

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2025

Mikael Ronkainen

# Auton jousitus

– passiiviset, adaptiiviset ja aktiiviset järjestelmät



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

Heinäkuu 2025 | 62 sivua

Mikael Ronkainen

## Auton jousitus

- passiiviset, adaptiiviset ja aktiiviset järjestelmät

Opinnäytetyön tavoitteena on esitellä aktiivisten jousitusten etuja sekä ongelmia, mutta myös kilpailevia rakenteita. Keskeisenä komponenttina on heilahtelunvaimennin, jota täydentämällä tai korvaamalla aktiivinen toiminta on useimmiten toteutettu. Aktiivijousitus ei ainoastaan mahdollista tienpinnan aiheuttamien iskujen täydellistä kumoamista, vaan myös voimien tuottamisen korin ja pyörän väliin.

Opinnäytetyö toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, perehtyen saatavilla oleviin kirjallisiin lähteisiin. Työ koostuu kolmesta osiosta. Näitä ovat heilahtelunvaimentimien historia pääkohdiltaan, keskeinen teoria sekä erilaisten rakenteiden esittely.

Opinnäytetyön tuloksena voidaan todeta, että aktiiviset jousitukset ovat kalliita ja monimutkaisia rakenteita, mistä johtuen niitä näkee lähinnä kalliimman luokan autoissa. Adaptiivisella toteutuksella saavutetaan lähes yhtä hyvä suorituskyky, vain murto-osalla energiankulutuksesta. Tästä huolimatta passiivinen heilahtelunvaimennin on edelleen yksinkertaisin ja halvin rakenne, jolloin sitä näkee nyt ja ainakin lähitulevaisuudessa yleisimmin etenkin halvemman hintaluokan henkilöautoissa.

Asiasanat:

ajoneuvotekniikka, ajoneuvot, järjestelmät, jousitus, resonassi

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Automotive and Transportation Engineering

July 2025 | 62 pages

Mikael Ronkainen

## Car Suspension

- Passive, Adaptive and Active Systems

The goal of this thesis is to present advantages and disadvantages of active suspension systems, but also of competing systems. The key component is shock absorber, which is often replaced or accommodated with other components to achieve active behavior. Active suspension not only allows to cancel forces arising from road surfaces, but also to create any kind of force between the vehicle body and wheel.

This thesis was carried out as a literature study, by familiarizing on available literature. The thesis is made up of three bigger parts. These are vehicle damper history, key theories and showcase of different structures.

As a result of this thesis, it can be said that active suspension systems are not only expensive, but also complicated, which is why they are mostly used in luxury-vehicles. Adaptive suspension offer similar performance, with a fraction of the cost. Nevertheless, passive systems continue to be the simplest and cheapest, which keeps them popular and an attractive option, especially on cheaper vehicles, now and in the near future.

Keywords:

automotive engineering, vehicles, systems, suspension (vehicles), resonance

# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Alusta ja jousitus</b>	<b>8</b>
2.1 Passiivinen, adaptiivinen ja aktiivinen heilahtelunvaimennin	11
<b>3 Heilahtelunvaimentimen historia</b>	<b>12</b>
3.1 Saksivaimentimet	13
3.2 Siipivaimentimet	13
3.3 Gabriel Snubber	15
3.4 Teleskooppivaimentimet	16
3.5 Reologian hyödyntäminen	18
<b>4 Vaimentimen suunnittelu</b>	<b>20</b>
4.1 Taajuuksien merkitys	20
4.2 Jousituksen mallintaminen	21
4.2.1 Yksi-massa-systeemi	21
4.2.2 Kaksi-massa-systeemi	23
4.2.3 Kolme-massa-systeemi	24
4.3 Kitkalajit heilahtelunvaimentimissa	25
4.4 Korin hallintastrategiat	28
4.4.1 Skyhook-strategia	28
4.4.2 Groundhook-strategia	29
4.4.3 Kynnysarvo-strategia	30
<b>5 Passiiviset teleskooppivaimentimet</b>	<b>31</b>
5.1 Kaksiputkivaimennin	32
5.2 Yksiputkivaimennin	33
5.3 Läpi-varsi-vaimennin	34
5.4 Teleskooppivaimentimen säätö	34
5.5 Vaimentimen mitoitus	36
<b>6 Adaptiiviset heilahtelunvaimentimet</b>	<b>38</b>

6.1 Adaptive Damping System	38
6.2 Continuous Damping Control	39
6.3 Magnetoreologinen vaimennin	41
<b>7 Aktiivisia jousituksia</b>	<b>43</b>
7.1 Daimler Active Body Control	43
7.2 Citroën Hydractive	46
7.3 Bose ja lineaarinen sähkömoottori	49
7.4 Aktiivijousitusten ongelmat	52
<b>8 Muita aktiivijousitusrakenteita</b>	<b>54</b>
8.1 Moduulimainen pyörä	54
8.2 Aktiivinen kallistuksenvakaaja	55
8.3 Aktiiviset tukivarret - ASCA	57
<b>9 Lopuksi</b>	<b>59</b>
<b>Lähteet</b>	<b>61</b>

## **Kaavat**

Kaava 1. Jousitetun massan ominaisheilahtelutaajuus.	22
Kaava 2. Pyörän heilahtelutaajuus.	24
Kaava 3. Renkaan vaimennussuhde.	24
Kaava 4. Coulombin lepokitka.	26
Kaava 5. Vaimennusvoima.	36
Kaava 6. Vaimennussuhde.	36

## **Kuvat**

Kuva 1. Audi S6 Alustarakenteita heijastettuna korin läpi (Audi AG 2025).	8
Kuva 2. Audi SQ5 Etuakselisto (Audi AG 2025).	10
Kuva 3. Semi-elliptinen lehtijousi (Gill J. 2006).	12

Kuva 4. Andre-Hartford-saksivaimennin (Dixon 2007, 5).	13
Kuva 5. Houdaillen siipivaimennin (Dixon 2007, 9).	14
Kuva 6. Hydraulivaimennin, jossa vierekkäiset männät (Dixon 2007, 13).	15
Kuva 7. Gabriel Snubber -heilahtelunvaimennin (Dixon 2007, 7).	16
Kuva 8. Kaksiputkinen teleskooppivaimennin (Dixon 2007, 16).	17
Kuva 9. Magnetoreologisen vaimentimen perusrakenne (Dixon 2007, 324).	19
Kuva 10. Taajuudet, joita istuva ihminen sietää (Dixon 2007, 115).	21
Kuva 11. Yksi-massa-systeemi.	22
Kuva 12. Kaksi-massa-systeemi.	23
Kuva 13. Kolme-massa-systeemi.	25
Kuva 14. Heilahtelunvaimennus Coulombin kitkalla (Dixon 2007, 75).	27
Kuva 15. Skyhook-strategia teoreettisesti esitettynä.	29
Kuva 16. Groundhook-strategia teoreettisesti esitettynä.	29
Kuva 17. Tyypillisen teleskooppivaimentimen rakenne (Dixon 2007, 41).	31
Kuva 18. Eri teleskooppivaimenninrakenteita (Dixon 2007, 34).	32
Kuva 19. ZF Sachs CDC-vaimennin (ZF Friedrichshafen AG 2024).	40
Kuva 20. Audi Magnetic Ride -heilahtelunvaimennin (Audi AG 2011).	41
Kuva 21. Mercedes-Benz 215-mallisarjan Coupé (Mercedes-Benz AG 2019).	43
Kuva 22. Demonstraatio ABC-jousituksesta (Mercedes-Benz AG 2024).	44
Kuva 23. ABC-aktiivijousitus. (Mercedes-Benz AG 2006).	45
Kuva 24. Citroen C5 hydropneumaattinen joustus (BXClub 2006).	48
Kuva 25. Bose:n lineaarimoottori asennettuna autoon (Howard 2017).	50
Kuva 26. Vakiomalli ja Bose:n muokkaama Lexus (Howard 2017).	50
Kuva 27. Bosen muokkaama Lexus hyppää ratapölkyn yli (Csere 2004).	51
Kuva 28. Michelin-aktiivijousitus pyörässä (Yu ym. 2023, 166).	54
Kuva 29. Audi A8 Predictive Active Suspension (Audi AG 2017).	56

## Taulukot

Taulukko 1. Taulukko heilahtelunvaimentimien jaottelusta (Dixon 2007, 289).	11
Taulukko 2. ADS-venttiilin ohjaus-asetukset (Heißing & Ersoy 2011, 529).	38

# 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä käsitellään henkilöautoissa käytettyjä aktiivisia, adaptiivisia ja passiivisia jousitusrakenteita. Aktiivisia jousitusjärjestelmiä on kehitetty 1980-luvulta lähtien. Täysin aktiivisten järjestelmien käyttö on silti suhteellisen harvinaista, vaikka niiden suorituskyky on ensiluokkaista ja erilaisia rakenteita on ollut olemassa yli 40 vuotta. Ajoneuvo saadaan parhaimmillaan tuntumaan siltä, kuin se leijuisi tienpinnan yllä. Jousituksen aktiivisuudella voidaan siis merkittävästi parantaa ajomukavuutta.

Kaiutinvalmistaja Bose:n aktiivijousitus on hyvä esimerkki siitä, mitä aktiivisella jousituksella voidaan saavuttaa. Heilahtelunvaimentimien tilalle asennetut lineaarimoottorit tuottavat niin suuria voimia, että ajoneuvo saadaan hyppimään vaikka ratapölkkyjen yli. Tämä on toiminut myös innostuksena opinnäytetyön tekemiseen.

Opinnäytetyön tavoitteena on esitellä aktiivisten jousitusjärjestelmien etuja sekä niiden ongelmia. Ohessa käydään läpi heilahtelunvaimentimien historiaa, joka antaa näkökulmaa siihen, miten vaimentimet ovat muuttuneet autoilun alkuajoilta nykypäivään. Aktiivisia järjestelmiä verrataan adaptiivisiin, mutta myös hyvin yleisiin passiivisiin heilahtelunvaimentimiin. Viimeiseksi esitellään muutama hieman poikkeuksellisempi aktiivijousituksen rakenne. Näissä aktiivijousitusta ei ole toteutettu heilahtelunvaimentimen muokkauksella, joka on ollut varsin yleinen lähestymistapa.

## 2 Alusta ja jousitus

Ajoneuvon rakenne voidaan yleisesti jakaa koriin, alustaan ja pyöriin. Alustarakenteet voidaan jakaa kokonaisuuksiksi toiminnallisien tai moduulimaisien perustein. Osat voivat kuulua moneen kokonaisuuteen, esimerkiksi lehtijousi voi jousen lisäksi toimia vaimentimena tai osana pyöräntuenta. (Heißing & Ersoy 2011, 1, 149.)

Ajoneuvon alusta vastaa ajoneuvon käyttäytymisestä, ajomukavuudesta ja ajoturvallisuudesta. Siksi alusta onkin moottorin ja voimansiirron ohella yksi tärkeimpiä ajoneuvon osakokonaisuuksia. Alustan on kuitenkin varsin näkymätön ajoneuvon osa, lukuun ottamatta ohjauspyörää ja pyöriä, alusta ei näy kuljettajalle lainkaan. Vain vaativissa ajotilanteissa kuljettaja voi huomata alustan roolin. (Heißing & Ersoy 2011, 8.)

Kuvassa 1 on Audi S6-henkilöauton alustarakenteita heijastettuna korin läpi.



Kuva 1. Audi S6 Alustarakenteita heijastettuna korin läpi (Audi AG 2025).

Alusta määrittelee pitkälti ajoneuvon hinnan, painon, aerodynaamiset ominaisuudet ja tilankäytön. Painon hallinta on alustan suunnittelussa tärkeämpää kuin missään muussa ajoneuvon suunnittelun osa-alueessa. Tämä johtuu jousittamattomasta massasta, joka kuuluu alustan suunnitteluun.

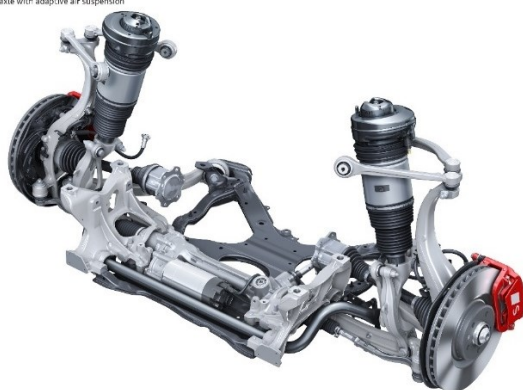
Jousittamattomaan massaan lasketaan vanteet, renkaat, pyörien laakerit, jarrut sekä osa jousesta, heilahtelunvaimentimesta ja tukivarsista. Jousittamattoman massan vähentäminen parantaa oleellisesti auton ajo-ominaisuuksia. Pienempi jousittamaton massa vähentää pyörän heilahtelun vaikutusta ajoneuvon koriin ja dynaamisiin rengaskuorman muutoksiin. Tämä edistää renkaan pysymistä tienpinnalla, parantaen ajoturvallisuutta ja -mukavuutta. (Heißing & Ersoy 2011, 8.)

Ajoneuvon kori on yhteydessä pyöriin jousituksen avulla. Jousituksen tarkoitus on mahdollistaa pyörien pystysuuntainen liike joustoliikkeen aikana sekä välittää pyörän ja tienpinnan välisellä kosketusalalla esiintyvät voimat ajoneuvon koriin. Kaikki ajoneuvon vaikuttavat voimat ja niiden momentit, pois lukien ilmanvastus, välittyvät renkaiden ja tienpinnan välisestä kosketusalasta. Tämä mahdollistaa ajoneuvon liikuttamisen, pysäyttämisen ja pysymisen halutulla radalla. Siksi onkin erityisen tärkeää, että yhteyttä tienpinnan ja renkaiden välillä ei menetettäisi missään tilanteessa. (Robert Bosch GmbH 2022, 1108, 1124, 1146).

Ajoneuvon jousitus koostuu tukivarsista, jousista ja vaimentimista. Tukivarsien tarkoitus on rajoittaa pyörien liikettä. Etuakselilla kahteen vapausasteeseen (ylös, alas ja kääntö) ja taka-akselilla yhteen (ylös ja alas) (Bosch 2022, 1114; Jacobson 2022, 145.)

Kuvassa 2 on Audi SQ5:n etuakselisto, josta nähdään miten monimutkainen rakenne moderni jousitus on.

**Audi SQ5**  
Fünflenker-Vorderachse mit adaptive air suspension  
Five link front axle with adaptive air suspension  
09/24



Kuva 2. Audi SQ5 Etuakselisto (Audi AG 2025).

Jousituksen työtä vaikeuttaa se, että tiet eivät aina ole suoria, kuivia ja tasaisia. Myös nopeuden kasvu asettaa kovempia vaatimuksia jousitukselle, sillä liike-energia, jota pyritään hallitsemaan, kasvaa eksponentiaalisesti ajoneuvon nopeuden kasvaessa. (Heißing & Ersoy 2011, 8.)

Jouset mahdollistavat hetkellisen pyörien korkeusmuutoksen suhteessa ajoneuvon koriin. Tavallisesti jokaisella pyörällä on oma jousi mutta myös jokaisella akselilla. Akselikohtaista joustaa kutsutaan kallistuksenvakaajaksi, sen tarkoitus on yhdistää saman akselin pyörät toisiinsa, vähentääkseen korin keinahtelua. Jousirakenteita on monia erilaisia kuten kierre-, lehti-, vääntösauva- ja ilmajousi. (Heißing & Ersoy 2011, 67.)

Jousen toimiessa erinomaisesti iskujen pehmentämiseen, on niillä taipumus jäädä heilahtelemaan edestakaisin. Tämä ei ole haluttu ominaisuus ajomukavuuden kannalta. Siksi onkin kehitetty heilahtelunvaimentimet, jotka nimensä mukaisesti vaimentavat jousen heilahtelua.

Heilahtelunvaimenninrakenteita on monia, mutta nykyään yleisin tieliikenteessä käytetty vaimennin on hydraulitoiminen teleskooppivaimennin. Myös ohjauspyörän yhteydessä käytetään vaimentimia, mutta ne ovat usein pienempiä ja asennettu vaakatasoon. (Dixon 2007, 3, 21.)

Heilahtelunvaimenninta kutsutaan arkikielessä iskunvaimentimeksi, joka on harhaanjohtava termi. Heilahtelunvaimennin ei vaimenna iskuja, vaan itse asiassa voimistaa niitä, ohjattaessaan renkaan kokemia voimia jousen ohi suoraan ajoneuvon koriin. Iskuja ”vaimennetaan” renkaiden ja jousien toimesta, ja heilahtelunvaimentimen tehtävä on muuttaa renkaan ja korin pystysuuntainen liike-energia lämmöksi. (Dixon 2007, 2.)

## 2.1 Passiivinen, adaptiivinen ja aktiivinen heilahtelunvaimennin

Heilahtelunvaimentimien toiminta voidaan jakaa passiiviseen, aktiiviseen ja adaptiiviseen tyyppiin. Adaptiivinen ja aktiivinen voidaan edelleen jakaa hitaisiin ja nopeisiin reaktionopeutensa perusteella. Joskus nopeaa adaptiivista jousitusta kutsutaan ’semi-aktiiviseksi’, mutta termi on harhaanjohtava. Aktiivisen ja adaptiivisen erona voidaan pitää tehon tarvetta. Aktiivinen jousitus vaatii paljon tehoa, useimmiten pumpulta, kun taas adaptiivinen jousitus tarvitsee tehoa vain venttiilien säätämiseen. (Dixon 2007, 289.)

Taulukko 1. Taulukko heilahtelunvaimentimien jaottelusta (Dixon 2007, 289).

<b>Vaimennintyyppi</b>	<b>Nopeus ja säätöperuste</b>
Passiivinen	Hidas (manuaalisäätö)
Adaptiivinen	hidas (maasto ja ajonopeus)
	nopea (kuopat)
Aktiivinen	hyvin hidas (ajokorkeus)
	hidas (maasto ja ajonopeus)
	nopea (kuopat)

### 3 Heilahtelunvaimentimen historia

1800-luvun puolivälissä teiden kunto oli yleisesti huono. Silloin kulkuvälineenä käytetyissä hevoscärryissä oli pehmeä jousitus. Rakenteena käytettiin lähes poikkeuksetta lehtijousitusta, joka yksinkertaisena rakenteena oli helppo valmistaa, ja toimi kiitettävän hyvin hitaissa hevoscärryissä. Lehtijouset olivat rakenteeltaan semi-elliptiset (Kuva 3) tai päällekkäin, vastakkain asennettuna täysin elliptiset. Erillistä heilahtelunvaimenninta ei ollut, vaan vaimennus tapahtui jousituksen lehtien välisen kitkan avulla. (Dixon 2007, 1.)

Lehtijouset toimivat myös akselien tukena pitkittäissuunnassa, jolloin ylimääräisiä vahvikkeita ei akselien välillä juuri tarvittu. (Heißing & Ersoy 2011, 3.)



Kuva 3. Semi-elliptinen lehtijousi (Gill J. 2006).

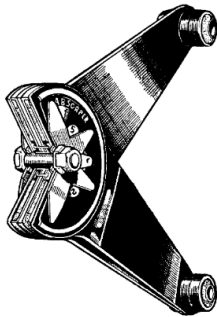
1800-luvun loppupuolella alkoi "hevosettomien kärryjen" eli autojen kehityskulku. Autoilun alkuaikojen uranuurtajat ottivat paljon mallia aikansa hevoscärryistä, minkä seurauksena ne olivat varsin eri näköisiä kuin nykyään. (Heißing & Ersoy 2011, 3.)

Saatavilla oleva teho kasvoi nopeasti polttomoottorien kehittyessä, mikä johti ajonopeuksien kasvuun ja kovempiin vaatimuksiin jousituksen osalta (Dixon 2007, 1).

### 3.1 Saksivaimentimet

Truffault kehitti saksimallisen kitkalevy-heilahtelunvaimentimen ennen 1900-lukua. Se koostui useasta kerroksesta pronssilevyjä ja öljyttyä nahkaa. Näitä painoi yhteen kartiomalliset jouset. Kaksi tankoa yhdisti rungon ajoneuvon pyöriin ja koriin. Vaimennuksen voimakkuus oli helposti säädettävissä ruuvaamalla mutteria, joka painoi kitkaelementtejä kovemmin tai kevyemmin yhteen. (Dixon 2007, 3.)

1900 ja 1903 välisenä aikana Truffault kehitti version joka voitiin asentaa autoon. Samankaltainen vaimennin on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Andre-Hartford-saksivaimennin (Dixon 2007, 5).

Hartford aloitti saksivaimentimien massatuotannon 1904 Yhdysvalloissa nimellä Truffault-Hartford Suspension. Truffault tiesi vaimentimensa potentiaalin, joten hän myi tuotantolisenssejä myös Eurooppaan Mors:lle ja Peugeot:lle, jotka valmistivat ja käyttivät vaimentimia jo 1904. (Dixon 2007, 3 - 4.)

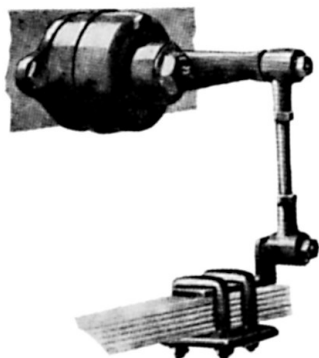
### 3.2 Siipivaimentimet

Hydraulitoimisten vaimentimien ensimmäinen merkittävä kaupallinen onnistuminen saavutettiin siipi -tyyppisellä vaimentimella, jota kehitti Maurice Houdaille vuodesta 1906 eteenpäin. Ensimmäinen malli muistutti paljon Saksivaimenninta, runko "kellui" vapaasti ilmassa ja kaksi vipuvartta välittivät voimat vaimentimeen. Myöhemmässä, vuoden 1909 mallissa, vaimennin

asennettiin suoraan ajoneuvon runkoon. Yhteys pyöriin luotiin kahdella tukivarrella. Tämä oli ensimmäinen massatuotettu hydraulitoiminen vaimennin. (Dixon 2007, 9.)

Houdaillen vaimentimet olivat hyvin suosittuja vuodesta 1915 eteenpäin, aina ensimmäisten kaksiputkivaimentimien kehittämiseen asti (Heißing & Ersoy 2011, 5). 1921 eteenpäin hydraulitoimiset vaimentimet toimivat ulosjouston lisäksi myös sisäänjoustossa, kehittyneempien venttiilien johdosta (Dixon 2007, 9).

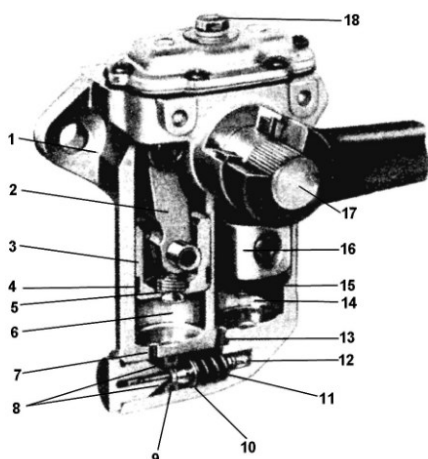
Runkoon asennettuna Houdaillen vaimennin viilenee paremmin (Kuva 5), mikä on selvä etu nykypäivän teleskooppivaimentimiin verrattuna.



Kuva 5. Houdaillen siipivaimennin (Dixon 2007, 9).

Houdaillen vaimentimessa joustoliike ei aiheuta tilan muutosta vaimentimen sisällä, niin kuin nykyään käytetyissä teleskooppivaimentimissa. Öljyn lämpötilasta aiheutuva tilan muutos tulee kuitenkin huomioida. Lisäksi pitkä tiiviste altistaa vuodoille ja kulumille, jolloin tarvitaan korkean viskositeetin omaava öljy, joka taas on herkkä lämpötilanvaihteluille. (Dixon 2007, 25.)

Siipivaimentimien ongelmat johtivat Lovejoy:n vaimentimen kaltaiseen rakenteeseen, jossa käytettiin siiven sijaan vierekkäisiä mäntiä (kuva 6).

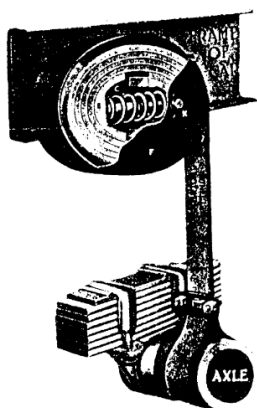


Kuva 6. Hydraulivaimennin, jossa vierekkäiset männät (Dixon 2007, 13).

Lovejoy -vaimentimien tuotanto alkoi vuonna 1919 ja ne olivatkin ensimmäisiä hydraulitoimisten vaimentimien menestyksiä Yhdysvalloissa. Mielenkiintoisesti, Lovejoy'n vaimennin olisi toimiva ratkaisu vielä nykyäänkin ja helposti muunnettavissa tukivarren korvaajaksi, vaimentimen vipuvartta ja laakerointia vahvistamalla. (Dixon 2007, 12 - 14.)

### 3.3 Gabriel Snubber

1915 Claud Foster kehitti 'snubber' mallisen vaimentimen (Kuva 7), jota hänen yrityksensä Gabriel valmisti suurissa määrin. Markkinanimeltään Gabriel Snubber saavutti suuren suosion yhdysvaltojen automarkkinoilla. Menestys pohjautui todennäköisesti pieniin tuotantokustannuksiin, helppoon asennukseen ja kestävyuteen. Vaimentimet olivat laajassa suosiossa etenkin Yhdysvalloissa vielä 1930-luvulle asti. (Dixon 2007, 5, 12.)

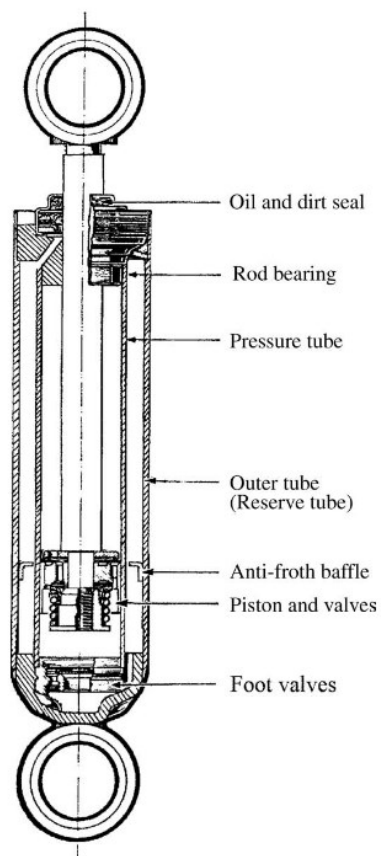


Kuva 7. Gabriel Snubber -heilahtelunvaimennin (Dixon 2007, 7).

Gabriel Snubber koostui jousikuormitteisesta palikasta, sekä sen ympärille kiedotusta nahkavyöstä, joka kiinnitettiin pyöräntuentaan. Pyörän ylösjoustossa vaimennin ei vaikuttanut millään tapaa, mutta jousikuormitus esti vyön löystymisen. Ulosjoustossa vyö hidastaa jousituksen liikettä, nahkakerän sisäisen kitkan avulla. (Dixon 2007, 6 - 7.)

### 3.4 Teleskooppivaimentimet

Teleskooppivaimentimen historia yltää aina vuoteen 1901 asti, jolloin Horock patentoi teleskooppisen hydrauliyksikön. Renault teki kehityksiä patenttiin vuonna 1905, jolloin muotoutui nykyaikaisen teleskooppivaimentimen rakenne. Jo seuraavana vuonna Renault käytti vaimentimia kilpa-autoissaan, mutta ei vielä tuotanto-autoissa. (Dixon 2007, 7.)



Kuva 8. Kaksiputkinen teleskooppivaimennin (Dixon 2007, 16).

Yhdysvaltalainen yritys Monroe aloitti teleskooppivaimentimien suuren mittakaavan valmistuksen vuonna 1934. Nämä ensimmäiset teleskooppivaimentimet olivat rakenteeltaan kaksiputkisia (Kuva 8). (Heißing & Ersoy 2011, 5.)

Koning kehitti näistä säädettävän version vuonna 1947 (Dixon 2007, 8). Kaksiputkivaimentimet saapuivat Eurooppaan vasta 1950-luvulla. Niiden ongelmia oli vaaditut asennuskulmat, ja vaara veden sekoittumisesta öljyn sekaan. Ongelmat saivat ratkaisun, kun Christian Bourcier de Carbon kehitti yksiputkivaimentimen vuonna 1950. De Carbonin vaimentimessa käytettiin kaasun painetta männänvarren ottaman tilan kompensointiin. (Heißing & Ersoy 2011, 5.)

1950-luvulla teleskooppivaimentimet valtasivat henkilöautomarkkinat ja 1960-luvulle tultaessa ne olivat pääasiallinen vaimennin (Dixon 2007, 9).

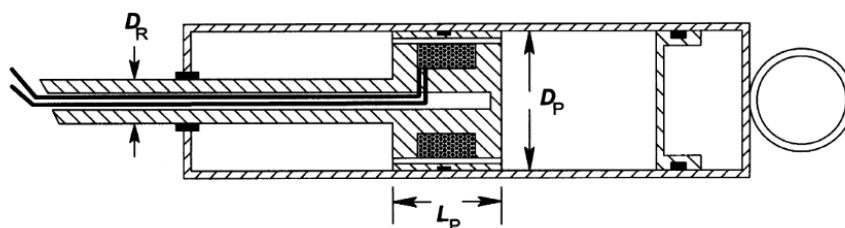
1980-luvulla heräsi kiinnostus aktiivisesta vaimentimesta, jolla voitaisiin korvata tavallinen vaimennin. Pian kuitenkin huomattiin, että adaptiivisella vaimentimella saavutettaisiin melkein yhtä hyvä suorituskyky kuin aktiivisella, mutta paljon halvemmalla. (Dixon 2007, 2.)

Vuosikymmenen alussa ensimmäiset adaptiiviset vaimentimet kehitettiin Japanissa Kayaba:n ja Tokico:n toimesta. Euroopassa vastaavia kehittämässä oli Boge. (Heißing & Ersoy 2011, 5.) 1980-luvulla myös kaiutinvalmistaja Bose aloitti aktiivijousituksen kehittämisen, josta tarkemmin myöhemmässä kappaleessa (Howard 2017).

### 3.5 Reologian hyödyntäminen

Uusimpia kehityksiä heilahtelunvaimentimissa on magnetoreologinen vaimennin, jonka toi markkinoille Delphi 2000-luvun alussa (Heißing & Ersoy 2011, 285). Vaimentimen toiminta perustuu *reologiaan*, joka on oma tieteenalansa. Tieteen termipankki (2025) määrittelee reologian olevan oppi jännityksen alaisten materiaalien jatkuvan deformaation ja virtauksen mekaniikasta. Reologian merkittäviä tutkijoita olivat W. M. Winslow ja Jacob Rabinow. Winslow tutki elektorreologian mahdollisia käyttökohteita. Vuoden 1947 patentissaan hän esitti, että nestettä voitaisiin käyttää voimansiirrossa. (Dixon 2007, 303.)

Kuvassa 9 on magnetoreologisen vaimentimen perusrakenteen poikkileikkaus.



Kuva 9. Magnetoreologisen vaimentimen perusrakenne (Dixon 2007, 324).

Rabinow suunnitteli magnetorheologian käyttöä kytkimessä tai jarruissa, jossa ei teoriassa olisi yhtään kulumia osia. Hän patentoi keksintönsä 1951.

Elektroreologiaa tutkittiin ensisijaisesti 1990-luvulle asti, jolloin huomattiin magnetoreologian olevan käytännöllisempi. Tämä johtui pienemmästä tehontarpeesta, suuremmista mahdollisista leikkausjännityksistä, laajemmasta toimintalämpötila-alueesta ja nesteen kestäessä paremmin epäpuhtauksia. (Dixon 2007, 303 - 305).

## 4 Vaimentimen suunnittelu

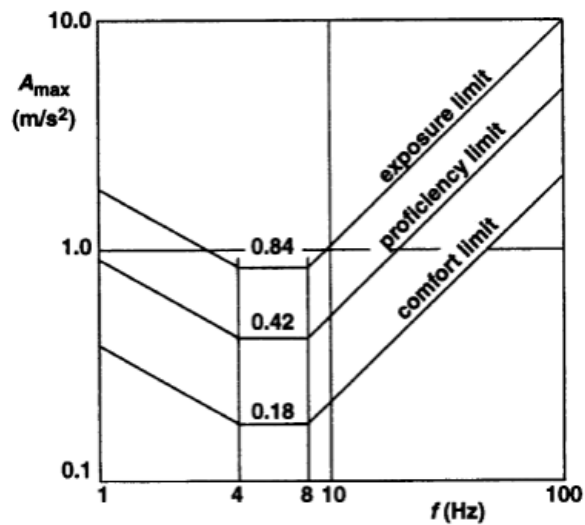
Heilahtelunvaimentimen merkityksen täysi ymmärtäminen vaatisi perusteellisen osaamisen ajoneuvon hallinnasta ja ajokäyttäytymisestä. Kuitenkin muutaman yksinkertaisen teorian sisäistäminen riittää perusteiden ymmärtämiseen.

Teorioista voidaan nähdä, miksi vaimennusta oikeastaan tarvitaan ja toisaalta mitä vaikeuksia vaimentimen suunnittelussa on. (Dixon 2007, 61.)

### 4.1 Taajuuksien merkitys

Tienpinta aiheuttaa epätasaisuudellaan varsin laajan alan herätetaajuuksia ajoneuvon. Voimakkaimmillaan ne ovat taajuuksilla 0 - 30 Hz (Heißing & Ersoy 2011, 70). Mikäli nämä herätteet ilmenevät samalla taajuudella kuin ajoneuvon korin luontainen heilahtelutaajuus, tapahtuu resonanssia. Resonanssi on fysiikan ilmiö, joka ilmenee, kun kappaleeseen kohdistuu voimia sellaisella taajuudella, joka on lähellä sen luontaista heilahtelutaajuutta, aiheuttaen värähtelyn amplitudin kasvua. (Bosch 2022, 61.)

Ihmisten kokemus värähtelystä on henkilökohtaista, kuitenkin jokaisella ihmisellä herkin alue on suunnilleen 4 - 8 Hz pystysuuntaiselle heilahtelulle. Tämä johtuu siitä, että useiden sisäelinten luontainen heilahtelutaajuus osuu tälle alueelle. Luontaisia taajuuksia ovat vatsalla 4 - 5 Hz, sydämellä noin 7 Hz ja olkapäillä 3 - 5 Hz. Ajomukavuuden parantamiseksi nämä 4 - 8 Hz taajuiset heilahtelut on pidettävä mahdollisimman vähäisinä. (Heißing & Ersoy 2011, 85 - 86.) Yksi tapa on pitää korin heilahtelutaajuus kaukana näistä arvoista, jolloin ajoneuvon kori ei resonoi matkustajien kanssa. Heilahtelut eivät ole ainoastaan ajomukavuuden asia, vaan ne vaikuttavat myös matkustajien jaksamiseen ja pahimmillaan aiheuttavat terveydellisiä haittoja kuten selkänikamien vaurioita (Bauer 2011, 3).



Kuva 10. Taajuudet, joita istuva ihminen sietää (Dixon 2007, 115).

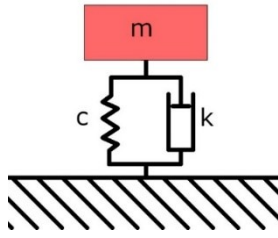
Kuvassa 10 on esitettyä istuvan ihmisen sietokyky keskimäärin eri taajuisille pystysuuntaisille heilahteluille, kahdeksan tunnin altistuksella. Kuvasta voidaan nähdä, että 4-8 Hz taajuiset heilahtelut ovat selvästi epämukavampia kuin muun taajuiset heilahtelut 1-100 Hz välillä. Ajoneuvon korin luontainen heilahtelutaajuus on sunnilleen 1 Hz isoille henkilöautoille ja 1,5 Hz pienemmille. Kilpa-autoissa suositaan hieman suurempaa 2 - 2,5 Hz heilahtelutaajuutta. (Dixon 2007, 124.)

## 4.2 Jousituksen mallintaminen

Ajoneuvo muodostaa varsin monimutkaisen heilahtelevan systeemin. Ajoneuvoa voidaan kuitenkin mallintaa yksinkertaisesti kolmella eri massasysteemillä.

### 4.2.1 Yksi-massa-systeemi

Yksinkertaisin malli on yksi-massa-systeemi, joka on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Yksi-massa-systeemi.

Laskennassa käytetty massa vastaa sitä osaa ajoneuvon massasta, jonka pyörä kantaa. Jousena ja vaimentimena toimii rengaskumi, mikä on usein tilanne työmaa-ajoneuvoissa. Renkaan rajalliset vaimennusominaisuudet johtavat suureen voiman amplitudiin resonanssitaajuudella. Systeemin luontainen heilahtelutaajuus riippuu jousen jäykkyydestä sekä ajoneuvon massasta, mikä voidaan nähdä seuraavasta kaavasta. (Heißing & Ersoy 2011, 74 - 75.)

$$\omega_e = \sqrt{\frac{c}{m}}$$

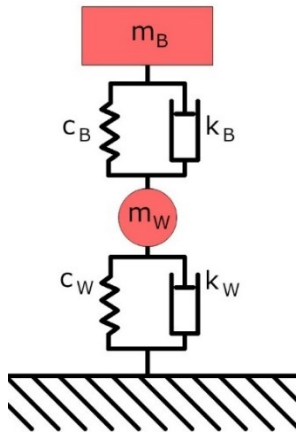
, jossa  $\omega_N$  on ominaisheilahtelutaajuus (Hz)  
 $c$  on jousen jousivakio (N/m)  
 $m$  on heilahtelevan kappaleen massa (kg)

Kaava 1. Jousitetun massan ominaisheilahtelutaajuus.

Kaavan perusteella jos ajoneuvon massa kasvaa, pienenee ominaistaajuus kasvun neliöjuuressa. Tämä on merkittävä ongelma henkilöautoissa ja erityisesti pienissä henkilöautoissa, joissa kuorman vaihtelut ovat ajoneuvon painoon nähden varsin suuria. Siksi henkilöautoissa suositaan jousia, joiden jousikerroin kasvaa jousen painuessa kasaan (progressiivinen jousi). Tällöin korin ominaisheilahtelutaajuus pysyy suunnilleen samana. (Dixon 2007, 63.)

#### 4.2.2 Kaksi-massa-systeemi

Useimmissa ajoneuvoissa on erilliset jouset ja vaimentimet. Tällöin jousitusta mallinnetaan yksinkertaisimmillaan kaksi-massa-systeeminä, kuten kuvassa 12.



Kuva 12. Kaksi-massa-systeemi.

Samaan tapaan kuin aikaisemmassa mallissa, massana käytetään ajoneuvon massaa, jonka pyörä joutuu kantamaan. Toisena massana on pyörän massa. Ajoneuvon massaa sanotaan jousitetuksi massaksi, sen maatessa varsinaisten jousien päällä ja pyörän massaa sanotaan jousittamattomaksi massaksi, sillä vain rengas toimii sen jousena. (Heiðing & Ersoy 2011, 69, 75.)

Kaksi-massa-systeemissä luontainen heilahtelutaajuus ajoneuvon korille saadaan samalla kaavalla, kuin aikaisemmassa yksi-massa systeemissä. Pyörän luontainen heilahtelutaajuus lasketaan seuraavalla kaavalla: (Heiðing & Ersoy 2011, 75).

$$\omega_{eW} = \sqrt{\frac{c_W + c_B}{m_W}}$$

, jossa  $\omega_{eW}$  on pyörän ominaisheilahtelutaajuus (Hz)  
 $c_W$  on rengaskumin jousivakio (N/m)

$c_B$  on varsinaisen jousen jousivakio (N/m)

$m_W$  on pyörän massa (kg)

Kaava 2. Pyörän heilahtelutaajuus.

Renkaan vaimennussuhde saadaan seuraavalla kaavalla: (Heiðing & Ersoy 2011, 75).

$$D_W = \frac{k_B + k_W}{2\sqrt{m_B * (c_W + c_B)}}$$

, jossa  $D_W$  on renkaan vaimennussuhde (Hz)

$k_W$  on rengaskumin vaimennuskerroin ( $N * s/m$ ) tai (kg/s)

$k_B$  on heilahtelunvaimentimen vaimennuskerroin ( $N * s/m$ ) tai (kg/s)

$c_W$  on rengaskumin jousivakio (N/m)

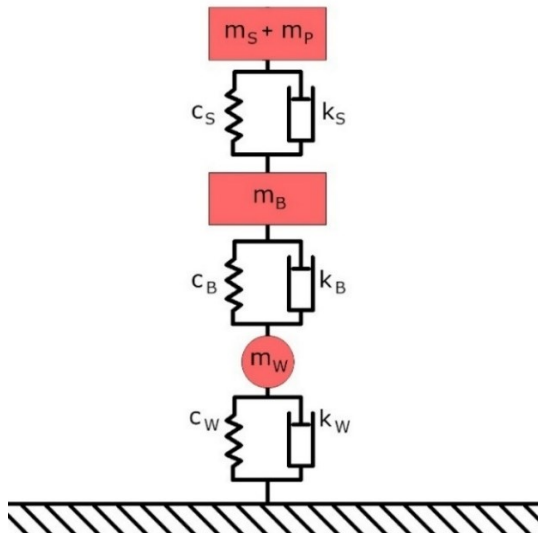
$c_B$  on varsinaisen jousen jousivakio (N/m)

$m_W$  on korin massa (kg)

Kaava 3. Renkaan vaimennussuhde.

#### 4.2.3 Kolme-massa-systeemi

Kahden massan järjestelmä voidaan vetää vielä pidemmälle tuomalla yhtälöön kolmas massa. Tämä on esitettyä kuvassa 13.



Kuva 13. Kolme-massa-systeemi.

Kolmas massa kuvastaa penkin ja siinä istuvan henkilön massaan summaa. Näiden massojen summa on kuitenkin niin pieni suhteessa korin massaan, että useimmiten ne jätetään huomioitta. Tällöin oletetaan ajoneuvolla olevan vain kaksi erillistä heilahtelevaa massaa. Systeemissä on lisäksi huomioitu penkin jousittava ja heilahtelua vaimentava vaikutus. (Heißing & Ersoy 2011, 75.)

#### 4.3 Kitkalajit heilahtelunvaimentimissa

Jousituksesta johtuen ajoneuvo on altis heilahtelemaan aikaisemmin esitetysti, noin 1 - 2 Hz taajuudella. Tämän hallitsemiseksi ajoneuvoissa käytetään heilahtelunvaimennusta. Vaimennus on liike-energian ”hukkaamista”, ajoneuvoissa liikettä vaimennetaan kitkalla, joka muuttaa liike-energiaa lämmöksi. (Dixon 2007, 63.)

Heilahtelunvaimentimen tehtäviä on kaksi. Se vähentää jousittamattoman massan eli pyörän heilahtelua, jolloin ajoturvallisuus paranee. Toisaalta myös vähentää jousituetun massan eli ajoneuvon korin liiallista heilahtelua, jolloin ajomukavuus paranee. Jousi ja heilahtelunvaimennin aiheuttavat molemmat kiihtyvyyksiä ajoneuvon koriin. Mikäli halutaan vähentää korin heilahtelua, eli

parantaa ajomukavuutta, tulisi käyttää heikkoa vaimennusta. Ajoturvallisuus kuitenkin vaatisi kovemman vaimennuksen käyttöä, jotta pyöränkuorman muutokset pysyisivät pieninä. (Heißing & Ersoy 2011, 69.)

Heilahtelunvaimentimen toiminta perustuu kitkan hallintaan. Vaimentimissa käytetään kolmenlaista kitkaa. Mitä tahansa näistä voidaan käyttää jousituksen heilahtelun vaimennukseen, mutta niiden ominaisuudet ovat hyvin erilaisia. (Dixon 2007, 15.)

- 1) Coulombin kitka
- 2) Nesteen viskoosikitka
- 3) Nesteen dynaaminen kitka

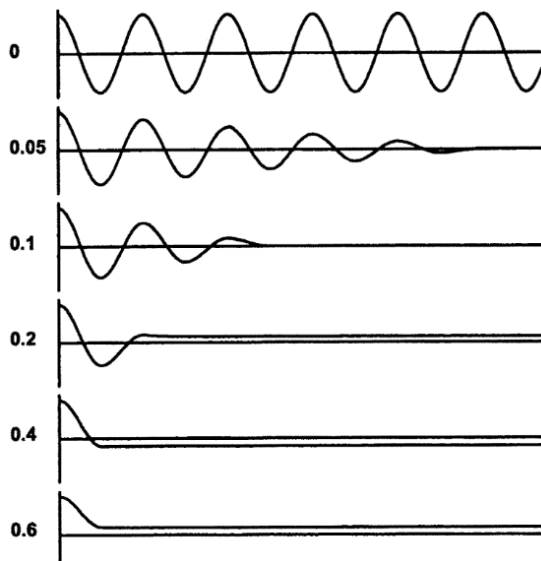
Coulombin kitkaa esiintyy kovien materiaalien kosketuspinnolla. Oleellista on lepokitka, joka vastustaa kappaleiden liukumista toisiinsa nähden. Lepokitka on lähes verrannollinen pinnan normaalivoimaan. (Dixon 2007, 15.)

$$F_F \leq \mu_F F_N$$

, jossa  $F_F$  on kitkavoima (N)  
 $F_N$  on pintojen välinen normaalivoima (N)  
 $\mu_F$  on rajoittava kitkakerroin

Kaava 4. Coulombin lepokitka.

Kovilla materiaaleilla rajoittava kitkakerroin on suunnilleen vakio suurimmalla osaa normaalivoiman  $F_N$  arvoja, ja lähes riippumaton pinta-alasta. Toinen osa Coulombin kitkaa on liikekitka, joka on huomattavasti pienempi kuin lepokitka. Kappaleiden lähtiessä liikkeelle, niiden liikettä vastustava kitkavoima voi laskea jopa 70 %. Tästä johtuen Coulombin kitka ei ole hyvä heilahtelun vaimennukseen, sillä se lukitsee liikkuvat osat pienillä voimilla. Tämä kitkalaji on myös hyvin riippuvainen lämpötilasta, mikä ei sekään ole toivottavaa. Siksi Coulombin kitka pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, esimerkiksi käyttämällä kumipuslia liukulaakerien sijaan. (Dixon 2007, 15 - 16.)



Kuva 14. Heilahtelunvaimennus Coulombin kitkalla (Dixon 2007, 75).

Kuvasta 14 nähdään Coulombin kitkan ongelma. Kuvitteellisessa tilanteessa vaimennin käyttää vain Coulombin kitkaa toiminnassaan. Lepokitka on niin suuri, että pienillä jousen siirtymillä se kumoaa jousivoiman kokonaan, aiheuttaen ajokorkeuden muutoksen. Lepokitka ei kumo ainoastaan jousen voimaa, vaan myös tienpinnan epätasaisuuksista johtuvat voimat, jotka eivät jousivoimaan summattuna ole suurempia kuin lepokitkan arvo. Nämä voimat eivät saa vaimenninta liikkumaan, eli ne ohjautuvat täysin ajoneuvon koriin, mikä vaikuttaa negatiivisesti ajomukavuuteen. (Dixon 2007, 75.)

Viskoosikitkaa esiintyy nesteissä ja se on verrannollinen virtausnopeuteen. Tämän seurauksena se on näennäisesti hyvä vaihtoehto, mutta harmillisesti nesteen viskositeetti riippuu lämpötilasta. (Dixon 2007, 16.)

Nesteen dynaaminen kitka johtuu virtauksien turbulenssien aiheuttaman energian hajaantumisesta. Kitkan voima on verrannollinen virtauksen neliöjuureen. Tämän seurauksena suurilla nopeuksilla voimat ovat liian isoja ja pienillä nopeuksilla liian pieniä. Nesteen dynaaminen kitka on riippuvainen tiheydestä, mikä on viskoosikitkan tapaan riippuvainen lämpötilasta, mutta kuitenkin merkittävästi vähemmän. Onnistunut heilahtelunvaimennin riippuu

pitkälti kitkaominaisuuksien optimoinnista ja johdonmukaisesti käyttäytyvän kitkan käytöstä, joka ei ole liian riippuvainen lämpötilasta. (Dixon 2007, 16 - 17.)

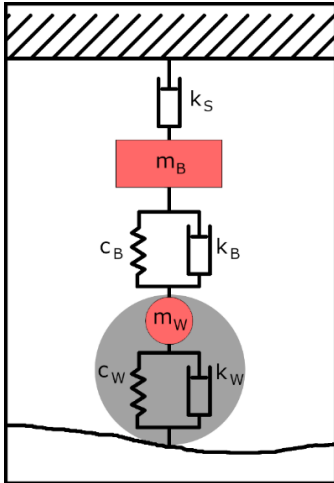
#### 4.4 Korin hallintastrategiat

On olemassa useita toimintaperiaatetta, joiden mukaan heilahtelunvaimentimen vaimennusvoimaa voidaan sopeuttaa ajon aikana. Näistä esitellään lyhyesti Skyhook-, Groundhook- ja kynnysarvo -strategia (Dixon 2007, 300). Nämä kaikki toimivat aktiivijousituksella, mutta niitä voidaan osittaisella onnistumisella käyttää myös adaptiivisilla vaimentimilla (Heißing & Ersoy 2011, 529).

##### 4.4.1 Skyhook-strategia

Skyhook-periaatteen mukaisessa korin hallinnassa, ajoneuvon korin kallistelut pyritään minimoimaan. Korin käytöksen tulisi olla verrattavissa tilanteeseen, jossa se roikkuisi taivaasta kuvitteellisten koukkujen varassa ja näin olisi täysin eristetty tien epätasaisuuksista aiheutuvista impulsseista. Ajoneuvossa pitäisi siis tuntua siltä, kuin se leijuisi tien yllä. Periaatteen tavoite on paras mahdollinen ajomukavuus. (Bosch 2022, 1142.)

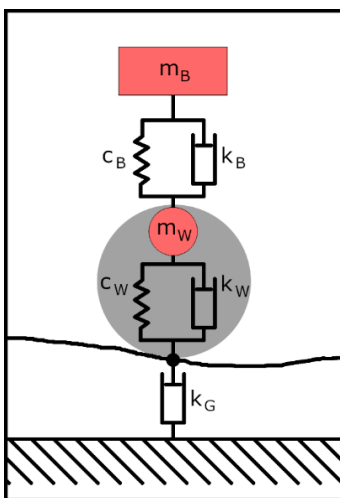
Teoreettisesti esitettynä, kori kuvitellaan kiinnittyvän taivaaseen koukkujen sijaan heilahtelunvaimentimen avulla, kuten kuvassa 15. Näin voidaan laskea tarvittavat vaimennusvoimat. Todellisessa toteutuksessa ajoneuvon heilahtelunvaimentimen on osoitettava kuvitteellisen vaimentimen voimat ajoneuvon korin ja pyörän väliin. Skyhook-strategia vaatii vaimentimen, joka pystyy mukauttamaan vaimennusta pyörän luontaisella heilahtelutaajuudella. (Heißing & Ersoy 2011, 530.)



Kuva 15. Skyhook-strategia teoreettisesti esitettynä.

#### 4.4.2 Groundhook-strategia

Groundhook-periaatteen mukaisella ratkaisulla pyritään minimoimaan ajoneuvon rengaskuormien muutokset. Tavoitteena on paras mahdollinen ajoturvallisuus. Samantapaisesti kuin Skyhook-strategiassa, Groundhook-strategiassa kuvitellaan pyörien kiinnittyvän maahan koukuilla tai teoreettisesti esitettynä heilahtelunvaimentimien avulla, kuten kuvassa 16. Tällöin voidaan laskea voimat, joita ajoneuvon korin ja renkaan välille tarvitaan. (Bosch 2022, 1143 - 1144.)



Kuva 16. Groundhook-strategia teoreettisesti esitettynä.

#### 4.4.3 Kynnysarvo-strategia

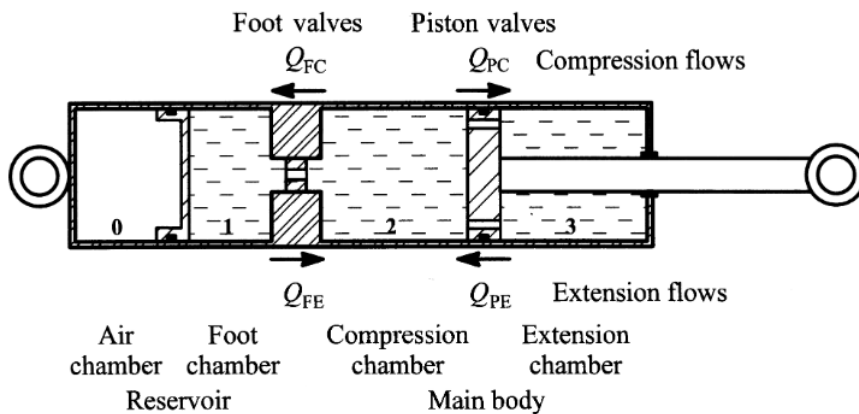
Kynnysarvo-pohjaisessa strategiassa ohjainlaitteet vertaavat ajotilanteesta saatavia anturitietoja ennalta asetettuihin arvoihin. Verrattavia anturitietoja voivat olla esimerkiksi korin asento, -kiihtyvyys tai ohjauskulma. Mikäli anturit antavat lukuja, jotka ovat isompia tai pienempiä kuin ennalta asetetut ohjearvot, mukauttaa ohjainlaite heilahtelunvaimentimien vaimennusta niihin päästäkseen. Heilahtelunvaimennusta säädetään usein akselikohtaisesti sisään- ja ulosjoustossa. (Bosch 2022, 1142.)

Kynnysarvo-periaatteessa tavoitteena on aikaisemmin mainittujen Skyhook- ja Groundhook -periaatteiden yhdistäminen. Tällöin pyritään tarjoamaan parempi ajomukavuus karsimatta ajoturvallisuudesta (Bosch 2022, 1142). Kynnysarvo-periaate on yleisin adaptiivisten heilahtelunvaimentimien ohjaustapa. (Heißing & Ersoy 2011, 527).

## 5 Passiiviset teleskooppivaimentimet

Teleskooppivaimentimet jaetaan pääasiassa sen mukaan, miten männän varren ottama tila on huomioitu vaimentimen rakenteessa. Tämä on merkittävä ongelma heilahtelunvaimentimen suunnittelussa, sillä öljy ei ole kovin kokoonpuristuvaa. Männän varsi aiheuttaa sisään- ja ulosjouston välillä jopa 10 % tilanmuutoksen vaimentimen sisällä. Männän varren lisäksi tulee huomioida öljyn lämpölaajeneminen mikä on merkittävän suuruista. (Dixon 2007, 25.)

Tavanomaisen teleskooppivaimentimen rakenne on esitettyä kuvassa 17. Vaimennin on jaettu kahteen tilaan, varasäiliöön (*Reservoir*) ja pääsäiliöön (*Main body*), jotka on edelleen jaettu kammioihin mäntien avulla. Kammiot 0 sisältää ilmaa, usein paineistettua typpeä. Kammiot 0 ja 1 erottaa vapaasti kelluva mäntä. Kammiot 2 on puristuskammio, jossa vallitsee suuri paine sisäänjouston aikana. Kammiot 3 on palautuskammio, jossa vallitsee suuri paine vaimentimen ulosjoustoliikkeen aikana. (Dixon 2007, 37.)



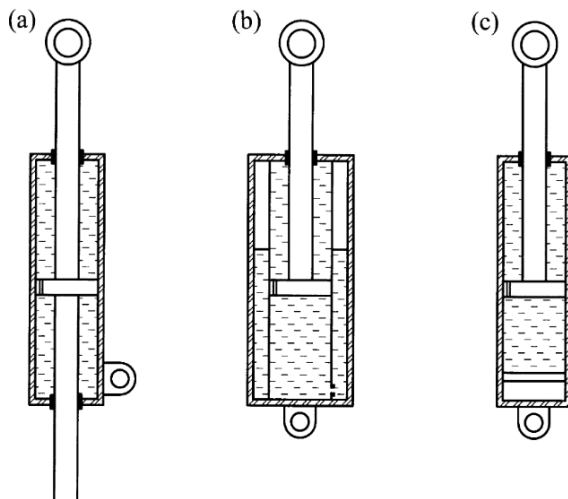
Kuva 17. Tyypillisen teleskooppivaimentimen rakenne (Dixon 2007, 41).

Sisäänjoustossa pääsäiliöstä 2 ja 3 virtaa pohjaventtiilin (*Foot valves*) läpi hydraulioöljyä varasäiliöön 1. Mikäli ei huomioida öljyn kokoonpuristuvuutta, säiliöön 1 virranneen öljyn tilavuus on yhtä suuri kuin männän varren syrjäyttämä tilavuus pääkammiossa. Lisäksi öljyä virtaa kammiosta 2 männän venttiilin läpi kammioon 3. Ulosjoustossa varasäiliöstä virtaa öljyä pääkammioon

männän varren aikaisemmin syrjäyttämä määrä. Lisäksi öljy virtaa kammioista 3 männän ulosjoustoventtiilin läpi kammioon 2. Tavanomaisen heilahtelunvaimentimen ominaisuudet riippuvat lähinnä männän sekä männän varren halkaisijasta ja neljästä venttiilistä. Lisäksi vaikuttavia asioita ovat säiliön paine, nesteen ominaisuudet ja osien välinen kitka. (Dixon 2007, 37, 41.)

Todellisessa vaimentimessa varasäiliö voi olla myös erillään vaimenninrungosta, jolloin kammioden 1 ja 2 välillä on venttiilien lisäksi joustava putki. Tällöin venttiilien säätö tapahtuu varasäiliön sivuun sijoitetuilla säätönupeilla. Tämän tapaista ratkaisua käytetään paljon kilpa-autoissa, mutta harvoin tieliikenteeseen tarkoitetuissa henkilöautoissa. (Dixon 2007, 41.)

Kuvassa 18 on esiteltynä mahdollisia teleskooppivaimentimen rakenteita: a) läpi-varsi-vaimennin b) kaksiputkivaimennin c) yksiputkivaimennin.



Kuva 18. Eri teleskooppivaimenninrakenteita (Dixon 2007, 34).

### 5.1 Kaksiputkivaimennin

Hyvin yleinen tapa on asettaa varasäiliö pääsäiliön ympärille, jolloin saadaan kaksiputkivaimentimena tunnettu rakenne (Kuva 18 b). Tällaisessa asetelmassa pääsäiliö viilentyy heikommin, mutta on paremmin suojassa kiveniskuilta.

Vaimentimen ollessa paineistamaton, vain painovoima erottaa öljyn ja ilman,

jolloin vaimennin on asennettava sylinteri alaspäin ja mäntä ylöspäin, ellei ilmaa ole fyysisesti erotettu esimerkiksi kumipussilla varasäiliössä. (Dixon 2007, 41.)

Kaksiputkivaimentimet ovat yleisiä ajoneuvoissa ympäri maailman. Ne ovat osoittautuneet sopiviksi myös jousituksiin, joissa vaimenninta käytetään osana pyöräntuentausta, ohjaamaan pyörän liikkeitä. (Heiðing & Ersoy 2011, 272.)

## 5.2 Yksiputkivaimennin

Yksiputkivaimentimen tapauksessa varasäiliö on yhdistetty suoraan pääsäiliöön, ilman pohjaventtiilejä (kuva 18 c). Tämänlainen vaimennin on usein kapeampi kuin kaksiputkivaimennin, mutta pidempi. Vaimennusta säädetään pohjaventtiilien puuttuessa vain männän venttiileillä, mikä vaikeuttaa säädetävän vaimentimen toteutusta. Lisäksi pohjaventtiilien puuttuminen vaatii suuren esipaineen käyttöä, luokkaa 2,5 - 3 MPa, jotta sisäänjoustossa ei tapahdu kavitaatiota kuvan 17 kammiossa 3. (Dixon 2007, 41.) Suuren paineen seurauksena tarvitaan erilaiset tiivistykset kuin kaksiputkivaimentimissa, sellaiset jotka kestävät paineita 11 MPa asti. Eristämisen tehtävää hoitaa fluorikumi, jonka esijännittää kuminen kiekko. Kumikiekko taas on esijännitetty vaimentimen sisäisen paineen toimesta. Paineistetut tiivisteet aiheuttavat yksiputkivaimentimissa enemmän kitkaa, mikä ei ole toivottavaa. (Heiðing & Ersoy 2011, 271 - 272.)

Yksiputkivaimennin voidaan paineistetun rakenteensa ansiosta asentaa mihin asentoon vain. Paineen ansiosta yksiputkivaimennin ei myöskään ole yhtä herkkä kavitaatiolle kuin kaksiputkivaimennin, joka parantaa toimintaa lyhyillä männänliikkeillä. Yksiputkivaimentimessa on myös vähemmän osia kuin kaksiputkivaimentimessa, jolloin se painaa vähemmän. Yksiputkivaimentimia käytetään etenkin Euroopassa. (Heiðing & Ersoy 2011, 271 - 272.)

### 5.3 Läpi-varsi-vaimennin

Läpi-varsi-teleskooppivaimennin sivuuttaa männän varren varaaman tilan ongelman kokonaan, varren ottaessa vaimentimen liikkeestä riippumatta vakiotilavuuden. Tämä voidaan nähdä kuvan 18 vaimentimesta a. Rakenne sisältää kuitenkin muunlaisia ongelmia. Ensiksi, molemmissa päissä on nyt tiiviste männän varrelle, jotka altistuvat suurille paineille. Toiseksi öljyn lämpölaajenemiselle ei ole varattu tilaa. Lisäksi vaimentimen toisessa päässä on nyt vapaasti liikkuva tanko, joka nykyisiin tuotantoautoihin asennettuna tulisi konepellin läpi. Rakenne on siksi epäkäytännöllinen. Vaimennintyyppi on näin ollen todennettu sopimattomaksi pyöräntuentaan, mutta sitä saatetaan joskus käyttää ohjauksen yhteydessä. (Dixon 2007, 26.)

### 5.4 Teleskooppivaimentimen säätö

On olemassa neljä tapaa säätää heilahtelunvaimentimen vaimennusta sisään- sekä ulosjoustossa. Säätötapa riippuu vaimentimen rakenteesta sekä ajoneuvon järjestelmistä. (Dixon 2007, 289.)

1. Manuaalisesti, kun vaimennin on irrotettu ajoneuvosta
2. Manuaalisesti, vaimentimen ollessa paikallaan
3. Etänä ajoneuvon kojelaudalta
4. Automaattisesti (adaptiivinen)

Ajoneuvossa tapahtuva säätö toimii kiekkoa tai säätönuppia kiertämällä tai vivun avulla. Säädot sijaitsevat vaimentimen rungossa tai männän varressa. Sisään- ja ulosjoustolle on yleensä omat säädot, mutta toteutuksesta riippuen säädot voivat vaikuttaa jossain määrin myös toisiinsa. (Dixon 2007, 289.)

Etäsäätö toteutetaan useimmiten sähkömoottorien avulla. Ohjainlaite sijoitetaan kojelautaan, jolla kuljettaja voi antaa sähkömoottoreille käskyjä ajon aikana. Sähkömoottori pyörittää vaimentimeen sijoitettua lieriötä, jossa on erikokoisia reikiä. Kääntämällä eri reiän kanavan suuntaisesti, muuttuu kanavan kuristus ja

samalla öljyn virtausnopeus. Tämä on sähköisesti säädettävän vaimentimen käytännöllisin toteutustapa, sillä ohjausvirta on pieni ja säätö voidaan tehdä vaimentimen ollessa käytössä. (Dixon 2007, 289 - 290.)

Viimeiseksi vaimennus voidaan sopeuttaa automaattisesti ajotilanteeseen. Tällöin kuljettajalla on usein mahdollisuus valita eri esiasetuksista ohjainlaitteen käytösmalli. Yleisimmät ovat urheilullinen- ja mukava -asetus, joiden perusteella vaimennus on enimmäkseen kovaa tai pehmeää. Ohjainlaitteen voidaan myös antaa itse sopeuttaa vaimennus tilannekohtaisesti. Normaalisissa tieliikenteessä ajotilanteet eivät muutu kovinkaan nopeasti, jolloin nopeita muutoksia ei tarvita. Esimerkiksi kolmen sekuntin reaktionopeus voi olla riittävä. (Dixon 2007, 290.)

Pehmeää vaimennusta pyritään käyttämään vain ajettaessa maltillisilla nopeuksilla suhteellisen suoraan. Tästä poiketessa halutaan usein kovempaa vaimennusta. Siis silloin, kun koriin kohdistuu suuria pitkittäis- tai pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä, ajetaan kovilla nopeuksilla tai hyvin epätasaisella pinnalla. Myös ajoneuvon ollessa pysäytettynä suositetaan kovaa vaimennusta, jolloin korin heilahtelu vähenee matkustajien noustessa ajoneuvoon tai ajoneuvosta ulos. (Dixon 2007, 290.)

Vaimentimissa on useimmiten kaksi venttiiliä: yksi männässä ja yksi vaimentimen pohjassa. Pohjaventtiili on helposti saavutettavissa, sen ollessa vaimentimen rungossa kiinni. Tästä johtuen siitä on helppo rakentaa säädettävä. Harmillisesti pohjaventtiili toimii vain sisäänjoustossa, mikäli kyseessä on esipaineistamaton vaimennin. Männän venttiili tarjoaisi parhaat mahdollisuudet säädettävyydelle. Asiaa vaikeuttaa vain se, että mäntä liikkuu varsin vapaasti vaimentimen sisällä, eikä siksi ole helposti saavutettavissa. Yksi tapa on tehdä männänvarresta ontto, jolloin sen sisälle voidaan asettaa säätövarsi. Tällöin vartta ruuvataan sisään tai ulospäin, joka muuttaa männässä sijaitsevan kartioneulan sijaintia, joka taas muuttaa virtausaukon kokoa. (Dixon 2007, 290.)

## 5.5 Vaimentimen mitoitus

Lopullinen vaimennin muotoutuu prototyypiauton testien perusteella. Lähtöarvot on kuitenkin loogista mitoitaa laskemalla. Esimerkiksi männän halkaisija riippuu pääasiassa käytettävistä vaimennusvoimista, jolloin se voidaan aluksi määrittää tarvittavan vaimennuksen perusteella. Myös aikaisempien automallien vaimentimia voidaan käyttää lähtökohtana, mutta aina se ei ole mahdollista. Tarvittava vaimennusvoima riippuu jousitetun massan painosta, jousen liikesuhteesta pyörään ja vaimentimen asennosta. Karkea arvo voidaan laskea seuraavalla kaavalla, kun oletetaan, että vaimennusvoima on riippuvainen vaimentimen liikenopeudesta. (Heißing & Ersoy 2011, 274.)

$$F = k * v$$

, jossa  $F$  on tarvittava vaimennusvoima (N)  
 $k$  on vaimennuskerroin ( $N * s/m$ ) tai (kg/s)  
 $v$  on vaimentimen liikenopeus (m/s)

Kaava 5. Vaimennusvoima.

Vaimennussuhde lasketaan seuraavanlaisella kaavalla (Heißing & Ersoy 2011, 274).

$$D = \frac{k}{2 * \sqrt{c * m}}$$

, jossa  $D$  on vaimennussuhde  
 $k$  on vaimennuskerroin ( $N * s/m$ ) tai (kg/s)  
 $c$  on jousen jousivakio (N/m)  
 $m$  on korin massa (kg)

Kaava 6. Vaimennussuhde.

Ajomukavuuden ja -turvallisuuden varmistamiseksi, pyritään käyttämään pientä vaimennuskerrointa. Puolikasta kerrointa ( $D = 0,5$ ) pidetään kriittisenä arvona. Tällä arvolla vaimennin on jo niin jäykkä, että tietyt vaikutteet saattavat aiheuttaa ajoneuvon pomppimisen pyörillään. Tämä nostaa ajoneuvon luontaista heilahtelutaajuutta korkeammaksi, ihmisille epämukavalle alueelle. Korin vaimennukseen käytetään arvoja 0,25 ja 0,35 välillä, mikä on hyvä kompromissi. (Heißing & Ersoy 2011, 267.)

Pehmeiden ja lyhyen iskupituuden omaavia vaimentimia käytettäessä on vaarana pohjaanlyönti. Tämä aiheuttaa epämukavia ääniä ja iskuja, jotka voidaan välttää käyttämällä iskunpituudesta riippuvaa vaimennusta (progressiivinen vaimennin) tai asentamalla kumiset tai jousikuormitteiset pohjaanlyöntivaimentimet. (Heißing & Ersoy 2011, 267.)

## 6 Adaptiiviset heilahtelunvaimentimet

Passiivisen heilahtelunvaimentimen ominaisuudet ovat aina kompromissi turvallisuuden ja mukavuuden välillä. Adaptiivinen eli jatkuvasti mukautuva tietokoneohjattu heilahtelunvaimennin mahdollistaa sekä turvallisen, että mukavan ajokokemuksen. (Heißing & Ersoy 2011, 499.) Seuraavaksi esitellään muutama adaptiivinen heilahtelunvaimennin-järjestelmä.

### 6.1 Adaptive Damping System

Adaptive Damping System (ADS) on ThyssenKrupp:n ja Bilstein:n yhdessä kehittämä adaptiivinen vaimenninjärjestelmä. Järjestelmä vähentää korin liikkeitä säätämällä vaimennusvoimia sisään- sekä ulosjouston yhteydessä. Järjestelmässä on kaksi erillistä ohitusventtiiliä, jolloin sisään- ja ulosjouston vaimennusta voidaan säätää vaikuttamatta toiseen. Kaksi venttiiliä mahdollistavat neljä erilaista voima-nopeus-käyrää, joita vaihdellaan tilanteen mukaan. Sähkövirran katketessa ohitusventtiilit sulkeutuvat, jolloin taulukossa 2 esitetty asetus 4 on päällä. Tämä parantaa ajoturvallisuutta järjestelmän vikaantuessa. (Heißing & Ersoy 2011, 528 - 529.)

Taulukko 2. ADS-venttiilin ohjaus-asetukset (Heißing & Ersoy 2011, 529).

Asetus	Venttiilit, joissa virta	Ulosjousto- vaimennus	Sisäänjousto- vaimennus
1	1 ja 2	Pehmeä	Pehmeä
2	Venttiili 1	Pehmeä	Kova
3	Venttiili 2	Kova	Pehmeä
4	-	Kova	Kova

Kun korin liikkeet ovat pieniä, käytetään vakioasetusta 1, joka on pehmeä vaimennus. Näin parannetaan ajomukavuutta. Korin liikettä mitattaessa on

olemassa raja-arvo, jonka ylittyessä ADS-järjestelmä siirtyy Skyhook-ohjausstrategiaan. Kuljettaja voi vaikuttaa raja-arvoon, valitsemalla ohjaamosta urheilullisen ja mukavan asetuksen välillä. Raja-arvoon vaikuttaa myös tien kunto, ajoneuvon nopeus ja kiihtyvyydet. (Heißing & Ersoy 2011, 529.)

ADS-järjestelmä käyttää Skyhook-strategian kohdalla asetusta 2 tai 3, riippuen jousituksen liikesuunnasta. Asetuksien avulla pyritään pitämään korin pystysuuntaiset liikkeet mahdollisimman pieninä. Pituussuuntaisia liikkeitä vaimennetaan kaksivaiheisella ohjauksella. Ensiksi suuret pituussuuntaiset liikkeet vaimennetaan suurella vaimennuksella osalla renkaista. Mikäli liike jatkuu tai kasvaa, aktivoidaan asetus 4 kaikilla renkailla, tällöin vaimennus on suuri sisään- että ulosjoustossa. (Heißing & Ersoy 2011, 529.)

ADS-järjestelmä käyttää ohjaukseen vain korin liikkeitä, jolloin voidaan käyttää yksinkertaisia kiihtyvyyssantureita. Tämä mahdollistaa myös varsin hitaiden venttiilien käytön, joiden nopeus vastaa ajoneuvon luontaista heilahtelutaajuutta. Järjestelmä on tästä johtuen varsin hidas verrattuna seuraavaksi käsiteltävään CDC-järjestelmään, joka kykenee reagoimaan renkaan 10 Hz taajuisiin heilahteluihin. (Heißing & Ersoy 2011, 529.)

## 6.2 Continuous Damping Control

Continuous Damping Control (CDC) on adaptiivinen vaimennin -järjestelmä, jonka on kehittänyt ZF Sachs (Kuva 19). Järjestelmä tuli markkinoille vuonna 1999. CDC-vaimentimen rakenne vastaa toiminnaltaan kaksiputkivaimenninta. Keskeisenä erona on kuitenkin pitkälle kehitetty, ohjattava venttiili. Vaimentimia on kahdenlaisia: ulkoisella ja sisäisellä säädettävällä venttiilillä. Venttiilin, sen liittimen ja ulkoisen hydraulilinjan lisäksi vaimentimessa ei ole muita erikoisosa, eli vaimennin koostuu pääosin valmiiksi markkinoilla olevista osista. Näin järjestelmän valmistuskustannuksia on pidetty matalana. CDC-vaimennin on adaptiivinen vaimennin, eli se ei kykene täysin poistamaan pyöränkuorman muutoksia tai korin liikkeitä. Se kykenee kuitenkin vaikuttamaan näihin

paremmin kuin passiivinen vaimennin. (Heißing & Ersoy 2011, 281 - 282, 493, 528.)



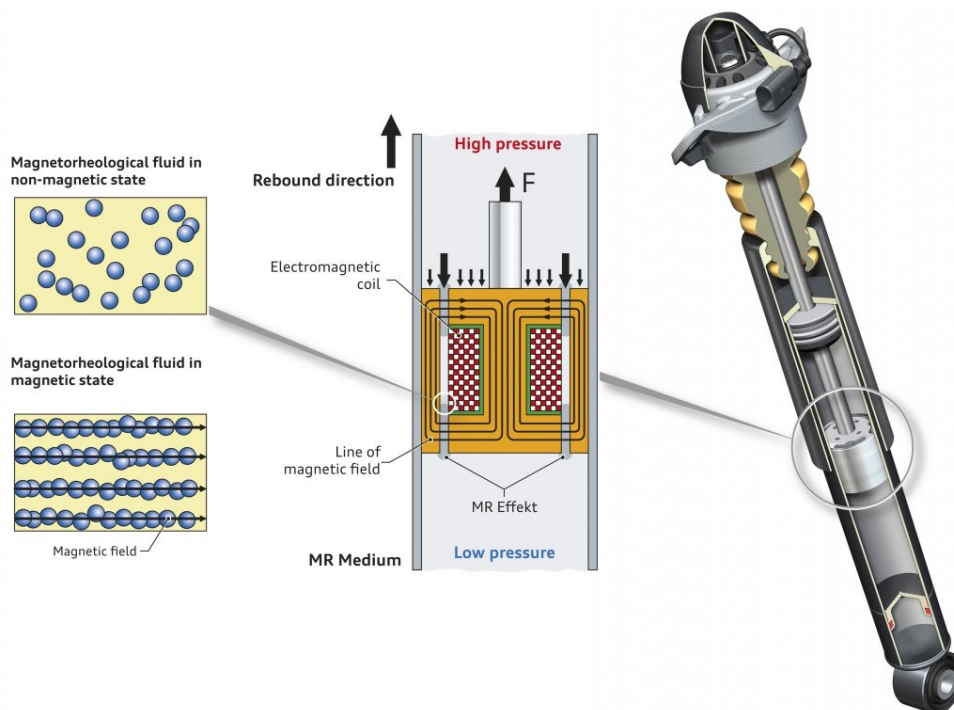
Kuva 19. ZF Sachs CDC-vaimennin (ZF Friedrichshafen AG 2024).

CDC-vaimentimen venttiilissä on viisi osaa, joita vaihtamalla voidaan saavuttaa hyvinkin erilaisia vaimennuskäyttäytymisiä. Tämän ansiosta yhdellä venttiilillä voidaan täyttää usean ajoneuvovalmistajan vaatimukset. Ulkoinen venttiiliyksikkö voidaan asentaa useaan kohtaan vaimentimen alaosaan, mikä helpottaa vaimentimen yhdistämistä valmiisiin jousitusrakenteisiin. Vaimentimen sisäisessä ratkaisussa säädettävä venttiili on sijoitettu mäntään. Tätä rakennetta käytetään vain, kun ulkoista venttiiliä ei haluta tai voida asentaa. Syitä voi olla tilanpuute tai kun kierrejousi on asetettu vaimentimen ympärille. Mikäli mäntään ei voida asentaa venttiiliä, voidaan venttiili sijoittaa myös vaimentimen pohjaan. (Heißing & Ersoy 2011, 282 - 283.)

CDC -järjestelmä käyttää kolmea kiihtyvyyssanturia, kahta ajoneuvon edessä ja yhtä takana, laskeakseen kiihtyvyydet jokaisella vaimentimella. Pyörän liikkeitä seurataan etuakselin pyörillä sijaitsevilla kiihtyvyyssantureilla. Etupyörien kiihtyvyyksien ja ajoneuvon nopeuden avulla voidaan laskea takapyörien liikkeet, jolloin ei tarvita takapyörille omia antureita. (Heißing & Ersoy 2011, 528.)

### 6.3 Magnetoreologinen vaimennin

Magnetoreologinen vaimennin on hyvin samankaltainen kuin passiivinen vaimennin, kuitenkin hyvin merkittävillä eroilla. Vaimentimessa ei ole venttiilejä, vaan männässä on reiät, joista neste virtaa vapaasti. Tämä voidaan nähdä kuvasta 20. Vaimentimessa ei myöskään ole tavanomaista hydraulioöljyä, vaan magnetoreologista nestettä. Neste koostuu synteettisestä öljystä, sekä hyvin pienistä rautahipuista, kooltaan mikrometrin luokkaa. Järjestelmää markkinoi BWI Group nimellä MagneRide. (Ahtiainen 2018.)



Kuva 20. Audi Magnetic Ride -heilahtelunvaimennin (Audi AG 2011).

Vaimentimen toiminta perustuu magnetoreologisen nesteen viskositeetin muutokseen aineen joutuessa magneettikenttään. Magneettikenttä saa rautapartikkelit suuntautumaan niin, että nesteen leikkausjännitys kasvaa. Leikkausjännityksen kasvu vähentää viskositeettiä, joka hidastaa nesteen virtaamista männän kanavien läpi ja näin lisää vaimennusvoimaa. (Heißing & Ersoy 2011, 285.)

Vaimentimen voisi toteuttaa myös elektroteologisesti, jolloin nesteeseen johdettu jännite muuttaa nesteen leikkausjännitystä. Ero toiminnassa on vain kumpaa käytetään: sähkö- vai magneettikenttää. MagneRide-järjestelmän kehittäjän Delphin mukaan magnetoreologisen vaimentimen vahvuudet ovat suuri voimaskaala, suuret voimat hitailla vaimentimen nopeuksilla sekä nopeat, lineaariset ohjausreaktiot ja liikkuvien osien vähäisyys. (Heißing & Ersoy 2011, 285.)

MagneRide-järjestelmän kehitti General Motors:in 1994 perustama Automotive Components Group (ACG), joka vuonna 1995 vaihtoi nimensä Delphi Automotive Systems:ksi ja myöhemmin itsenäistyi omaksi erilliseksi yritykseksi. Vuonna 2005 Delphi ajautui konkurssiin, jolloin kiinalainen jarru- sekä jousitusjärjestelmiä valmistava Beijin West Industries (BWI) osti Delphin. BWI markkinoi jousitusta edelleen MagneRide-nimellä. (GM Authority 2025.)

## 7 Aktiivisia jousituksia

Suunniteltaessa vaimentimia ajoneuvoon, on aina tehtävä kompromissi ajoturvallisuuden ja -mukavuuden välillä (Heißing & Ersoy 2011, 499).

Sähköohjattu heilahtelunvaimennin poistaa tämän tarpeen sopeuttaessaan vaimennuksen reaaliaikaiseen hetkelliseen ajotilanteeseen. Aktiivisessa jousituksessa jousi ja heilahtelunvaimennin on joko korvattu tai täydennetty hydraulisyliinterillä taikka sähkömoottorilla. Nopealla reagointinopeudella ja sopivalla anturitekniikalla ajoneuvon kori voidaan pitää kuormasta ja ajotilanteesta huolimatta oikealla ajokorkeudella, sekä täysin eristää se tienpinnan aiheuttamista heilahteluista. Ajoneuvosta saadaan vakaampi ja pitoa voidaan parantaa epätasaisilla pinnoilla, kun pyöränkuorma voidaan pitää vakiona. (Dixon 2007, 296.)

### 7.1 Daimler Active Body Control

Active Body Control (ABC) on Daimlerin toteutustapa aktiivijousituksesta. ABC esiteltiin ensimmäistä kertaa 1999 Geneven Auto Messuilla Mercedes:n CL500 ja CL600-malleissa. Kuvassa 21 on 215-mallisarjan CL-Coupé, johon ABC-jousitusta oli saatavilla.



Kuva 21. Mercedes-Benz 215-mallisarjan Coupé (Mercedes-Benz AG 2019).

Järjestelmässä passiivinen jousi on yhdistetty yläpäästä hydraulisyliinteriin, jolla sen korkeutta muutetaan. Järjestelmä toimii pumppaamalla hydraulioöljyä

sylintereille tai niistä pois. Tämä muuttaa männän sijaintia, jolla muutetaan jousen puristusta ja siten sen jäykkyyttä. Järjestelmällä pyritään kompensoimaan staattiset ja matalataajuiset pyöränkuorman muutokset. Enintään 5 Hz taajuiset värähtelyt kumotaan aktiivisesti ja sitä nopeammat ABC-joustintuen kaksiputkisella heilahtelunvaimentimella. Näin tehontarve on voitu pitää matalana. (Heiðing & Ersoy 2011, 533.)

ABC-järjestelmässä hydraulisylinteri ja passiivinen jousi on asetettuina sarjaan. Passiivinen heilahtelunvaimennin on näiden rinnalla. Tämä rakenne lisää turvallisuutta ja toimintavarmuutta, sillä aktiivijärjestelmän vikaantuessa passiivinen jousi ja heilahtelunvaimennin toimivat silti. ABC järjestelmän aktiivisen jousenohjauksen ansiosta, voidaan kompensoida korin sivuttaista kallistumista, jolloin ei tarvita passiivista kallistuksenvakaajaa. Vakaajan puuttuminen parantaa ajomukavuutta ja vähentää tien vaikutusta korin kallisteluun. (Heiðing & Ersoy 2011, 533.)

Kuvassa 22 nähdään konkreettisesti ABC-jousituksen vaikutus kaarreajossa. Kuvassa vasemmalla on 215-mallisarjan henkilöauto, jossa ABC-aktiivijousitus ja oikealla aikaisemman 140-mallisarjan henkilöauto vakiojousituksella.

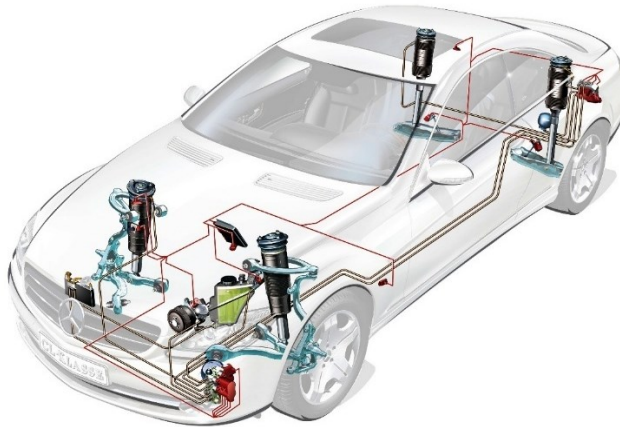


Kuva 22. Demonstraatio ABC-jousituksesta (Mercedes-Benz AG 2024).

ABC-järjestelmässä suositetaan jäykkää joustia ja pehmeää vaimenninta. Jäykällä jousella saavutetaan riittävä, passiivinen pyörän liikkeiden vaimennus ja pienennetään järjestelmän kokoa. Koska aktiivisesti vaimennetaan vain matalataajuiset heilahtelut, saavutetaan jäykällä jousella varsin hyvä ajomukavuus.

Tämä taas mahdollistaa heikon vaimentimen käytön. (Heißing & Ersoy 2011, 533.)

ABC-järjestelmä käyttää voimanlähteenä ajoneuvon moottorin pyörittämää hydraulipumppua, joka voidaan nähdä kuvassa 23 etupyörien välissä.



Kuva 23. ABC-aktiivijousitus. (Mercedes-Benz AG 2006).

Pumpulla tuotetaan 200 barin paine korkeapaineiseen hydraulijärjestelmään. Molemmilla akseleilla on lisäksi painesäiliöt, joita käytetään suurimmissa tehontarpeissa. Öljy virtaa pumpulta ohjausyksikköön, jossa on painetta rajoittava venttiili, paineanturi ja ääntä vaimentama pulssivaimennin. Ohjausyksiköstä öljy virtaa korkeapaine-linjoja pitkin akselikohtaisille venttiileille. Akselien venttiileistä voidaan lisätä tai vähentää kummankin pyörän öljymäärää sekä sulkea öljyn kulku kokonaan, kun ajoneuvo on pysäköitynä. Sulkuventtiilit toimivat myös turvalaitteena, joka lukitsee hydraulisyntereiden asennon järjestelmän vikaantuessa. Järjestelmästä on tehty jatkokehitelmä eABC, jossa hydraulisynterit on korvattu sähkömoottorilla. Oleellisina hyötyinä on osien vähäisyys, helpompi asennus ja öljyn puuttuminen. (Heißing & Ersoy 2011, 534 - 535.)

## 7.2 Citroën Hydractive

Citroënin kehittämä Hydractive on esimerkki hydropneumaattisesta ratkaisusta. Hydractiven ensimmäistä versiota oli saatavilla jo vuonna 1989 Citroën XM - henkilöautossa. Seuraava versio eli Hydractive II saapui 1993 Citroën Xantia:n alustassa ja sen laskentateho oli kolme kertaa isompi kuin aikaisemmassa versiossa. Hydractive II tuli myös seuraavaan Citroën XM -maliin, jota oli saatavilla 1994. Kolmas versio oli saatavilla Citroën C5 -henkilöautossa vuonna 2001. (Heißing & Ersoy 2011, 531) Citroën päätti 2015 lopettaa Hydractiven tuotannon ja tarjoamisen C5-malliinsa. Syynä tähän oli uudenlaiset aktiivijousitukset, jotka pystyvät samaan kuin Hydractive, mutta edullisemmin valmistuskustannuksin. (Guillaume 2015.)

Hydractive-aktiivijousitus perustuu Citroënin ensimmäiseen hydropneumaattiseen jousitukseen vuodelta 1954, jolloin Citroën 15CV - henkilöauto sai sen takajousitukseen. Seuraavan vuoden Citroën DS sai myös etuakselille hydropneumaattisen jousituksen. (Bauer 2011, 180.)

1950-luvun hydropneumaattinen jousitus oli rakenteeltaan varsin yksinkertainen. Siinä ei ollut esipainetta ja se koostui hydraulisylinteristä sekä niihin liitetyistä painesäiliöistä. Sylinterin ja painesäiliön välissä toimivat venttiilit, jolloin rakenne oli hyvin samanlainen yksiputkivaimentimen kanssa. Sylinterit olivat myös yhteydessä toisiinsa, jolloin ne eivät toimineet kallistuksenvakaajina, vaan tarvittiin lisäksi täysin mekaaninen vakaaja. Etu- ja taka-akselille oli omat korkeusohjausyksikkönsä, jotka yhdistyivät ajoneuvon hydraulikkalinjaan, josta hydraulijohdot ohjattiin myös ohjaukseen, vaihteistoon ja kytkimelle. (Bauer 2011, 181.)

Pehmeä jousitus aiheuttaa suuret korin kallistelut, mikäli ei käytetä jäykkiä kallistuksenvakaajia. Jäykkä kallistuksenvakaaja aiheuttaa kuitenkin ongelmia suoraan ajettaessa, sillä vain toisella puolella autoa vaikuttavat epätasaisuudet eivät tule kumotuksi yhtä pehmeästi. Hydractive-järjestelmä mahdollistaa pehmeän kallistuksenvakaajan käytön, sillä hydropneumaattisella

aktiivijousituksella voidaan lisätä kallistusjäykkyyttä hydraulisylintereissä. Suurimman osan ajasta käytetään vain passiivista kallistuksenvakaajaa, mutta kaarreajossa aktiivijousitus sopeutetaan passiivisen vakaimen tueksi. (Bauer 2011, 183.)

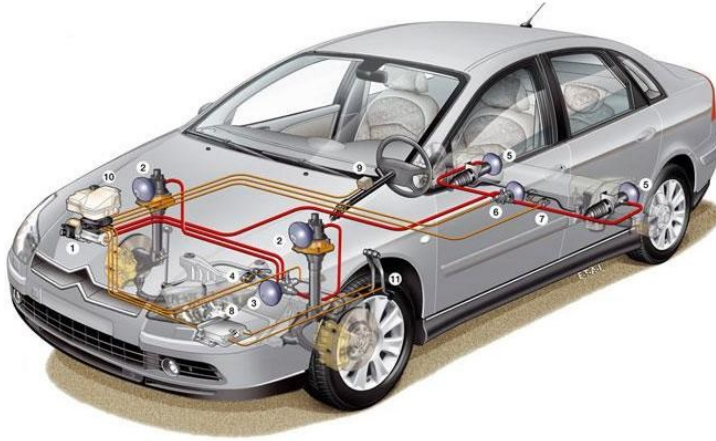
Järjestelmän säätö perustuu anturitietoihin, joita kerätään kuljettajan ohjauksikäskyistä ja ajoneuvon hetkellisestä tilasta. Esimerkiksi ohjaukskulmaa, jarrunesteen painetta ja moottorin pyörimisnopeutta käytetään pääättelemään ajotilanne ja sen vaatimat muutokset jousien ja vaimentimien jäykkyyteen. (Bauer 2011, 190; Heiðing & Ersoy 2011, 532.)

Hydractive III -järjestelmässä on aktiivijousituksen lisäksi automaattinen korkeudensäätö. Säätö tapahtuu lisäämällä tai poistamalla hydraulioiljyä jousituksesta. Ajoneuvon kori laskee alemmas korkeilla nopeuksilla, jolloin ilmanvastus on pienempi ja nousee pienemmillä nopeuksilla, jolloin jousituksen liikematka saadaan pidemmäksi. (Heiðing & Ersoy 2011, 532.)

Korkeudensäätö on helposti toteutettavissa hydropneumaattisessa sekä pneumaattisessa jousituksessa. Hydropneumaattinen on kuitenkin nopeudessa parempi, johtuen paremmasta energiatiheudesta ja koska öljy ei painu kasaan. (Bauer 2011, 12.) Hyötynä hydropneumaattisessa ratkaisussa on tilankäyttö. Hydraulisylintereillä on suuri teho suhteessa painoon tai tilaan, jolloin ne ovat oiva vaihtoehto aktiivijousitukselle. (Heiðing & Ersoy 2011, 532.)

Hydraulisylinteri toimii jousena ja vaimentimena samanaikaisesti. Lisäksi sylinterin halkaisija voi olla kapea, sillä toimintapaineet saadaan suuriksi. Staattinen paine on tyypillisesti 20 MPa -luokkaa. Tämän ansiosta sylinteri voi olla tavallisen vaimentimen kokoinen, jolloin se voidaan yhdistää valmiisiin pyöräntuntoihin. Painesäiliöiden olisi suotavaa sijaita sylintereissä kiinni. Tämä ei kuitenkaan ole pakollista, vaan ne voivat olla myös hyvin lähellä, mahdollistaen varsin vapaan osien asettelun. Hydraulipumpulla voidaan tuottaa öljynpaine jousituksen lisäksi myös jarruille ja vaihteistolle, jolloin ei tarvita useampaa öljypumppua. (Bauer 2011, 1, 13.)

Kuvassa 23 On Citroenin C5-henkilöauton aktiivinen hydropneumaattinen jousitus esitettynä. Kuvassa sähköjohdot ovat keltaisella ja hydraulilinjat punaisella.



Kuva 24. Citroen C5 hydropneumaattinen joustus (BXClub 2006).

Hydropneumaattisen jousituksen pääheikkouksia on osakokonaisuuksien hinta ja sen suuri energiankulutus, joka on noin 7 kW luokkaa (Heißing & Ersoy 2011, 532). Tavanomainen, passiivinen joustintuki -ratkaisu on paljon halvempi kuin hydropneumaattinen. Syynä tähän on mittava optimointi, etenkin kustannusten suhteen. Toinen syy on hintavan automatiikan puuttuminen, jota hydropneumaattinen aktiivijousitus tarvitsee korkeudensäätöön. (Bauer 2011, 13.)

Korkeasta paineesta johtuen hydropneumaattisessa jousituksessa esiintyy enemmän kitkaa kuin tavanomaisessa vaimentimessa. Suurempi kitka ei ole toivottua heilahtelunvaimentimessa, sillä se lisää vasteaikaa. Tämä aiheuttaa ongelmia epätasaisilla pinnoilla kuten mukulakiviteillä, jotka aiheuttavat hyvin lyhytkestoisia kiihtyvyyksiä renkailla. Citroënin ensimmäinen ratkaisu ongelmaan on matalakitkainen tiivistys, joka aiheuttaa pientä, jatkuvaa öljyvuotoa. Vuoto ohjataan omia hydraulilinjoja pitkin takaisin säiliöön, jolloin hydraulioöljyä ei häviä järjestelmästä. Toinen ratkaisu on suuren liikesuhteen käyttö. Jolloin vaimentimen liikematka on suuri, vaikka pyörä liikkuisi vain

vähän. Tällöin kitka- ja jousivoimien välinen suhde on pienempi. (Bauer 2011, 181 - 182.)

Vuotava vaimennin on edelleen ollut käytössä uudemmissa Citroënin hydropneumaattisissa jousituksissa. Aikaisemmin käytetyt, päällekkäiset kolmiotukivarret ovat tosin vaihtuneet yksinkertaisempaan McPherson-tyyliseen jousitukseen 80-luvun lopulla, todennäköisesti tilankäytöllisistä ja kustannussyistä. Uudistetussa rakenteessa ongelmana on pienempi liikesuhde, joka on lähemmäs 1, johtaen huonoon kitka- jousivoima suhteeseen. Rakenne on liikesuhteesta huolimatta silti varsin pehmeä ja omaa matalan ominaisheilahtelutaajuuden. Pelkän jousittamattoman ja jousitetun massan ominaistajuus on reilusti alle 1 Hz, kun yleensä jousitus pyritään suunnittelemaan 1 - 1,4 Hz alueelle. Matala ominaistajuus on mahdollista vain automaattisen korkeudensäädön avulla, muutoin pienetkin kuormanmuutokset aiheuttaisivat jousituksen pohjaanlyönnin. (Bauer 2011, 182 - 183.)

### 7.3 Bose ja lineaarinen sähkömoottori

Tohtori Amar Bose sai 1980-luvulla idean skaalata kaiuttimen sähkömagneettisen yksikön ajoneuvon jousituksessa toimivaan kokoon. Idea juontaa juurensa Tohtori Bose:n kokemuksiin 1957-vuosimallin Pontiac:sta, jonka ilmajousitus oli varsin alkeellinen ja 1967-vuosimallin Citroën:in nähden, jossa oli ikuisesti vuotava hydraulijousitus. Tohtori Bose oli varma, että kaiuttimen magneetin ja sähkömagneettisen käämin, jotka liikuttavat kaiuttimen kartiopintaa, voitaisiin suurentaa paperisen kartion sijaan liikuttamaan ajoneuvon 450 kg painoa jokaisella pyörällä. (Howard 2017.)

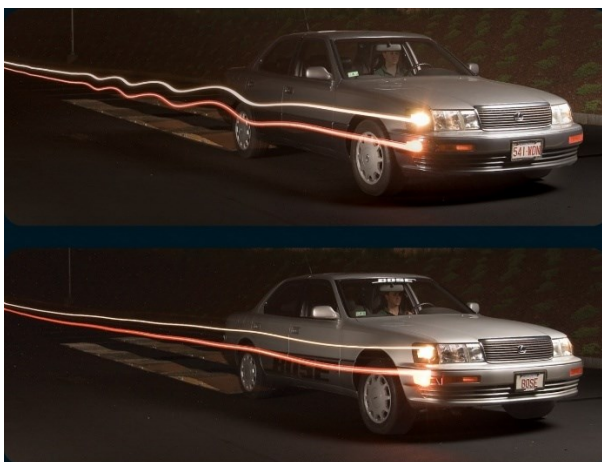
Sähköisellä toteutuksella saavutettaisiin myös nopeat vasteajat, joka mahdollistaa reagoinnin kaikenlaisiin epätasaisuuksiin tiessä. (Heißing & Ersoy 2011, 536.)

Bose korvasi vuosimallin 1994 Lexus LS400-henkilöauton passiivisen joustintukiratkaisun omalla, lineaarimoottori-ratkaisullaan (Kuva 25).



Kuva 25. Bose:n lineaarimoottori asennettuna autoon (Howard 2017).

Toimintaperiaate oli, että ajoneuvon ajaessa kuopan yli, energiaa kuluu moottorin työntäessä pyörää ulospäin. Työnnetty pyörä estää korin nytkähtämisen alaspäin, pitäen sen suorassa. Kuopan ohitettuaan pyörä, seuraten tienpintaa, palautuu takaisin ajokorkeudelle. Palautuksen aikana lineaarimoottoria voidaan käyttää generaattorina, joka palauttaa energiaa takaisin järjestelmään. Generaattorina toimiminen hidastaa pyörän liikettä, ja toimii näin myös vaimentimena. Generaattoritoiminto laskee merkittävästi tehontarvetta, jolloin järjestelmä käyttää alle 1 kW tehoa tavallisella tienpinnalla ajettaessa. Tehontarvetta laskee myös vääntösauva-jouset, jotka kantavat staattiset pyöränkuormat. (Heißing & Ersoy 2011, 535.) Kuva 26 on pitkällä valotusajalla otettu kuva, josta voidaan huomata miten Bose:n jousitus vaikuttaa korin liikkeisiin epätasaisella tienpinnalla ajettaessa.



Kuva 26. Vakiomalli ja Bose:n muokkaama Lexus (Howard 2017).

2004 Bose esitteli prototyyppiään, muokattua Lexus LS400-henkilöautoa. Esittelyssä oli mukana myös vakiomallinen LS400 ja Porsche 911. Autoilla ajettiin jyrkkiin kaarroksiin, etu- ja taka-akselia heiluttaviin epätasaisuuksiin sekä sivu-suunnassa keinuttaviin epätasaisuuksiin. Vakiomallin LS400 suoriutui kohtuullisesti testistä, mutta Bose:n prototyyppi ei korinsa osalta hievahtanutkaan epätasaisilla pinnoilla. Ajoneuvo käyttäytyi kuin huonossa tietokonepelissä jossa ei fysiikkoja tunneta. (Howard 2017).

Bose:n prototyypin esittelyssä vertailukohtana olleen Porschen sivuttainen keinunta oli niin kovaa, että kuljettajan oli pidettävä kypärää välttääkseen tajunnan menetystä, päänsä osuessa sivuikkunaan. Esittelyn loppuhuipennuksena muokattu LS400 hyppäsi ratapölkyn yli (Kuva 27). Ajoneuvo lähestyi pölkkyä vauhdilla, jousitus laskeutui alas ja seuraavaksi työntyi täyteen ulosjoustoon. Ajoneuvo liisi ratapölkyn yli, muutaman sentin sen yläpuolelta. Lopuksi kuski nousi ulos, kumarsi ja painoi nappia, jolloin Lexus kumarsi myös. (Howard 2017)



Kuva 27. Bosen muokkaama Lexus hyppää ratapölkyn yli (Csere 2004).

Csere (2006) kirjoittaa Car and Driver -lehdessä, viitaten kuvaan 27:

*”Tällä teknisellä tempulla ei ole käyttötarkoitusta, mutta se demonstroi perusteellisia eroja aktiivijousituksen ja kehittyneimmän, tietokoneohjatun perinteisen jousituksen välillä.”*

Jotta Bose:n jousitusta olisi mahdollista käyttää tuotantoautoissa, olisi hinnan pitänyt tulla alaspäin kohtuulliseksi kalliimpaan henkilöautoon ja painoa laskea enintään 20 kg painavammaksi kuin valmiit jousitusratkaisut. Bose kävi keskusteluja useiden autovalmistajien kanssa, mutta yhtäkään Bose:n jousituksella varustettua autoa ei tullut markkinoille. (Howard 2017.)

Bose onnistui kuitenkin hyödyntämään kehitystyötään kuorma-autojen istuimissa. Tarkoituksena oli parantaa pitkiä matkoja ajavien kuorma-auton kuljettajien ergonomiaa. Paljon käytetty ilmajousitus on auttanut tässä paljon, mutta selkävaikeuksien kuljettajille sekään ei ole ollut riittävän hyvä taso. Bose:n istuin hyödyntää anturitekniikkaa, joiden tietojen perusteella ohjausyksikkö laskee säädöt istuimelle. Pohjassa on Bose:n jousituksen tapaan sähkömoottori, joka pyrkii kumoamaan tien epätasaisuuksista johtuvaa liikettä. Istuimen lähtöhinta on \$ 3700, mutta suuremmissa tilauksissa hieman halvempi. Bose:n istuinta käyttäville toteutetussa kyselyssä 97 % koki, että Bose:n istuin vähensi huomattavasti epämukavuutta. (Howard 2017.)

Vuonna 2017 Bose myi patenttinsa, algoritminsa ja kuorma-auton istuimensa Amerikkalaiselle ClearMotion -yhtiölle. Uusi omistaja pyrkii hyödyntämään teknologiaa henkilö- että työajoneuvoissa sekä myös itseajavissa autoissa. ClearMotionin toimitusjohtajan mukaan itseajavien autojen matkustajat odottavat tasaista kyytiä, jolloin työskentely tietokoneella ja etenkin kynällä ja paperilla on mahdollista matkan aikana. (Howard 2017.)

#### 7.4 Aktiivijousitusten ongelmat

John C. Dixon (2007, 296) kiteyttää erinomaisesti aktiivisten jousitusten ongelman:

*”Nopea adaptiivinen järjestelmä ei saavuta aktiivisen suorituskykyä, mutta se on paljon halvempi. Tarjoten ehkä 50 % hyödyistä, viidellä prosentilla tai vielä pienemmällä osuudella hinnasta. Siksi adaptiivinen järjestelmä on paljon kustannustehokkaampi. Tämä jättää loput 50 % suorituskyvystä ja*

*95 % hinnasta aktiiviselle järjestelmälle, joka ei siksi ole kovin kustannustehokas.”*

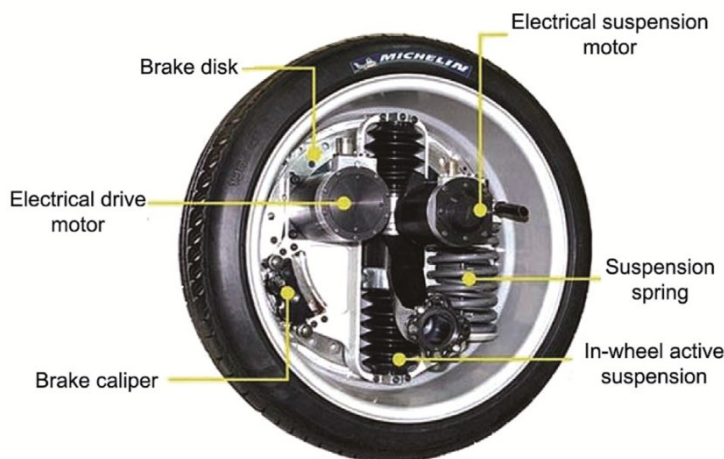
Adaptiiviset järjestelmät ovat siis paljon järkevämpi ratkaisu kustannustehokkuutensa vuoksi, mikäli ei tarvita absoluuttista skyhook- tai groundhook-strategian mukaista ajokäyttäytymistä. Passiivinen vaimennin ei ole paras ratkaisu, koska se on aina kompromissi turvallisuuden ja mukavuuden välillä. Kuitenkin tieliikennekäytössä passiivinen vaimennin on osoittautunut tarpeeksi hyväksi. Kehittyneemmät ratkaisut ovat siten mukava lisävaruste, eivätkä välttämättömyys.

## 8 Muita aktiivijousitusrakenteita

Aktiivijousituksia voidaan toteuttaa muullakin tavalla kuin vain heilahtelunvaimentimella. Seuraavaksi esitellään aktiivijousituksia, jotka eivät perustu heilahteluvaimentimeen tai hydraulisyntereihin.

### 8.1 Moduulimainen pyörä

Pyörään sijoitettuja jousituksia on kehittänyt rengasvalmistajat Michelin, Bridgestone ja Continental (Heißing & Ersoy 2011, 566). Michelin esitteli omaa konseptia jo vuonna 1996 (Kuva 28). Pyörässä on kaksi sähkömoottoria vanteen sisäpuolella. Toinen moottori toimii voimanlähteenä ajoneuvon liikuttamiseen ja toinen toimii aktiivijousituksena. Järjestelmä on kehitetty erityisesti sähköautoille, jolloin pyörään ei tarvitse liittää vetoakselia polttomoottorilta. Michelin keskeytti projektin vuonna 2014 painon, tilankäytön ja hintaan liittyvien ongelmien seurauksena. (Yu ym. 2023, 164.)



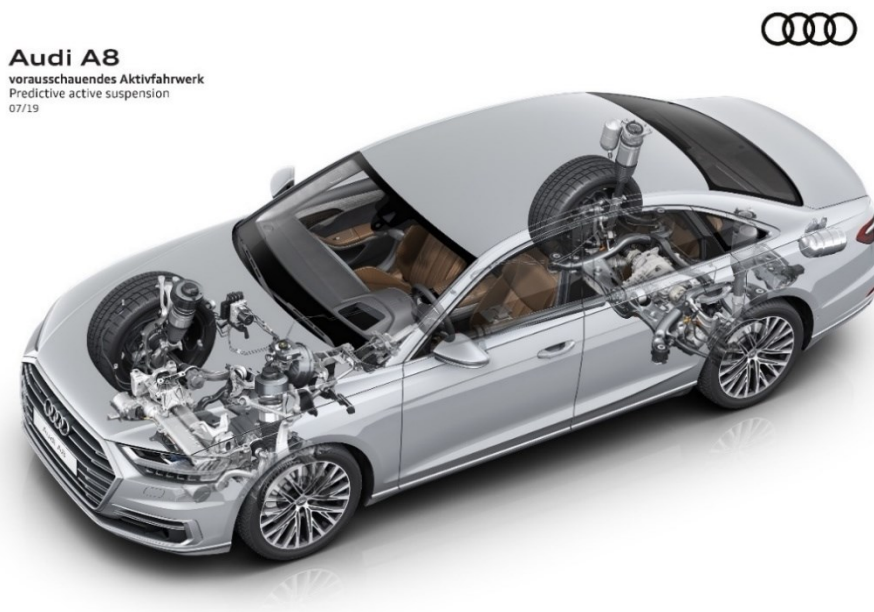
Kuva 28. Michelin-aktiivijousitus pyörässä (Yu ym. 2023, 166).

## 8.2 Aktiivinen kallistuksenvakaaja

Passiivinen kallistuksenvakaaja auttaa vähentämään ajoneuvon kallistelua, mutta ei kykene poistamaan sitä. Aktiivisessa toteutuksessa vakaajaan on yhdistetty hydraulii- tai sähkömoottori, jonka avulla kohdistetaan kallistuksen kumoavia voimia ajoneuvon koriin kaarreajossa. Myös suoraan ajettaessa on hyötyjä, sillä kallistuksenvakaajan eri puolet voidaan erottaa toisistaan, jolloin vain ajoneuvon toisella puolella vaikuttavat epätasaisuudet eivät vaikuta kallistuksenvakaajan välityksellä molemmille puolille. Aktiiviset jousitukset kykenevät tarjoamaan myös kallistuksenvakaajan toimintoja, jolloin aktiivista kallistuksenvakausta ja -jousitusta harvemmin käytetään samassa ajoneuvossa. (Heißing & Ersoy 2011, 501, 520.)

Ensimmäisiä sarjautotantoisia aktiivisia kallistuksenvakaajia tuli markkinoille 2002 BMW:n henkilöautoissa Dynamic Drive -nimellä. Nykyään on useita erilaisia järjestelmiä saatavilla, monessa tuotantoautossakin. Dynamic Drive:n lisäksi esimerkiksi Delphi:n Active Cornering Enhancement (ACE), TRW:n Active Suspension Control System (ASCS) ja Citroen:n Active Chassis Stabilization (ACS). (Heißing & Ersoy 2011, 520 - 523.)

Audin Predictive Active Suspension (Kuva 29) eli ennakoiva aktiivinen jousitus on täysin aktiivinen ja elektromekaanisesti toimiva jousitus.



Kuva 29. Audi A8 Predictive Active Suspension (Audi AG 2017).

Järjestelmä säätää jokaiselle pyörälle kohdistuvaa painoa itsenäisesti ajopinnan mukaan ja näin hallinnoi korin liikettä kaikissa ajotilanteissa. Jokaisella pyörällä on yksi sähkömoottori, joka saa virtansa ajoneuvon 48 voltin sähköjärjestelmästä. Jousitus saa ohjaussignaaleja viiden millisekunnin välein, jotka akselikohtainen ohjausyksikkö muuntaa signaalit moottoreiden liikkeeksi. Moottorit tuottavat hihna- ja rataspyörästön välityksellä 1,100 Nm vääntöä kallistuksenvakaajalle, jota voidaan taivuttaa yli 20 astetta. Kallistuksenvakaajalta vääntövoima siirretään vipuvarrella pyöräntuentaan. Kuljettajalla on valittavissa dynaaminen tai comfort-ajotila, joiden perusteella jousitus vaihtaa käyttäytymistään. Dynaamisessa tilassa ajoneuvo on urheilullisempi. Comfort-tilassa liikkeet ovat pehmeämpiä ja jousituksen tehontarve pienempi. Keskimäärin jousitus kuluttaa 10 - 200 W tehoa. (Audi AG 2017.)

Aktiivijousituksen yhteydessä toimii turvajärjestelmä, joka valvoo auton ympäristöä. Mikäli järjestelmä havaitsee yli 25 km/h nopeudella lähestyvän kappaleen ajoneuvon sivussa, nostavat sähkömoottorit auton sivua 80 mm puolella sekunnissa, kohdistuen iskun enemmän ajoneuvon helmakoteloon, joka on vahvempi korirakenne kuin ovet. Audin mukaan tämä vähentää matkustajiin kohdistuvaa kuormitusta 50 prosenttia. Audi nimittää tätä järjestelmää ”Audi Pre Sense 360° Safety System” :ksi. (Audi AG 2017.)

### 8.3 Aktiiviset tukivarret - ASCA

Saksalainen ZF Lemförder kehittää ASCA-nimeä kantavaa aktiivista tukivarsijärjestelmää. ASCA on lyhenne sanoista Active Suspension via Control Arm. Järjestelmässä keskeisenä toimilaitteena on pyörän tukivarren korinpuoleiseen kiinnityspisteeseen sijoitettu hydraulitoiminen moottori. Ideana on integroida korin vakauttavia sekä ajomukavuutta parantavat ominaisuudet yhdeksi järjestelmäksi. ASCA pyrkii yhdistämään parhaita puolia muista järjestelmistä kuten BMW:n Dynamic Drive, Daimler ABC ja ZF Sachs CDC. (Heißing & Ersoy 2011, 521, 536.)

Useamman toiminnon integrointi mahdollistaa järjestelmän käyttämisen ilman erillistä passiivista heilahtelunvaimenninta tai kallistuksenvakaajaa. Näin saman akselin pyörien liikkeet eivät ole toisistaan riippuvaisia, jolloin pyörät voivat vapasti liikkua eri suuntiin. Tämä parantaa ajomukavuutta ja vähentää korin kallistelua. Passiivinen kallistuksenvakaaja kytkisi saman akselin pyöräntuennat toisiinsa, jolloin toisen pyörän nouseminen aiheuttaisi nostavia voimia myös toiselle puolelle. (Heißing & Ersoy 2011, 537.)

Usean toimilaitteen yhdistäminen vähentää jousituksen kokonaispainoa ja tilantarvetta. Valitettavasti järjestelmän ollessa aktiivinen, se tarvitsee lisälaitteita jotka kuluttavat energiaa ja tuovat painoa takaisin.

Yksittäinen ohjausyksikkö hallinnoi korin liikettä kolmella vapausasteella (korin kierto pitkittäis- sekä sivusuunnassa ja pystysuuntainen liike) ja lisäksi

sopeuttaa jokaisen pyörän heilahtelunvaimennusta. ASCA-järjestelmä optimoi ajomukavuutta pienellä vaimennuskertoimella ja jousen jäykkyydellä. Järjestelmä voi käyttää vaimentimia passiivisesti tai aktiivisesti. Tässäkin järjestelmässä passiivinen jousi kantaa staattisen pyöräkuorman, jolloin aktiivisesti ei tarvitse kumota kuin ajon aikana ilmenneitä voimia. Näin järjestelmän energiantarvetta on madallettu. Suurin energiankulutus on 1,2 kW pyörää kohden. Järjestelmä vaimentaa pyörän heilahteluja 30 Hz asti ja korin 5 Hz asti. (Heißing & Ersoy 2011, 537.)

Korin heilahteluja vaimennettaessa pumpussa sijaitsevaa ohjausläppää käännetään 2 mm vasemmalle tai oikealle riippuen halutusta virtaussuunnasta. Tämä mahdollistaa moottorin jatkuvan pyörittämisen yhteen suuntaan ilman pysäytyksiä. Myös pumpun pyörintänopeutta käytetään heilahtelunvaimennuksen säätämiseen. (Heißing & Ersoy 2011, 537.)

## 9 Lopuksi

Aktiivisten järjestelmien monimutkaisuudesta ja suuresta energiantarpeesta johtuen ne tulevat olemaan todennäköisesti vielä pitkään vain kalliimpien automallien vakio- tai lisävaruste. Suorituskyky on tästä huolimatta ensiluokkaista.

Adaptiivisista järjestelmistä puuttuu voimien tuottamisen mahdollisuus. Ne voivat siis enintään tarjota puolet aktiivisen jousituksen ominaisuuksista. Tosin, tämän ansiosta adaptiiviset järjestelmät ovat paljon kustannustehokkaampia, sillä kustannukset ovat merkittävästi pienemmät suhteessa menetettyyn suorituskykyyn. Siksi adaptiivisia järjestelmiä nähdään nyt ja tulevaisuudessa enemmän kuin täysin aktiivisia järjestelmiä.

Passiivisten vaimentimien ominaisuudet ovat aina kompromissi, sillä niiden vaimennussuhde on suunnilleen vakio. Vaimennin joudutaan siis mitoittamaan tarpeeksi hyväksi useisiin tilanteisiin, jotka vaatisivat erilaisia vaimennusvoimia. Passiiviset järjestelmät, vaikka eivät suorituskyvyltään olekkaan kovin ihmeellisiä, tarjoavat ne silti riittävän toimintakyvyn tavalliseen tieliikennekäyttöön. Pienet tuotantokustannukset, sekä vuosikymmeniä viilatut tuotantomenetelmät pitävät passiiviset järjestelmät suosiossa valtaosassa ajoneuvoja.

Adaptiivisten ja aktiivisten järjestelmien keskeinen ongelma on, että ne tarvitsevat energiaa toimiakseen, ja tämä energia on jostain otettava. Ajoneuvoissa ainoa energian lähde on ajoneuvon voimanlähde, joka joutuu tekemään työtä tuottaakseen ylimääräisen laitteen tarvitseman energian. Näin on, vaikka voimanlähteenä olisi polttomoottori, akusto tai molemmat. Tämä vähentää taloudellisuutta, mikä on tärkeä asia etenkin Euroopan markkinoilla.

Sähkömoottorit vaikuttavat hyvin lupaavilta aktiivijousituksen toteutustavaksi, kuten Audin käyttämä aktiivinen kallistuksenvakaaja on osoittanut.

Sähkömoottori ei tarvitse pumppuja tai korkeapaineisia hydraulilinjoja. Lisäksi se on helposti yhdistettävissä sähköautoihin, jotka ovat kovaa vauhtia yleistymässä. Sähkömoottoreita voidaan käyttää myös generaattoreina, jolloin jousituksen energiantarvetta voidaan madaltaa.

ASCA -järjestelmässä ja samantapaisissa järjestelmissä aktiiviset korinpuoleiset kiinnikkeet mahdollistaisivat eri toimilaitteiden yhdistämisen osaksi tukivarsia.

Tämä vähentää jousituksen kokoa sekä painoa ja helpottaisi asennusta. Tämä voisi hyvinkin olla tulevaisuuden kehityssuunta, etenkin pienemmissä ja halvemmissä autoissa, joissa tilankäyttö ja osakokonaisuuksien hinta on hyvin tarkkaa.

## Lähteet

Ahtiainen, L. 2018. MagneRide - näin toimii magneettinen iskunvaimennin. Viitattu 24.2.2025. <https://moottori.fi/uutinen/magneride-nain-toimii-magneettinen-iskunvaimennin/>.

Audi AG 2011. Audi Magnetic Ride. Viitattu 29.5.2025. [https://www.audi-technology-portal.de/en/chassis/suspension-control-systems/audi-magnetic-ride\\_en](https://www.audi-technology-portal.de/en/chassis/suspension-control-systems/audi-magnetic-ride_en).

Audi AG 2017. Chassis. Viitattu 29.5.2025. <https://www.audi-mediacycenter.com/en/audi-technology-lexicon-7180/chassis-7185>.

Audi AG 2025. Chassis. Viitattu 26.6.2025. <https://www.audi-mediacycenter.com/en/chassis-15506>.

Bauer, W. 2011. Hydropneumatic Suspension Systems. Heidelberg: Springer.

BXClub 2006. Citroen C5 Hydractive 3. Viitattu 28.5.2025.

<http://devel.bxclub.cz/articles/c5-technical-info/hydractive/citroen-c5-hydractive-3>.

Csere, C. 2004. A Surprising New Active Suspension. Viitattu 6.5.2025. <https://www.caranddriver.com/features/a15132223/a-surprising-new-active-suspension/>.

Dixon, J. 2007. The Shock Absorber Handbook. 2., painos. Chippenham: Professional Engineering Publishing Ltd & John Wiley and Sons, Ltd.

Gill, J. 2006. A picture of a traditional leaf spring. Wikimedia Commons. Viitattu 30.6.2025. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leafs1.jpg>.

GM Authority 2025. General Motors Magnetic Ride Control Technology. Viitattu 4.4.2025. <https://gmauthority.com/blog/gm/general-motors-technology/gm-chassis-suspension-technology/gm-magnetic-ride-control-technology/>.

Guillaume, G. 2015. Peugeot scraps DS-era hydraulics in cost-cutting drive. Viitattu 23.6.2025. <https://www.reuters.com/article/business/peugeot-scraps-ds-era-hydraulics-in-cost-cutting-drive-idUSL5N0YQ27T/>.

Heißing, B. & Ersoy, M. 2011. Chassis Handbook – Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. 1., painos. Berliini: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Howard, B. 2017. Bose Sells Off Its Revolutionart Electromagnetic Suspension. Viitattu 5.5.2025. <https://www.extremetech.com/cars/259042-bose-sells-off-revolutionary-electromagnetic-suspension>.

Jacobson, B. 2020. Vehicle Dynamics, Compendium for course MMF062. Göteborg: Chalmers University of Technology. Viitattu 1.5.2025. <https://research.chalmers.se/en/publication/520229>.

Mercedes-Benz AG 2006. Active Body Control: New Mercedes coupé comes with the very best chassis technology as standard. Viitattu 24.6.2025. <https://media.mercedes-benz.com/article/156c3727-480c-4563-9b7b-2e18c6e8d155>.

Mercedes-Benz AG 2019. Mercedes-Benz CL of the C 215 model series: Luxurious sportiness in top form. Viitattu 24.6.2025. <https://media.mercedes-benz.com/article/7ea1f66f-ee80-46b9-80c0-811bd4894a51>.

Mercedes-Benz AG 2024. 25 years of Mercedes-Benz CL: innovation leader with ABC. Viitattu 24.6.2025. <https://media.mercedes-benz.com/article/f56b86bf-4749-4cee-a5d5-142f5e658e65>.

Robert Bosch GmbH 2022. Automotive Handbook. 11. painos. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.

Tieteen termipankki 2025. Geologia: reologia. Viitattu 30.5.2025. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Geologia:reologia>.

Yu, M.; Evangelou, S. & Dini, D. 2023. Advances in Active Suspension Systems for Road Vehicles. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809923003983>.

ZF Friedrichshalfen AG 2024. SACHS CDC dampers. Viitattu 23.6.2025. [https://press.zf.com/press/en/media/media\\_67712.html](https://press.zf.com/press/en/media/media_67712.html).