



Traktorin ja työkoneiden jarrut

Jukka Ahokas

Sisällys

1	Perusteet	3
1.1	Kitka	3
1.2	Hidastuvuus	4
1.3	Jarrutussuhde	6
1.4	Traktorin teoreettinen hidastuvuus	6
1.5	Traktori ja hinattava työkone	7
1.6	Stabiilisuus	7
1.7	Jarrutus käytännössä	7
1.7.1	Jarruviive	7
2	Jarruvaatimukset	10
2.1	Ajoneuvoluokat	10
2.2	EU jarruvaatimukset	10
2.3	Tieliikennelainsäädäntö	11
3	Jarrurakenteet	13
3.1	Rumpujarrut	13
3.2	Levyjarrut	14
3.3	Traktorin jarrut	14
3.4	ABS jarrut	14
3.5	Työkoneen tai perävaunun jarrut	15
3.5.1	Yksijohtoinen hydraulijarru	16
3.5.2	Kaksijohtoinen hydraulijarru	16
3.5.3	Elektronisesti ohjattu hydraulinen jarru	17
3.5.4	Kaksijohtoinen pneumaattinen jarru	17

Johdanto

Traktoreiden, hinattavien työkoneiden ja perävaunujen koot ovat kasvaneet ja samanaikaisesti ajonopeudet ovat lisääntyneet. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että tarvitaan tehokkaampia jarruja, jotta ajoneuvo saadaan pysäytettyä. Nopeuden lisääntyminen tuo mukanaan myös hallittavuusongelmia, epäsuhteiset jarrut aiheuttavat ajoneuvon hallinnan menettämisen, jolloin sitä ei pystytä enää ohjaamaan.

Traktoreiden, hinattavien työkoneiden ja perävaunujen säädöksiä on tämän takia tarkennettu, jotta turvallisuus säilyisi. Ongelmana on kaluston hidas uusiutuminen ja kestää aikansa ennenkuin kaikki laitteet ovat uusien säädösten mukaisia.

Kirjoituksessa on esitetty myös miten eri jarrutusyhtälöt on muodostettu. Osalle lukijoista voi riittää vain pelkät yhtälöt. Jarrutustapahtuma on dynaaminen eli liikkeessä tapahtuvaa. Tällöin mukaan tulee hitaus- ja kiihtyvyysoimat. Se aiheuttaa tarkkuutta oikeisiin fysikaalisiin termeihin ja yksiköihin. Staattisia eli paikallaan olevia tilanteita voidaan tarkastella joko painon (kg) tai voiman (N) yksiköiden avulla. Dynaamisissa systeemeissä massan hitausvoimat ovat aina yksiköltään Newtonia. Tällöin myös muutkin yhtälöiden voimat on oltava samoissa yksiköissä.

Luku 1

Perusteet

Taulukko 1.1: Tiepintojen tyypillisiä kitkakertoimia

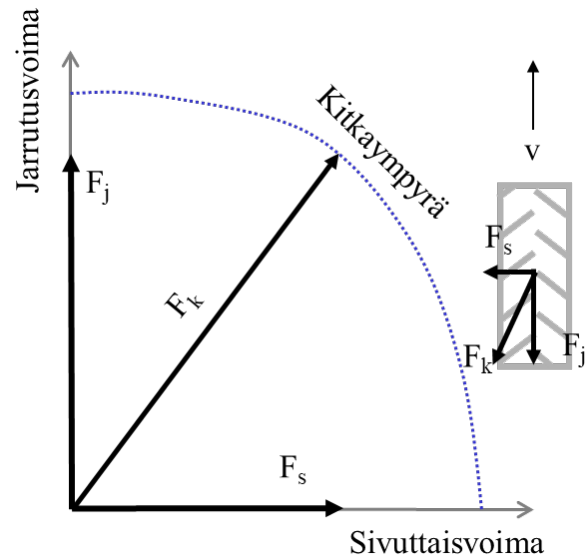
Pinta	Kitkakerroin
Kestopäälystetie	0,8 - 0,9
Soratie	0,5 - 0,6
Jäinen tie	0,1 - 0,3
Jäinen tie ja ketjut renkaissa	0,5

1.1 Kitka

Renkaan ja tien välillä vaikuttavan kitkavoiman voidaan ajatella muodostuvan kolmesta komponentista, alustan ja renkaan välisestä kiinnevoimasta (adheesio), renkaan muodonmuutoksista ja alustan muodonmuutoksista. Kiinnevoima perustuu renkaan ja alustan väliin sidoksiin, joita muodostuu jatkuvasti, kun kumia painetaan tien pintaa vasten. Renkaassa tapahtuu muodonmuutoksia (joustoa) kuorman ja alustan vaikutuksesta. Jos liikutaan pehmeällä alustalla, silloin traktorin renkaiden rivat tunkeutuvat alustaan ja aiheuttavat maan muodonmuutoksia.

Jarrutuksessa kitkavoiman (pidon) suuruus riippuu oleellisesti normaalivoimasta, jolla rengasta puristetaan tietä vasten. Kitkavoima lasketaan perinteisesti normaalivoiman ja kitkakertoimen tulona. Kitkakerroin on ominainen tietylle renkaalle tietyllä tienpinnalla ja riippuu lisäksi ainakin renkaan lämpötilasta ja luistosta. Renkaan ominaisuuksiin vaikuttaa paljon sen kumilaatu. Pehmeä kumi painuu paremmin tienpinnan epätasaisuuksien väliin, mikä lisää kitkaa, mutta myös renkaan kulumista.

Taulukossa 1.1 on tyypillisiä traktorirenkaiden kitkakertoimia erilaisilla alustoilla. Näistä on huomattava, että niihin vaikuttaa hyvin voimakkaasti rengastyypin. Henkilöautojen renkaiden suunnittelu lähtee hyvästä pidosta ja niissä kitkakerroin on asfaltilla 0,9 - 1,0 luokkaa. Traktoreiden renkaiden jarrutuspidot ovat asfaltilla selvästi huonompia kuin auton renkaiden pidot. Tämä johtuu suurelta osin renkaiden rivoista, jolloin kosketuspinta alustaan on pieni. Nelipyöräjarrutuksessa traktoreiden hidastuvuudet ovat 5- 6 m/s² luokkaa ja takapyöräjarrutuksessa 3 - 4 m/s². Tästä laskettu jarrutuksen kitkakerroin on luokkaa 0,6 - 0,8. Nämä hidastuvuudet on mitattu koko jarrutustapahtuman ajalta, jossa on mukana jarrutuksen aloittamiseen ja loppumiseen kuuluvia aikoja. Pelkän jarrutuksen aikainen kitkakerroin on siten hieman näitä arvoja suurem-

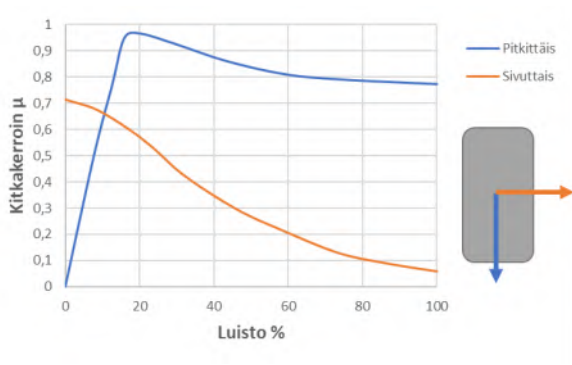


Kuva 1.1: Kitkaympyrä

pi. Traktoreiden palarenkailla on parempi kosketus kovaan alustaan ja niillä on saatu riparenkaita parempia jarrutuspittoja [Knaapi J a].

Kun tarkastellaan jarruttavaa rengasta kuvan 1.1 mukaisesti, renkaaseen vaikuttaa jarrutusvoima F_j ja sen lisäksi siihen kohdistuu sivuttaisvoima F_s , joka pitää renkaan suunnassa. Jarrutuksessa vaikuttavia kitkavoimia kuvataan kitkaympyrän avulla. Sen perusajatus on, että kitkalla on tietty suurin arvo, joka noudattaa ympyrää. Renkaan kokonaiskitkavoima jakaantuu kahteen kitkavoimaan, jarrutuskitkaan ja sivuttaisikiitkaan. Kuvassa kokonaiskitkavoima F_k jakaantuu kahteen komponenttiin, jarrutusvoimaan F_j ja sivuttaisvoimaan F_s . Jos kyseessä on lukkojarrutus, silloin koko kitka käytetään jarrutukseen ja renkaan sivuttaispidolle ei jää enään kitkaa. Tämän takia esimerkiksi renkaan lukkiutuminen jäisellä tiellä johtaa helposti sivuttaisluistoon. Todellisuudessa kitkaympyrä ei ole pyöreä, koska renkaan pito-ominaisuudet ajo- ja sivuttaisluistoon ovat erilaiset. Myöskin renkaan luisto vaikuttaa kitkaan ja senkin takia ympyrä ei ole täysin pyöreä.

Renkaan ja maan välinen kitkakerroin riippuu pyörien luistosta jarrutuksessa. Vetävään pyörään verrattuna tämä luisto on oikeastaan negatiivista luistoa eli



Kuva 1.2: Pyörän kitkakerroin jarrutuksessa luiston funktiona

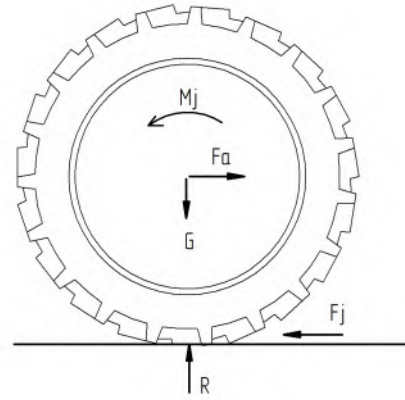
pyörän kehänopeus on ajonopeutta alhaisempi. Kuvassa 1.2 on esimerkki pyörän kitkakertoimista eri jarrutusvoimakkuuksilla (luistoilla) asfaltilla. Paras pitkittäispito saadaan tässä tapauksessa n 15% jarrutusluistolla ja kun pyörä on täysin lukossa (luisto 100 %), pitkittäispito on hieman alentunut, mutta sivuttaispito on lähes kokonaan loppunut. Tällöin on vaarassa ajoneuvon sivuluisto. Kuvasta 1.2 voidaan myös pohdita, mikä on kyseisen alustan ja renkaan kitkakerroin. Onko se suurin arvo 15% luistolla vai lukkojarrutuksen arvo 100% luistolla?

1.2 Hidastuvuus

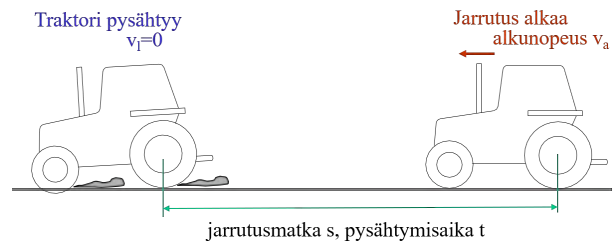
Kuvassa 1.3 on esitetty jarruttavaan renkaaseen vaikuttavat voimat. F_a on massan hitaudesta johtuva hitausvoima. F_j on renkaan ja maan välinen jarrutusvoima, G on rengaspaino ja R on vastaavasti alustan tukivoima. Kun jarruja käytetään, pyörän pyöriminen hidastuu tai pysähtyy jarrurummuissa tai -levyissä vaikuttavan jarrutusmomentin M_j ansiosta. Jarrutusvoima F_j riippuu sekä jarrujen jarrutusmomentista että alustan pitävyydestä. Jos jarrutusmomentti on riittävän suuri, aikaansaadaan lukkojarrutus. Jos jarrutusmomentti ei ole riittävä, pyörän pyörintä vain hidastuu. Jäisellä tiellä renkaan pito on huono ja lukkojarrutus aikaansaadaan pienelläkin jarrumomentilla. Pitävällä alustalla etenkin raskaasti kuormattujen traktoreiden tai perävaunujen jarrumomentti ei aina riitä lukkojarrutukseen. Jarrutusvoima saadaan maan ja renkaan välisen kitkan avulla, jolloin $F_j = \mu R = \mu G$. Vastaavasti $F_a = ma$ ja $G = mg$. Tässä m on jarrutettava massa ja g on maan vetovoiman kiihtyvyys (9,81 m/s²). Muodostamalla ajosuunnassa voimatasapainon saadaan, $F_j = F_a \Rightarrow \mu G = ma$ ja ratkaisemalla hidastuvuus a saadaan yhtälö 1.1.

$$a = \mu g \tag{1.1}$$

Suurin mahdollinen hidastuvuus riippuu siten renkaan ja alustan välisestä kitkasta. Jos kitkakerroin on luokkaa 1, suurin mahdollinen hidastuvuus on silloin maan vetovoiman kiihtyvyys g . Liukkaalla jäällä kitkakerroin on luokkaa 0,1 - 0,3 ja vastaavasti hidastuvuus on silloin 1 - 3 m/s².



Kuva 1.3: Renkaan voimat jarrutettaessa



Kuva 1.4: Jarrutus

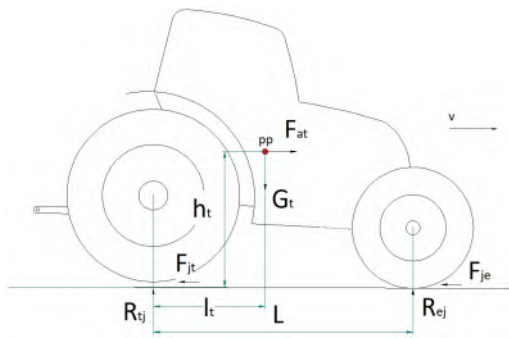
Kuvassa 1.4 on esitetty jarrutukseen liittyviä termejä. Kuvassa traktori pysähtyy lopuksi, mutta jarrutus voi olla myös vain nopeuden alentamista.

Jarrut aikaansaavat traktorin nopeuden hidastumisen. Hidastuvuus ilmaistaan kiihtyvyyden avulla, ja kun jarruista on kysymys, hidastuvuus on negatiivista kiihtyvyyttä. Hidastuvuuden yksikkö on m/s². Tämä voitaisiin ajoneuvokäytössä pukea myös muotoon km/h/s eli kuinka monta km/h vauhti hidastuu sekunnin aikana. Kun nopeus vähenee nopeudesta v_a nopeuteen v_l , hidastuvuus saadaan yhtälön 1.2 avulla. Jos jarrutus loppuu pysähdykseen, loppunopeus v_l on nolla.

$$a = \frac{v_a - v_l}{t} \tag{1.2}$$

a	hidastuvuus
v_a	alkunopeus
v_l	loppunopeus
t	jarrutusaika

Laskuissa joudutaan usein muuttamaan nopeuden yksikköä. Nopeus 1 km/h on 1000 m 3600s aikana. Tunnessa on 3600s ja 1 km on 1000 m. Tästä päästään nopeusmuunnokseen, yksikössä km/h oleva nopeus jaetaan luvulla 3,6 niin saadaan nopeus m/s yksikönä.



Kuva 1.5: Jarrutuksen voimat

Esimerkki. Traktorin alkunopeus on 40 km/h ja se pysäytetään jarruilla 5 s aikana. Mikä on hidastuvuus?

Hidastuvuus on, $a = \frac{40-0}{5} = 8$ km/h/s eli nopeus hidastuu 8 km/h jokaisen sekunnin aikana. Kun käytetään nopeuden yksikkönä m/s, 40 km/h on $\frac{40}{3,6} = 11,1$ m/s ja hidastuvuus on $2,2$ m²/s.

Hidastuvuus voidaan määrittää myös jarrutusmatkan avulla ja silloin saadaan, kun alkunopeus on v_a ja pysähtymismatka on s , yhtälö 1.3.

$$a = \frac{v_a^2}{2s} \tag{1.3}$$

Toisaalta, jos hidastuvuus ja alkunopeus on tiedossa, pysähtymismatka s saadaan ratkaisemalla se yhtälöstä 1.3, yhtälö 1.4.

$$s = \frac{v_a^2}{2a} \tag{1.4}$$

Esimerkki. Traktori alkunopeus on 40 km/h ja jarrutusmatka on 30 m. Mikä on traktorin hidastuvuus?

Muutetaan alkunopeus yksikköön m/s, $v_a = \frac{40000m}{3600s} = 11,1$ m/s. $a = \frac{11,1^2}{2 \cdot 30} = 2,1$ m/s² = 7,6 km/h/s.

Keskinopeus jarrutuksen aikana on $v_{ka} = \frac{v_a}{2s} = \frac{s}{t}$. Ratkaistaan tuosta jarrutusaika t , jolloin saadaan yhtälö 1.5

$$t = \frac{2s}{v_a} \tag{1.5}$$

Esimerkki. Traktorin alkunopeus on 40 km/h ja jarrutusmatka on 30m. Kuinka nopeasti traktori pysähtyy?

$t = \frac{2 \cdot 30}{11,1} = 5,4$ s.

Jarrutettaessa hidastuvuus aiheuttaa hitausvoiman F_{at} , kuva 1.5. Tämän takia etuakselikuorma kasvaa ja taka-akselikuorma pienenee. Painopisteen etäisyys

taka-akselista voidaan laskea traktorin etu- ja taka-akselipainoista, $l_t = \frac{R_e}{G}L$, jossa R_e on traktorin akselipaino sen ollessa paikallaan, G on traktorin paino ja L on akseliväli. Painopisteen korkeustietoa ei yleensä ole saatavilla. Se on normaalisti keskikokoisilla traktoreilla n 1 m korkeudella maasta. Isommissa traktoreissa vähän korkeammalla kuin pienissä traktoreissa. Pystyvoimien summa on $\sum F_y = R_{ej} + R_{tj} - G_t = 0$. Muodostetaan momenttiyhtälö takarenaan ja maan kosketuspisteen kohdalle $M = -G_t l_t - F_{at} h_t + R_{ej} L = 0$. Ratkaistaan momenttiyhtälöstä etuakselikuorma jarrutuksen aikana ja sen jälkeen ratkaistaa voimayhtälöstä taka-akselikuorma. Näistä saadaan yhtälöt 1.6. Yhtälöissä on sekä traktorin paino että massa. Tässä paino G_t saadaan kertomalla massa m maan vetovoiman kiihtyvyydellä g (9,81 m/s²).

$$R_{ej} = \frac{G_t l_t + F_{at} h_t}{L} = \frac{G_t l_t + m a h_t}{L} \tag{1.6}$$

$$R_{tj} = G_t - R_{ej} \tag{1.7}$$

R_{ej}	Etuakselikuorma jarrutettaessa
R_{tj}	Taka-akselikuorma jarrutettaessa
G_t	Traktorin paino
l_t	Painopisteen etäisyys taka-akselista
L	Akseliväli
h_t	Painopisteen korkeus
m	Traktorin massa

Esimerkki. Leikkupuimurin etuakselipaino on 70% kokonaispainosta 6400 kg ja puimurin painopiste on 1,6 m korkeudella maasta ja akseliväli on 2,6 m. Jarrutettaessa hidastuvuus on 3,2 m/s². Miten akselikuormat muuttuvat?

Puimurin etuakselipaino on 4480 kg ja taka-akselipaino 1920 kg. Painopiste on $l_t = 0,7 \cdot 2,6 = 1,82$ m. Etuakselikuorma jarrutettaessa on $R_{ej} = \frac{6400 \cdot 9,81 \cdot 1,82 + 6400 \cdot 3,2 \cdot 1,6}{2,6} = 56\ 552$ N. Tämä vastaa painona $\frac{56552}{9,81} = 5765$ kg. Alkuperäinen etuakselipaino oli 4480 eli etuakselille tuli 1285 kg lisäpainoa ja taka-akselille jäi 635 kg paino.

Jarrutuksessa kuluva energia E , kun jarrutetaan pysähdyksiin saakka saadaan ajoneuvon alkuperäisestä liike-energiasta (alkunopeus v_a), joka jarrutettaessa kulutetaan kokonaan, yhtälö 1.8.

$$E = \frac{m v_a^2}{2} \tag{1.8}$$

Esimerkki. Traktorin, jonka massa on 6200 kg nopeus alenee tasaisesti alkunopeudesta 50 km/h pysähdyksiin. Mikä on jarrutusenergia?

$$E = \frac{6200 \cdot (\frac{50}{3,6})^2}{2} = 598$$
 kWh

Jarrutuksen aikainen hetkellinen teho saadaan hidastuvuuden a , ajoneuvon massan m ja pysähtymismatkan s avulla. Jos tarakastellaan hetkellistä tilannetta, hidastuvuudesta johtuva voima $F_{at} = ma$ ja teho on

$P = F_{at}v$, jolloin sijoittamalla saadaan hetkelliseksi jarrutustehoksi $P = mav$.

Esimerkki. Traktorin, jonka massa on 6200 kg hidastuvuus on 4 m/s^2 . Alkunopeus on 40 km/h ja loppunopeus 0 km/h. Mikä on hetkellinen jarrutus-teho?

Jarrutuksen alussa $P = 6200 \cdot 4 \frac{40}{3,6} = 276 \text{ kW}$. Lo-pussa nopeus on nolla eli myös teho on nolla.

1.3 Jarrutussuhde

Ajoneuvolainsäädännössä jarrujen suorituskyky ilmaistaan jarrutussuhteella (braking efficiency) z , joka saadaan kun akselin tai ajoneuvon jarrutusvoima F_j jaetaan sen painolla R , yhtälö 1.9. Lainsäädännössä usein vaaditaan jarruilta tiettyä jarrutussuhdetta. Silloin jarrutusvoimaa verrataan suurimpaan valmistajan ilmoittamaan akseli- tai kokonaispainoon.

$$z = \frac{F_j}{R} \quad (1.9)$$

Jos yhtälöön sijoitetaan jarruvoiman arvo $F_j = \mu R$, saadaan, että $z = \mu$. Suurin mahdollinen jarrutussuhde on siten kitkakertoimen suuruinen. Jos jarrutussuhde jää alle kitkakertoimen, silloin jarrut ovat alitehoiset, niiden aikaansaama jarrutusmomentti ei pysty lukitsemaan pyöriä.

EU:n jarrudirektiivin mukaan [EU 2015/68], jos hinnattavassa työkonessa tai perävaunussa on jarrut, jarrutussuhteen on oltava vähintään 35%, kun ajonopeus on enintään 30 km/h ja 50%, kun ajonopeus on yli 30 km/h.

Esimerkki. Yksiakselisen perävaunun suurin akselipaino on 12 tn. Renkaiden halkaisija on 80 cm ja jarrurummun halkaisija on 25 cm. Perävaunun suurin sallittu ajonopeus on 40 km/h. Kuinka suuri voima jarruissa tarvitaan?

Perävaunulta vaaditaan 50% jarrutussuhde, jolloin vaasittu jarrutusvoima on $F_j = 0,5 \cdot 12 = 6 \text{ tn}$. Renkaan säde on 40 cm, jolloin jarrutukseen tarvitaan $M = 6000 \cdot 9,81 \cdot 0,4 = 23,5 \text{ kNm}$ jarrutusmomentti. Jarrujen kitkapintojen pitää aikaansaada $F = \frac{23,5}{0,125} = 188 \text{ kN}$ eli 19 tn suuruinen kitkavoima. Tämä jakaantuu akseliston jarrumäärän kesken. Telivaunussa on neljä pyörää ja jarrua, jolloin yhden jarrun on aikaansaattava lähes 5 000 kg jarrutusvoima.

1.4 Traktorin teoreettinen hidastuvuus

Kuvassa on 1.5 on esitetty pelkkään traktoriin vaikuttavat voimat jarrutettaessa ja kun traktorissa on nelipyöräjarrut. Jarruvoimat F_{je} ja F_{jt} aikaansaavat hidastuvuuden a ja se aiheuttaa traktoriin hitausvoiman F_{at} . Kun tarkastellaan tilannetta pystysuunnassa, traktorin

paino jakaantuu kahdelle akselilla eli $G_t = R_{ej} + R_{tj}$. Ajosuunnassa saadaan vastaavasti, että hitausvoima on akseleiden jarruvoimien summa, $F_{at} = F_{je} + F_{jt}$, jossa $F_{at} = ma$, $F_{je} = \mu_e R_{ej}$ ja $F_{jt} = \mu_t R_{tj}$. Sijoitetaan ajosuunnan yhtälöön jarruvoimien ja hidastuvuusvoiman yhtälöt, jolloin saadaan $ma = \mu_e R_{ej} + \mu_t R_{tj}$. Tästä ratkaistaan hidastuvuus a ja saadaan $a = \frac{\mu_e R_{ej} + \mu_t R_{tj}}{m}$. Jos oletetaan, että etu- ja takarenkaiden kitkakertoimet ovat yhtäsuuret, saadaan $a = \mu \frac{R_{ej} + R_{tj}}{m}$. Kun otetaan huomioon akselipainojen summa on traktorin paino, saadaan nelipyöräjarrutuksessa hidastuvuudelle yhtälö 1.10. Hidastuvuus riippuu siten vain kitkakertoimesta ja maan vetovoiman kiihtyvyydestä g .

$$a = \mu g \quad (1.10)$$

Esimerkki. Traktorissa on nelipyöräjarrut. Kuinka pitkä on jarrutusmatka, jos alkunopeus on 40 km/h ja tie on jäinen ja sen kitkakerroin on 0,3?

Hidastuvuus on $a = 0,3 \cdot 9,81 = 2,9 \text{ m/s}^2$. Ratkaistaan yhtälöstä 1.4 jarrutusmatka $s = \frac{v_a^2}{2a} = \frac{(\frac{40}{3,6})^2}{2 \cdot 2,9} = 21 \text{ m}$.

Jos traktorissa on vain takapyöräjarrut, hidastuvuus saadaan yhdeltä akselilta ja etuakselilla oleva akselipaino ei ota osaa jarrutukseen. Lisäksi jarrutus siirtää painoa taka-akselilta etuakselille, joka heikentää jarrutusta edelleen. Autoissa etujarrut ovat tämän takia tehokkaammat kuin takajarrut, koska paino siirtyy etuakselille. Ajosuunnan voimatasapainoyhtälö saa muodon $F_a = F_{jt}$. Taka-akselikuormalla tarkoitetaan hetkellistä jarrutuksen aikana vaikuttavaa kuormaa. Tämä tarkoittaa sitä, että jarrutuksessa vaikuttava painonsiirto pitää ottaa huomioon, etuakselille tulee vaakavoimien vaikutuksesta lisäkuormaa ja taka-akseli kevenee.

Muodostetaan momenttiyhtälö kuvan 1.5 mukaisesti traktorin eturenkaan ja maan kosketuspisteen suhteen, $\sum M = G_t(L - l_t) - R_{tj}L - F_{at}h_t = 0$. Ratkaistaan tästä taka-akselikuorma, $R_{tj} = \frac{G_t(L - l_t) - F_{at}h_t}{L}$. Kun takarenkaan ja maan välistä kitkakerrointa merkitään μ kirjaimella ja taka-akselikuormituksen lauseke sijoitetaan ajosuunnan voimatasapainoyhtälöön, saadaan: $ma = \mu \frac{mg(L - l_t) - mah_t}{L}$. Ratkaisemalla tästä hidastuvuus a saadaan takapyöräjarrutukselle yhtälö:

$$a = \frac{L - l_t}{L + \mu h_t} \mu g \quad (1.11)$$

Esimerkki. Mitkä ovat hidastuvuudet, jos traktorissa on nelipyöräjarrut tai vain takapyöräjarrut? Traktorin painopiste on 1,3 m etuakselin takapuolella ja 95 cm korkeudella maasta ja akseliväli on 2,3 m.

Asfaltin kitkakerroin on traktorirenkailla 0,7, jolloin nelipyöräjarrutuksen hidastuvuus on $a = 0,7 \cdot 9,81 = 6,9 \text{ m/s}^2$. Takapyöräjarruilla vastaavasti hidastuvuus on $a = \frac{1,3}{2,3 + 0,7 \cdot 0,95} 0,7 \cdot 9,81 = 3,0 \text{ m/s}^2$.

Traktoriin voi olla kytkettynä painavia työkoneita tai perävaunuja. Traktoreiden jarrujen on pystyttävä tehokkaaseen jarrutukseen myös näissä tapauksissa. Perävaunun suurin paino voi olla kaksin- tai kolminkertainen traktorin painoon verrattuna. Traktoreiden nopeuksen lisääntyminen tarkoittaa jarrutusenergian lisääntymistä. Sehen lisäntyy yhtälön 1.8 mukaan nopeuden neliössä. Jos traktori kantaa työkoneita, silloin jarrutettava kokonaisuudessa kasvaa työkoneen painon verran. Lisäksi yhdistelmän painopiste muuttuu.

Esimerkki. Traktorin perävaunuyhdistelmän nopeus kasvaa 40 km/h nopeudesta nopeuteen 50 km/h. Kuinka paljon jarrutusenergia kasvaa?
 $\left(\frac{50}{40}\right)^2 = 1,6$ kertaiseksi. Nopeuden muutos oli 1,25-kertainen.

1.5 Traktori ja hinattava työkone

Hinattavan työkoneen tai perävaunun huomioonotto vaatii toisenlaisen tarkastelun, koska traktorille tuleva aisapaino lisää traktorin painoa ja, jos työkoneessa tai perävaunussa ei ole jarruja, se työntää traktoria. Yhdistelmän tarkastelu on monimutkaisempaa kuin pelkän traktorin jarrutustarkastelu. Kuvassa 1.6 on esitetty traktoriin ja perävaunuun vaikuttavat voimat jarrutettaessa. Jarrutusvoimat siirtävät perävaunussa painoa kiinnituspisteeseen (vetokokkuun), joka taas vaikuttaa traktorin painonsiirtoihin. Kaikkiaan tässä on kuusi tuntematonta ja ratkaisua varten pitää muodostaa kuusi tasapainoyhtälöä. Analyttinen ratkaisu on hyvin vaativa ja helpoiten tällaisia tilanteita voi ratkaista matriisilaskun avulla.

Jos hinattavassa työkoneessa tai perävaunussa on jarrut, niin yhtälö 1.10 pätee myös tässä tapauksessa. Jos yhdessä tai kahdessa akselissa ei ole jarruja, hidastuvuus pienenee. Kuvassa 1.7 on laskettu esimerkki jarrutuksesta kun perävaunun jarrut ovat joko kaikissa telin pyörissä tai vaihtoehtoisesti etu- tai takapyörissä tai vain traktorissa. Kuvassa on pitävillä pinnoilla (suuri kitakerroin) rajoitteena ollut traktorin ja perävaunun jarrujen tehokkuus, traktorin jarrutussuhde on ollut 0,46 ja perävaunun 0,35. Tämä näkyy pitävillä pinnoilla, jossa hidastuvuuskaäyrä on vaakasuora. Jarrut eivät ole pystyneet näissä tapauksissa lukkojarrutukseen. Jos vain telin toisissa pyörissä on jarrut, hidastuvuus on hieman telin nelipyöräjarruja heikompi, mutta selvästi jarrutonta perävaunua parempi.

1.6 Stabiilisuus

Traktori perävaunuyhdistelmä menee helposti linkkuun etenkin jäisellä alustalla, kun pyörät lukkiutuvat. Lukkiutuneet pyörät menettävät sivuttaispidon ja yhdistelmä ei ole enään ohjattavissa. Jarrutuksen keventäminen niin, että pyörät pyörivät palauttaa ohjattavuuden. ABS-jarrut estävät pyörien lukkiutumisen ja yhdistelmä on ohjattavissa koko ajan. Perävaunu, vaik-

Taulukko 1.2: Traktori perävaunuyhdistelmän hallittavuus jäisellä tiellä

Jarrut	Ongelmia stabiilisuudessa %
Jarruton perävaunu	71
Jarrut telin etupyörissä	31
Jarrut telin takapyörissä	30
Jarrut kaikissa telin pyörissä	13

ka siinä olisi jarrutkin yleensä puskee traktoria, mikä pahentaa tapausta, kuva 1.8. Linkkuuntuminen on etenkin kovassa vauhdissa vaarallista, koska seurauksena voi olla onnettomuus.

Kuvassa 1.9 on esimerkki traktori perävaunuyhdistelmän jarrukokeesta jäisellä tiellä. Hidastuvuus on ollut 1 m/s² luokkaa ja yhdistelmä on pyrkinyt menemään linkkuun. Tämä näkyy traktorin ja perävaunun välisen kulman muutoksesta. Linkkuuntuminen on vaihtanut suuntaa kokeen aikana kulman ollessa alussa negatiivinen ja lopussa positiivinen. Yhdistelmä on heittelehtinyt puolelta toiselle.

Jäisellä tiellä tehdyissä kokeissa arvioitiin yhdistelmän stabiilisuutta siten, että rekisteröitiin kuinka useasti jarrutusta piti vähentää linkkuuntumisen takia. Taulukossa 1.2 on tulos tästä. Perävaunun jarrut vähentävät selvästi linkkuuntumista ja mahdollistavat turvallisemman ajon.

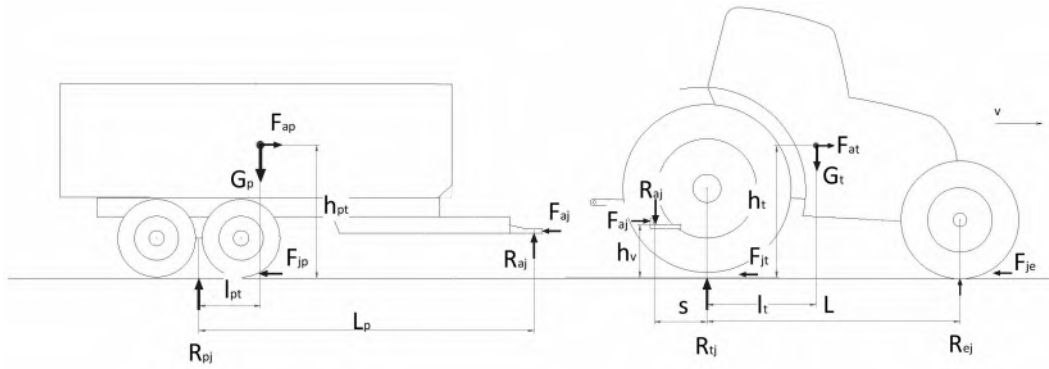
Stabiilisuutta voidaan tarkastella kuvan 1.10 esimerkin mukaisesti. Siinä on hydraulisen jarruliitännän paineen mukaiset jarrutussuhteet sekä traktorille ja hinattavalle työkoneelle/perävaunulle. Jos jarrutusaine on esimerkiksi 10 MPa, traktorin jarrutussuhde on 0,6 ja hinattavan laitteen 0,43. Traktori jarruttaa tässä tapauksessa tehokkaammin. Jarrutussuhteiden pitäisi olla lähes samat, jotta saadaan stabiili jarrutus. Perävaunun jarrutusvoimat riippuvat kuormasta. Tyhjänä jarrutusvoima on liian suuri ja täysin kuormattuna se voi olla sopiva. Tätä varten perävaunujen jarruissa on joko automaattinen tai käsin säädettävä jarrutusvoimakkuus.

1.7 Jarrutus käytännössä

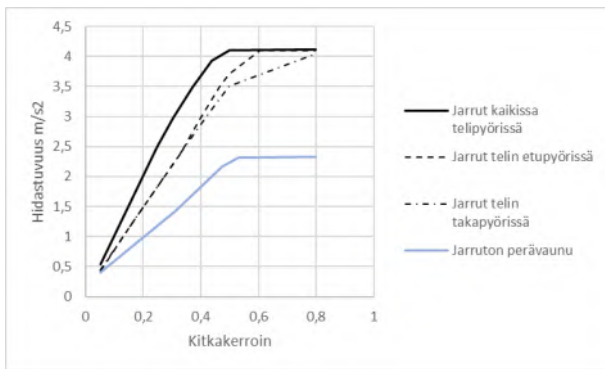
1.7.1 Jarruviive

Todellinen jarrutus ei toteudu siten, että jarruja painettaessa jarrutus olisi heti täystehoista. Käytännössä kestää aina jonkin ajan ennenkuin jarrupaineet saavuttavat täyden arvonsa. Mitä suuremmista ajoneuvoista on kyse, sitä pidempiä jarrulinjat ovat ja jarrujen viive tulee pidemmäksi. Samoin ajoneuvon koon kasvaessa jarrujen koko kasvaa, jolloin niiden käyttämiseen tarvittava nestemäärä lisääntyy ja siitä tulee lisäviivettä.

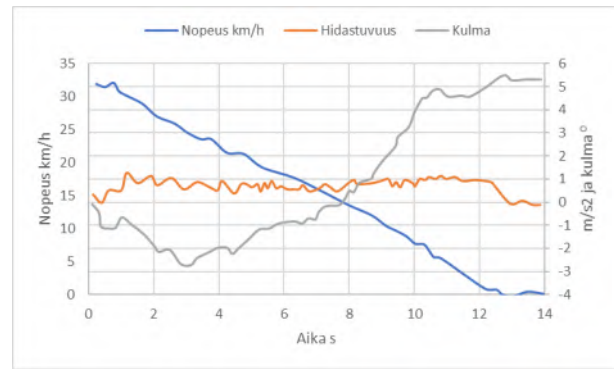
Todellinen jarrutus on kuvan 1.11 mukainen. Jarrutus alkaa hetkellä 0. Aika hetkeen t_0 kuvaa ajajan



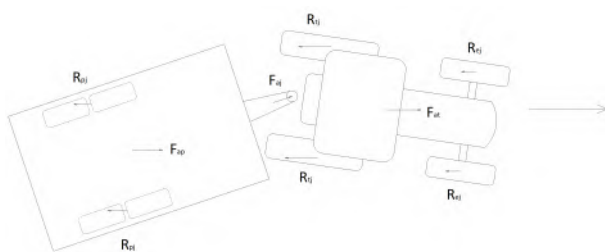
Kuva 1.6: Traktorin ja perävaunun voimat jarrutettaessa



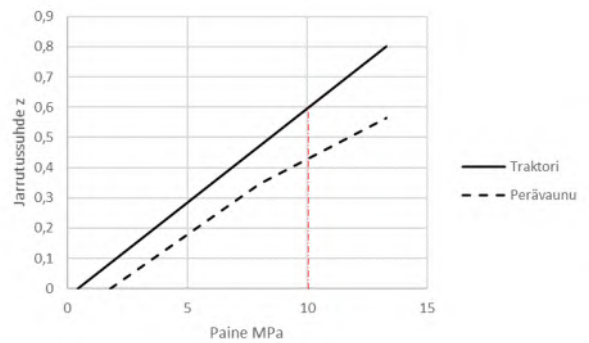
Kuva 1.7: 6,4 t traktorin ja 14,5 t perävaunun hidastuvuudet eri jarruvaihtoehdoissa, traktorin jarrutusuhde 0,46 ja perävaunun 0,35 [Ahokas ja Kosonen 2003]



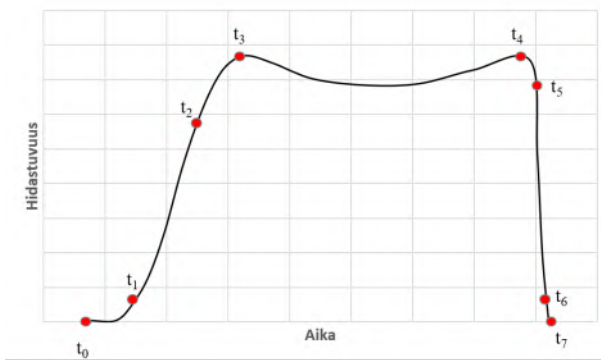
Kuva 1.9: Traktori perävaunuyhdistelmän jarrukoe jäisellä tiellä [Ahokas ja Kosonen 2003]



Kuva 1.8: Linkussa olevan traktori perävaunuyhdistelmän voimat



Kuva 1.10: Traktorin ja hinattavan työkonteen jarrujen yhteys



Kuva 1.11: Jarrutustapahtuma

Hidastuvuus on ollut liukkaan tien takia suurimmillaan vain 1 m/s^2 luokkaa eli jokaista sekunttia kohtia nopeus hidastuu $3,6 \text{ km/h}$.

reaktioaikaa. Jarrutustapahtumassa käytetään seuraavia termejä:

- **Kytkenän alkuviive** on aikaväli $t_0 - t_1$, joka alkaa jarrun painamisesta ja päättyy jarrupaineen noustua 10% päähän suurimmasta jarrupaineesta.
- **Kytkentäviive** alkaa jarrujen painamisesta ja päättyy 75% paineeseen suurimmasta jarrupaineesta ($t_0 - t_2$).
- **Paisuntaviive** on aikaväli $t_1 - t_2$, joka alkaa 10% jarrutusaineesta ja päättyy 75% jarrutusaineeseen.
- **Vapautusviive** alkaa kun jarrupoljin vapautetaan ja jarrutusaine laskee 10% maksimipaineesta ($t_4 - t_6$)
- **Vapautuksen alkuviive** alkaa kun jarrupoljin vapautetaan ja jarrutusaine laskee 90% maksimipaineesta ($t_4 - t_5$)

Jarrituksen voimakkuutta voidaan kuvata useilla eri tavoilla.

- **Keskihidastuvuus** (mean deceleration) on koko jarrutusajan keskimääräinen hidastuvuus. Siinä on mukana kaikki jarruviiveet.
- **Täysin kehittynyt hidastuvuus** määritellään keskimääräisenä hidastuvuutena jarrituksen alussa ja lopussa esiintyvien huippuarvojen välillä ($t_4 - t_3$). Täysin kehittynyt hidastuvuus on määritelty EU:n jarrudirektiivissä [EU 2015/68] keskihidastuvuutena sillä välillä, jolla nopeus alenee arvosta $0,8 \cdot v_0$ arvoon $0,1 \cdot v_0$, kun jarrituksen alkunopeus on v_0 .
- **Suurin hidastuvuus** (maximum deceleration) on jarrituksen aikana saavutettu suurin hidastuvuuslukema (pisteet t_3 ja t_4).

Käytännössä hidastuvuuksien määrittäminen voi olla vaikeaa, sillä hidastuvuuskuvaaja ei ole aina säännöllinen. Kuvassa 1.9 on esimerkki, jossa traktoriin on ollut kytkettynä raskas perävaunu ja koe on tehty jäisellä tiellä. Kokeessa on pidetty jarrun poljinvoima samana, koska poljinvoima vaikuttaa jarrujen jarrutusmomenttiin.

Luku 2

Jarruvaatimukset

Maa- ja metsätaloudessa käytettävien ajoneuvojen jarruvaatimukset on annettu EU:n asetuksessa 2015/68 [EU 2015/68]. Asetus on yksityiskohtainen ja määrittää jarrutekniikan sekä jarruvaatimukset. Tämän lisäksi jarrujen testaamiseen on kansainvälinen ISO 5697 standardi [ISO 5697] ja ANSI/ASAE S648 standardisarja [ANSI/ASAE S648].

Jarruvaatimukset voidaan jakaa kahteen eri vaatimukseen, EU:n direktiiveihin ja tieliikennelainsäädäntöön. Direktiivit koskevat kauppaa siten, että laitteiden pitää olla direktiivien mukaisia, jotta niitä voi myydä koko EU:n alueella. Valmistaja tai maahantuoja on vastuussa siitä, että traktori, työkonetta tai perävaunu täyttää direktiivien vaatimukset. Jos kaupan on laitteita, jotka eivät ole direktiivien mukaisia, silloin valmistajan tai maahantuojan on ryhdyttävä korjaustoimenpiteisiin [EU 167/2013].

Tieliikenneasetukset ovat kansallisia ja ne koskevat julkisella tiellä tapahtuvaa liikennettä. Jos laitteet eivät ole tieliikennesääntöjen mukaisia, silloin vastuussa on käyttäjä ja häntä voidaan rankaista tästä.

EU:n yhteisestä vaatimuksesta huolimatta jäsenmailla on tieliikennelainsäädännössä omia vaatimuksia, jotka voivat olla lievempiä tai vaativimpia kuin EU:n jarrudirektiivien vaatimukset. Ongelmana on myös vanhat ja uudet laitteet. Perävaunun jarruvaatimus ei auta, jos sitä käytetään vanhassa traktorissa, jossa ei ole siihen tarvittavaa tekniikkaa. Sama tilanne on uuden traktorin ja vanhan perävaunun kanssa. Traktoreiden ja perävaunujen käyttöiät ovat kymmeniä vuosia, joten siirtymäaika kaluston uusiutumisen kautta on hidasta.

2.1 Ajoneuvoluokat

Ajoneuvot luokitellaan omilla tunnuksillaan ja lakiteksteissä viitataan näihin tunnuksiin. Sen takia on syytä tuntea nämä tunnuksat. Traktori on T ja C-luokan moottorikäyttöinen maa- ja metsätaloudessa käytettävä pyörä- (T) tai tela-ajoneuvo (C). Traktoriluokat ovat seuraavat:

- T1-luokka, raideväli on vähintään 1 150 mm ja omamassa yli 600 kg
- T2-luokkaa, raideväli on alle 1 150 mm ja omamassa yli 600 kg
- T3-luokka, omamassa enintään 600 kg

- T4-luokka, erikoiskäyttöön tarkoitetut traktorit.

Normaali maataloustraktori on T1 luokan pyörillä varustettu ajoneuvo, jonka pienin raideväli on vähintään 1150 mm ja omamassa yli 600 kg. Tämän lisäksi on kolme muuta luokkaa, joista kaksi on pientraktoreita ja yksi erikoiskäyttöön tarkoitettu.

Perävaunut luokitellaan neljään luokkaan, jota merkitään R-kirjaimella seuraavasti:

- R1 luokka, akselimassojen summa on enintään 1 500 kg
- R2 luokka, akselimassojen summa on yli 1 500 kg, mutta enintään 3 500 kg.
- R3 luokka, akselimassojen summa on yli 3 500 kg, mutta enintään 21 000 kg
- R4 luokka, akselimassojen summa on yli 21000 kg

Hinattavat työkonet merkitään S-kirjaimella ja ne luokitellaan seuraavasti:

- S1 luokka, akselimassojen summa on enintään 3 500 kg
- S2 luokka, akselimassojen summa on yli 3 500 kg

Traktorin ja perävaunun sekä hinattavien työkonoiden nopeusluokat merkitään pienillä kirjaimilla siten, että kirjaimella a (esim. T1a, R3a, S1a) tarkoitetaan ajoneuvoa, jonka suurin rakenteellinen nopeus on enintään 40 km/h ja kirjaimella b ajoneuvoa, jonka nopeus on yli 40 km/h. Liikennetraktori on kansallinen ajoneuvoluokka ja sen suurin sallittu nopeus on 50 km/h.

2.2 EU jarruvaatimukset

Asetus EU 2015/68 [EU 2015/68] (jarrudirektiivi) kattaa maa- ja metsätaloustraktorit ja hinattavat työkonet sekä perävaunut ja se määrittää erilaisten jarrulaitteiden vaatimukset sekä niiden testaamiset. Tätä asetusta on muutettu ja täydennetty asetuksella EU 2016/1788 [EU 2016/1788] ja EU [EU 2018/828] sekä oikaisulla EU virallisessa lehdessä [EU L17 23.1.2015]. Jarrujärjestelmän on tarjottava:

- **käyttöjarru** (service braking)

Taulukko 2.1: Jarruvaatimukset traktorin suurimman rakenteellisen nopeuden (v_{\max}) mukaan

	$v_{\max} \leq 30$ km/h	$v_{\max} > 30$ km/h
Testinopeus	v_{\max}	v_{\max}
Pysähtymismatka m	$\leq 0,15v + \frac{v^2}{92}$	$\leq 0,15v + \frac{v^2}{130}$
Hidastuvuus m/s^2	$\geq 3,55^1$	$\geq 5^1$
Poljinvoima N	≤ 600	≤ 600

¹Täysin kehittynyt hidastuvuus

- **varajarru** (hätäjarru, secondary braking system), tämä tarvitaan, jos käyttöjarru vikaantuu tai traktorin ja hinattavan laitteen kytkentä irtoaa
- **seisontajarru** (parking brake), seisontajarru pitää ajoneuvon rinteessä pysäytettynä

Direktiivissä määritellään hinattavien ajoneuvojen jarrujärjestelmät. Meillä yleisesti käytetyn hydraulisen jarrujärjestelmän liittimen on oltava ISO 5676 [ISO 5676] standardin mukainen kun perävaunu tai hinattava työkoneliitetään traktoriin. Jarrun käyttöpaineen on oltava jarrutettaessa 11,5 - 15,0 MPa (115 - 150 bar). Jos perävaunun tai hinattavan työkoneen rakenteellinen nopeus on alle 30 km/h, jarrut on oltava ainakin yhdellä akselilla. Jos rakenteellinen nopeus on yli 30 km/h, vaaditaan jarrut kaikilla aksleilla. Luokkien R3, R4 tai S2 (akselimassa yli 3 500 kg) laitteet on varustettava jarruilla.

Jarrujen teho vaatimukset perustuvat joko pysähtymismatkaan tai täysin kehittyneeseen keskimääräiseen hidastuvuuteen. Jarrut mitataan sekä kylminä että kuumina (häipymistesti) siten, että ajoneuvo on kuormitettu valmistajan ilmoittamaan suurimpaan massaan sekä myös kuormittamattomana.

Hinattavien työkonien ja perävaunujen jarrutusuhde voidaan määrittää joko mittamalla niiden työntövoima jarrutuksessa tai tekemällä jarrukokeet perävaunun jarrujen kanssa ja sen jälkeen pelkästään traktorin jarruin.

EU jarrudirektiin mukaiset traktorin vaatimukset ovat taulukon 2.1 mukaiset. Näiden lisäksi vaaditaan tietty teho varajarruilta ja seisontajarruilta. Seisontajarrun pitää pitää ajoneuvo tai hinattava laite kuormittuna 18% rinteessä. Jarrutusuhteen (kappale 1.3) määritelmän ja yhtälön 1.10 mukaan nelipyöräjarrutuksen jarrutusuhde on $z = \frac{t}{g}$. Hidastuvuus $3,55$ m/s² merkitsee jarrutusuhdetta $0,36$ ja 5 m/s² merkitsee jarrutusuhdetta $0,51$.

Hinattavien työkonien jarrutusvoiman suhde suurimpaan staattiseen akselikuormaan (jarrutusuhde) on oltava taulukon 2.2 mukainen. Jarrutusuhdevaatimus on sama kuin traktoreiden vaatimukset. Ainoastaan, jos yli 30 km/h kulkevalla traktorilla vedetään alle 30 km/h rakenteellisen nopeuden omaavaa laitetta, traktorilta vaaditaan tehokkaammat jarrut. Traktorin ja hinattavan työkoneen yhteensovittamista varten direktiivissä on annettu kuvan 1.10 mukaisia yhteensovitusvaatimuksia.

Taulukko 2.2: Hinattavan työkoneen tai perävaunun jarruvaatimus

Ajoneuvo-luokka	Rakenteellinen nopeus km/h	Jarrutusuhde z
R3, R4 ja S2	≤ 30 km/h	0,35
	> 30 km/h	0,50

Esimerkki. Traktorin suurin nopeus on 45 km/h, mikä on vaatimusten mukainen pysähtymismatka? Pysähtymismatka on taulukon 2.1 $\leq 0,15 \cdot 45 + \frac{45^2}{130} = 22,3$ m. Yhtälön 1.3 mukaan laskettu hidastuvuus on $\frac{(\frac{45}{3,6})^2}{2 \cdot 22,3} = 3,5$ m/s². Tämä on koko jarrutustapahtuman keskimääräinen hidastuvuus. Taulukon 2.1 hidastuvuusvaatimus 5 m/s² on täysin kehittynyt hidastuvuus nopeuden ollessa 80 - 10 % alkunopeudesta.

Jarrutusviiveen vaatimus on jarrudirektiivissä $0,6$ s eli epäedullisimman jarrusylinterin on saavutettava täysi jarrutus tässä ajassa jarrutuksen alusta.

Maataloustraktorin jarruja käytetään myös ohjaamiseen. Tämän takia määritetään, että yli 40 km/h nopeuksissa ei traktorin yksipyöräjarru saa olla toiminnassa ja hinattavan laitteen jarrujen ei tarvi yksipyöräjarrutuksessa toimia alle 12 km/h nopeuksissa.

Alkuperäisessä direktiivissä oli vaatimuksena traktorin ABS jarrut 1.1.2020 alkaen, kun traktorin suurin rakenteellinen nopeus on 40-60 km/h. Tämä vaatimus on poistettu asetuksella 2018/828 [EU 2018/828]. Samassa asetuksessa on jatkettu yksipiiristen hydraulijarrujen käyttöä uusissa traktoreissa 31.12.2024 asti. Tämän päivämäärän jälkeen uusiin traktoreihin ei saa asentaa yksipiirisiä järjestelmiä. Yksipiiriset perävaunun jarrut eivät täytä varajarruvaatimusta. Yli 60 km/h kulkevilta traktoreilta vaaditaan ABS-jarrut.

2.3 Tieliikennelainsäädäntö

Jarruja koskeva kansallinen tieliikennelainsäädäntö on annettu Liikenne- ja viestintäviraston määräyksessä TRAFICOM/75637/03.04.03.00/2020 [TRAFICOM/75637/03.04.03.00/2020]. Määräys koskee traktorin ja moottorityökoneen perävaunua sekä R-luokan perävaunua. Kytkentäpisteen suurin kuorma rajataan 4 tn suuruiseksi tai valmistajan ilmoittamaan suurimpaan kuormaan. Perävaunut kytketään meillä vetokoukkuun, mutta hinattavat työkonet voidaan kytkeä maatalousvetolaitteeseen tai jopa nostolaitteeseen. Standardin ISO 6489-1 [ISO 6489-1] mukainen yleisesti käytössä olevan vetokoukun suurin sallittu pystykuormitus on 3000 kg. Tämän noudattaminen rajoittaisi kytkentäkuorman 3 tn suuruiseksi. Maatalousvetolaitteen kuormitukset riippuvat sen säädöistä ja normaalisti ne ovat muutama sata kilogrammaa [ISO 6489-3]. Näiden lisäksi kytkentäkuormaa voi rajoittaa traktorin valmistajan antamat suurimmat

kuormitusarvot.

Tieliikennemääräysten
[TRAFICOM/75637/03.04.03.00/2020] mukaan
vaaditaan seuraavat jarruvarusteet:

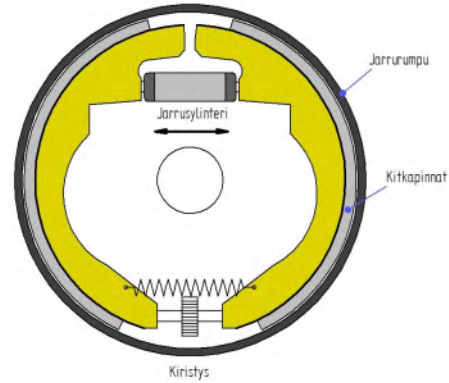
- Jos perävaunun suurin akselipaino on yli 3500 kg ja se on tarkoitettu vedettävän yli 40 km/h nopeudelle, siinä on oltava jarru, joka toimii traktorin käyttöjarrun kautta. Tässä jää tulkinnan varaiseksi onko esimerkiksi vanhat perävaunut tarkoitettu vedettäväksi yli 40 km/h.
- Jos perävaunussa on teliakselisto ja sen tarkoitettu enimmäisnopeus on enintään 40 km/h, jarrut on oltava vähintään telin etummaisissa pyörissä.
- Jos perävaunu on tarkoitettu vedettäväksi yli 40 km/h, mutta enintään 60 km/h, kuivalla tiellä (kitkakerroin 0,8) on saavutettava $3,5 \text{ m/s}^2$ hidastuvuus. Tämä poikkeaa EU:n jarrudirektiivistä, jonka mukaan (taulukko 2.2) $3,5 \text{ m/s}^2$ hidastuvuus on koskee rakenteellisia nopeuksia, jotka ovat korkeintaan 30 km/h. Lisäksi perävaunussa on oltava seisontajarru ja varajarru (hätäjarru).
- Yli 60 km/h tarkoitettujen perävaunujen on täytettävä jarrudirektiivin [EU 2015/68] ja direktiivin EU 167/2013 vaatimukset.

Luku 3

Jarrurakenteet

Taulukko 3.1: Jarrujen ominaisuuksia

Jarrutyyppe	Etuja	Ongelmia
Rumpujarru	Halpa, helppo huoltaa, pieni käyttövoima	Tarvii huoltoa, jarrutusmomentti vaihtelee, suojaamattomana likaantuu helposti
Levyjarru	Suuri käyttövoima, kitkapalat helppo vaihtaa, hyvä jarrutusteho	Lämpenee voimakkaasti, jarrupalat ja -levyt kuluvat, likaantuu helposti
Öljykylpyinen levyjarru	Vähäinen huolto, voi kestää koko koneen eliniän	Laahaaminen mahdollista, erikoisöljy



Kuva 3.1: Rumpujarrut

Jarrutuksessa vapautuva energia on suuri ja lämpötilat nousevat jopa 500 °C lämpötilaan. Kuivien jarrujen kitkakertoimet ovat 0,2 - 0,4 ja öljykylpyisten 0,1 paikkeilla [Goering ym 2006].

Ajoneuvojen jarrut ovat joko rumpujarruja (drum brakes) tai levyjarruja (disc brakes). Näillä jarruilla on taulukon 3.1 mukaisia ominaisuuksia.

Jarrujen toimintaperiaatteita on nähtävissä esimerkiksi YouTube sivustolla. Hakusanoilla 'drum brake principle', 'disc brake principle' tai 'wet brake principle' voit löytää näitä.

Jarrun aikaansaama momentti voidaan laskea yhtälön 3.1 avulla. Sama yhtälö pätee myös kytkimille.

$$M_j = F_p \mu r_m n \tag{3.1}$$

- M_j Jarrutusmomentti
- F_p Jarrun puristusvoima
- μ Pintojen kitkakerroin
- r_m Jarrurummun/-levyn säde
- n Kitkapintojen määrä

Rumpujarruilla säde on jarrurummun säde. Levyjarrujen kesikimääräinen säde r_m saadaan yhtälön 3.2 avulla.

$$r_m = \frac{d_u^3 - d_s^3}{3(d_u^2 - d_s^2)} \tag{3.2}$$

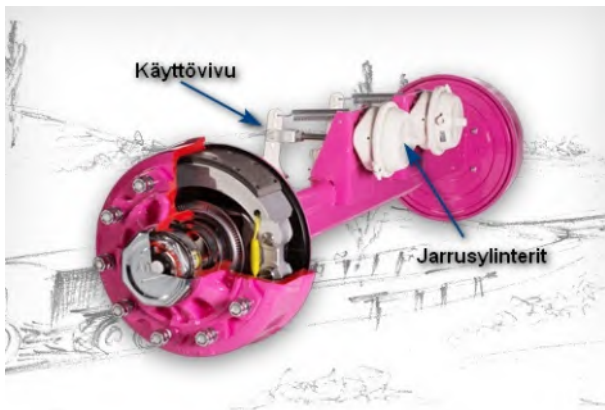
- d_u Kitkapinnan ulkohalkaisija
- d_s Kitkapinnan sisähalkaisija

3.1 Rumpujarrut

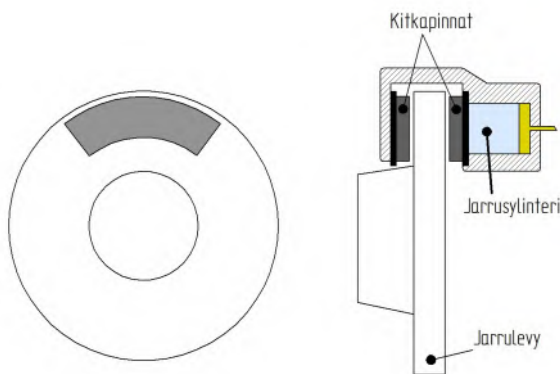
Rumpujarruissa on kitkapinnat, jotka puristetaan jarrurumpua vasten. Kuvassa 3.1 on esitetty rumpujarrujen periaatekuva. Rumpujarrut eivät tarvitse suurta käyttövoimaa, alkujaan niitä käytettiin mekaanisin vivuin. Nykyään autoissa on apuna jarrutehostin. Kitkapintojen kuluessa jarruja joudutaan säätämään. Tämäkin voi olla automaattisesti toimiva.

Henkilöautojen jarrut toimivan kuvan 3.1 mukaisesti yhden sylinterin puristusvoimalla. Rumpujarruissa voi olla useita erilaisia käyttömekanismia. Simplex-jarruissa on yksi jarrusylinteri, duplex-jarruissa on kaksi jarrusylinteriä, yksi kummassakin päässä. Jarrusylinterien tilalla voi olla mekaaninen levitys, esimerkiksi s-nokka. Tällöin varsinainen jarrusylinteri on jarrujen ulkopuolella.

Hinattavien työkonien ja perävaunujen jarrut ovat usein rumpujarruja. Kuvassa 3.2 on esimerkki jarrulisestä akselistosta. Pneumaattiset jarrusylinterit vaikuttavat käyttövipujen kautta jarrurumpuihin. Käyttövipuissa on kitkapintojen kulumisen kompensointia varten säätömahdollisuus ja jarrujen toiminta on tarkastettava säännöllisesti. Kuvassa on pneumaattiset jarrusylinterit. Siinä voisi olla myös vaihtoehtoisesti hy-



Kuva 3.2: Perävaunun jarrullinen akselisto, ADR



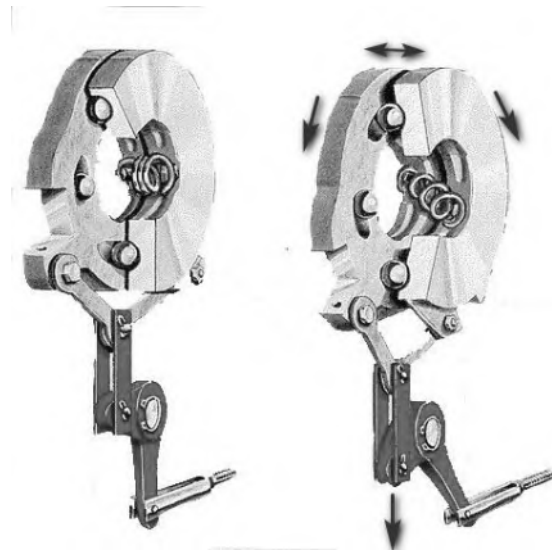
Kuva 3.3: Levyjarrut

draulisylinterit.

3.2 Levyjarrut

Kuvassa 3.3 on levyjarrujen periaate. Jarrusylinteri painaa kitkapintoja jarrulevyä vasten. Tarvittava puristusvoima on suurempi kuin rumpujarruissa ja levyjarruissa tarvitaan jarrutehostin käyttöä varten. Levyjarrut voivat olla myös monilevyisiä, silloin levyt jarruttavat koko alaltaan. Levypakka puristetaan kitkapintoja vasten jarrutettaessa. Monilevyisiä rakenteita käytetään myös kytkiminä, esimerkiksi traktorissa voimanoton kytkin ja nelivedon kytkin on toteutettu usein hydraulisella monilevykytkimellä.

Traktoreissa tyypillisesti jarrut ovat öljykylpyisiä (märkiä) levyjarruja (oil immersed disc brakes, wet disc brakes), kuva 3.4. Kun jarruja painetaan käyttövipu lähtee pyörittämään jarrulevyjä. Levyjen välissä on kuulat, jotka aiheuttavat jarrulevyjen puristumisen kitkapintoja vasten. Jarrut ovat traktorin voimansiirrossa öljykylvyssä. Näissä voi olla ongelmana jarrujen laahaaminen. Öljyn ja pienten välysten takia jarrut eivät aina vapaudu kokonaan.



Kuva 3.4: Traktorin öljykylpyiset jarrut

3.3 Traktorin jarrut

Kuvassa 3.5 on esimerkki traktorin jarrujärjestelmästä. Polkimilla 7 hallitaan traktorin öljykylpyisiä takapyöräjarruja. Kummallekin pyörälle on oma jarrupiiri. Tämä mahdollistaa ohjausjarrujen käytön. Toisen pyörän jarrupiiristä saadaan ohjaus perävaunun jarruille perävaunun jarruventtiilin 2 kautta. Perävaunun jarrut saavat paineen traktorin hydraulikasta 1.

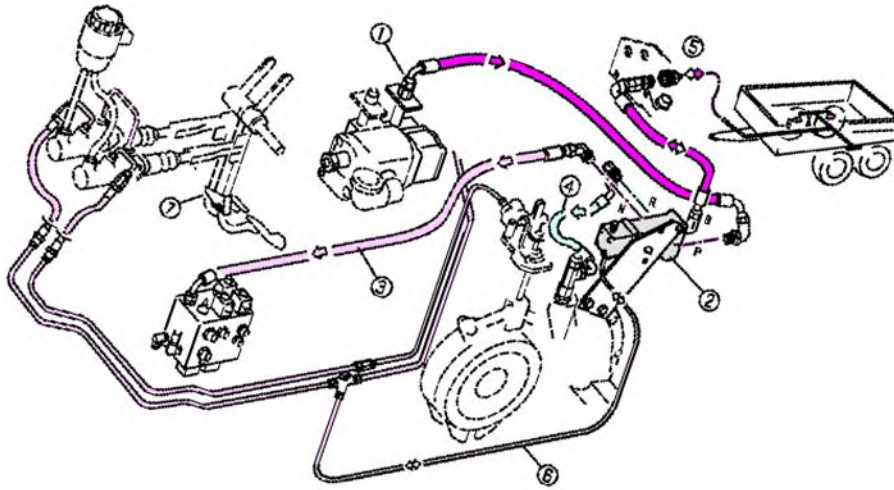
Traktorin jarrut on yleensä sijoitettu tasauspyörästä ja vähennyspyörästä väliin, mustalla merkitty kohta kuvassa 3.6. Tällöin jarrut ovat öljykylpyiset. Siinä voimansiirron nopeus on suuri ja tarvittava jarrutusmomentti tämän takia pienempi kuin esimerkiksi pyörän navoissa olevissa jarruissa. Vanhemmissa tai pienissä traktoreissa jarrut voivat olla pyörien navoissa, joskus myös vaihteistokotelon ulkopuolella.

Etupyörien jarrut voivat toimia nelivedon kautta siten, että suuremmilla nopeuksilla jarrutus kytkee nelivedon päälle. Tällöin jarrutus tulee takapyörien jarrujen kautta. Nelivedon akselilla voi olla erillinen jarru, joka vaikuttaa etupyöriin tai etupyörien navoissa voi olla jarrut. Tällöin niihin tarvitaan omat jarrut ja käyttöjärjestelmä.

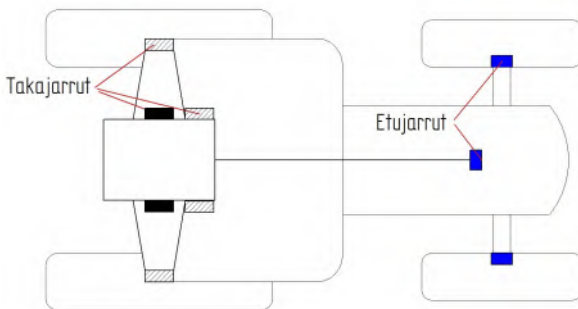
Vanhemmissa traktoreissa jarrut voivat olla takapyörien navoissa tai peräkotelon sivulla ennen portaalista vähennyspyörästä. Nämä jarrut ovat kuivia jarruja, kun taasen voimansiirron sisällä olevat jarrut ovat märkiä.

3.4 ABS jarrut

ABS (Anti-block Braking System) jarrujärjestelmä estää pyörien lukkiutumisen. Tämän ansiosta ajoneuvo ei menetä sivuttaispitoa ja ajon stabiilisuus säilytetään. Pyöriin sijoitetaan nopeusanturit, joiden antaman tiedon perusteella tietokone hallitsee pyöräjarruja. Jos pyörä on vaarassa lukkiutua, sen jarrutusta vähennetään. ABS-jarrut ovat pakolliset yli 60 km/h



Kuva 3.5: Esimerkki traktorin jarrujärjestelmästä



Kuva 3.6: Traktorin jarrujen sijoittelu

kulkeville traktoreille. Niiden pakollisuutta traktoreihin ja perävaunuihin on tutkittu mm Euroopan komission raportissa PPR831 [Scarlett ym 2017]. Lukkiutumattomat jarrut eivät yleensä lyhennä jarrutusmatkaa, mutta ne varmistavat yhdistelmän hallittavuuden [Knaapi J 2021b].

Kuorma-autoissa käytetään pneumaattisia jarruja ja niitä varten ABS-tekniikka on kehitetty valmiiksi. Traktoreissa käytetään hydraulisia jarruja ja ABS-jarrut vaatisi traktorin jarrujen uudelleen suunnittelua. Nykyisin jarrut vaikuttavat usein vain taka-akselilla ja nelivedon kytkennän avulla saadaan myös etuakselin jarrutus toimimaan. Tästä pitäisi siirtyä etuakselin pyöriin oleviin jarruihin. Lisäksi taka-akselille tarvitaan pyörien nopeusanturit. Anturit pitäisi suunnitella mieluiten voimansiirron yhteyteen, jotta niiden suojaus olisi traktorikäytössä riittävä.

Perävaunuihin on saatavissa pneumaattisia abs-jarruja, tämä vaatii tietysti traktorissa myös pneumaattisen järjestelmän. Hydraulisiin perävaunun jarruihin voitaneen kehittää myös ABS-toiminto.

3.5 Työkoneen tai perävaunun jarrut

Raskaissa ajoneuvoissa on käytössä pneumaattiset jarrut ja niiden tekniikka on kehittyntä tökoneiden tai perävaunujen jarrujärjestelmiin verrattuna. Lainsäädännön mukaan yli 3500 kg akselipainon jälkeen tarvitaan hinattavassa työkoneessa tai perävaunussa jarrut. Jos perävaunuja käytetään enimmäkseen tilusteillä, silloin jarrujen merkitys on vähäinen. Yleisillä teillä liikuttaessa taasen jarrut ovat liikenneturvallisuuden takia tarpeen.

Meillä perävaunujarrut toimivat aluksi traktorin työkonehydrauliikan kautta. Siinä oli mahdollista vain täysjarrutus. Keski-Euroopassa taasen oli käytössä yleisesti pneumaattiset perävaunun jarrut. Traktoreiden jarruventtiileiden [ISO 5676] yleistyttyä perävaunun jarrutuspainne säätö traktorin jarrupolkimen poljinvoiman perusteella, jolloin osittainen jarrutus oli mahdollista. Pneumaattiset jarrut ovat harvinaisia, mutta ne voidaan hankkia lisävarusteena traktoreihin.

Pneumaattiset jarrut ovat kehittyneempiä kuin hydrauliset jarrut. Tämä johtuu niiden laajasta käytöstä raskaassa liikenteessä. Hydraulisia perävaunun jarruja ei ole kehitetty samalla lailla kuin pneumaattisia, koska ne on käytössä vain maataloudessa. Perävaunujarrujen yhtenä ongelmana on se, että jarrut on mitoitettu täydelle kuormalle. Tyhjänä tai vajaalla kuormalla liikuttaessa jarrut ovat liian tehokkaat ja johtavat helposti lukkojarrutukseen, jolloin seurauksena voi olla sivuluisto. Myöskin jäisellä tiellä täydellä kuormalla jarrut lukkiintuvat helposti. Taulukossa 3.2 on esitetty pneumaattisen ja hydraulisen hinattavan laitteen jarrujärjestelmä eroja.

Toisin kuin traktoreiden jarrut perävaunun jarruja on huollettava ja säädettävä. Traktoreiden öljykylpyiset jarrut ovat lähes huoltovapaita, kun taasen työkoneissa ja perävaunuissa käytetään yleisesti rumpujarruja, joiden kitkapinnat kuluvat ja säädöt muuttuvat. Tehdyssä tutkimuksessa perävaunujen jarrujen

huollolla saatiin aikaiseksi 35% parempi jarrutussuhde [Scarlett A. J. 2009].

3.5.1 Yksijohtoinen hydraulijarru

Yksijohtoinen hydraulinen jarrujärjestelmä (single-line hydraulic brake system) otettiin käyttöön 1970-luvulla. Joissakin traktorimalleissa se on ollut vakiovarusteena, useimmiten kuitenkin se on lisävaruste. Perävaunun jarrut liitetään traktorin jarrujärjestelmään standardoidun liittimen avulla [ISO 5676] siten, että traktorin puolella on urosliitin ja työkoneneen tai perävaunun puolella on naarasliitin. Traktorissa on venttiili, joka säätelee perävaunun jarrutuspainetta traktorin jarrutus-paineen mukaan. Tämän ansiosta saadaan samanaikainen ja lähes samansuuruinen jarrutus, jos traktorin ja perävaunun jarrut ovat lähes yhtä tehokkaat. Sellaiseenaan yksijohtoinen jarrujärjestelmä ei täyty varajarru vaatimusta eikä se ota huomioon perävaunun kuormitusta.

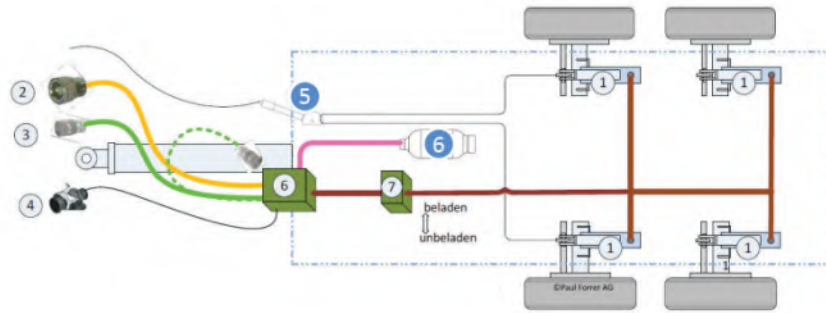
3.5.2 Kaksijohtoinen hydraulijarru

Kaksijohtoinen hydraulijarru (dual-line hydraulic brake system) on kehitetty yksijohteisesta hydraulijarrusta ja siinä on traktoridirektiivin vaatima varajarru. Lisäksi traktorin seisontajarrun käyttö vaikuttaa myös perävaunun seisontajarruun. Järjestelmässä on kaksi hydraulista liittäntää, hydraulinen ohjausjohto (painejohto) ja hydraulinen apujohto (valvontajohto) [EU 2015/68]. Ohjausjohto on sama kuin yksipiirisen hydraulijarrun liitin ja järjestelmää voidaan käyttää myös yksijohteiseen perävaunuun kytkettynä. Kaksijohteisessa järjestelmässä sen kautta saadaan perävaunun jarrutus-paine, jonka on oltava täysjarrutuksessa 11,5 - 15 MPa (115 - 150 bar). Apujohto on ISO 16028 [ISO 16028] standardin mukainen kokoluokan 10 liittäntä ja kaksijohteisessa järjestelmässä siinä on jatkuva 15 - 35 bar paine. Traktorissa on urosliitin ja työkoneneessa tai perävaunussa naarasliitin. Jos ohjausjohdon paine häviää, esimerkiksi perävaunun irrotessa traktorista, perävaunu jarruttaa automaattisesti. Lisäksi järjestelmässä voi olla sähköinen liittäntä, jolla toimintaa voidaan seurata ja se mahdollistaa myös elektronisesti ohjatut jarrut.

Kuvassa 3.7 on esimerkki kaksijohteisesta jarrujärjestelmästä. Perävaunun jarruventtiiliin 6 tulee sekä ohjausjohto 2 että apujohto 3. Lisäksi siihen tulee elektroniikkaliitäntä 4. Perävaunun jarruventtiilissä on kuormantunto 7 (ALB Automatic Load-dependant Braking), joka saa signaalinsa kuorma-anturilta. Perävaunun kuorma aikaansaa jousituksen kasaan puristumisen, jonka anturi rekisteröi. Tämän takia kuormantunto toimii vain jousitetuissa perävaunuissa. Jousittamattomissa perävaunuissa käytetään käsin säädettyä kuorma-asetusta. Sillä voidaan valita täyden kuorma, tyhjän kärryn ja muutaman väliasennon väliltä. Kuvan järjestelmässä on erillinen käsijarru 5, joka vaikuttaa mekaanisesti jarruihin.

Taulukko 3.2: Jarrujärjestelmien eroja [Scarlett A. J. 2009]

Jarrujärjestelmä	Etuja	Heikkouksia
Hydraulinen	Yksinkertainen	Vuotoöljyt likaavat järjestelmää
	Käyttövoima traktorin hydraulikasta	Varajarruna erillinen laite
	Muutokset traktorissa vähäisiä	Toiminta riippuu traktorin hydraulikan toiminnasta ja viiveistä
	Halpa	
Pneumaattinen	Vara-/seisontajarru toimii perävaunun irrotessa	Monimutkaisempi kuin hydrauliset jarrut
	Hyvä jarrutus-tuntuma	Traktorissa ei usein ole pneumatiikkaa valmiina
	Ilmavuodot eivät aiheuta likaantumisia	Vaatii traktoriin merkittäviä muutoksia
	Kuorman tuntevat ja ABS jarrut valmiina	Kallis



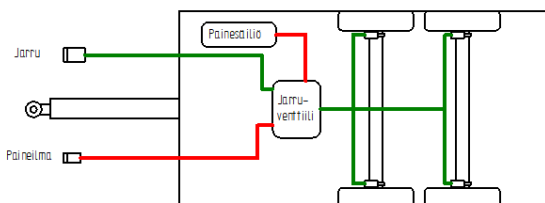
Kuva 3.7: Kaksijohteisen hydraulisen jarrujärjestelmän periaatekuva [Paul Forrer]

3.5.3 Elektronisesti ohjattu hydraulinen jarru

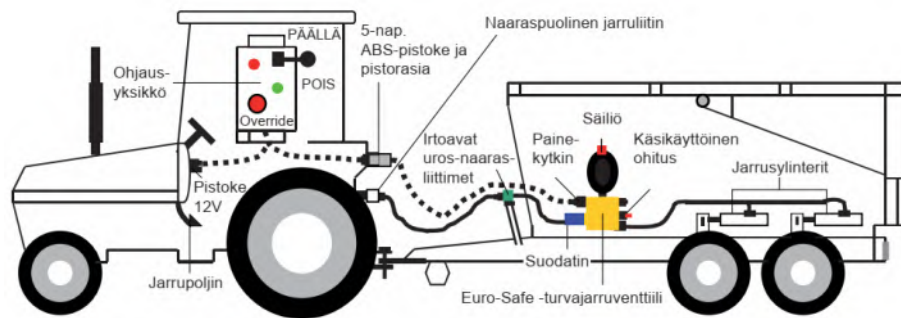
Yksijohtoinen hydraulijarru ei täytä jarrudirektiivin hätäjarruvaatimusta. Tämä voidaan aikaansaada yksijohtoiseen jarruun elektronisella ohjauksella kuvan 3.8 mukaisesti. Perävaunuun asennetaan turvajarruventtiili, jonka ohjauslaite tuodaan traktorin ohjaamoon. Sen avulla perävaunun jarrut voidaan kytkeä toimintaan tai pois tai vapauttaa ne.

3.5.4 Kaksijohtoinen pneumaattinen jarru

Kuvassa 3.9 on esitetty yksinkertaistettuna kaksijohtoinen pneumaattinen (dual line pneumatic) jarrujärjestelmä. Paineilmaliittimen kautta perävaunun jarrujärjestelmä saa paineilman. Jarruliitäntän kautta ohjataan perävaunun jarruja. Painesäiliö pitää jarrut kytkettynä niin kauan kuin se pystyy antamaan riittävän paineen. Jos irrotettua perävaunua halutaan siirtää esimerkiksi traktorilla, jossa ei ole paineilmajarruvarustusta, sitä varten järjestelmässä voi olla erillinen jarrujen vapautusventtiili. Jos perävaunu irtoaa traktorista tai paineilma liitäntä irtoaa, perävaunun jarruventtiili toimii ja jarruttaa perävaunua.



Kuva 3.9: Kaksijohtoisen pneumaattisen jarrujärjestelmän periaatekuva



Kuva 3.8: Elektronisesti ohjattu hydraulinen jarru

Kirjallisuutta

- [Ahokas ja Kosonen 2003] Ahokas J. ja Kosonen S. Dynamic Behaviour of a Tractor-trailer Combination during Braking. *Biosystems Engineering* (2003) 85 (1), 29–39
- [Ajoneuvolaki] Ajoneuvolaki, <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2002/20021090>, 4.2.2022
- [ANSI/ASAE S648] Agricultural Field Equipment Braking, Part 1-5. American Society of Agricultural and Biological Engineers
- [Goering ym 2006] Goering C.E., Stone M. L., Smith D. W., Turnquist P.K. Drive Trains. Chapter 12 in *Off-Road Vehicle Engineering Principles*. American Society of Agricultural Engineers, 2006
- [EU 167/2013] Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 167/2013, maa- ja metsätaloudessa käytettävien ajoneuvojen hyväksynnästä ja markkinavalvonnasta.
- [EU 2015/68] Komission delegoitu asetus (EU) 2015/68. Maa- ja metsätaloudessa käytettävien ajoneuvojen hyväksynnässä sovellettavien, ajoneuvojen jarruttamista koskevia vaatimuksia.
- [EU 2016/1788] Komission delegoitu asetus (EU) 2016/1788, Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) N:o 167/2013 muuttamisesta siltä osin kuin on kyse ajoneuvon EU-tyyppihyväksyntään sovellettavien vaatimusten luettelosta sekä komission delegoidun asetuksen (EU) N:o 1322/2014, (EU) 2015/96, (EU) **2015/68** ja (EU) 2015/208 muuttamisesta ja oikaisemisesta siltä osin kuin on kyse ajoneuvon rakennetta koskevista ja yleisistä vaatimuksista, ympäristöominaisuuksista ja käyttövoimayksikön tehoa koskevista vaatimuksista, ajoneuvon jarrutusta koskevista vaatimuksista ja ajoneuvon toimintaturvallisuusvaatimuksista
- [EU 2018/828] Komission delegoitu asetus (EU) 2018/828, annettu 15 päivänä helmikuuta 2018, delegoidun asetuksen (EU) 2015/68 muuttamisesta lukkiutumattomia jarrujärjestelmiä, korkeapaineisia energianvaraajia ja yksipiirisiä hydraulikkaliitäntöjä koskevien vaatimusten osalta
- [EU L17 23.1.2015] Oikaisu komission delegoituun asetukseen (EU) 2015/68, annettu 15 päivänä lokakuuta 2014, Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) N:o 167/2013 täydentämisestä maa- ja metsätaloudessa käytettävien ajoneuvojen hyväksynnässä sovellettavien, ajoneuvojen jarruttamista koskevien vaatimusten osalta (Euroopan unionin virallinen lehti L 17, 23. tammikuuta 2015). Euroopan unionin virallinen lehti L 17, 23. tammikuuta 2015
- [Euro-Safe - turvajarruventtiili] Euro-Safe -turvajarruventtiili, Asennus- ja käyttöohje. https://www.kraatz.fi/wp-content/uploads/2016/12/Eurosafe_turvajarruventtiili.pdf, 16.2.2022
- [ISO 16028] Hydraulic fluid power — Flush-face type, quick-action couplings for use at pressures of 20 MPa (200 bar) to 31,5 MPa (315 bar). International Standards Organisation
- [ISO 5676] ISO 5676:1983 Tractors and machinery for agriculture and forestry — Hydraulic coupling — Braking circuit. International Standards Organisation
- [ISO 5697] ISO 5697 (1982). Agricultural and Forestry Vehicles - Determination of Braking Performance. International Standards Organisation

- [ISO 6489-1] Agricultural vehicles — Mechanical connections between towed and towing vehicles — Part 1: Hook type . International Standard Organisation.
- [ISO 6489-3] Agricultural vehicles — Mechanical connections between towed and towing vehicles — Part 3: Tractor drawbar . International Standard Organisation.
- [Knaapi J a] Renkaat ovat tieturvallisuuden ydin. Koneviesti Nro 3 2021.
- [Knaapi J 2021b] Knaapi J. Vaunujen ABS tekee yhdistelmästä toimivan. Koneviesti Nro 3 2021.
- [Paul Forrer] Brake systems in agricultural and forestry vehicles, https://www.laumetris.lt/UserFiles/image/downloads/Dual_and_Single_Line_Hydraulic.
- [Scarlett A. J. 2009] Scarlett A.J. In-service assessment of agricultural trailer and trailed appliance braking system condition and performance. Health and Safety Executive, Report RR697, 2009
- [Scarlett ym 2017] Scarlett A. J., Knight I. M. ja Morgan P. A. Study on the availability of anti-lock braking systems for agricultural and forestry vehicles with a maximum design speed between 40 km/h and 60 km/h. European commission document number PPR931, 2017
- [TRAFICOM/75637/03.04.03.00/2020] Liikenne- ja viestintävirasto.Traktorien, moottoriyökoneiden ja maastoajoneuvojen, niiden perä- vaunujen, muiden kuin autoon kytkettäväksi tarkoitettujen hinattavien laitteiden sekä eläinten vetämien ajoneuvojen rakenne ja varusteet. Määräys TRAFICOM/75637/03.04.03.00/2020, Voimaantulopäivä 01.03.2021