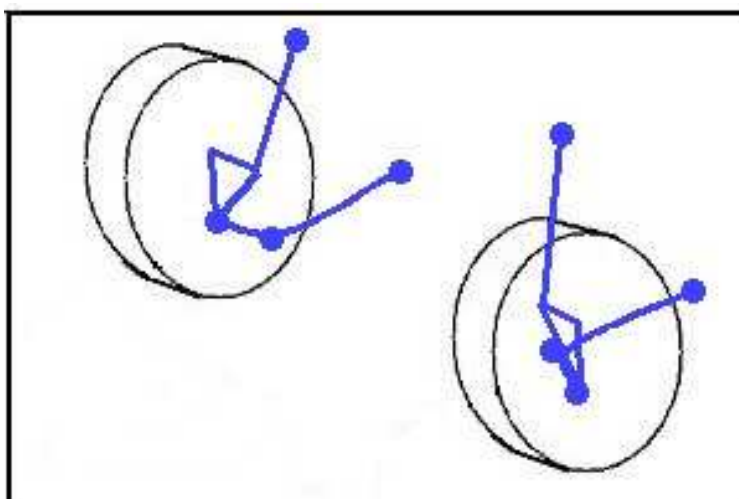
erillistuentarakenteista poiketen liukuvaa ja kiertyvää niveltä (vaimenninelementti) pystyessä. Vaimenninelementti on jäykästi kiinnitetty olkakappaleeseen ja vaimentimen yläpää on kiinnitetty runkoon (shock tower). Vaimenninelementti korvaa kaksi kahden pisteen tukea, ja tuenta tarvitsee enää yhden alakolmiotukivarren (tai kaksi kahden pisteen tukivartta) sekä aurauksesta ja ohjauksesta huolehtivan poikittaistuen (raidetanko). (Heißing & Ersoy 2011, 407—412; Fitzgerald 2005, 1.) Vaimentimeen kohdistuvista rasituksista johtuen sen mitat ovat hieman normaalia vaimenninta suuremmat. Reimpell ym. (2001, 10) mitoittaa männänvarren halkaisija-arvoksi 18mm ja männän halkaisijaksi 30-32mm. Vaimentimena käytetään normaalisti kaksiputkivaimenninta.

Joustintukirakennetta käytetään nykyisin usein nimenomaan ohjaavan akselin tuentana. Vaimenninelementtiin joustossa johtuvat sivuttaisvoimat kompensoidaan jousen vinolla asennuskulmalla (kääntöakselin suuntaisesti). Joustintuessa käytetään yleensä coilover-yksikköä, mutta myös erillisen vaimentimen ja jousen käyttö on mahdollista. Raidetangon pään kiinnityspiste tulisi sijaita olkakappaleessa pyörän keskilinjalla. Mikäli alatukivarsia on kaksi, voi toinen olla poikittaissuunnassa ottamassa vastaan poikittaisvoimia. Toinen varsi voi olla pitkittäin (kuten McPhersonin patentissa) tai lähes pitkittäin pehmeämmillä puslilla nivelöitynä auttaen pituussuuntaista elastokinematiikkaa. Ominaisohjausta voidaan muokata raidetangon pituussuuntaista sijaintia muuttamalla (sen kulmaa y-akselin suhteen muuttamalla). Alakolmiotukivarren (mikäli kolmiotukivartta käytetään) sisempi etummainen kiinnityspusla tulisi sijaita pituussuunnassa noin 10-15mm pallonivelen etu- tai takapuolella optimaalisten elastokinemaattisten ominaisuuksien saavuttamiseksi (kuva 84). Joustintukituennan hyviä puolia ovat jousitus- ja pyöränhallintakomponenttien yhdistäminen yhdeksi yksiköksi, pieni sivusuuntainen pakkaustila, jousen ja vaimentimen 1:1 välityssuhteen mahdollisuus ja edullinen valmistettavuus. Mikäli jousi asennetaan erilleen vaimenninyksiköstä, pienenee jousittamaton massa ja tuen yläpään laakerointi ei ole välttämätön. Joustintukituennan huonoja puolia ovat mm. heikohko kinematiikka, voimien suora välitys runkoon vaimenninelementin kautta, vaikea äänieristettävyys, huono yökkäyksenesto,

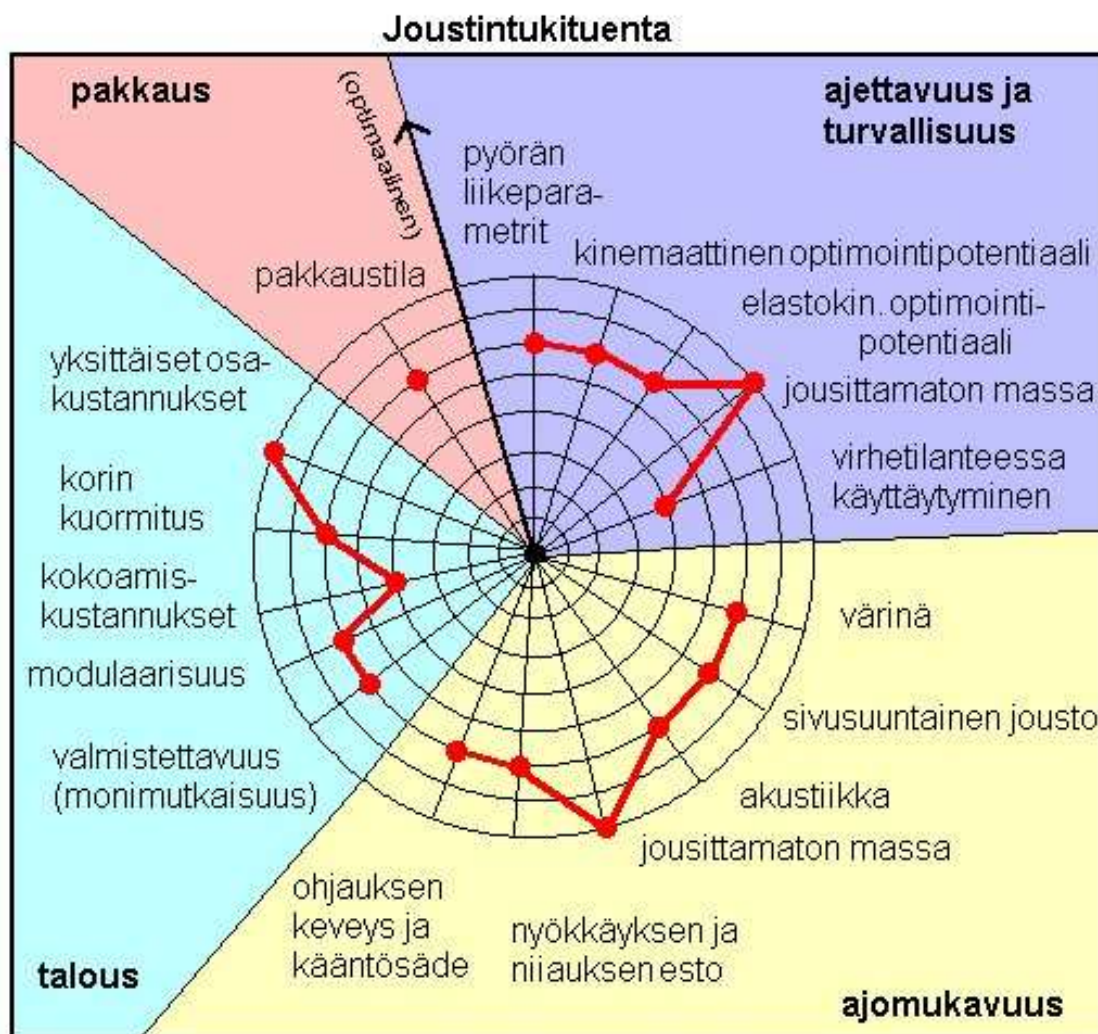
vaimentimen rasitus sivu- ja pystysuuntaisissa voimissa. Joustintuen yläpään laakeri joutuu koville kuormituksille tehokkaalla moottorilla varustetussa etuvetoisessa autossa. Laakerit välittävät pystysuuntaisten voimien lisäksi pituus- ja sivusuuntaisia voimia. Joustintukien yläpäät voidaan yhdistää tarvittaessa jäykistetuella. Joustintukirakenne nähdään kuvassa 85. Joustintukituennan ominaisuuksia on esitelty kuvaajassa 25. (Heißing & Ersoy 2011, 407—412.)



Kuva 84. Pallonivelen ja etummaisen puslan offset

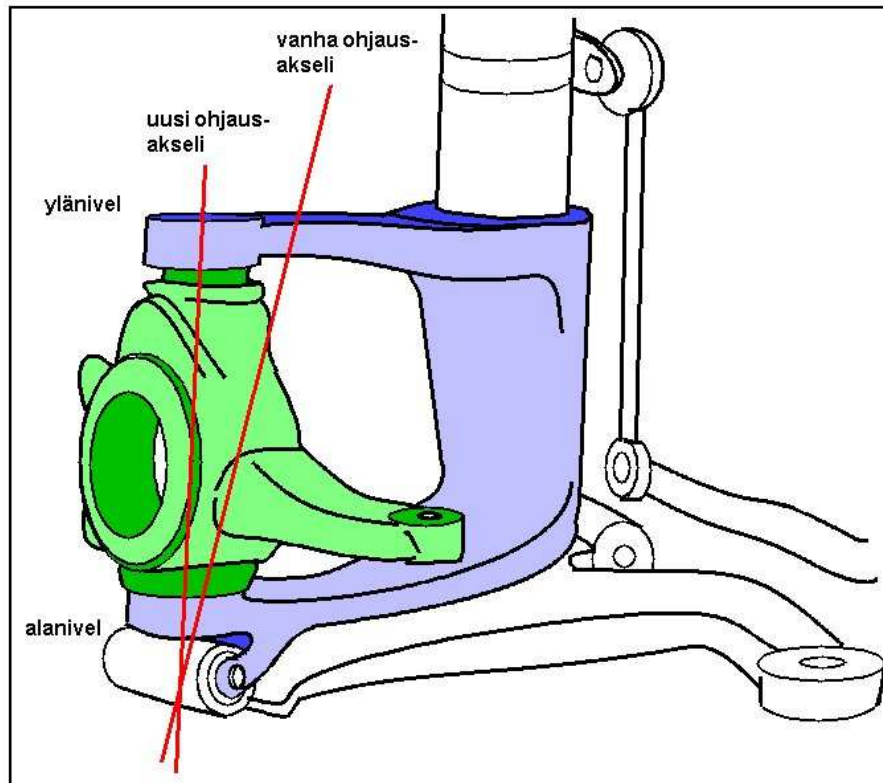


Kuva 85. Joustintukituenta



Kuvaaja 25. Joustintukituennan ominaisuudet

Olkakappale voidaan myös tehdä kahdesta osasta (GM:n HiPer strut tai Fordin RevoKnuckle) ja luoda näin uusi kääntöakseli entistä ulommas. Tämä helpottaa nollapisteohjauksen luomista, ja on hyödyllinen ratkaisu etenkin suuritehoisissa etuvetoisissa autoissa, joissa vetelyä on pyrittävä estämään. Rakenne tuo muodostaa uuden kääntöakselin, joka tulisi kulkea pyörän keskipisteen kautta. Olkapoikkeama on tosin hyvä pitää hieman negatiivisena jarrutuksessa syntyvän mahdollisen ohjausmomentin kääntämiseksi ”turvallisempaan” suuntaan, kuten selitettiin kinematiikka-kappaleessa. Kuvassa 86 esitetään Fordin ratkaisu (RevoKnuckle). (Heiβing & Ersoy 2011, 413.) Ironista on, että tekniikka on kehittynyt taaksepäin kohti vanhaa olka-akselia.



Kuva 86. Kaaviokuva Fordin RevoKnucklesta

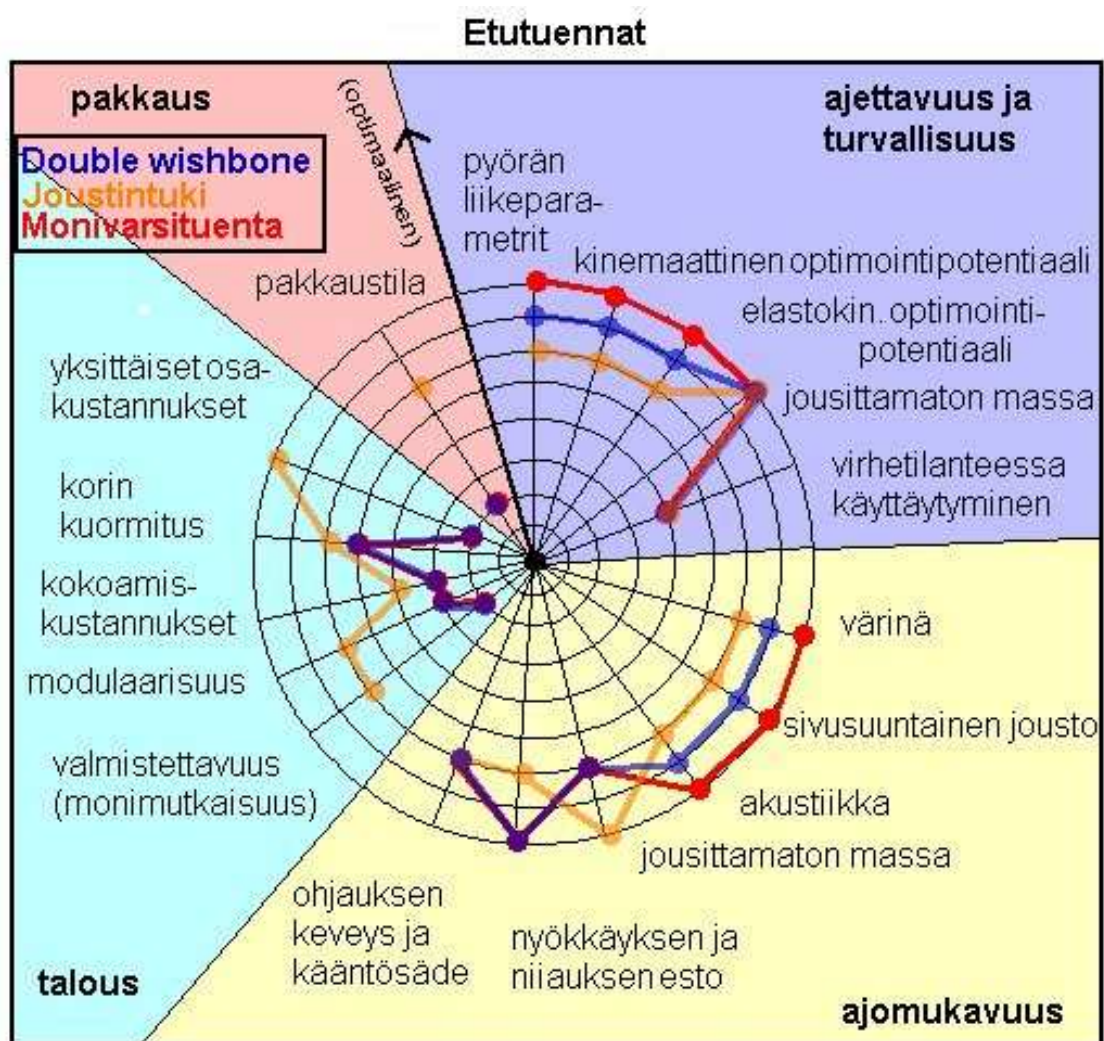
8.6 Vertailu

Jäykkä akseli on halpa, ja sillä saavutettavia etuja ovat lähinnä maavara ja urasietoisuus. Käyttö painottuu takavetoisten hyöty- ja off-road-autojen takatuennaksi, mutta myös de Dion-tuentatyyppi sekä aisatuenta voivat olla käytössä pikkuautoissa.

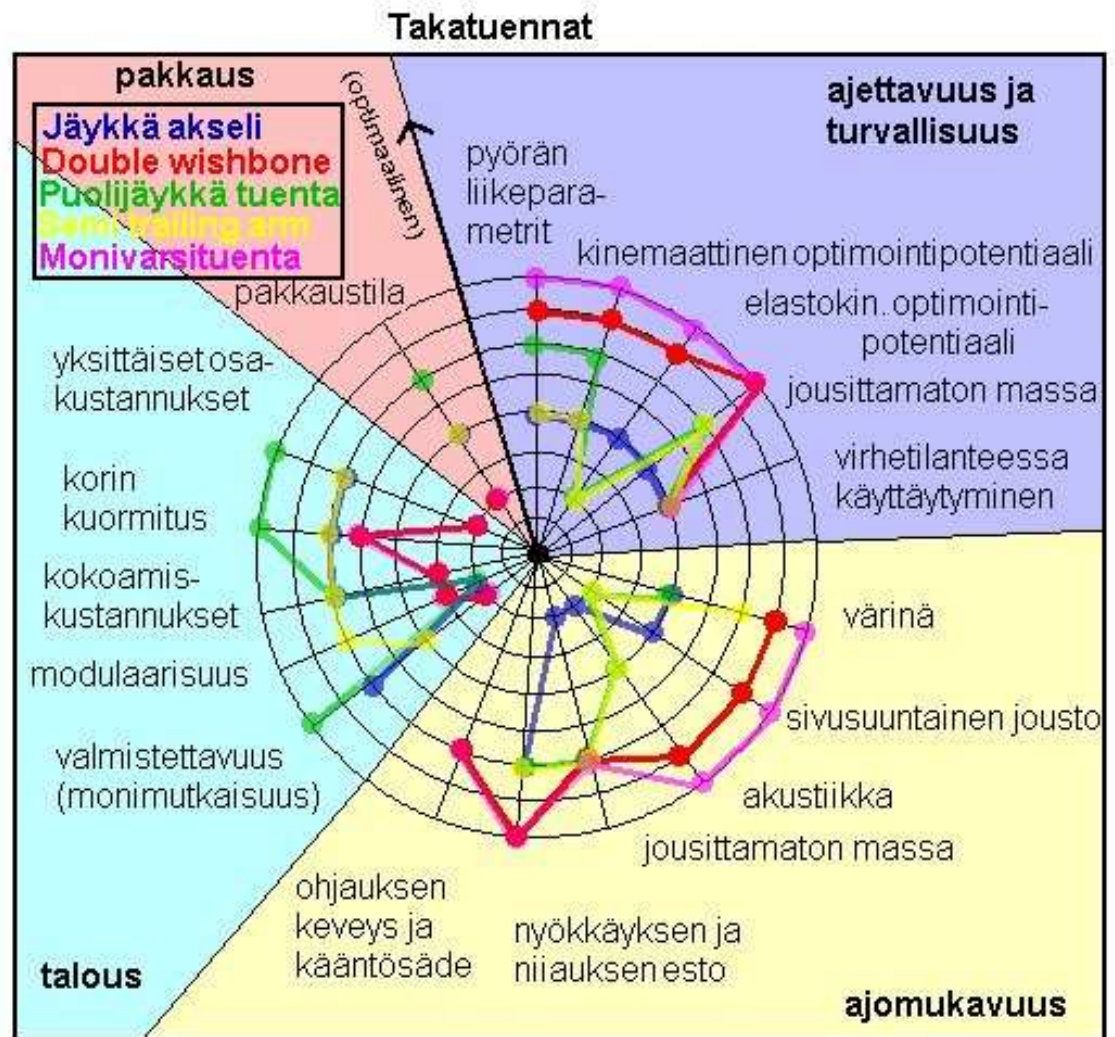
Puolijäykkä akseli on myös halpa ja yksinkertainen rakenteeltaan. Sen etuja ovat pieni tilantarve, pieni jousittamaton massa, pieni raidevälin muutos, kuormituksesta riippumaton ja puslilla säädettävissä oleva ominaisohjaus, hyvä nyökkäyksen esto ja vakaajan tarpeettomuus. Rajoituksia ovat oikeanlaisten laakerien tarve ominaisohjausta ajatellen, sivusuuntainen jousto, rajoitetut ajo-ominaisuudet, sekä se, ettei puolijäykkää tuentaa voida käyttää vetävällä akselilla. (Vesterinen 2010, Akselistorakenteet, 21—22.)

Monivarsituenta on kallis ja monimutkainen, sekä vaatii tilaa, mutta sillä saavutetaan paras kinematiikan säätö ja ajo-ominaisuudet. Monivarsituenta on käytössä yleensä paremman luokan autoissa, joissa tuennan ominaisuuksia voidaan optimoida kustannuksien rajoittamatta.

Etu- ja takatuennoiksi soveltuvia vaihtoehtoja on kootusti vertailtu seuraavissa kuvaajissa.



Kuvaaja 26. Etutuennat



Kuvaaja 27. Takatuennat

Liite 9 esittää Boschin kokoaman taulukon tuentatyyppien ominaisuuksista.

9 OHJAUS

9.1 Historia

Ensimmäinen ohjattava akseli oli jäykkä ja keskeltä pystyakselilla tuettu. Ohjaavan akselin pyörien itsenäisen kääntyminen omien kääntöakseliensa ympäri, eli king pin-ohjauksen kehitti Müncheniläinen Georg Lankeperger vuonna 1816. Molempien pyörien kääntökulmaan voitiin vaikuttaa yhdistämällä

pyörät raidetangolla. Tämän periaatteen kehitti Lankerpergerin Lontoolainen lisenssinhaltija Rudolph Ackermann. Ensimmäinen ohjauspyörä oli Walter Hancockin höyrykäyttöisessä autossa 1800-luvun alussa. Kingpin-ohjauksen keksimisen jälkeen ensimmäinen (ohjausvoiman tarvetta vähentävää) hammastanko-ohjausta hyödyntävä ajoneuvo oli Amedee Bolleen höyrykäyttöinen ”La Mancelle”-auto vuonna 1878. Amerikkalainen L. Megy kehitti raidetangon vuonna 1902 luoden nykyisen kaltaisen ohjauslaitteiston. Henry Males kehitti vuonna 1913 kierukkapyöräohjausvaihteen ja Bishop esitteli hieman vastaavan kierukkatappiohjausvaihteen (Ross steering system) vuonna 1923. 1930-luvulla kierukkapyörävaihdetta kehitettiin Saginaw Steering Divisionin toimesta matalampikittaiseksi kuulamutteriohjaukseksi. Tätä ohjaustyyppiä käytettiin 1960-luvulla yleisesti, ja Mercedes-Benz käytti sitä vielä 1990-luvulle asti. Ohjaustehostin kehitettiin Chryslerillä (ja myöhemmin GM:lla) USA:ssa vuonna 1951. Ohjaustehostimen halpeneminen mahdollisti taas hammastanko-ohjauksen ylivoiman kuulamutterivaihteeseen nähden. Nelipyöräohjausta kokeiltiin ensimmäisen kerran jo 1900-luvun alussa, mutta todettiin, että auto on tällöin liian vaikea hallita kovissa nopeuksissa. Japanissa kokeiltiin nelipyöräohjausta uudelleen 1980-1990-luvuilla eri automalleissa (esim. Honda Prelude), mutta se hiipui muutaman vuoden jälkeen. Nyt nelipyöräohjaus on taas tullut takaisin muutama vuosi taaksepäin. Säädetty ohjausakseli kehitettiin USA:ssa ja passiivista turvallisuutta parantava kokoonpainuva ohjausakseli Daimler-Benzillä Bela Berenyn toimesta. Imaginäärinen kääntöakseli oli käytössä Audi 80:ssä ensimmäisenä negatiivista olkapoikkeamaa hyödyntävänä ohjaavana akselirakenteena vuonna 1972. (Heißing & Ersoy 2011, 2—6.)

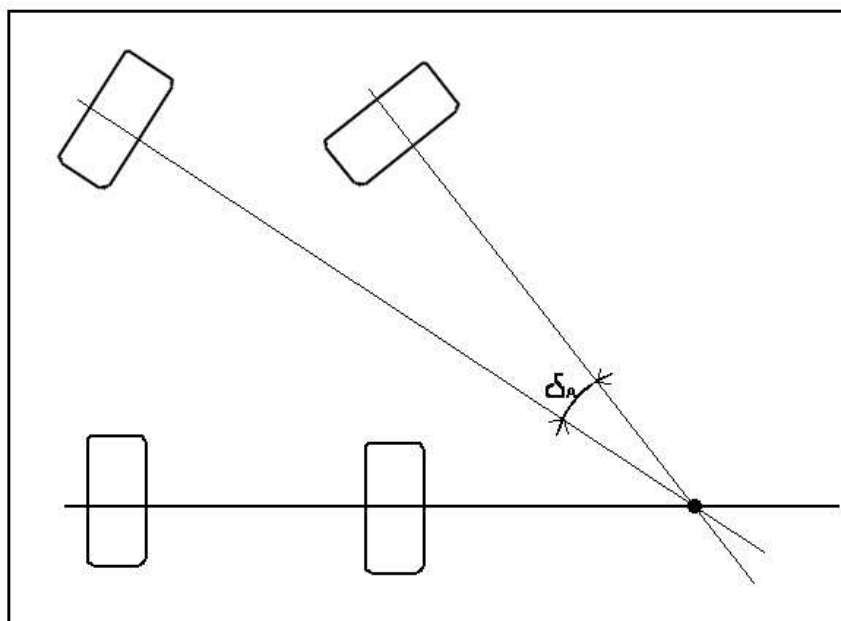
9.2 Yleistieto

IZVW:n (Interdisciplinary Center for Transportation Science in Würzburg) tekemän tutkimuksen mukaan ihminen reagoi haptiseen (kosketuksen kautta välittyvään) informaatioon nopeimmin. Ohjaustuntuman on siis tärkeä olla välitön ja tunnokas etenkin kovilla nopeuksilla. Ohjaustuntuma on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista, joiden avulla kuljettaja kokee turvallisuuden ja mukavuuden

ajaessaan. Yleisesti on käytössä kaksi ohjausjärjestelmätyyppiä: hammastanko-ohjaus ja kuulamutteriohjaus ("simpukka"). (Heißing & Ersoy 2011, 191—193.)

Ohjauksen kinematiikkaan vaikuttaa useita eri parametrejä, joita käsiteltiin akseliston kinematiikassa kappaleessa 7.2.2. Tässä kappaleessa ei enää esitellä kyseisiä parametrejä, vaan keskitytään niiden ohjausvaikutukseen. Ohjauksen tulee olla välyksetön ja keskittävä. Hammastangon tulisi olla mahdollisimman pitkä, jotta kevyt ohjaus olisi mahdollinen. Toisaalta liian lyhyet raidetangot aiheuttavat ei-toivottua ohjausta joustoliikkeissä. Raidetangon kokonaisliikematka on tyypillisesti $\pm 70\text{--}90\text{mm}$. Kääntöakseli on akseli, jonka ympäri ohjaava pyörä kääntyy. Akseli oli aiemmin konkreettinen kingpin-akseli, mutta nykyisin usein olkakappaleessa olevien tukivarsien kiinnityspisteiden kautta, tai niiden kuvitteellisten jatkeiden risteyskohdan kautta kulkeva imaginaarinen akseli. Kääntöakseli on yleisesti sisään- sekä taaksepäin kallistunut. Olka-akselin takakallistuma (caster) vaikuttaa hieman ohjausta keskittävään momenttiin. Mitä suurempi kulma on, sitä voimakkaampi keskitys on (toisaalta ohjauksesta tulee raskaampi). Olka-akselin jättämä (caster trail) vaikuttaa voimakkaammin keskitysvoimaan, sekä myös sivutuulesta syntyvään ohjausmomenttiin. Jos olka-akselin ja tien pinnan risteyskohta sijaitsee pyörän takapuolella, on caster-jättämä negatiivinen ja ohjausmomentti vaikuttaa kaarteeseen, tai sivutuuleen päin. Jos caster-jättämä on positiivinen (kuten yleisesti on), ohjausmomentti vaikuttaa kaarteesta tai sivutuulesta poispäin. Ajatusta voi havainnollistaa esim. ajatteleamalla ostoskärryjen pyöriä (joissa caster trail on vahvasti positiivinen—raahaava). Jos eteenpäin työnnettäessä tuotetaan kärryä sivulle työntävä voima, se ohjautuu helposti sivulle. Jos pyörän saisi käännettyä toisinpäin (työntäväksi) ja painaisi kärryä sivulle, kärry haluaisi ohjautua painamista vasten. Positiivinen KPI-kulma auttaa myös ohjauksen keskitystä. KPI-kulma määrittää myös momenttivarren, jolla μ -split-jarrutustilanteessa syntyvä ohjausmomentti syntyy. Olka-akselin ja pyörännavan väliin jäävä "torque steer"-momenttivarso puolestaan määrittää saman momentin kiihdytystilanteessa. Aurasikulma synnyttää ohjausmomentin (joskin tasajoustossa yhtä suuren molempiin suuntiin). Harittavaa akselia on kevyempi kääntää, kuin auraavaa. Auraava akseli toisaalta on suuntavakaampi. Akselin

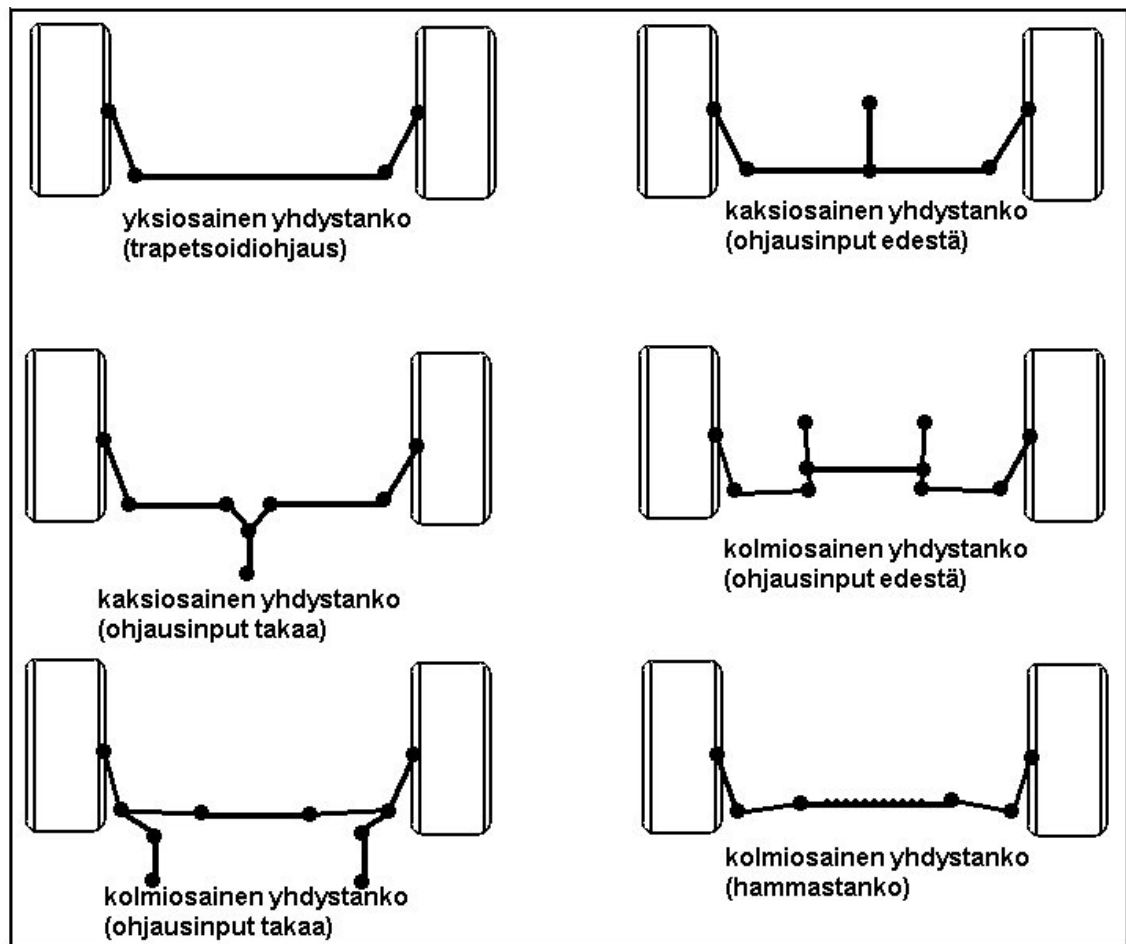
ominaisohjauksen muutos vedon muuttuessa tulee huomioida suunniteltaessa aurasarvoja. Etuvetoisten autojen etuakselilla onkin oletusarvoisesti haritusta enemmän (-30'→+20'), kuin takavetoisissa (0'→+30'). Auraus aiheuttaa renkaille sortokulmaa, joka lisää vierintävastusta. Camber-kulma vaikuttaa ohjaavasti pyörän kallistuman suuntaan. Pyörän keskiakselin ja tienpinnan leikkauspiste toimii liikekeskiönä, jonka ympäri pyörä pyrkii vierimään. Positiivinen camber keventää ohjausta, mutta voi aiheuttaa vetelyä. Negatiivinen camber vakauttaa ajoa. Camberia ei kuitenkaan saa olla liikaa, sillä se kuluttaa rengasta. Ackermann-kulma (δ_A) esitetään kuvassa 87. Se määrittää ilman renkaiden sortoa. Ackermann-kulma on renkaiden välinen kääntökulman ero. Auton tulee kääntyä taka-akselinsa ympäri, joten etupyörien pitää kääntyä eri kulmilla (koska ne matkustavat kaarteessa eri säteistä kehää). Pyörien keskiakselien jatkeiden tulee leikata taka-akselin jatke samassa pisteessä, tällöin Ackermann-ehto toteutuu. Ehtoa kuitenkin rajoittaa käytännön suunnittelussa usea asia. Sisärenkaan kääntymistä rajoittaa pyöräkotelon koko. Toinen rajoitus on etuvetoisella autolla vetoakselien nivelten taipuvuus. Takavetoisesta autosta voidaan siis tehdä pienemmässä tilassa kääntyvä, kuin etuvetoisesta autosta. Koska Ackermann-ehto ei käytännössä toteudu, kuvataan suhteellista toteutumista prosenttiluvulla (todellisen kulmaeron suhde Ackermann-ehdon mukaiseen kulmaan kerrottuna sadalla prosentilla). Yleisesti hyväksytään 10% poikkeama Ackermann-ehdosta. Näin huomioidaan kovien nopeuksien aiheuttaman pyörien sortokulman vaikutus muuttuvaan auton kääntökeskiön sijaintiin. Auton kääntösäde mitataan ulomman etupyörän etäisyydeltä kääntymiskeskiöön. Auton estevara taas mitataan uloimmasta etukulmasta kääntymiskeskiöön. (Heißing & Ersoy 2011, 21—27.)



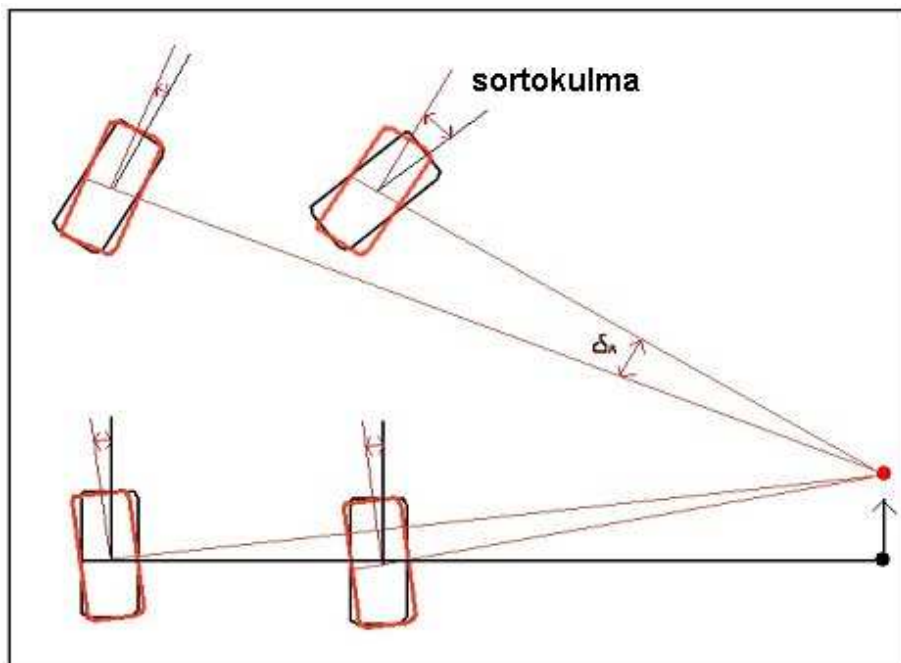
Kuva 87. Ackermann-kulma

Ohjauksella on vaatimuksena, että ohjauspyörän kääntämisen sekä auton suunnanmuutoksen välillä on selkeä ymmärrettävä suhde. Palaute tiestä tulisi tuntea ratilla esim. ohjausmomenttina ennen ajoneuvon rajojen ylittymistä. Häiriöiden, kuten tien epätasaisuudet ja sivutuuli, vaikutus ajosuuntaan tulisi olla minimaalinen. Sallittu kaartonopeus ja sivuttaiskiiktyvyys tulisi (niin turvallisuuden, kuin auorituskyyvynkin kannalta) olla niin suuri, kuin mahdollista. Ohjaukseen tarvitaan pyörätuennalta oma vapausaste. Ohjauspyörän ja pyörien kääntymisen välinen suhde on epälineaarinen johtuen ohjauslaitteiden geometriasta. Ohjausvivuston erilaisia rakenneratkaisuja esitellään kuvassa 88. Ohjausjärjestelmää voidaan tarkastella (ja suunnitella) staattisesti tai dynaamisesti kuormitetuksi. Staattinen tilanne pätee, kun sortokulma on nolla (ei havaittavia sivuttaisvoimia) ja Ackermann-ehdon katsotaan täyttyvän. Dynaaminen tilanne huomioi sortokulman vaikutuksen. Tällöin hetkellinen kääntökeskiö siirtyy taka-akselin etupuolelle. Tämä voidaan todeta kuvan 89 avulla. Usein alle 20° ohjaukulmilla Ackermann-kulma pyritään pitämään pienenä, jotta dynaaminen tilanne asettaa luonnollisesti sortokulmien avulla kääntökeskiön oikeaan kohtaan (sekä etu- että takarenkaiden kääntökeskiö

muuttuu). Yli 20° ohjaukulmilla Ackermann-ehto on suotavaa täyttää hitaan nopeuden ohjaamisen helpottamiseksi. (Heiðing & Ersoy 2011, 86—88.)

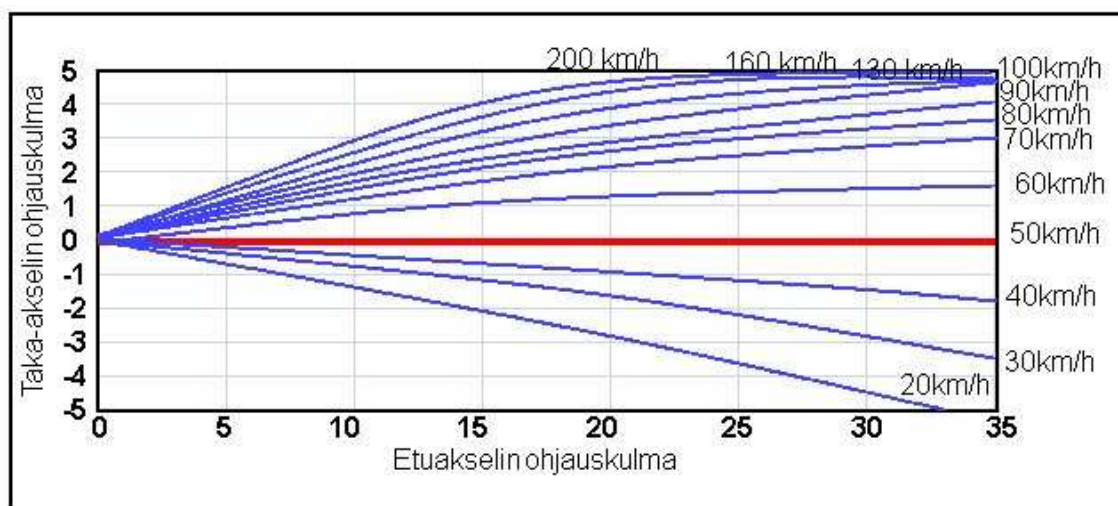


Kuva 88. Ohjausvivustotyyppejä



Kuva 89. Korjattu Ackermann-kulma

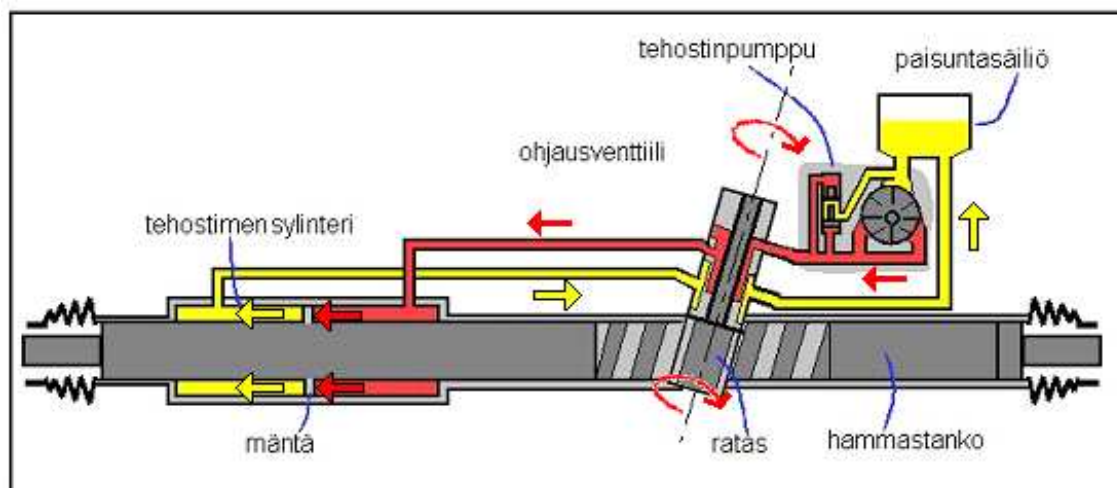
Nelipyöräohjaus on harvoin käytetty menetelmä (pääasiassa kustannus/hyöty-suhteen takia). Periaatteena on, että hitailla nopeuksilla tarvitaan pieni kääntösäde, jolloin takapyöriä käännetään etupyöriin nähden vastakkaiseen suuntaan. Kaistanvaihtoja verten kovemmissa nopeuksilla puolestaan takapyöriä käännetään etupyörien kanssa samaan suuntaan. Tämä ominaisuus auttaa myös kovilla nopeuksilla kaarrettaessa takarenkaiden pitoa tuoden turvallisuuden tunnetta ja nopeutta ohjaukseen. Esimerkinelipyöräohjauksen etu- ja takapyörien ohjaukulman muutos ajonopeuden suhteen nähdään kuvaajasta 28. Kuvassa takapyörien kääntösuunta vaihtuu 50km/h nopeudessa ja takapyörien suurin kääntymiskulma on 5°. Takapyörien ohjaus voidaan toteuttaa esim. taka-akselin aktiivisella kinematiikalla joko tukivarsiin vaikuttavana tai koko apurinkoon vaikuttamalla. (Heißing & Ersoy 2011, 220—221, 519.)



Kuvaaja 28. Takapyörien ohjauskulman suhde etupyörien ohjauskulmaan eri nopeuksilla (esimerkkitapaus)

9.3 Hammastanko-ohjaus

Ns. servo-block-ohjausvaihte on nykyisin hallitseva hammastanko-ohjauksen toteutustyyppi. Siinä tehostinsylinteri sekä ohjausventtiili on integroitu ohjausvaihteeseen. Rakenne on kevyt, tilaa säästävä, edullinen ja toimiva. Järjestelmä voi olla ”open hydraulic center” tai ”closed hydraulic center”. Avoin järjestelmä kierrättää auton moottorin ajaman pumpun avulla öljyä jatkuvana tilavuusvirtana läpi järjestelmän. Tilavuusvirta muuttuu moottorin kierrosluvun mukaan riippumatta siitä, tehdääntö sylinterillä työtä vai ei (käännetäänkö rattia). Hyötysuhde ei näin ollen ole optimaalinen läheskään kaikissa ajotilanteissa. Toisaalta avoin järjestelmä on vuosikymmenien ajan todettu robustiksi, luotettavaksi, kestäväksi ja hyvin mukautettavaksi eri autojen ominaisuuksille. Perinteinen avoin järjestelmä nähdään kuvassa 90. (Heißing & Ersoy 2011, 194—195.) Öljypumppu tulee mitoittaa niin, että moottorin tyhjäkäynnillä se kykenee tuottamaan sen suuruisen tilavuusvirran, että ohjauspyörää voidaan kääntää ainakin 1,5 rad/s kulmanopeudella. Hydraulinesteen lämpötila ei saa ylittää 100°C, eikä öljyn vaahtoamista ja melua saa esiintyä. (Bosch, 2002, 704.)



Kuva 90. Tavallinen avoimen järjestelmän hydraulinen ohjaustehostin

Suljettu järjestelmä on kehitetty avoimen järjestelmän huonon hyötysuhteen parantamiseksi. Järjestelmä sisältää hermeettisesti suljetun venttiilirakenteen, joka ei kierrätä öljyä, kun ohjausta ei tarvita. Tämä järjestelmä ei ole massatuotannossa käytössä muutamaa poikkeustapausta lukuunottamatta (esim. Citroën). Järjestelmään kohdistuu suuret vaatimukset tiivistämateriaalien ja venttiilien toleranssien osalta. (Heiðing & Ersoy 2011, 195.)

Sähköhydraulista ohjausjärjestelmää on käytetty hieman yli kymmenen vuoden ajan. Järjestelmällä saavutetaan perinteistä avointa hydraulijärjestelmää parempi hyötysuhde. Hydraulipumppua ajetaan tässä sähkömoottorilla. Yksittäinen ns. ”powerpack”-yksikkö sisältää moottorin, ECU:n ja nestesäiliön. Yksikkö voidaan sijoittaa vapaasti moottoritilassa. Kun ohjausta ei tarvita, järjestelmässä kiertää vain pieni ”standby-öljyvirta”. Sähköhydraulinen ohjaus voi sen ohjauksesta riippuen säästää polttoainetta 40-70% perinteiseen ohjaustehostimeen verrattuna. Järjestelmä on lisäksi helppo toimittaa raidetankoineen kompaktina asennusvalmiina yksikkönä. Sähkötehon tarve rajoittaa yleensä sähköhydraulisen järjestelmän käytön korkeintaan keskikokoisiin autoihin. (Heiðing & Ersoy 2011, 195—196.)

Servotronic ”parameter steering”-järjestelmä (uudempi Servotronic-järjestelmä) on suunniteltu suurille ohjauskuormituksille paremman luokan autoihin. Järjestelmällä voidaan luoda ajotilanteesta riippuva halutunlainen ohjaustuntuma. Pienillä nopeuksilla ohjausta kevennetään ja suurilla nopeuksilla jäykennetään. Ohjausventtiilissä on hydraulinen ECU-ohjattu vasteen tunnistava laite. Ajonopeus voidaan aistia esim. ABS-antureilta, ja ohjausmomentti määrittää sen mukaiseksi. (Heiðing & Ersoy 2011, 196—197.)

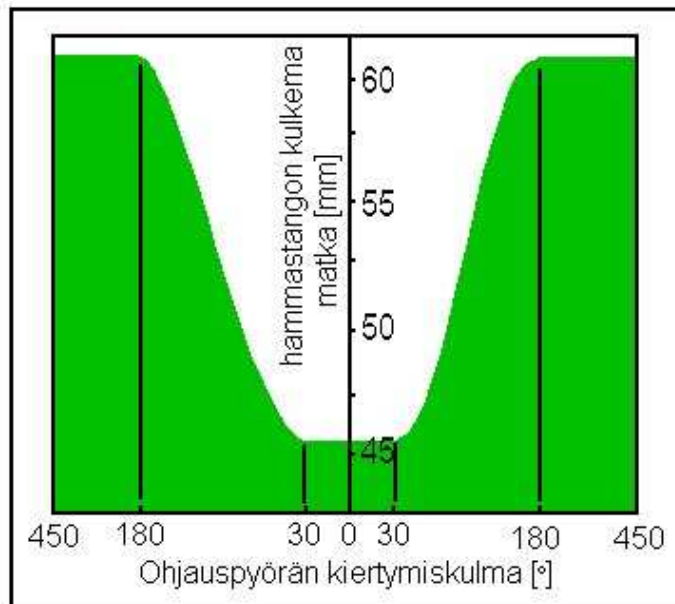
9.4 Kuulamutteriohjaus

Kuulamutteriohjausta käytetään nykyisin enää pääasiassa suurissa autoissa. Hydraulinen hammastanko-ohjaus on nykyisin kustannustehokkain järjestelmä (koska ohjaustehostin on perusvaatimus). Kalliimpaa hydraulista kuulamutteriohjausta voidaan käyttää SUV- tai pickup-autoissa sen robustin, kestävän rakenteen vuoksi. Lisäksi ko. Rakenteen pieni pakkaustila mahdollistaa suuren maavaran. (Heiðing & Ersoy 2011, 192—193.)

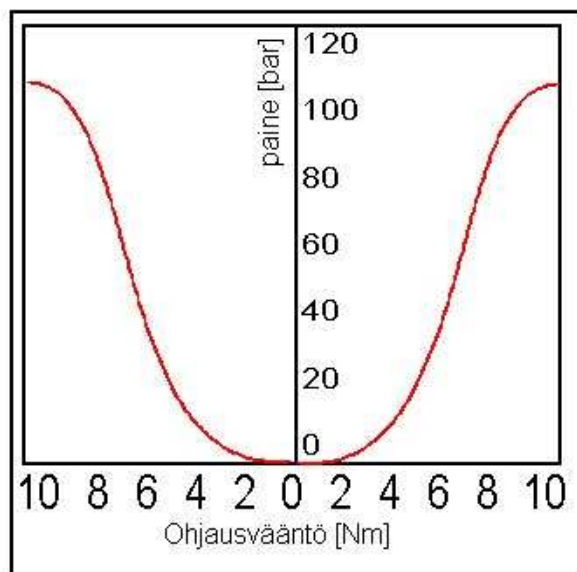
9.5 Rakenne ja toiminta

Ohjauspyörän kiertoliike välittyy ohjauspylväältä nivelöidyn ohjausakselin välityksellä hammasrattaalle. Vääntöjäykkyydestä riippuva akselin ja ohjauspuslan välinen suhteellinen kiertoliike avaa ja sulkee mekaanisesti rajoitettuja ohjauskanavia kuormituksen mukaan aiheuttaen tarvittavan suuruisen hydraulipaineen. Ohjauskanavia voi olla 6,8,10 tai 12. Paine siirtyy letkuja pitkin sylinteriin aiheuttaen tarvittavan suuruisen tehostusmomentin. Hammasratas on yleisesti kahdella laakerilla tuettu. Hammasrattaan ja –tangon välityssuhde määrittää ohjauksen keveyden ja ratin liikematkan suhteessa pyörän kääntökulmaan. Suhde voidaan määrittää ohjausvaihdekohtaisesti, mutta usein 2-3 ohjauspyörän täyttä kierrosta on havaittu olevan sopiva täysien poikkeutusten väli. Jo 1980-luvulta lähtien on tehty myös muuttuvavälityksisiä hammastankoja. Ohjauksen keskivaiheilla tuntuma on kevyt ja välitys suuri, mutta suuremmilla kääntökulmilla välitys pienenee progressiivisesti. Kuvaaja 29 esittää muuttuvavälitteisen ohjausvaihteen periaatteen. Ohjausventtiilin

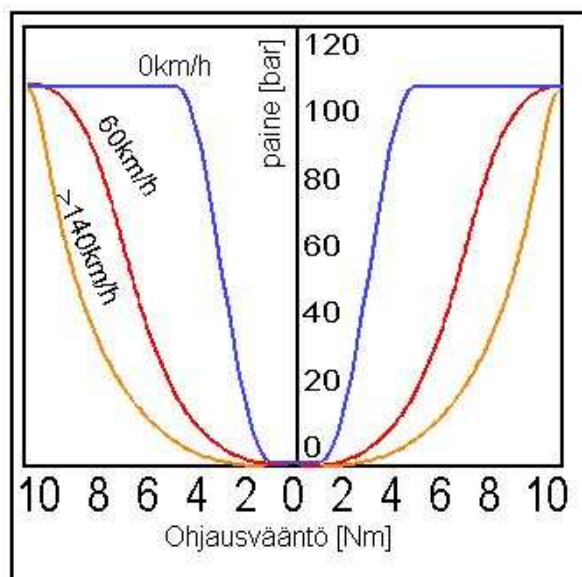
asetuksilla vaikutetaan tuotettavaan hydraulipaineeseen ja näin ollen ohjaustuntumaan. Kuvaaja 30 esittää perinteisen ohjausventtiilin toimintaa, ja kuvaaja 31 nopeustiedolla varustetun Servotronic-venttiilin toimintaa. (Heißing & Ersoy 2011, 197—199.)



Kuvaaja 29. Muuttuvavälitteisen ohjausvaihteen vaikutus pyörien ja ohjauspyörän kääntymisen suhteen



Kuvaaja 30. Tavallisen ohjausventtiilin paine suhteessa ohjausvääntöön

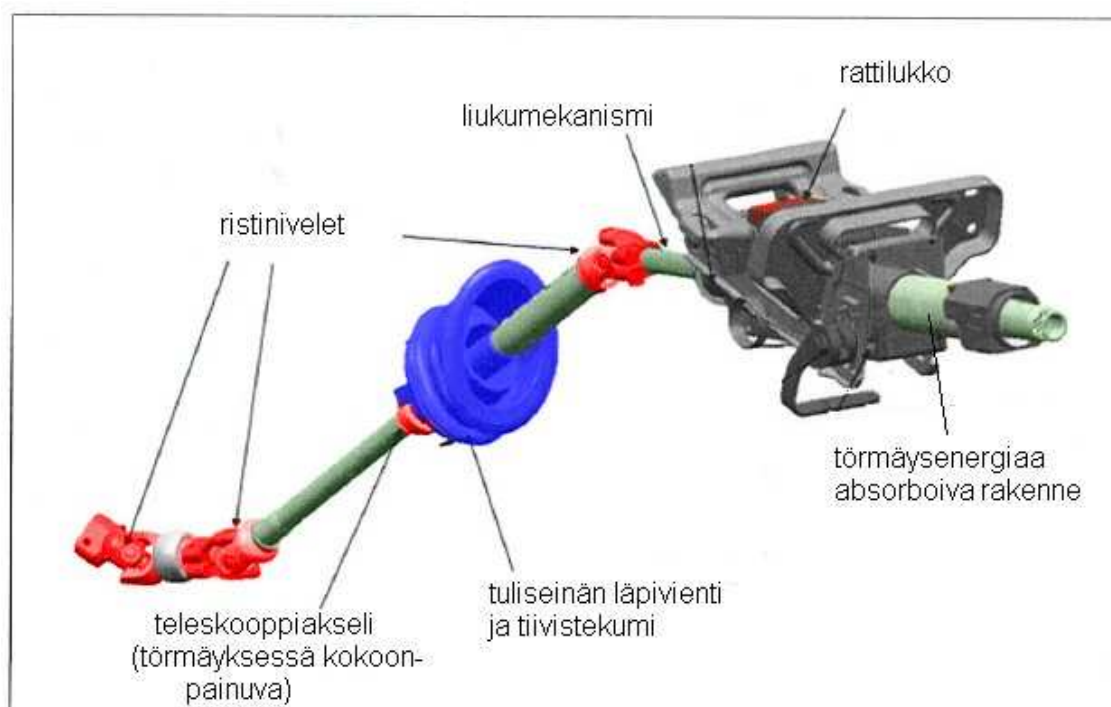


Kuvaaja 31. Servotronic-venttiilin toiminta

Raidetangot kiinnittävät hammastangon olkakappaleisiin. Raidetankojen tulisi olla mahdollisimman suoria taivutusrasitusten ehkäisemiseksi (joskaan tämä ei läheskään aina ole mahdollista pakkausteknisistä syistä). Raidetankojen päissa tulisi olla $\pm 15\text{mm}$ säätö auruasta varten. Raidetankojen pallonivelten eräs tehtävä on törmäystilanteessa olla rajoittamatta korin muodonmuutosta, sekä puolestaan rajoittaa ohjausjärjestelmän kalliiden komponenttien vahinkoja. Raidetangon tulisi normaalitilanteessa kestää $\pm 25\text{kN}$ voima (esim. käännettäessä pyörää katukiveä vasten). (Heiðing & Ersoy 2011, 200—201.)

Ratin tulee vielä nykyisin olla mekaanisesti välitetty ohjausvaihteelle. Ohjausakselin on oltava törmäyksessä kokoonpainuva. Kokoonpainuvan järjestelmän tulee kestää noin $1\text{--}8\text{kN}$ voimia. Akselissa käytetään kumista ”välikappalekiekkoa” vaimentamaan värinöitä pyörältä ratille. Ohjauspylväässä voi olla teleskooppirakennetta hyödyntävä pituussäätö. Korkeussäätö on yleisempi, ja se on toteutettu pikalukituksella. Myös esim. ”ripple counter”- tai Hall-anturitekniikalla toimivat sähkösäädöt voidaan toteuttaa mukavuuden lisäämiseksi. Tämä mahdollistaa esim. ”easy entry”-toiminnon, joka säätää

ohjauspyörän yläasentoon autoon astuttaessa ja siitä poistuttaessa. Säädoissä voi olla myös ”pre safe”-toiminto, joka säätää ratin automaattisesti optimaaliseen törmäysasentoon. Ohjauspylvään vaippaputki kiinnittyy ohjauskonsoliin, joka puolestaan kiinnittyy runkoon. Vaippaputkeen kiinnittyvät muovikatteet, mahdolliset sähkömekaaniset aktuaattorit, johdinsarjat, ECU:t, jne. Rattilukko sijaitsee ohjauspyörän takana. Ohjauspylväs lukitaan, kun mekanismissa tappi osuu lukkoholkin reikään. Jotkin lukkoholkit ovat tähden mallisia mahdollistaen usean lukitusasennon. Lain mukaan mekanismin on luistettava yli 100Nm vääntömomentilla, jotta mahdollisilta ohjauslaitteiston vaurioilta vältyttäisiin. Nykyisin elektroninen rattilukko on korvannut mekaanisen. Se on helppo integroida auton sähköjärjestelmään ja on kätevä käyttää automaattisesti avaimettomassa käynnistyksessä ja sammutuksessa. Pakkaustilan tarve on myös pienempi. Ohjausvoimalinjan tavallinen rakenne selviää kuvasta 91. (Heißing & Ersoy 2011, 200—205.)

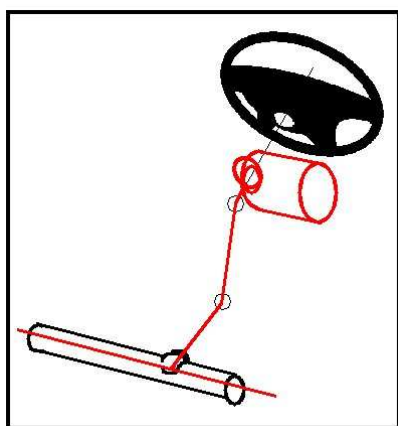


Kuva 91. Nykyaikainen ohjausvoimalinja

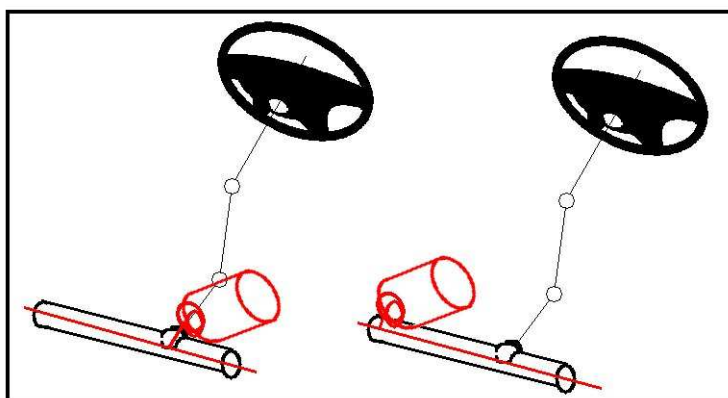
Törmäystilanteessa airbagin kautta kulkeutuva voima sekä osien inertia aiheuttaa perinteisessä ohjauspylväsrakenteessa pylvään ja ratin siirtymisen moottoritilaa kohti. Tämä vaatii vapaata liiketilaa, ja on herkkä muiden osien paikan- ja muodonmuutoksesta aiheutuville esteille. Uusissa järjestelmissä (ilman mekaanista rattilukkoa olevissa) on energiaa absorboivat (metallilanka tai -levy) tukirakenteet sijoitettu suoraan ratin taakse pakkaustilantarpeen vähentämiseksi. Ohjauspylväs painuu kasaan ja energiaa vastaanottavat elementit hajoavat ja muotoutuvat tarkoituksenmukaisesti. Vaijerirakenteita voidaan ohjata pyrotekniikalla. (Heißing & Ersoy 2011, 206—209.)

Perinteiselle hydrauliselle ohjaustehostukselle on vaihtoehtona sähkömekaaninen tehostus (EPS, electric power steering). Iso osa perusosista on samankaltaisia, mutta tehostus syntyy sähkömoottorilla ja se välitetään mekaanisesti ohjausvaihteeseen. Energiansäästö verrattuna perinteiseen avoimeen hydraulitehostukseen on 85%. Ohjauspylvään vääntö tunnistetaan anturilla, ja signaali välitetään ECU:lle, joka ohjaa sähkömoottorilta tarvittavan tehostuksen. Sähköinen tehostus on hydraulista heikompi. ”Steering column drive”-rakenteessa sähkömoottori on kiinnitetty ohjauspylvääseen (kuva 92). Rakenne kehitettiin Japanissa 1988 pienien kaupunkiautojen ohjaustehostimeksi. Tehostus kytkeytyi pois päältä maantienopeuksilla. Moottorin sijainti ohjaamossa helpotti lämpötilankestovaatimuksia, mutta ”ylhäältä” tuleva tehostus rasitti puolestaan ohjausvoimalinjaa. ”Pinion drive”-rakenteessa tehostinmoottori sijaitsee ohjausvaihteessa vähentäen ohjausvoimalinjan kuormitusta. Rakenne on melko edullinen, ja houkutteleva keskikokoisiin ja pieniin autoihin, mutta moottorin sijainti ohjausvaihteessa on ongelmallista pakkausteknisesti. ”Dual pinion drive”-järjestelmässä moottori sijaitsee hammastangon oikeassa päässä (vasemmalta puolelta ajettavissa autoissa) pienentääkseen pakkaustilan. Moottori voidaan asentaa mihin tahansa asentoon hammastangon kiertosuunnassa. Tätä järjestelmää hyödynnettiin ensimmäisen kerran massatuotannossa VAG-konsernin Golf-platformissa vuonna 2003. Pinion drive, sekä dual pinion drive on esitelty kuvassa 93. ”Parallel axis drive”-järjestelmä toimii samalla tavalla, kuin dual pinion drive, mutta siinä moottori sijaitsee hammastangon kanssa

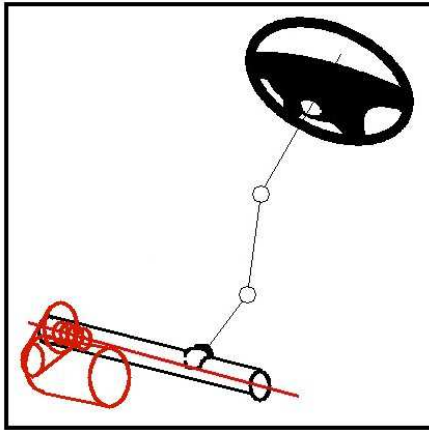
samansuuntaisesti (kuva 94). Voima välittyy rattaan tai hihnan välityksellä kuulamutteriohjaustekniikalla hammastangolle. Järjestelmä toimii vielä nykyisellä 12V sähköjärjestelmällä, mutta mahdollisesti 42V järjestelmässä sitä voitaisiin hyödyntää jopa suurissa luksusautoissa. Rakenne voidaan myös tiivistää suoraan hammastangolle vaikuttavaksi, jolloin moottori ajaa suoraan kuulamutteriohjausta, tai planeettavaidetta (kuva 95). Tämä rakenne heikentää hyötysuhdetta, joten sitä tuskin käytetään usein. Väyläteknologian myötä ohjaustietoa voidaan yhdistää esim. ABS-, TSC-, tai ESC-antureiden tietoihin ja saada näin ohjaustuntumaa mallinnettua ajotilanteen mukaiseksi. (Heißing & Ersoy 2011, 209—215, 497.)



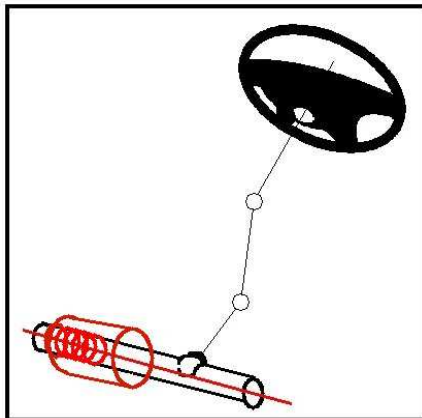
Kuva 92. Steering column drive-sähkömekaaninen tehostus



Kuva 93. Pinion drive- (vas.) sekä dual pinion drive- (oik.) sähkömekaaninen tehostus



Kuva 94. Parallel axis drive- sähkömekaaninen tehostus



Kuva 95. Suoraan tai planeettapyörästäön kautta kuulamutteria ajava aksiaalinen sähkömekaaninen tehostus

9.6 Aktiiviohjaus

Aktiiviohjaus tai superpositio-ohjaus tarkoittaa sitä, että ratin kääntämiskulman suhdetta pyörien kääntökulmaan voidaan muuttaa ”sarjassa” ohjausakseliin liitetyllä aktuaattorilla. Aihetta sivuttiin jo ESC-järjestelmistä puhuttaessa. Ajotilan mukaan antureilta saatujen tietojen perusteella aktuaattori voi siis aiheuttaa kuljettajasta riippumatta esim. $\pm 5^\circ$ ohjauskulman pyörille. ”Fail-safe”-rakenteen ansiosta vikatilanteessa akselista tulee täysin jäykkä. Aktiiviohjaus toteutettiin ensimmäisen kerran sarjatuotantoautossa vuoden 2003 BMW 5-sarjassa. Tässä ratkaisussa aktuaattori oli sijoitettu ohjausvaihteen yhteyteen

ohjausventtiiliin taakse. Kierävaihte ajaa planeettapyörästä, joka muuttaa nopeustiedon perusteella ohjausakselin välityssuhdetta pyörimissuunnasta riippuen suuremmaksi tai pienemmäksi. (Heiðing & Ersoy 2011, 215—219.)

Mekaaninen yhteys ohjauspyörän ja pyörien välillä on vielä edellytyksenä ohjauslaitteiston suunnittelussa (paitsi aktiivisesti ohjaavalla taka-akselilla), mutta tulevaisuudessa voi olla mahdollista siirtyä ”steer-by-wire”-teknologiaan, jossa mekaaninen yhteys poistetaan. Järjestelmä vaatisi kaksi rinnakkaista järjestelmää toistensa turvaksi, ja luultavasti varalle mekaanisen tai hydraulisen yhteyden ensimmäisissä versioissa luottamuksen saavuttamiseksi. Ohjaustuntuma sekä aktiiviohjaus voitaisiin ohjelmoida halutunlaiseksi. Myös esim. joystickin käyttö ratin sijasta voisi olla mahdollista. Tämä vapauttaisi huomattavan määrän tilaa ja laitteiden sijoittelu olisi vapaata. (Heiðing & Ersoy 2011, 222—225.)

9.7 Lainsäädäntö

9.7.1 YK:n normit (tulevat määrääviksi 2014)

ECE R12 (Protection of drivers against the steering mechanism in the event of impact)

- Termistöä
- Hyväksyntä
- Parametrejä (specifications)
- Testaus

ECE R79 (Steering equipment)

- Termistöä
- Hyväksyntä
- Merkinnät
- Järjestelmän vaatimuksia
- Testaus

(United Nations Economic Commission for Europe)

9.7.2 EU-Direktiivi (kumoutuu 2014)

70/311 EEC (Steering equipment for motor vehicles and their trailers)

Määritelmiä

- Rakenne-, asennus- ja tarkastusvaatimukset

Direktiivi 92/23/EEC kumoutuu vuonna 2017 direktiivillä EC 661/2009 (General safety of vehicles). (European Commission)

9.7.3 USA:n lakivaatimukset

49 C.F.R Part 571- Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS), Subpart B §571.203 (Impact protection for the driver from the steering control system)

-Törmäyksestä aiheutuvien pää-, niska- ja rintavammojen minimointi

-Rajoituksia ohjausjärjestelmälle

-Koskee GVWR alle 4,536 kg henkilöautoja ja hyötyajoneuvoja, ei koske (49 CFR 571.208) mukaisia ajoneuvoja muuten, kuin turvavöiden osalta

§571.204 (Steering control rearward displacement)

-Ohjausjärjestelmän taaksepäinsiirtymisen rajoittaminen törmäystilanteessa pää-, niska- ja rintavammojen ehkäisemiseksi

-Koskee henkilö- ja hyötyajoneuvoja (paitsi walk-in-van)

(US Law. 49 C.F.R Part 571)

9.7.4 Kanadan lakivaatimukset

Motor Vehicle Safety Regulations (C.R.C.,c 1038), Part 3

Standard 203 (Driver impact protection and steering control systems)

-Törmäyksestä aiheutuvien vammojen minimointi

-Rajoituksia ohjausjärjestelmälle

-Koskee GVWR alle 4,536 kg henkilöautoja ja hyötyajoneuvoja (paitsi walk-in-van)

Standard 204 (Steering column rearward displacement)

-Ohjausjärjestelmän taaksepäinsiirtymisen rajoittaminen törmäystilanteessa pää-, niska- ja rintavammojen ehkäisemiseksi

-Koskee GVWR alle 4,536 kg henkilöautoja ja hyötyajoneuvoja

(Motor Vehicle Safety Regulations, C.R.C., c. 1038, Part 3)

10 MARKKINATUTKIMUS

Kokosin suppean markkinatutkimuksen autojen alustaratkaisuihin. Tarkoituksena oli tutustua Euro Car Segmenttien A-J mukaisiin M1-luokan, ja N1-luokan autoihin. Tutkimuksessa autot jaettiin kolmeen pääryhmään niiden pääasiallisen käyttötarkoituksen mukaan. Lisäksi ensimmäinen pääluokka jaettiin neljään alaluokkaan auton tarkemman käyttötarkoituksen mukaan:

1. Henkilönkuljetus
 - a. Perheauto (M1, segmentit A,B,C,D,E)
 - b. Edustusauto (M1, segmentti F)
 - c. Urheiluauto (M1, segmentti S)
 - d. SUV (M1, segmentti J)
2. Tavarankuljetus (N1, ei Euro Car Segment-luokitusta)
3. Off-road (M1, segmentti J)

Jokaista autosegmenttiä kohti on taulukoitu kolme esimerkkiautomallia. Automallit on mahdollisuuksien mukaan pyritty valitsemaan jollakin seuraavista kriteereistä (prioriteettijärjestys):

1. Mahdollisimman erilainen alusta-arkkitehtuuriratkaisu jokaisessa mallissa
2. Yksi japanilainen, yksi eurooppalainen ja yksi amerikkalainen malli
3. Kaksi eurooppalaista ja yksi japanilainen tai amerikkalainen malli

Henkilönkuljetusautojen J-segmentin SUV-autot on haluttu erottaa off-road-luokan autoista niin, että off-road-autoiksi lasketaan 4-vetoiset keskidifferentiaalilukolla varustetut aidosti maastoon tarkoitettut autot.

Autotietokanta taulukoitiin kahteen erilliseen taulukkoon. Ensimmäinen taulukko on ”sisällysluettelo” automallikohtaisista taulukoista, ja sisältää automallien perustiedot. ”Valmistettu”-sarake tarkoittaa k.o. korimallin valmistusvuosia. ”ECS-sarake” tarkoittaa Euro Car Segment-luokitusta. Moottorin vääntö ja teho ([Nm]/[kW]) on automallin pienimmän bensiinimoottorin mukainen, mikäli bensiinimoottori on saatavilla. Hintatiedot on ilmoitettu halvimman mallin mukaan. Ensisijainen hintatietojen lähde on media.autotietokanta.fi. Mikäli hintatietoa ei sivuston taulukosta löytynyt, on toissijainen lähde automerkin suomenkielinen kotisivu (pätee ainoastaan 2012-malleihin). Hintatietoa ei ole, mikäli automallia ei ole saatavilla Suomesta.

merkki	malli	vuosimalli	valmistettu	ECS	käyttötarkoitus 1	käyttötarkoitus 2	moottorin asennus	[Nm]/[kW]*	vetotapa	saatavana AWD	Hinta uutena*
Smart	Fortwo	2006	2007->	A	henkionkuljetus	perheauto	takana poikittain	89/45	takaveto		12500
Peugeot	107	2008	2005->	A	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	93/50	etuveto		10700
Toyota	IQ	2008	2008->	A	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	91/50	etuveto		16400
Mini	One	2010	2007->	B	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	140/55	etuveto		20200
VW	Polo	2011	2009->	B	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	108/44	etuveto		14000
Toyota	Yaris	2011	2005-2011	B	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	93/51	etuveto		14900
VW	Golf	2011	2008->	C	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	132/59	etuveto	X	20900
Toyota	Auris	2010	2006->	C	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	128/73	etuveto		20800
BMW	1	2008	2004-2011	C	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	150/85	takaveto	X	25000
Ford	Mondeo	2011	2007->	D	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	160/85	etuveto		28000
Toyota	Avenis	2011	2009->	D	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	160/97	etuveto		25100
BMW	3	2010	2005-2011	D	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	160/90	takaveto	X	32300
M-B	E	2011	2009->	E	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	270/135	takaveto	X	50500
Lexus	GS	2010	2007-2012	E	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	314/188	takaveto	X	76400
Citroën	C6	2010	2005->	F	henkionkuljetus	perheauto	edessä poikittain	290/155	etuveto		75300
Audi	A8	2009	2003-2009	F	henkionkuljetus	edustusauto	edessä poikittain	280/154	etuveto	X	127000
Lexus	LS	2009	2006-2009	F	henkionkuljetus	edustusauto	edessä poikittain	500/287	takaveto	X	181300
BMW	7	2010	2009->	F	henkionkuljetus	edustusauto	edessä poikittain	450/240	takaveto	X	121800
Jaguar	XK	2009	2006->	S	henkionkuljetus	urheilauto	edessä poikittain	420/283	takaveto		167500
Chevrolet	Corvette	2009	2005->	S	henkionkuljetus	urheilauto	edessä poikittain***	542/298	takaveto		117500
Ferrari	Enzo	2002	2002-2004	S	henkionkuljetus	urheilauto	keskellä poikittain	657/485	takaveto		-
Honda	CR-V	2012	2010->	J	henkionkuljetus	SUV	edessä poikittain	192/110	neliveto	X	36000
Nissan	Cashqai	2011	2006->	C/J	henkionkuljetus	SUV****	edessä poikittain	158/86	etuveto	X	21000
Cadillac	Escalade	2012	2007->	J	henkionkuljetus	SUV	edessä poikittain	565/301	takaveto	X	-
M-B	Sprinter	2012	2006->	-	tavarankuljetus		edessä poikittain	240/115	takaveto	X	33000
Toyota	Hiace	2012	2004->	-	tavarankuljetus		edessä poikittain	230/70*****	takaveto	X	30900
GMC	Savana	2012	2003->	-	tavarankuljetus		edessä poikittain	400/209	takaveto	X	-
Land Rover	Defender	2012	1983->	J	off-road		edessä poikittain	360/90*****	neliveto		46100
Toyota	4Runner	2012	2003->	J	off-road		edessä poikittain	378/201	takaveto	X	-
M-B	G	2012	1990->	J	off-road		edessä poikittain	456/218	neliveto		75000

Taulukko 10. Tietokannan autojen perustiedot (*pienin bensiinimoottori, **alkaen-hinta, ***transaxle-rakenne, ****Crossover-SUV, *****diesel-moottori)

Valitsin SUV-autojen joukkoon tietoisesti vertailun vuoksi yhden Crossover-SUV-auton, joka yhdistää segmentit C ja J. On mielenkiintoista vertailla Crossover-mallin eroja alustarakenteissa verrattuna puhtaisiin J-segmentin autoihin.

Tutkimuksen toinen taulukko on automallikohtainen, ja sisältää taulukosta 11 nähtävät alustatiedot. Kohdan muut tiedot tavaratilan koko on off-road-autoissa korvattu differentiaalitoimintatavalla. Automallikohtaiset taulukot on listattu liitteeksi 12.

	Alusta	
	Etu	Taka
tuenta		
tyyppi		
huom		
jousityyppi		
huom		
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat		
huom		
Akseliväli [mm]		
Raideväli [mm]		
Max akselimassa [kg]		
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät		
	Etu	Taka
rakenne		
huom		
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä		
tehostustyyppi		
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]		
henkilölukumäärä		
kääntöympyrä [m]		
pituus/akseliväli-suhde		

Taulukko 11. Automallikohtainen alustatietotaulukko

Tutkimuksesta voidaan todeta autosegmenteittäin tiettyjä odotettuja trendejä alustarakenteiden valinnassa. Myös joitakin uusia suuntauksia on havaittavissa.

10.1 A-segmentti

Pienimpien autojen luokassa oli esimerkkimalleina Smart Fortwo, Peugeot 107 sekä Toyota IQ. Peugeot 107 käyttää samaa alustaa Toyota Aygon sekä Citroën C1:n kanssa.

Smart Fortwo oli tutkimuksen ainut takamoottoriauto, ja se muodosti takavetoisena poikkeuksen pienten autojen tavalliseen voimalinjarakenteeseen. Smart käyttää jäykkää poikkeuksellisesti deDion-takatuentaa, joka toimii kevyessä autossa hyvin. Peugeotin ja Toyotan takatuentana on perinteinen puolijäykkä akseli ilman kallistuksenvakaajaa. Etutuentana kaikissa käytetään tavallista joustintukituentaa.

Ohjaustehostus on kaikissa malleissa sähköinen EPS. Smartissa se on tosin lisävaruste. Vakiovarusteena ei tehostusta poikkeuskellisesti ole ollenkaan.

10.2 B-segmentti

Vertailumalleina olivat Mini One, VW Polo sekä Toyota Yaris. Toyotassa ja VW:ssa on takatuentana puolijäykkä akseli ilman kallistuksenvakaajaa. Minissä sen sijaan käytetään "central arm"-monivarsituentaa. Etutuentana kaikissa on perinteinen joustintuki.

Polossa oli ohjaustehostuksena VAG:n käyttämä sähköhydraulinen Servotronic-järjestelmä, Toyotalla ja Minillä tehostus on sähköinen.

10.3 C-segmentti

Vertailumalleina olivat VW Golf, Toyota Auris ja BMW 1-sarja. C-segmentissä tuentarakenteisiin alkaa tulla jakaumaa. Toyota käyttää ainoana C-segmentissäkin puolijäykkää takatuentaa, kun BMW:llä ja VW:llä on käytössä monivarsituenta. Etutuentana kaikissa on joustintuki, mutta BMW:n ratkaisussa alakolmiotuki on jaettu kahdeksi kahden pisteen tueksi, ja muodostaa näin ollen imaginäärisen kääntöakselin. Golfiin ja BMW:hen saa lisävarusteena

adaptiivialustan. VW ja BMW oli saatavilla myös nelivetoisina malleina. Toyotassa se ei taka-akselirakenteen takia ole mahdollista.

C-segmentissä kaikissa vertailumalleissa takajarrut olivat levyjarrut toisin, kuin A- ja B-segmenteissä.

Ohjaustehostus on sähköinen muissa, kuin BMW:ssä (joskin BMW:kin siirtyi 2012-vosimallissa EPS-tehostukseen).

10.4 D-segmentti

Vertailussa olivat Ford Mondeo, Toyota Avensis ja BMW 3-sarja. BMW ja Ford käyttävät takatuentana monivarsituentaa, mutta Toyotalla on käytössä double wishbone-tuenta. Etutuentana BMW:llä on 1-sarjan kaltainen tuenta, Fordilla ja Toyotalla tavallinen joustintuki.

BMW oli ainoa vertailumalli, jota oli saatavissa nelivetoisena mallina.

Ohjaustehostus on sähköinen ainoastaan Avensiksessa.

10.5 E-segmentti

Tässä segmenteissä vertailussa olivat Mercedes-Benz E-sarja, Lexus GS ja Citroën C6. Takatuentana kaikissa käytettiin monivarsituentaa. Tässä segmentissä etutuentakin vaihtui joustintuesta muihin tyypeihin. Citroën ja Lexus käyttävät double wishbone-tuentaa ja M-B:ssä on kolmen monivarsituenta. M-B ja Lexus oli saatavissa myös nelivetoisina.

Citroën muodosti poikkeuksen perinteiseen kierrejousitukseen nähden. C6:ssa on tavallinen jousi ja vaimennin korvattu Citroënin perinteisellä hydropneumaattisella rakenneratkaisulla. C6:ssa on lisäksi aktiivinen Hydractive 3+-alusta. Myös muihin vertailumalleihin oli saatavilla adaptiivinen tai semiaktiivinen alusta.

Jarrulevyt ovat vertailumalleissa jäähdytettyjä myös takana. Ainakin M-B:n ja Lexuksen jarrujärjestelmät ovat sähköisesti ohjattuja mahdollistaen useita eri lisätoimintoja.

Lexus käyttää poikkeuksena vertailumalleihin sähköistä ohjaustehostusta.

Ohjaus oli kaikissa malleissa säätävä ja aktiivinen (M-B:ssä lisävarusteena).

10.6 F-segmentti

Luksusautoluokassa vertailumalleina olivat Audi A8, Lexus LS ja BMW 7-sarja. Kaikissa malleissa oli sekä etu- että taka-akselilla monivarsituenta adaptiivi- tai aktiivialustavaihtoehdolla. Kaikkiin malleihin oli saatavilla ajomukavuutta lisäävä ilmajousitus. Kaikki mallit oli saatavissa myös nelivetoisina.

Mielenkiintoisena havaintona suurimmat sallitut akselimassat ovat F-segmentissä takapainotteiset.

Jarrut ovat kaikissa jäähdytetyt levyt. Audiin on saatavilla hiili/keraamilevyt (S8-versioon). Vannekoko on kaikissa malleissa suuri 19 tuumaa.

Ohjaus on kaikissa malleissa jo edellisen segmentin tavoin säätävä ja aktiivinen. Lexus käyttää LS:ssäkin sähköistä tehostusta. BMW:hen on saatavilla aktiivinen nelipyöräohjaus.

10.7 S-segmentti

Urheiluautosegmentissä vertailussa olivat Jaguar XK, Chevrolet Corvette sekä Ferrari Enzo. Näistä malleista Enzo on selkeästi superautoluokassa. Ferrarissa on ainoana mallina takatuentana double wishbone. Muissa vertailumalleissa käytettiin monivarsituenta. Etutuentana kaikissa malleissa oli käytössä double wishbone. Kaikki vertailumallit olivat takavetoisia.

Corvette käyttää perinteisesti poikittaista lasikuituista lehtijousitusta molemmilla akseleilla. Alusta oli kaikissa malleissa adaptiivinen tai aktiivinen (Corvetessa lisävarusteena). Ferrarissa on pienen maavaran takia alustan nostomahdollisuus.

Kaikissa malleissa käytetään taka-akselilla etuakselia leveämpää rengasta. Ferrarin erikoisvalmisteisissa renkaissa takarenaan leveys on jopa 345mm. Vannekoko kaikissa vertailumalleissa on 18-19 tuumaa.

Jaguarin jarruista ei tarkkoja tietoja löytynyt, mutta Corvette ja Ferrari käyttävät jäähdytettyjä sekä rei'itettyjä levyjä. Ferrarin levyt ovat F1-teknologiaa mukaillen hiilikuitu-, tai hiili/keraamiyhdistettä (joka toimii myös normaalilämpötilassa).

10.8 J-segmentti

Henkilönkuljetukseen tarkoitettujen SUV-autojen luokassa vertailumalleina olivat Honda CR-V, Nissan Qashqai sekä Cadillac Escalade. Honda edustaa tavallista katumaasturia, kun taas Cadillac luksus-SUV-autoa. Nissan on muista malleista poiketen Renaultin/Nissanin C-platformiin perustuva Crossover-malli. Samaa alustaratkaisua käytetään esim. Renault Meganessa. Honda käyttää taka-akselilla double wishbone-tuenta. Muissa vertailumalleissa on monivarsituenta. Etuakselilla puolestaan Cadillacissa on double wishbone, ja muissa malleissa on joustintuki.

Jokaisessa autossa oli erilainen voimalinjarakenne. Honda oli ainut nelivetomalli, joskin se on normaaliajossa etuvetoinen, ja taka-akselin veto kytkeytyy sähköisesti päälle vetoluistotilanteessa. Qashqai oli puhdas etuveto, joskin sitä on saatavilla myös erikseen nelivetoisena versiona. Selkeästi suurin osa ainakin Suomessa myydyistä Qashqai-malleista lienee etuvetoisia. Cadillac on vertailun ainut takavetoinen malli. Sitä on myös saatavilla nelivetoisena versiona.

Hondaan on saatavilla progressiivinen kierrejousitus sekä progressiivinen vaimennus lisävarusteena. Cadillacissa on taka-akselilla ilmajousitasonsäätö sekä adaptiivinen alusta lisävarusteena.

Honda käyttää ainoana vertailumallina sähköistä ohjaustehostusta.

10.9 Tavarankuljetusautot

Tässä luokassa vertailtiin täysverisiä pakettiautoja, joita ei Euro Car Segment luokittele. Valitsin vertailuun suuren pakettiauton (Mercedes-Benz Sprinter), jota saa myös kuorma-autoksi rekisteröitynä usealla eri kori- ja alustavariaatiolla. Kaksi muuta vertailukohdetta ovat hyvin tavallinen pienemmän koon pakettiauto

Toyota Hiace sekä perinteinen amerikkalainen GMC Savana. Kaikki autot ovat takavetoisia, mutta niistä kaikista on saatavilla nelivetoversio.

Hiace on ainoa, joka käyttää taka-akselillaan erillistuentaa. Aiemmissa vuosimalleissa Hiacessa oli jäykkä taka-akseli, kuten muissa vertailumalleissa. Etuakselilla kaikissa malleissa oli alempi kolmiotukivarsi joustintukirakennetyyppisellä vaimenninelementillä ja kallistuksenvakaajalla varustettuna. Jousitus erosi eri malleissa toisistaan. Savana ja Sprinter käyttävät jäykällä taka-akselillaan lehtijousitusta. Hiacella on taka-akselilla nykyisin käytössä kierrejousitus. Kierrejousia etuakselilla käyttää ainoastaan GMC, joskin sen nelivetoversiossa käytetään vääntötankoja. M-B:ssä on edessä poikittainen lehtijousi ja Toyotassa vääntötanko. Sprinteriin on saatavilla erilaisia kallistuksenvakaajia ja jousen jäykkyyksiä eteen sekä taakse.

Rengasprofiili on kaikissa malleissa huomattavan korkea 70-75.

Hiace on vertailussa ainut auto, joka käyttää takana rumpujarruja. Etujarrut ovat kaikissa malleissa levyt.

10.10 Off-road-autot

Vertailussa oli J-segmentin autoja, jotka on suunniteltu maastokäyttöön, ja joissa on neliveto lukittavalla keskidifferentiaalilla. Vertailuautoista perinteinen Land Rover Defender ja Mercedes-Benz G-sarja ovat korimallin (juurikaan) muuttumatta pitkään valmistettuja täysverisiä maastoautoja, joista molemmista on saatavilla hyvin pelkistetty ”työjuhtaversio”. Kolmas auto oli Toyota 4Runner, joka perustuu Hiluxin alustaan. Toyota on tarkoitettu maastoajoon, mutta suuria eroja alustarakenteissa oli havaittavissa Land Roveriin ja M-B:n G-sarjaan nähden. Defenderissä ja G:ssä tuennat olivat lähes identtiset. Molemmissa on takana pitkittäistukivarsilla (trailing link) tuettu kierrejousitettu jäykkä akseli sekä edessä niin ikään pitkittäistukivarsilla (radius arm) tuettu kierrejousitettu jäykkä akseli Panhard-tangolla. 4Runnerissa taka-akseli on samanlainen, kuin muissa, mutta etutuentana on double wishbone. Kaikissa autoissa oli

kallistuksenvakaajat molemmilla akseleilla, tosin ainakin Toyotassa vakaajat ovat saatavilla kytkettävänä off-road-vakaajina.

ABS-jarrut olivat kaikissa vertailumalleissa poiskytkettyjä tai off-road-ajoon mukautuvia.

Ohjaus on kovien kuormitusten kestoa varten Land Roverissa sekä M-B:ssä kuulamutterilla toteutettu. Toyotan ohjausjärjestelmänä on hammastanko. Land Roverissa tehostus on sähköinen.

10.11 Päätelmät

Voimalinjaratkaisuista A-D-segmenteissä yleisin on odotetusti poikittainen etumoottori ja etuveto. Etuakselituenta näissä autoissa on poikkeuksetta joustintuki. Tämä lienee ainoa järkevä ratkaisu yhä poikittaisen etumoottorin tapauksessa (etenkin näissä segmenteissä, joissa auton hinta on tärkeä kilpailutekijä). Takatuentana käytetään perinteistä puolijäykkää taka-akselia enää B-segmenttiin asti. C-segmentissä on jo siirrytty kohti monivarsituenta (japanilaista poikkeustapausta lukuunottamatta). E- ja F-segmenteissä voimalinjarakenne on lähes poikkeuksetta pitkittäinen etumoottori. Vetotapa voi olla etu- tai takavetoinen, mutta voimalinjarakenne mahdollistaa sen, että nelivetoversiot on saatavilla (yhtä poikkeusta lukuunottamatta) kaikista vertailuautoista. Takatuenta on näissä segmenteissä poikkeuksetta monivarsituenta. S-segmentin autoissa voimalinjarakenne ”tavallisemmissa urheiluautoissa on etumoottori pitkittäin ja takaveto. Ns. superautoissa yleinen ratkaisu on keskimoottori pitkittäin ja takaveto. Etutuentana kaikissa on double wishbone. Takatuenta ”tavallisemmissa” urheiluautoissa on monivarsituenta, kun taas superautoissa käytetään double wishbone-tuenta. J-segmentissä SUV-autoissa tuentatyypit vastaavat melko lailla D-segmentin tuentoja, kun taas off-road-autoissa käytetään jäykkiä akseleita pituussuuntaisilla tukivarsilla tuettuna. Kevyemmän luokan off-road-autoissa (esim Toyota 4Runner) etuakseli ei kuitenkaan ole jäykkä. Off-road-autojen ja SUV-autojen väliset alustarakenne-erot ovat siis huomattavia. Tavarankuljetusautoissa voimalinjarakenne on usein etumoottori pitkittäin ja takaveto. Taka-akseli on

hyvä olla jäykkä, mikäli suunnitellaan kuljetettavaksi suuria kuormia. Kevyissä pakettiautoissa voidaan ajatella ajomukavuutta enemmän erillistuentaa käyttämällä.

Jousityypeistä tavallinen kierrejousi on lähes aina käytössä E-segmenttiin asti, sekä J-segmentissä. E- ja etenkin F-segmentin autoissa nähdään jo usein ajomukavuutta parantavia adaptiivi-, semiaktiivi-, tai aktiivialustaratkaisuja. S-segmentin autoissa suositaan yleisesti coilover-tyyppistä jousitusta, mutta poikkeustapauksia on esim. Corvetten lehtijousitus. S-segmentin autoissa nähdään myös adaptiivi- ja aktiivialustasovelluksia. Tavarankuljetusautoissa lehtijousia käytetään jäykällä taka-akselilla. Etujousituksena voidaan käyttää joko poikittaista lehtijousta, vääntötankoja, tai kierrejousta. Vääntötanko näytti olevan yleinen etujousisovellus, joka mahdollistaa nelivetoversioon tarvittavan etuvetoakselin sijoituksen. Joustintukea en tavarankuljetusautoissa tavannut.

Jarrujärjestelmät näyttävät kehittyneen elektroniikan ansiosta huimasti. Jo A-segmentin autoista lähtien on käytössä elektroninen jarruvoiman jako (EBD), ja ajonvakautusjärjestelmä löytyi useimmista autoista. Jarruissa käytetään hyvin usein levyjarruja myös taka-akselilla. Rumpujarruja käytetään enää A- ja B-segmenttien autoissa.

Ohjausjärjestelmien käytössä kuulamutteriohjausta oli vertailuautoissa käytössä ainoastaan off-road-autoissa, sekä GMC Savana-pakettiauton raskaissa versioissa. Järjestelmä voinee olla käytössä myös muissa tavarankuljetusautoissa suuren voimavälityssuhteen ansiosta. Mielenkiintoista oli havaita sähköisen ohjaustehostuksen yleistymisen yhä suuremmissa autoissa. C-segmenttiin asti EPS oli yleisin tehostustyyppi, mutta D-, E-, F-, ja J-segmenteissä sitä käytettiin joissakin tapauksissa. Ainoastaan S-segmentin autoissa sekä tavarankuljetusautoissa sitä ei käytetty missään vertailuautossa.

Tutkimuksen otanta oli melko suppea, eikä varmasti kerro koko totuutta alustarakennetrendeistä etenkin, kun vertailuautot edustivat tarkoituksella hieman toisistaan eroavia rakenneratkaisuja, mutta suuntaa antavana tietokantapohjana tutkimus toiminee kuitenkin.

11 YHTEENVETO

Käsikirja auton alustarakenteista osoittautui mielekkääksi tehtäväksi tehdä. Projekti oli äärimmäisen opettavainen ja avasi hyvin erilaisten ratkaisujen tarkoituksia. Projektin aikana oppi kyseenalaistamaan vanhaa "totuutta" ja miettimään syvällisemmin esim. kinematiikan tavoitteita. Vaikka kirjan aihe on äärimmäisen laaja ja eri osa-alueista voitiin käsitellä ainoastaan perustiedot, uskon, että näiden perustietojen ja oikean maailman esimerkkien avulla suunnittelija pystyy etsimään syvempää tietoa tarvitsemastaan osa-alueesta. Kirjan onkin tarkoitus toimia lähtötietoja tarjoavana materiaalina, jonka luettuaan insinööriellä olisi hyvä kokonaiskuva alustarakenteiden perusteista havainnollistavien esimerkkien ja joidenkin erikoisempien ratkaisujen valossa.

Tutkimusosuus opetti lisää lähdekriittisyyttä otannan tutkimisessa. Eri tietolähteissä oli hieman toisistaan poikkeavia tietoja saman korimallin osalta. Täyttä varmuutta tutkimusosan tulosten oikeellisuudesta ei ole, eikä kaikista autoista kaikkia tietoja edes löytynyt (ainakaan taarpeeksi luotettavasta lähteestä). Kuitenkin mielestäni tarvittavien asioiden havainnointi onnistui melko hyvin näinkin suppeasta ja "hajanaisesta" otannasta. Tietokannan täydentäminen myöhemmin näyttää, kuinka oikeita päätelmät ovat.

LÄHTEET

- Antoine, A. 2004. Motortrend 10/2004, 1. Viitattu 20.4.2012
http://www.motortrend.com/roadtests/coupes/112_0410_exotic_coupe_comparison/viewall.html
- Autotuoajat ry. 2012. Autotietokanta. Viitattu 20.4.2012 <http://media.autotietokanta.fi>
 (Autotuoajat ry:n tuomat automallit excel-taulukko)
- Autozine Technical school, Suspension geometry. Viitattu 12.2.2012
http://www.autozine.org/technical_school/suspension/tech_suspension1.htm#DeDion
- Bastow, D. 1987. Car Suspension and Handling, second edition. London: Pentech Press
- Bosch. 2002. Autoteknillinen taskukirja, 6. painos. Stuttgart: Robert Bosch GmbH
- Carfolio. 2012. Viitattu 20.4.2012 <http://www.carfolio.com> (hakukentän kautta haettu kaikki markkinatutkimukseen osallistuvat autot)
- Crolla, D.A. 2009. Automotive engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body. Burlington: Butterworth-Heinemann. Saatavissa myös
<http://www.elsevierdirect.com/9781856175777>
- Csere, C. 2004. Car and driver 10/2004, 1. Viitattu 20.4.2012
<http://www.caranddriver.com/columns/a-surprising-new-active-suspension>
- Daimler. 2011. Safety first: Mercedes-Benz Sprinter with extended Electronic Stability Program (ESP). Viitattu 24.4.2012 <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-656175-1-1444742-1-0-0-0-0-1-11700-614216-0-1-0-0-0-0-0.html>
- European Commission. Automotive directives and regulations- motor vehicles. Viitattu 24.2.2012
http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/documents/directives/motor-vehicles/index_en.htm (riittääkö vai tarviiko kaikki dokumentit?)
- Fitzgerald, C. 2005. Earl S. MacPherson; Hemmings Sports & Exotic Car. Viitattu 24.1.2012
http://www.hemmings.com/hsx/stories/2005/11/01/hmn_feature20.html
- Heißing, B & Ersoy, M. 2011. Chassis handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Berlin: Vieweg+Teubner
- Justia.com US Law. 49 C.F.R Part 574—Tire identification and recordkeeping. Viitattu 24.2.2012 <http://law.justia.com/cfr/title49/49-6.1.2.3.39.html>
- Justia.com. US Law. 49 C.F.R Part 571—Federal Motor Vehicle Safety Standards. Viitattu 24.2.2012 http://law.justia.com/cfr/title49/49cfr571_main_02.html
- Laine, O. 1981. Autotekniikka osa 2. Tampere: Oy Sonator A
- Laitala, M. 2009. Uutuusrengas pitää märällä loppuun asti. Tekniikka & Talous 18.2.2009, 1. Viitattu 13.3.2012
<http://www.tekniikkatalous.fi/metalli/uutuusrengas+pitaa+maralla+loppuun+asti/a218147>

Lindqvist, J-P. 2011. Autoelektroniikka luentomateriaali; ABS-, ASR-, ja ESP-järjestelmien anturit. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu

Reimpell, J; Stoll, H & Betzler, J.W. 2001. The Automotive Chassis: Engineering Principles, second edition. Warrendale: SAE.

Saastamoinen, J. 2011. Henkilöauton ilmajousitus katsastuksessa. Tampere: Tampereen Ammattikorkeakoulu

Sarakaski, R. 2012. Supplier table.xlsx

Stone, R & Ball, J.K. 2004. Automotive Engineering Fundamentals. Warrendale: SAE.

The suspension bible, Rear suspension —dependent (linked) systems. viitattu 11.2.2012 http://www.carbibles.com/suspension_bible_pg2.html

Trafi. 2012. Ajoneuvoluokat. Viitattu 13.4.2012 <http://www.trafi.fi/tieliikenne/katsastukset/ajoneuvoluokat>

Transport Canada. Motor Vehicle Safety Regulations (C.R.C., c. 1038). Viitattu 24.2.2012 <http://www.tc.gc.ca/eng/acts-regulations/regulations-crc-c1038.htm>

Tuononen, A & Koisaari, T. Ajoneuvojen dynamiikka. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus Oy

United Nations Economic Commission for Europe. 1985 Agreement: UNECE Regulations. Viitattu 24.2.2012 <http://www.unece.org/trans/main/welcwp29.html>

Vehicle Certification Agency. 2012. Latest Legislation Information Notice. Viitattu 24.2.2012 <http://www.dft.gov.uk/vca/additional/files/legislation/information-notices/latest-information-notice.pdf>

Vesterinen, K. 2010. Autotekniikan perusrakenteet luentomateriaali, Jarrut 1. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu.

Vesterinen, K. 2010. Jousitus ja alustarakenteet luentomateriaali, Jouset. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu.

Vesterinen, K. 2010. Jousitus ja alustarakenteet luentomateriaali, Vaimentimet_aktiivivaimennus. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu.

Vesterinen, K. 2010. Jousitus ja alustarakenteet luentomateriaali, Pyörätuenta. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu.

Vesterinen, K. 2010. Jousitus ja alustarakenteet luentomateriaali, Akselistorakenteet. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu.

Auton osien taajuuksia

Turun ammattikorkeakoulu

Jousitus ja ajo-ominaisuudet

Värähtelytaajuuksia

- Ominaistaajuuudet
 - Pääjouset 0,5...2,5 Hz
 - Kallistelu 1,5...2,0 Hz
 - Nyökkäys n. 1 Hz
- Herätteet
 - Katu ääriä 3,0...5 Hz
 - Pyörän pomppiminen 7...16 Hz
 - Moottorin kiinnitys 7...18 Hz
 - Korin rakenne 13...40 Hz
 - Moottorin sisältä 10...200 Hz
 - Voimansiirto 8...300 Hz
 - Tieäänet 40...400 Hz

Suunnittelusuureiden vaikutuksia korin kiihtyvyyteen

Turun ammattikorkeakoulu






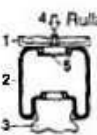
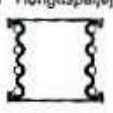
Jousitus ja ajo-ominaisuudet



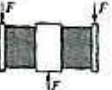

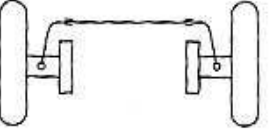
Suunnittelusuureiden vaikutus

Taulukko 5

Suureen kasvaessa		Korin kiihtyvyys	
		1. resonanssihuipun kohdalla	2. resonanssihuipun kohdalla
korimassa,	m_1	alenee voimakkaasti	ei muutu merkitsevästi
akselimassa,	m_2	miltei sama	kasvaa hieman
jousen jäykkyys,	c_1	kasvaa voimakkaasti	kasvaa hieman
renkaan jäykkyys,	c_2	miltei sama	kasvaa voimakkaasti
vaimentimen jäykkyys,	k_1	alenee voimakkaasti	kasvaa hieman
renkaan vaim.jäykkyys,	k_2	miltei sama	alenee hieman
		Pyöräkuormitusmuutos	
	m_1	miltei sama	kasvaa hieman
	m_2	miltei sama	kasvaa
	c_1	kasvaa	alenee hieman
	c_2	miltei sama	kasvaa voimakkaasti
	k_1	alenee hieman	alenee voimakkaasti
	k_2	miltei sama	alenee hieman

Eri jousityyppien ominaisuuksia

Jousityypit	Rakennekuva	Kuormituksen vaikutus korin ominaistaajuuteen	Ominaisuudet
Teräsjouset Lehtijousi	Lehtijousi (ha)  Lehtijousi (ka) apujousella 	$\frac{m^2 n_{kuorm}}{m^2 n_{hyj}} = \frac{m_{hyj}}{m_{kuorm}}$	Yksi- tai monilehtisiä. Toimii monissa tapauksissa samalla pyörän tuentana ohjaten sen liikettä. Rakenteesta riippuen kitkaa kehittävä, voidaan lieventää muovisin välilykskein (toimintaäänät mahdollisia). Kuorma-autoissa usein ilman välilykskoja, huolto tarpeen, voimansiirto runkoon edullinen.
Kierrejousi	Sylinterimäinen  Spiraalijousi 	Ominaistaajuus alenee kuormituksen kasvaessa. Jousien ominaiskuvaajat yhteensä lineaarisia.	Progressiivinen ominaiskuvaaja mahdollinen käyttämällä muuttuvaa nousua ja/tai kartiomaisia jousilankaa. Vaimennin voidaan sijoittaa jousen sisään. Ei itseväimennystä, jousisuringa mahdollista. Etuja: Pieni tilantarve, alhainen paino, huolto- vapaa Hoitoja: Pyöräntuenta vaatii eriliset tukisauvat.
Vääntösauvajousi			Pyörö- ja lattateräksestä (pyörösaavulla alhaisempi paino). Rakenteesta riippuen auton maavaran säätö mahdollista. Huoltovapaa ja kulumaton. Jos esiintyy yhdistettyä taiputusrasitusta, käytetään lattateräsjousikimppua
Ilmajouset Rullapaljejousi Rengaspaljejousi	Vakiotilavuusjousi 1 auton runko, 2 rullapalje, 3 työmäntä, 4 ilmakanava, 5 tukilevy.  4 r. Rullapaljejousi Rengaspaljejousi 	$\frac{m^2 n_{kuorm}}{m^2 n_{hyj}} = 1$ Ominaistaajuus pysyy kuormituksen riippumatta vakiona. Ominaiskuvaajat riippuvat kaasun ominaisuuksista, palkeen muodosta ja kudosrakenteesta.	Joustintukena tai yksittäisjousena etenkin hyötyajonajoneuvoissa ja linja-autoissa. Enenevässä määrin henkilö-auton taka-akselin tasonsäätöratkaisuna ja joka paikan jousena. Toteuttaa pohmeän vertikaalijousituksen (lisää matkustusmukavuutta). Pyöräntuentaan tarvitaan eriliset tukisauvat. Alhainen painetaso (10 bar) vaatii suuret tilavuudet. Rengaspaljeella palkeen toimintageometriasta johtuen vaikea päästä alhaiseen joustojäykkyyteen.

Hydropneumaattiset jouset Kalvo- varaaja Mäntävaraaja	Kaasumäärävakioinen jousi 1 kaasu, 2 öljy, 3 kalvo, 4 teräsjousi. Kalvo- painevaaraaja  Mäntäpainevaraaja 	$\frac{m^2 n_{kuorm}}{m^2 n_{hyj}} = \frac{m_{kuorm}}{m_{hyj}}$ Ominaistaajuus alenee kuormituksen kasvaessa. Ominaiskuvaajat ovat progressiivisia ja riippuvat varaajan täyttöpaineesta.	Varaajan kaasutilavuus (kalvon tai männän öljylsä eristämä) määrittää jousitusominaisuudet. Kaasu puristuu pyöränkuormituksen mukaan hydraulilijyn toimissa voiman välittäjänä. Vaimenninventtiilit sijaitsevat joustintuen mäntäosassa ja/tai painevaaraajan yhtymäkohdassa joustintukeen. Kumikalvon kuntoa on seurattava kaasudifфуusion johdosta.
Kumijousi	 	Ominaistaajuus muuttuu kuormituksen kasvaessa. joustokuvaajan epälineaarisuuden johdosta.	Metallilevyjen väliin vulkanoitu feikkauskumijousi, jonka yhteydessä yleistynyt erillinen hydraulinen vaimennus. Käytetään kiinnityslaakeroinneissa (moottori-, vaihteistotyynt), tuentasauvojen kiinnitysnivelissä ja lisäjousena.
Kaarrevakalin		Yhtä suunnilla samansuuntaisilla joustoilla ei vaikutuksia. Toispuoleisella joustoilla jäykistää joustusta puolella, erisuuntaisilla joustoilla täydellä vakaimen jäykkyydellä.	Rajoltaa korin kallistumista kaarteissa ja vaikuttaa auton ohjautuvuusominaisuuksiin (yli- tai aliohjautuvuus). Usein U-muotoon taiputettua pyörö- tai putkiterästä. Vääntövarret ovat taiputusrasituksesta johtuen lattavaissattuja. Vakalintangan halkaisijan pienentämiseksi tulisi vakaimen vääntövarren kiinnitys suunnitella mahdollisimman lähelle pyörää. Tuentasauvojen liikkeet on sovitettava vakaimen vääntökinematiikkaan siten, että syntyy vain puhdasta vääntöä, eikä taiputusrasituksia.

Akselistorakenteiden suunnittelumatriisi

Classification Section										Assessment Section										Reference Section																				
Rear Axle					Front Axle					Axle (F/R)					General					Kinematics					Handling					Ride Comfort					Economic Considerations					
Independent Suspension			Semi-Rigid Axle	Rigid Axle		Independent Suspension			Rigid	Suspension Type																														
Indirect		Direct			Direct	Indirect		Direct	Link Connection Type																															
5	4	3	2	1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Q/D	L/Q	Q	Q	Q	L	L/D	D	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D
5	4	3	2	1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Q/D	L/Q	Q	Q	Q	L	L/D	D	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D
5	4	3	2	1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Q/D	L/Q	Q	Q	Q	L	L/D	D	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D
5	4	3	2	1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Q/D	L/Q	Q	Q	Q	L	L/D	D	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D
5	4	3	2	1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Q/D	L/Q	Q	Q	Q	L	L/D	D	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D
5	4	3	2	1	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
Q/D	L/Q	Q	Q	Q	L	L/D	D	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D	Q	Q	Q/D	L	L/D

Design matrix for axle type selection (L = longitudinal, Q = lateral, D = diagonal, F = front axle, R = rear axle, 1 = poor, 5 = very good)

Tukivarsien valmistusmenetelmiä

CLASSIFICATION SECTION				MAIN SECTION		ASSESSMENT SECTION												
MATERIAL	PROCESS TYPE	MANU-FACTURING PROCESS	NUMBER OF PARTS	TYPE NUMBER		RELATIVE WEIGHT	STRENGTH	DURABILITY	ELONGATION	ROUGHNESS	SPACE REQUIRED	DESIGN FLEXIBILITY	TOLERANCES	PROCESS STABILITY	RAW PART COST	FINAL PART COST	TOOLING COSTS	CURRENT USE
STEEL	molten metal	sand cast	single	1	cast iron	125	2	2	2	2	large	medium	1	low	80	80	100	2
		mold cast	single	2	cast steel	110	4	3	3	2	large	medium	2	medium	80	90	180	1
	solid metal processes	forging	single	3	forged steel	100	5	5	5	2	small	low	1	v. high	100	100	100	4
		stamp./bending	single	4	single-piece stamped	90	4	4	4	4	large	medium	4	high	55	50	300	3
			multi	5	multi-pc. stamped	80	4	3	4	3	medium	medium	3	high	65	60	400	5
		bending	single	6	bent tube	100	4	4	4	3	medium	low	3	high	50	60	150	2
		hydro	single	7	hydroformed tube	75	3	3	2	4	medium	high	5	medium	50	50	300	4
STAIN-LESS	solid forming	stamp./bending	single	8	single pc. stainless	80	4	5	4	4	large	medium	4	high	75	70	300	1
		single	9	multi-pc. stainless	70	4	4	4	3	medium	medium	3	high	85	80	400	1	
ALUMINUM	molten metal processes	sand cast	single	10	sand cast aluminum	70	1	1	1	2	v. large	medium	1	v. low	150	140	100	2
		mold cast	multi	11	perm. mold cast alu.	65	2	1	3	3	v. large	medium	3	low	150	140	180	2
		die cast	single	12	die cast aluminum	60	3	2	4	4	medium	v. high	5	high	130	120	300	3
		mix	die cast	single	13	aluminum Cobapress	65	3	2	4	4	medium	low	4	v. high	140	130	250
	solid metal processes	forging	single	14	forged aluminum	65	4	3	4	5	medium	low	3	v. high	200	180	150	4
		extruding	single	15	extruded profile	65	4	3	4	5	medium	v. low	4	high	140	120	100	1
		stamp./bending	single	16	single pc. stamped	75	3	2	3	4	v. large	medium	4	medium	120	110	300	1
			multi	17	multi-pc. stamped	70	3	2	3	3	large	medium	3	medium	140	130	400	1
		hydro	single	18	hydroformed tube	80	4	3	3	4	medium	v. low	4	high	160	150	500	1

Manufacturing method selection table for three-point suspension links

CLASSIFICATION SECTION				MAIN SECTION		ASSESSMENT SECTION												
MATERIAL	MAIN PROCESS	MANU-FACTURING PROCESS	NUMBER OF PARTS	TYPE NUMBER		RELATIVE WEIGHT	STRENGTH	DURABILITY	ELONGATION	ROUGHNESS	SPACE REQUIRED	DESIGN FLEXIBILITY	TOLERANCES	PROCESS STABILITY	RAW PART COST	FINAL PART COST	TOOLING COSTS	CURRENT USE
STEEL	join	welding	multi	1	multi-pc. welded stl.	100	4	3	3	2	large	medium	2	low	80	90	180	5
		solid metal processes	forging	single	2	forged steel	100	5	5	5	1	small	low	2	high	100	100	100
	solid metal processes	stamp./bending	single	3	single pc. stamped	80	4	4	4	3	large	medium	3	medium	40	40	300	2
			multi	4	multi-pc. stamped	75	4	3	3	2	medium	medium	2	medium	60	60	400	2
		bending	single	5	bent control arm	90	3	3	4	3	medium	low	3	medium	50	60	150	2
		hydro	single	6	hydroformed tube	70	4	5	4	3	medium	low	3	medium	85	85	500	1
ALUMINUM	cast	die cast	single	7	die cast aluminum	75	3	3	2	4	medium	high	5	medium	50	50	300	4
		solid metal processes	forging	single	8	forged aluminum	70	4	4	4	3	medium	low	3	high	140	130	150
	solid metal processes	extrude	single	9	extruded profiles	70	4	4	4	3	medium	low	3	high	85	80	60	2
		stamp./bending	single	10	single pc. stamped	65	3	3	3	3	large	medium	3	low	60	60	300	1
			multi	11	multi-pc. stamped	65	3	2	2	3	large	medium	2	low	70	75	400	1
		hydro	single	12	hydroformed tube	60	3	4	3	3	medium	low	3	medium	80	90	500	1

Manufacturing method selection table for two-point links

Apurungon suunnittelumatriisi

Luokittelu		Pääosa		laatuolosu										
	materiaali	vaihtuvuusmenetelmä		suht. paino	jäykkyy	kestävyys	energ. absorptio	pakkaus	muodon	muodon	osien	poiston	rykymen	käyttö
moniosainen	teräs	sheet	moniosa sheet	100	keski	korkea	korkea	keski	korkea	korkea	100	100	100	100
		putki	taivutettua putkea	85	korkea	korkea	korkea	keski	matala	matala	80	70	90	90
			hydro	75	korkea	eritt. korkea	eritt. korkea	pieni	keski	korkea	90	60	70	70
	alumiini	sheet	moniosa sheet	70	keski	keski	korkea	suuri	korkea	korkea	200	120	90	90
		putki	taivutettua putkea	65	korkea	keski	keski	keski	matala	matala	150	75	80	80
			puristus	70	korkea	korkea	keski	eritt. suuri	eritt. matala	matala	180	50	50	50
			hydro	60	korkea	keski	keski	keski	keski	keski	160	70	60	60
	yksiosainen	teräs	sheet	veio	125	eritt. matala	eritt. korkea	matala	suuri	keski	60	50	100	100
	alumiini		hiekkavali	75	matala	korkea	matala	pieni	eritt. korkea	250	40	60	60	
			perm. mold	75	matala	korkea	matala	pieni	eritt. korkea	200	50	70	70	
			die cast	55	matala	korkea	keski	pieni	eritt. korkea	140	60	60	60	

Esimerkkiautojen kinemaattisia parametrejä

Kinematic parameter values for selected current European-model vehicles

Make	Model	Audi			BMW				Ford			Mercedes Benz				
		A4	A6	A8	3-series	5-series	7-series	X5	Fiesta	Focus	Mondeo	A-Class	C-Class	E-Class	S-Class	M-Class
Platform		B8	PL56	PL63	E90	E60	E65	E53	B20X	C1	CD132	BR169	BR203	BR211	BR220	BR164
Vehicle	Units	2007	2002	2002	2005	2003	2001	2001	2002	2004	2000	2003	2000	2002	1998	2004
Wheelbase	mm	2808	2948	2948	2760	2888	2990	2820	2466	2615	2754	2568	2715	2854	2965	2915
Exterior Dimensions (length/width/height)	mm	4703/	4915/	5060/	4520/	4840/	5040/	4665/	3915/	4340/	4730/	3840/	4525/	4820/	5045/	4780/
		1825/	1855/	1895/	1815/	1845/	1900/	1870/	1680/	1840/	1810/	1765/	1730/	1820/	1855/	1911/
		1427	1480	1440	1420	1470	1480	1720	1480	1480	1480	1483	1588	1430	1450	1480
GVW	kg	1410	1520	1670	1525	1670	1895	2275	1137	1230	1490	1325	1535	1835	1735	2185
Weight Distribution Front/Rear	%	52	50	52	46	46	48	46	52	51	52	53	50	48	48	
Rated Axle Load (Front)	kg	1100	1295	1385	935	1070	1295	1265	860	1000	1090	935	1060	1165	1270	
Rated Axle Load (Rear)	kg	1000	1300	1285	1085	1275	1410	1465	780	965	1000	845	1065	1240	1355	
Front Axle																
Technical Data																
Suspension Type	-	Multi-Link	Multi-Link	Multi-Link	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	Multi-Link	Multi-Link	Double-Wishbone
Driven	-	•	•	•				•	•	•	•	•				•
Track Width	mm	1564	1612	1628	1500	1558	1578	1576	1475	1494	1522	1566	1505	1577	1574	1630
Track Width Change	mm/mm		0.20	0.20												
Toe-in (Per Wheel)	mm		9.00	5.00	7.00	4.00	5.00	9.00							16.00	16.20
Toe Change (Bump Steer)	mm/mm	-0.13	-0.37	-0.16												
Compression Travel	mm	105	110	102	95	100	99		75	67	74	90	74		105	120
Rebound Travel	mm	-110	-110	-113	100	110	108		95	98	107	90	100		100	110
Steering Ratio	-	16.1	16.1	16.0					15.5	16.0	15.5	19.1	16.1		17.8	
Turning Radius	m	11.1	11.9	12.1	11.0	11.4	12.1	12.1	10.3	10.7	11.2	11.0	10.8	11.4	11.7	11.6
Wheel Offset	mm	39.0			34.0	20.0	20.24	40.0	55.0	55.0	55.0		37.0		44.0	56.0
Tire Radius	mm				291	300	341									335
Wheel Out (Inner)	deg				41.1	34.0	41.0						43.1		42.6	41.0
Wheel Out (Outer)	deg				33.3	43.4	33.0						34.1		33.7	34.9
Kinematic Data																
Static Toe Angle	deg	0.34	0.30			0.13	0.17	0.30	0.25	0.16	0.06	0.24	0.17	0.33	0.35	0.27
Static Camber Angle	deg	-0.71	-0.87	-0.93	-0.30	-0.20	-0.10	-0.20	-0.80	-0.52	-0.76	-83	-0.69	-0.68	-1.00	-0.63
Camber Change	grad/mm	-0.02	-0.01	-0.016												
Axle Roll Center Height	mm	86.3	71.9	78.2	84.1	96.0	95.0		63.5	55	62		22.8		110	200.1
Braking Support Angle	deg	8.1			3.90	3.06	3.41									
Anti-Dive	%															
Acceleration Support Angle	deg															
Anti-Squat	%		9.4	2.8												2.9
Caster Angle	deg	4.20	3.2	3.5	7.09	7.85	8.11	7.10	4.61	3.61	3.75	2.83	10.98	10.70	9.20	5.82
Caster Trail	mm	22.5	23.1	24.3	19.7	28.00	26.0		20.8	21	19	13.8	33.1		-1.7	34.4
Spindle Offset	mm	-0.4							-0.49	-5.2	-2.6		-22.3		18	0
Kingpin Angle	deg	4.90	4.5	5.2	14.11	14.54	15.43		13.9	15	15	14.1	14.41		6	10.74
Scrub Radius	mm	-6.60	-1.7	1.8	6.10	2.00	0.00		-7.2	-13.7	-16.7	-20.7	-24.1		-0.63	
Wheel Load Lever Arm	mm				5.7	7.54	6.86									
Disturbance Force Lever Arm An	mm	15.7	17.7	25.3	77.8	78.81			4.56	4.67	4	44	44.96		26.4	
Disturbance Force Lever Arm Br	mm						88.10								26.4	
Diagonal Springing Angle	deg				1.00	1.37	1.48						0.35		3.6	0.84
Rear Axle																
Technical Data																
Suspension Type	-	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal	Multi-Link	Integral	Integral	Multi-Link	McPherson	Multi-Link	Double-Wishbone	Parabolic	Multi-Link	Multi-Link	Multi-Link	Multi-Link
Driven	-		•	•	•	•	•	•	•	•			•	•	•	•
Track Width	mm	1561	1618	1615	1613	1582	1582	1576	1444	1531	1537	1551	1476	1570	1575	1619
Track Width Change	mm/mm		0.40	0.30												
Toe-in (Per Wheel)	mm		9.0	12.0	9.0	9.0	9.0					15.6			20.0	12.6
Toe Change (Bump Steer)	mm/mm	0.25	0.05	0.12			0.03	0								
Maximum Axle Load	kg	1030	1300	1285		1275	1410	4065	780	965	1000	845	1055	1240	1355	1800
Compression Travel	mm	133	144	123		100	100					100			110	120
Rebound Travel	mm	-97	-86	-99		120	120					100			120	110
Wheel Offset	mm	39			34	20		40								56
Tire Radius	mm				291	300										335
Kinematic Data																
Static Toe Angle	deg	0.33	0.30			0.30	0.30	0.30	0.52		0.28		0.55	0.42	0.68	0.21
Static Camber Angle	deg	-1.33	-0.83	-1.25	-1.50	-2.00	-1.50	-1.83	-1.03		-1.20	-1.50	-1.40	-1.07	-1.10	-1.30
Camber Change	grad/mm	-0.03	-0.01	-0.01		-0.02	-0.02									
Axle Roll Center Height	mm	115	114.3	106.6	100	78	82					280			108	192
Braking Support Angle	deg	24.2			22.20	21.50	22.40									
Anti-Dive	%		16.6	0.4								60			50	40.18
Acceleration Support Angle	deg				5.4											
Anti-Squat	%		51.3	50.9											70	7.05
Diagonal Springing Angle	deg	8.80				6.60	6.50									1.71

Kinematic parameter values for selected current European-model vehicles (cont.)

Make		Opel			Peugeot			Renault			Toyota		VW				
Model		Astra	Vectra	Sig- num	307	407	807	Clio	Megane	Es- pace	Co- rolla	Aven- sis	Polo	Golf	Passat	Touareg	
Platform		T3000	Epsilon	Epsilon	PF1	PF2	PSA	B	C	M2S	Corolla	Premio	PQ24	PQ35	PQ46	PL 71	
Vehicle	Units	2002	2002	2003	2001	2003	2002	2005	2002	2002	2004	2003	2001	2003	2004	2002	
Wheelbase	mm	2614	2700	2830	2608	2725	2823	2472	2686	2803	2750	2700	2482	2578	2709	2855	
Exterior Dimensions (length/width/height)	mm	4250 / 1755 / 1400	4585 / 1800 / 1400	4635 / 1795 / 1400	4200 / 1745 / 1510	4675 / 1810 / 1445	4730 / 1850 / 1750	3775 / 1640 / 1420	4210 / 1775 / 1455	4660 / 1965 / 1730	4260 / 1710 / 1610	4630 / 1760 / 1480	3885 / 1650 / 1430	4205 / 1760 / 1485	4765 / 1820 / 1470	4755 / 1930 / 1725	
GVW	kg	1230	1390	1490	1200	1400	1570	915	1220	1740	1420	1245	960	1154	1343	2175	
Weight Distribution Front/Rear	%	50	51	51	50	54	50	43	52	50	50	50	55	53	52	47	
Rated Axle Load (Front)	kg	870	1025	1135	1065	1200	1290	720	1060	1420	1140	1020	940	1060	1340	1490	
Rated Axle Load (Rear)	kg	860	960	1080	1065	1010	1300	950	975	1410	1140	1020	760	930	1220	1650	
Front Axle																	
Technical Data																	
Suspension Type	-	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	Double- Wishbone	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	McPherson	Double- Wishbone
Driven	-	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
Track Width	mm	1488	1535	1524	1513	1560	1570	1406	1518	1574	1505	1505	1419	1533	1552	1653	
Track Width Change	mm/mm																
Toe-in (Per Wheel)	mm		0.00														
Toe Change (Bump Steer)	mm/mm														-0.30		
Compression Travel	mm		93										60	90			
Rebound Travel	mm		89										100	85			
Steering Ratio	-													15.8			
Turning Radius	m	10.6	10.7	11.9	11.1	12.0	12.3	10.3	10.5	11.3	10.3	11.5	10.6	10.9	11.4	11.6	
Wheel Offset	mm												43.0				
Tire Radius	mm																
Wheel Cut (Inner)	deg																
Wheel Cut (Outer)	deg																
Kinematic Data																	
Static Toe Angle	deg	0	0	0.00	0.30	0.00	0.30	0.17	0.17	0.00	0.17	0.1	0.08	0		0.17	
Static Camber Angle	deg	-0.50	-1.00	-1.03	0.00	-0.58	0.00				-0.53	-0.57	-0.47	-0.5		-0.17	
Camber Change	grad/mm																
Axle Roll Center Height	mm												72	40			
Braking Support Angle	deg																
Anti-Dive	%																
Acceleration Support Angle	deg																
Anti-Squat	%																
Caster Angle	deg	4.00	3.40	2.73	5.30	5.42	3.50				2.88	2.9	4.47	7.6		8.58	
Caster Trail	mm												30.0	40			
Spindle Offset	mm												7.3				
Kingpin Angle	deg				11.78	8.42	12.40				12.28	12.45	13.8	14.5		10.75	
Scrub Radius	mm												-21				
Wheel Load Lever Arm	mm																
Disturbance Force Lever Arm An	mm												45				
Disturbance Force Lever Arm Br	mm																
Diagonal Springing Angle	deg																
Rear Axle																	
Technical Data																	
Suspension Type	-	McPherson	Multi-Link	Multi-Link	Multi-Link	Multi-Link	McPherson	Torsion Bar	McPherson	Torsion Bar	McPherson	Double- Wishbone	McPherson	Multi- Link	Multi- Link	Multi- Link	
Driven	-															I	
Track Width	mm	1488	1525	1525	1510	1525	1548	1385	1514	1558	1495	1510	1425	1521	1551	1665	
Track Width Change	mm/mm																
Toe-in (Per Wheel)	mm		14.0											6.0			
Toe Change (Bump Steer)	mm/mm													0.2			
Maximum Axle Load	kg	860	980	1080	1065	1010	1300	750	975	1410	1140	1020	760	930	1220	1650	
Compression Travel	mm		133											126			
Rebound Travel	mm		97											74			
Wheel Offset	mm												35				
Tire Radius	mm																
Kinematic Data																	
Static Toe Angle	deg	0.17			0.90	0.00	0.77	0.67	0.67	0.67	0.18	0.30	0.35	0.28		0.17	
Static Camber Angle	deg	1.25	1.50		1.25	0.00	1.00	0.77	1.50	0.72	1.45	0.90	1.42	-1.75		1.00	
Camber Change	grad/mm																
Axle Roll Center Height	mm													160			
Braking Support Angle	deg																
Anti-Dive	%																
Acceleration Support Angle	deg																
Anti-Squat	%																
Diagonal Springing Angle	deg																

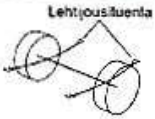
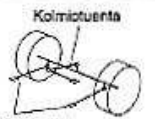


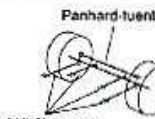



Esimerkkiauton kinemaattisia tavoitearvoja






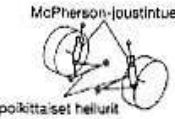

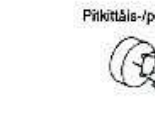
Example target suspension parameter values
for an upper midsize vehicle (in neutral position)

Parameters	Units	Front Axle	Rear Axle
Track Width	mm	1564	1554
Rebound Travel	mm	85	100
Compression Travel	mm	100	130
Toe (Per Wheel)	°	-0.2	-0.2
Camber	°	-1	-0.8
Kingpin Inclination	°	8 ... 15	-
Caster Angle	°	4 ... 5	-
Spindle Offset	mm	35 ... 60	-
Scrub Radius	mm	-15 ... +5	-
Caster Trail	mm	12 ... 15	-
Anti-Squat	%	15 ... 40	> 70
Bump Steer	min/mm	-0.24	0.06
Camber Change	min/mm	-0.9	0.1 ..0.15
Caster Change	°/mm	0 ... 0.6	0 ... 0.6
Roll Center Height	mm	50 ... 80	80 ... 120
Body Spring Rate	N/mm	20 ... 22	18 ... 20
Spring Rate	N/mm	23 ... 25	20 ... 23
Tire Spring Rate	N/mm	200 ... 250	200 ... 220
Roll Stiffness	N/mm	600 ... 900	700 ... 800
Long. Compliance Br	mm/kN	4 ... 8	8 ... 16/g
Stabilizer Percentage	%	< 50	< 50
Long. Compliance Ro	mm/kN	3 ... 4	4 ... 10/g
Long. Compl. Steer Br	°/kN	0.1 ... 0.2	0.05
Long. Compl. Steer Ro	°/kN	0 ... 0.5	0.03
Wheel Lateral Compl.	mm/kN	< 2.0	< 1.5
Lateral Compl. Steer	°/kN	-0.08	0.01
Camber Compliance	°/kN	< 0.3	< 1.0

Br = braking, Ro = rolling, /g = per g instead of kN

Eri tuentatyyppien ominaisuuksia

Jäykät akselit				
 <p>Lehtijousuuenta</p>	 <p>Kolmiotuenta</p> <p>pitkittäiset tuet</p>	 <p>Wattin niveluuenta</p> <p>kiinteä akseli</p>	 <p>Panhard-tuenta</p> <p>kiinteä akseli</p> <p>pitkittäiset tuet</p>	 <p>Panhard-tuenta</p> <p>pitkittäiset tuet</p>
<p>Käyttö taka-akselirakenteissa takavetoisissa autoissa, etu- ja taka-akselina hyöty- ja maastoajoneuvoissa</p> <p>Raidelevyys, aeraus ja sivukallistuma pysyvät vakiona tien pintaan nähden myös sivuttaissiirtymien/kallistumien aikana. Hyvä urasieloisuus.</p> <p>Alhaiset tuotantokustannukset, kiertovärihtelyä, suuri jousittamaton massa, epäedullista joustoa sivuvoimien ja momenttien vaikutuksesta.</p> <p>Ei sivuttaisjoustoja joustoliikkeen aikana, ei epäedullisia pyöränkuiman muutoksia sivuttais- ja pitkittäisvoimien ja momenttien vaikutuksesta, suuri tilantarve</p> <p>Vivun tasapainopiste vapaasti vaihtavissa. Kallis ja painava.</p> <p>Panhard-tuenta aiheuttaa korin ajon aikana sivuliikkeitä.</p> <p>Vivun tasapainopiste vapaasti vaihtavissa.</p>				
Puolijäykät akselit				
 <p>Vääntösauvatuenta</p>	 <p>Yhdysheiluuntuenta</p>	 <p>Kytkeyty tuenta</p>		
<p>Käyttö taka-akselina etuvetoisissa autoissa</p> <p>Pienet tuentavoimat etäällä toisistaan sijaitsevien tukipisteiden vaikutuksesta, edullinen voiman siirto jäykkien pitkittäistukien ansiosta, yksinkertainen rakenne, kaksi laakerointipistettä, yksinkertainen asennettava, erittäin kestävä, kinemaattiset mahdollisuudet rajalliset</p> <p>KK:n paikka panhard-tangon tuennasta riippuvainen pyörän navan yläpuolella</p> <p>KK pyörän navan alapuolella rakenteesta riippuen</p> <p>KK maanpinnassa (kaikki KK:t keskilinjalla)</p> <p>KK = kallistuskeskiö</p>				

Erillistuentaiset akselit				
 <p>Pitkittäiset heilurit</p>	 <p>Vinoheilurit</p>	 <p>Vinoheilurit</p>	 <p>Heiluriakselisto</p>	 <p>Heiluriakselisto</p>
<p>käyttö taka-akselistoina etu- ja takavetoisissa ajoneuvoissa</p> <p>pieni tilantarve, alhaiset valmistuskustannukset, kinemaattiset mahdollisuudet rajalliset, sivukallistuman muutos korin kallistuessa, suuri takakallistuman muutos, suuri jättämän muutos</p> <p>metallinen rakenne, edulliset kinemaattiset mahdollisuudet, elastokinemaattisesti epäedullinen, suuret tukivoimat, sivu- ja pitkittäisvoimat aiheuttavat ylioheutuvuutta</p> <p>alhaiset valmistuskustannukset, kinemaattiset mahdollisuudet rajalliset, kaareajoilentoisissa ja joustoissa suuret sivukallistuman ja raidelevyden muutokset</p>				
 <p>McPherson-joustintuet</p> <p>poikittaiset heilurit</p>	 <p>Kaksolahelluriaakselisto</p>	 <p>Pitkittäis-/poikittaisheiluriakselisto</p>		
<p>käyttö etu- ja taka-akselirakenteissa taka- ja etuvetoisissa autoissa;</p> <p>pieni tilantarve, pienet tukivoimat tuenta-alueesta johtuen, vähän tukivarsia, hyvä asennettavuus, alhainen paino, vähäinen tukipisteiden tarkkuusvaatimus, kinemaattisesti rajalliset mahdollisuudet koskien sivukallistuman muutoksia, kääntöakselin sivukallistumaa, rajallinen tila jousille, kokonaiskorkeudelle ja renkaan leveydelle</p> <p>käyttö etuakselistoissa etu- ja takavetoisissa ajoneuvoissa kinemaattisesti suuret toteutusmahdollisuudet, suuret valmistuskustannukset tukivarsien lukumäärän vuoksi, suuri mittatarkkuusvaatimus tukipisteiden keskinäisten etäisyyksien vuoksi, jäykkä laakerointi tarpeellinen suurten tukivoimien vuoksi ja suurten kulmanmuutoksien estämiseksi (ajomukavuuden heikentyminen)</p> <p>Pitkittäis-/poikittaisheiluriakselisto alle:</p> <p>ylätukivarsiin välittyvät voimat voidaan johtaa tukevaan soinnirakenteeseen</p>				

Autoja, joihin on saatavilla tehdasvarusteen ilmajousitus

Audi

A6, Allroad Quattro, A8, Q7

BMW

5, 6, 7, X5, X6

Chevrolet USA

Suburban, Tahoe, Avalanche

Ford USA

Expedition

Hummer

H2

Jaguar

XJ, XF

Jeep

Grand Cherokee (vm 2011-)

Land Rover

Discovery 2, 3, 4

Lexus

LC120 (Toyota Land Cruiser), LS400, LS430, RX450h

Lincoln

Town Car, Continental, Mark VIII

Maybach

Mercedes-Benz

E(W/S210,W/S211,W/S212);S(W220,W221);ML(W164);R(W251);GL(X164);CLS (C219);CL(C216)

Pontiac

LeSabre, Bonneville

Porsche

Panamera, Cayenne

Range Rover

L322 (2002+), P38a(1994-2002)

Rolls-Royce

VW

Touareg, Phaeton

Alustarakenteiden toimittajia

Steering

Steering rack (manual, HPS, EHPAS, EPS), Column, Intermediate shaft
 ZF Lenksysteme, TRW Automotive, ThyssenKrupp Automotive,
 Tedrive Steering Systems GmbH, Nexteer Automotive, NSK Ltd,
 JTEKT Corporation, Mando Corporation, Kayaba

EPS Power pack
 Continental Automotive Systems, Robert Bosch GmbH

Power steering pump
 ZF Lenksysteme, Ixetic, RBL Brems- und Lenksysteme

Steering wheel
 Autoliv, Takata

Brakes

Wheel brake
 TRW Automotive, Continental Automotive Systems, Mando Corporation,
 BWI Group, Robert Bosch GmbH, Brembo Spa, Wilwood Engineering, Alcon

Brake disc & drum
 ZF Lemförder, BWI Group, Cimos d.d., Akebono Brake Corporation,
 FTE Automotive GmbH, Federal Mogul, Fagor Ederlan Group

Caliper
 BWI Group, Akebono Brake Corporation, Fagor Ederlan Group

Pads & shoes
 Federal Mogul, ITT Automotive, Honeywell Friction Materials,
 FTE Automotive GmbH

Brake actuation
 TRW Automotive, Continental Automotive Systems, Mando Corporation,
 BWI Group, Robert Bosch GmbH, Wilwood Engineering, Alcon,
 FTE Automotive GmbH

Parking brake
 Emergency assist
 Vacuum pump
 Continental Automotive Systems, Hella KGaA

Pedal box
 Cimos d.d.

Brake lines & hoses
 TI Automotive, Flexitech

Suspension

Suspension modules, corner modules
 Benteler Automotive, Magneti Marelli, Tenneco

Control arm
 ZF Lemförder, TRW Automotive, Benteler Automotive,
 Magneti Marelli, Tower International, Heyco, Brabant Alucast, Bharat Forge,
 Cosma International, GF Automotive, CIE Automotive,

Ball joint

TRW Automotive, Inauxa, Federal Mogul

Tie rod

TRW Automotive, Heyco, Inauxa,

Bushings

Vibracoustic, Trelleborg AB, Tenneco

Wheel carrier

ThyssenKrupp Automotive, BWI Group, Heyco,
Hirschvogel Automotive Group, Bharat Forge, GF Automotive,
KSM Castings GmbH, Fagor Ederlan Group, Benteler Automotive

Hub

ThyssenKrupp Automotive, NSK Ltd, Hirschvogel Automotive Group,
Bharat Forge

Wheel bearings

Schaeffler AG

Subframe

Benteler Automotive, Magneti Marelli, Cosma International,
KSM Castings GmbH, Inauxa

Rear axle, twist beam

Benteler Automotive, Magneti Marelli, ThyssenKrupp Automotive,
Tower International, CIE Automotive, Inauxa

Spring & shock**Coil spring**

Mubea, Sogefi, Ahle federn, Tenneco, ThyssenKrupp Automotive,
Federal Mogul

Stabilizer bar

Mubea, Sogefi, Inauxa, Tower International, Benteler Automotive

Absorbers & Struts

Tokico, ITT Automotive, Ride Control LLC, BWI Group,
Mando Corporation, Kayaba, Magneti Marelli, Tenneco,
ThyssenKrupp Automotive, ZF

Air suspension

ThyssenKrupp Automotive, Mando Corporation, BWI Group,
Kayaba, Continental Automotive Systems, Vibracoustic

Markkinatutkimuksen autotietokanta

Lyhenteiden selitykset:

Alusta:

ARB=anti roll bar
dD=DeDion-axle
DW=double wishbone
La=live axle
LW=lower wishbone
MS=McPherson-type strut
ML=multilink
PR=Panhard-rod
RA=radius arms
TB=torsion bar
TrLi=trailing link
TrBl=trailing blade
TzLi=trapezoidal link
UW=upper wishbone
W=wishbone

Jarrut:

ABS=antilocking braking system
ASR=anti slip regulation
BAS=brake assistant system
EBD=electronic brake force distribution
ESC=electronic stability control

Ohjaus:

EPS=electric power steering
PAS=power assisted steering

Smart	Alusta	
fortwo	Etu	Taka
tuenta	erillis	jäykkä
tyyppi	W,MS,ARB	dD
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		coilover
vaimennintyyppi	kaksiputki	kaksiputki
huom		
renkaat	155/60R15, 175/50R15	175/50R15, 225/35R17 XL
huom		
Akseliväli [mm]	1867	
Raideväli [mm]	1262	1360
Max akselimassa [kg]	440	660
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	rumpu
huom		
seisontajarru		rumpu
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	-	
huom	EPS lisävarusteena	
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[1]	220	
henkilölukumäärä	2	
kääntöympyrä [m]	8,8	
pituus/akseliväli-suhde	1,44	

Peugeot	Alusta	
107	Etu	Taka
tuenta	erillis	puolijäykkä
tyyppi	MS,ARB	TB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi	kaksiputki	kaksiputki
huom		
renkaat	155/65R14	155/65R14
huom		
Akseliväli [mm]	2340	
Raideväli [mm]	1415	1405
Max akselimassa [kg]	695	695
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	rumpu
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		rumpu
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[1]	130	
henkilölukumäärä	4	
kääntöympyrä [m]		
pituus/akseliväli-suhde	1,47	

Toyota	Alusta	
IQ	Etu	Taka
tuenta	erillis	puolijäykä
tyyppi	W,MS	TB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	175/65R15, 175/60R16	175/65R15, 175/60R16
huom		
Akseliväli [mm]	2000	
Raideväli [mm]	1480	1460
Max akselimassa [kg]	670	630
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	jäähdytetty
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	32	
henkilölukumäärä	4	
kaantoympyrä [m]	7,8	
pituus/akseliväli-suhde	1,49	

Mini	Alusta	
One	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	MS,ARB	ML,ARB
huom		central arm
jousityyppi	kierre	kierre
huom		coilover
vaimennintyyppi	kaksiputki	kaksiputki
huom		
renkaat	175/65R15	175/65R15
huom		
Akseliväli [mm]	2487	
Raideväli [mm]	1445	1453
Max akselimassa [kg]	815	730
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	160	
henkilölukumäärä	4	
kaantoympyrä [m]	10,7	
pituus/akseliväli-suhde	1,51	

VW	Alusta	
Polo	Etu	Taka
tuenta	erillis	puolijäykä
tyyppi	MS,ARB	TB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	175/70R14, 185/60R15	175/70R14, 185/60R15
huom		
Akseliväli [mm]	2456	
Raideväli [mm]	1438	1434
Max akselimassa [kg]	880	770
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS	
	Etu	Taka
rakenne	levy	rumpu
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		rumpu
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom	sähköhydraulinen	
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	280	
henkilölukumäärä	5	
kaantöympyrä [m]	10,6	
pituus/akseliväli-suhde	1,72	

Toyota	Alusta	
Yaris	Etu	Taka
tuenta	erillis	puolijäykä
tyyppi	MS,ARB	TB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	175/65R15	175/65R15
huom		
Akseliväli [mm]	2510	
Raideväli [mm]	1485	1470
Max akselimassa [kg]	825-895	825
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS, BAS, ASR, ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	rumpu
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		rumpu
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	286	
henkilölukumäärä	5	
kaantöympyrä [m]	9,4	
pituus/akseliväli-suhde	1,55	

VW	Alusta	
Golf	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	MS,ARB	ML,ARB
huom		TrBI-tyyppinen pituustukivarsi
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom	adaptiivalusta lisävaruste	adaptiivalusta lisävaruste
renkaat	185/70R15,205/50R17	185/70R15,205/50R17
huom		
Akseliväli [mm]	2575	
Raideväli [mm]	1527	1500
Max akselimassa [kg]	950-1150	880-970
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	350	
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	10,9	
pituus/akseliväli-suhde	1,63	

Toyota	Alusta	
Auris	Etu	Taka
tuenta	erillis	puolijäykkä
tyyppi	MS,ARB	TB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		coilover
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	195/65R15, 225/45R17	195/65R15, 225/45R17
huom		
Akseliväli [mm]	2600	
Raideväli [mm]	1525	1525
Max akselimassa [kg]	1020	1010
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	354	
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	10,4	
pituus/akseliväli-suhde	1,63	

BMW	Alusta	
1	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	ML,MS,ARB	ML,ARB
huom	imag. kääntöakseli	
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom	adaptiivialusta lisävaruste	adaptiivialusta lisävaruste
renkaat	205/55R16	205/55R16
huom	Run-flat	Run-flat
Akseliväli [mm]	2860	
Raideväli [mm]	1484	1497
Max akselimassa [kg]	855	1020
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	jäähdytetty
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS*	
huom	active steering lisävaruste	
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[1]	330	
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	10,7	
pituus/akseliväli-suhde	1,61	
*2012 versiossa EPS		

Ford	Alusta	
Mondeo	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	W,MS,ARB	ML,TrBI,ARB
huom		control blade-tuenta
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom	adaptiivialusta lisävaruste	adaptiivialusta lisävaruste *
renkaat	205/55R16, 215/50R17	205/55R16, 215/50R17
huom		
Akseliväli [mm]	2850	
Raideväli [mm]	1597	1595
Max akselimassa [kg]	1010-1190	1085-1150
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[1]	550	
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	11,8	
pituus/akseliväli-suhde	1,7	
*Farmanimalliin lisävarusteena Nivomat taakse		

Toyota	Alusta	
Avensis	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	MS,ARB	DW,ARB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	205/60R16, 215/55R17	205/60R16, 215/55R17
huom		
Akseliväli [mm]	2700	
Raideväli [mm]	1550	1540
Max akselimassa [kg]	1215	1135
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS, BAS, ASR, ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	509	
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]		
pituus/akseliväli-suhde	1,74	

BMW	Alusta	
3	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	ML,MS,ARB	ML,ARB
huom	imag. Kääntöakseli	
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom	adaptiivialusta lisävaruste	adaptiivialusta lisävaruste
renkaat	205/55R16,245/40ZR18	205/55R16,265/40ZR18
huom	Run-flat	Run-flat
Akseliväli [mm]	2780	
Raideväli [mm]	1494	1519
Max akselimassa [kg]	830-1085	1055-1135
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS, BAS, ASR, ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	jäähdytetty
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	460	
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	11,7	
pituus/akseliväli-suhde	1,64	

M-B	Alusta	
E	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	ML,ARB	ML,ARB
huom	3-link	
jousityyppi	kierre	kierre
huom	coilover	coilover
vaimennintyyppi		
huom	semiaktiivialusta lisävaruste*	semiaktiivialusta lisävaruste*
renkaat	205/60R16,255/35ZR19	205/60R16,285/30ZR19
huom	Run-flat	Run-flat
Akseliväli [mm]	2874	
Raideväli [mm]	1580	1587
Max akselimassa [kg]	1030-1270	1180-1285
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty,adaptiivinen Pre-safe	adaptiivinen Pre-safe
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom	aktiivi/säätävä ohjaus lisävaruste	
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[1]	530-540	
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	11,3	
pituus/akseliväli-suhde	1,7	
*Agility control		

Lexus	Alusta	
GS	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	DW,ARB	ML,ARB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom	adaptiivialusta*	adaptiivialusta*
renkaat	225/50R17,245/40RZ18	225/50R17,245/40RZ18
huom		
Akseliväli [mm]	2850	
Raideväli [mm]	1535	1540
Max akselimassa [kg]		
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty, ECB**	jäähdytetty, ECB**
seisontajarru		rumpu
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom	aktiiviohjaus, säätävä	
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[1]		
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	10,4	
pituus/akseliväli-suhde	1,7	
*AVS (Active variable suspension), VDIM (vehicle dynamics integrated manager)		
**Electronically controlled brakes (brake by wire)		

Citroën	Alusta	
C6	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	DW,ARB	ML,ARB
huom	McPherson-tyyp. Alatukivarsi	
jousityyppi	hydropneumaattinen	hydropneumaattinen
huom	aktiivialusta*	aktiivialusta*
vaimennintyyppi		
huom	aktiivialusta*	aktiivialusta*
renkaat	225/55R17,245/45R18	225/55R17,245/45R18
huom		
Akseliväli [mm]	2900	
Raideväli [mm]	1580	1553
Max akselimassa [kg]	1350	1050
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	jäähdytetty
seisontajarru		
huom		sähkömek.
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom	aktiiviohjaus, säätävä	
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	411-421	
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	12,43	
pituus/akseliväli-suhde	1,69	
*Hydractive 3+, tasonsäätö, 16 jäykkyyttä vaimennukselle, jousen säätö		

Audi	Alusta	
A8	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	ML,ARB	ML,TzLi,ARB
huom	imag. Kääntöakseli	
jousityyppi	ilma	ilma
huom	adaptiivialusta,tasonsäätö	adaptiivialusta,tasonsäätö
vaimennintyyppi	kaksiputki	kaksiputki
huom	CDC	CDC
renkaat	235/50R19	235/50R19
huom		
Akseliväli [mm]	2992	
Raideväli [mm]	1630	1621
Max akselimassa [kg]	1275-1405	1395-1420
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty (C/SiC*)	jäähdytetty (C/SiC*)
seisontajarru		
huom		sähkö
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom	aktiivinen, säätävä	
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]		
henkilölukumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	12,1	
pituus/akseliväli-suhde	1,72	
*S8-versiossa lisävaruste		

Lexus	Alusta	
LS	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	ML,ARB	ML,ARB
huom	imag. Kääntöakseli	
jousityyppi	kierre	kierre
huom	ilmajousitus lisävaruste	coilover, ilmaj. lisävaruste
vaimennintyyppi		
huom	aktiivi/adaptiivialusta*	aktiivi/adaptiivialusta*
renkaat	235/50R18,245/45R19	235/50R18,245/45R19
huom		
Akseliväli [mm]	2970	
Raideväli [mm]	1610	1610
Max akselimassa [kg]	1395	1465
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty, ECB**	jäähdytetty, ECB**
seisontajarru		
huom		sähkö
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom	aktiivinen, säätävä	
	muut tiedot	
tavaratilan koko (VDA)[l]	390	
henkilökumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	10,8	
pituus/akseliväli-suhde	1,69	
	*APSSS (aktiivivakaajasaato), VDIM (vehicle dynamics integrated manager)	
	**Electronically controlled brakes (brake by wire)	

BMW	Alusta	
7	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	ML,UW,ARB	ML,ARB
huom	imag. Kääntöakseli	Integral-V, alatrapsi
jousityyppi	kierre/ilma	kierre/ilma
huom		coilover
vaimennintyyppi	EDC	EDC
huom	aktiivialusta*	aktiivialusta*
renkaat	245/50R18,245/40R19	245/50R18,275/40R19
huom		
Akseliväli [mm]	3070	
Raideväli [mm]	1603	1621
Max akselimassa [kg]	1200-1365	1365-1440
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	jäähdytetty
seisontajarru		rumpu
huom		sähkö
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom	aktiivinen, säätävä, 4WS**	
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]	500	
henkilökumäärä	5	
kääntöympyrä [m]	12,5	
pituus/akseliväli-suhde	1,65	
	*Dynamic Drive	
	**lisävarusteena aktiivinen nelipyörahjaus	

Jaguar	Alusta	
XK	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	DW,ARB	ML,ARB
huom		IRS 3 rd generation
jousityyppi	kierre	kierre
huom		coilover
vaimennintyyppi	elektr.	elektr.
huom	aktiivialusta*	aktiivialusta*
renkaat	245/45ZR18	275/40ZR18
huom		
Akseliväli [mm]	2752	
Raideväli [mm]	1560	1596
Max akselimassa [kg]	1040	1090
Jarrut		
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS, BAS, ASR, ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom		
seisontajarru		
huom		
Ohjaus		
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
muut tiedot		
tavaratilan koko [l]	327	
henkilölukumäärä	4	
kääntöympyrä [m]	10,9	
pituus/akseliväli-suhde	1,74	
*CATS (computer active technology suspension)		

Chevrolet	Alusta	
Corvette	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	DW,ARB	ML,ARB
huom		
jousityyppi	lehti	lehti
huom	lasikuitu, poikittainen	lasikuitu, poikittainen
vaimennintyyppi	MSRC lisävaruste*	MSRC lisävaruste*
huom	aktiivialusta lisävaruste	aktiivialusta lisävaruste
renkaat	245/40ZR18,285/30R19	285/35ZR19,335/25R19
huom	Run-flat	Run-flat
Akseliväli [mm]	2685	
Raideväli [mm]	1577	1542
Max akselimassa [kg]		
Jarrut		
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS, BAS, ASR, ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty/rei'itetty	jäähdytetty/rei'itetty
seisontajarru		
huom		
Ohjaus		
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom	aktiivinen	
muut tiedot		
tavaratilan koko [l]		
henkilölukumäärä	2	
kääntöympyrä [m]	11,9	
pituus/akseliväli-suhde	1,66	
*Magnetic selective ride control		

Ferrari	Alusta	
Enzo	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	DW,ARB	DW,ARB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom	coilover, työntötankovälitys	coilover, työntötankovälitys
vaimennintyyppi		
huom	adaptiivialusta*	adaptiivialusta*
renkaat	245/35ZR19	345/35ZR19
huom	erikoisvalmistettu**	erikoisvalmistettu**
Akseliväli [mm]	2650	
Raideväli [mm]	1660	1650
Max akselimassa [kg]		
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty/rei'itetty***	jäähdytetty/rei'itetty***
seisontajarru		levy
huom		erillinen satula
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]	350	
henkilölukumäärä	2	
kääntöympyrä [m]	12,3****	
pituus/akseliväli-suhde	1,77	
*sähkösäätöinen, maavaran nostomahdollisuus		
**Bridgestone Potenza RE050A Scuderia		
***Brembo CCM (hiili/kerami), toimii normaalilämpötilassa		
****arvioitu (www.motortrend.com)		

Honda	Alusta	
CR-V	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	MS,LW,ARB	DW,ARB
huom		reactive link
jousityyppi	kierre	kierre
huom	*	coilover*
vaimennintyyppi		
huom	progressive valve gas absorber	progressive valve gas absorber
renkaat	225/65R17	225/65R17
huom		
Akseliväli [mm]	2630	
Raideväli [mm]	1570	1585
Max akselimassa [kg]	1020-1050	1040-1050
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	EPS	
huom	adaptiivinen**	
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]	556	
henkilölukumäärä	5	
kaantöympyrä [m]	11,8	
pituus/akseliväli-suhde	1,74	

*lisävarusteena progressiivinen jousitus

Nissan	Alusta	
Qashqai	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	MS,ARB	ML,ARB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	215/65R16	215/65R16
huom		
Akseliväli [mm]	2630	
Raideväli [mm]	1540	1545
Max akselimassa [kg]	1150	1000-1100
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]	410	
henkilölukumäärä	5	
kaantöympyrä [m]	10,6	
pituus/akseliväli-suhde	1,64	

Cadillac	Alusta	
Escalade	Etä	Taka
tuenta	erillis	jäykkä
tyyppi	DW,ARB	ML,ARB
huom	SLA	
jousityyppi	kierre	kierre
huom		ilmajousitasonsäätö
vaimennintyyppi		
huom	adaptiivialusta*	adaptiivialusta*
renkaat	P265/65R18, P285/45R22	P265/65R18, P285/45R22
huom	Tire Pressure Monitor	Tire Pressure Monitor
Akseliväli [mm]	2946	
Raideväli [mm]	1727	1702
Max akselimassa [kg]		
	Jarrut	
järjestelmä	hydr/alipaine	
Lisäjärjestelmät	ABS,BAS,ASR,ESC	
	Etä	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jähdytetty	jähdytetty
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]	479	
henkilölukumäärä	7-8	
kääntöympyrä [m]	11,9	
pituus/akseliväli-suhde	1,75	

*elektroninen tai magnetoreologinen vaimentimien säätö (varustepaketista riippuen)

Mercedes-Benz	Alusta	
Sprinter	Etä	Taka
tuenta	erillis	jäykkä
tyyppi	LW,ARB	La,ARB*
huom	eri variaatioita	
jousityyppi	lehti	lehti
huom	poikittainen, lasikuitu, eri jäykkyyksiä	eri jäykkyyksiä
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	205/75R16C, 235/65R16C	205/75R16C, 235/65R16C
huom		
Akseliväli [mm]	3250, 3665, 4325	
Raideväli [mm]	1710	1716
Max akselimassa [kg]	1650*	1800*
	Jarrut	
järjestelmä	ABS,BAS,ASR,ESC,EBD	
Lisäjärjestelmät		
	Etä	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä		
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]	7500-17000	
henkilölukumäärä	3-9	
kääntöympyrä [m]	12,3-15,6	
pituus/akseliväli-suhde	1,61-1,70	

*lisävarusteena kallistuksenvakaaja

**pienin malli, luultavasti vaihtelee eri versioissa

Toyota	Alusta	
Hiace	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	DW,ARB	
huom		viistot tukivarret
jousityyppi	vääntötanko	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	195/70R15C	195/70R15C
huom		
Akseliväli [mm]	2985 3430	
Raideväli [mm]	1560	1540
Max akselimassa [kg]		
	Jarrut	
järjestelmä		
Lisäjärjestelmät	ABS	
	Etu	Taka
rakenne	levy	rumpu
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		rumpu
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]	5500-6500	
henkilölukumäärä	3	
kaantöympyrä [m]	11,0-12,4	
pituus/akseliväli-suhde	1,53-1,60	

GMC	Alusta	
Savana	Etu	Taka
tuenta	erillis	jäykkä
tyyppi	LW,ARB	La
huom		hypoid drive axle*
jousityyppi	kierre**	lehti
huom	coilover	progressiivinen
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	P245/70R17	P245/70R17
huom		
Akseliväli [mm]	3425 3937	
Raideväli [mm]	1722	1722
Max akselimassa [kg]	1633-1950	1814-2760
	Jarrut	
järjestelmä		
Lisäjärjestelmät	ABS,ASR,ESC	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom		
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko***	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
tavaratilan koko [l]	6122-8889	
henkilölukumäärä	2-15	
kaantöympyrä [m]	13,2-16,6	
pituus/akseliväli-suhde	1,57-1,66	
*muissa, kuin 1500-mallissa		
**AWD-malleissa vääntötankojousitus edessä		
***2500 & 3500-malleissa kuulamutteriohjaus		

Land Rover	Alusta	
Defender	Etu	Taka
tuenta	jäykkä	Jäykkä
tyyppi	La,RA,PR,ARB	La,TrLi,ARB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom		
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	235/85R16	235/85R16
huom		
Akseliväli [mm]	2360, 2794, 3302	
Raideväli [mm]	1486	1486
Max akselimassa [kg]	1250	1500-1980
	Jarrut	
järjestelmä		
Lisäjärjestelmät	ABS*,ASR	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	kuulamutteri	
tehostustyyppi	EPS	
huom		
	muut tiedot	
henkilölukumaara	2-7	
kaantöympyrä [m]	12,8**	
pituus/akseliväli-suhde	1,58-1,66	
differentiaalitoiminta	0-100% keskilukko***	
*ABS:n saa lisävarusteena maastoajoon mukautettuna		
**110-versio		
***manuaalisesti lukittava		

Toyota	Alusta	
4Runner	Etu	Taka
tuenta	erillis	erillis
tyyppi	DW,ARB	La,TrLi,ARB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom	erikoisvakaaja*	erikoisvakaaja*
vaimennintyyppi		
huom		
renkaat	P265/70R16	P265/70R16
huom		
Akseliväli [mm]	2766	
Raideväli [mm]	1605	1605
Max akselimassa [kg]		
	Jarrut	
järjestelmä	ABS**_ASR	
Lisäjärjestelmät	ABS**_ASR	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	jäähdytetty
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	hammastanko	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
henkilölukumäärä	5-7	
kääntöympyrä [m]	11,4	
pituus/akseliväli-suhde	1,72	
differentiaalitoiminta	keskilukko***, takalukko****	
*vaihtoehtona kytkettävä off-road-vakaaja		
**ABS:n saa lisävarusteena maastoajoon mukautettuna		
***vaihtoehtona Torsen, lukittava		
****vaihtoehtona sähköisesti lukittava takadifferentiaali		

Mercedes-Benz	Alusta	
G	Etu	Taka
tuenta	jäykkä	jäykkä
tyyppi	La,RA,PR,ARB	La,TrLi,ARB
huom		
jousityyppi	kierre	kierre
huom	coilover	
vaimennintyyppi		
huom	painekaasuvaimennin	painekaasuvaimennin
renkaat	225/75R16, 265/70R16, 265/60R	225/75R16, 265/70R16, 265/60R
huom		
Akseliväli [mm]	2400, 2850	
Raideväli [mm]	1475	1475
Max akselimassa [kg]		
	Jarrut	
järjestelmä		
Lisäjärjestelmät	ABS*,BAS,ASR,ESC,EBD	
	Etu	Taka
rakenne	levy	levy
huom	jäähdytetty	
seisontajarru		
huom		
	Ohjaus	
järjestelmä	kuulamutteri	
tehostustyyppi	PAS	
huom		
	muut tiedot	
henkilölukumäärä	5	
kaantömpyrä [m]	11,3-13,6	
pituus/akseliväli-suhde	1,64-1,75	
differentiaalitoiminta	0-100% keskilukko, etu/takalukot**	
*lukot kytkevät ABS:n pois päältä		
**sähköisesti ohjatut manuaalisesti lukittavat lukot edessä, keskellä ja takana.		