



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Ilmatäytteisen kumirenkaan tiekontakti

Anssi Koskitalo

TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Ilmatäytteen kumirenkaan tiekontakti

Anssi Koskitalo

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2021, 35 s.

Työn ohjaaja: Miro-Tommi Tuutijärvi

Kandidaatintyön tarkoituksen on käydä yleisesti läpi ilmatäytteen kumirenkaan tiekontaktista. Työssä käydään läpi kitkan teoriaa, kuinka perinteinen kitkateoria eroaa kumirenkaan ja tien välisestä kitkasta, kumin materiaaliominaisuuksia sekä renkaan pito-ominaisuuksia. Työn tarkoituksen on perehdyttää lukijaa renkaiden toimintaan ja ominaisuuksiin.

Työn lähteinä on käytetty aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Työssä on käytetty teoriaa havainnollistavia kuvia ja esimerkkejä.

Asiasanat: kumi, rengas, tiekontakti, pito, kitka

ABSTRACT

Road contact of inflatable rubber tire

Anssi Koskitalo

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 35 p.

Supervisor: Miro-Tommi Tuutijärvi

The purpose of this bachelor's thesis was to get familiarized with the tire contact patch of a rubber tire. This thesis focuses on the theory of friction, how simple friction model is different from the friction between the tire and the road, material features of rubber and grip features of the tire. The target for this work was to familiarize the reader with how the tires work and the features of a rubber tire.

The sources of the work have been automotive literature. Pictures and examples have been used to help understand the theory.

Keywords: rubber, tire, road contact, grip, friction

ALKUSANAT

Olen ollut mukana Formula Student Oulun toiminnassa vuodesta 2018 asti. Mielenkiinto kilpa-autojen pito-ominaisuuksiin innosti tämän aiheen valinnassa.

Haluan kiittää Formula Student Oulun jäseniä sekä kandityön ohjaajaa.

Oulu, 27.04.2021

Anssi Koskitalo

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
1 JOHDANTO	8
2 HISTORIA	9
2.1 Ilmatäytteisen kumipyörän keksiminen	9
2.2 Ilmatäytteisen kumipyörän kehitys	9
3 TEORIA	10
3.1 Kitka	10
3.1.1 Kitkan historiaa	10
3.1.2 Amontonosin-Coulombin lait	10
3.1.3 Kitka kumissa	12
3.1.4 Adheesio	13
3.1.5 Deformaatio	14
3.1.6 Repeytyminen ja kuluminen	14
3.2 Kumi materiaalina	15
3.2.1 Materiaaliominaisuudet	15
3.2.2 Viskoelastinen materiaali	16
3.2.3 Kumin elastisuus	17
4 RENKAAN TIEKONTAKTI	20
4.1 Rengas yleisesti	20
4.2 Ilmatäytteisen renkaan rakenne	20
4.2.1 Ristikudosrengas	21
4.2.2 Vyörengas	22
4.2.3 Ristikudosvyörengas	23
4.3 Renkaan pito	24
4.3.1 Renkaan pitkittäinen pitokyky	24
4.3.2 Renkaan sivuttainen pitokyky	25
4.3.3 Renkaan vierintävastus	26
4.3.4 Renkaan luisto	26
4.3.5 Ajopinnan laatu	27
4.3.6 Rengas märällä	27
4.3.7 Rengas lumella ja jäällä	27

4.4 Eri rengastuksien eroja kontaktipintaan	28
4.4.1 Kesärenkaat.....	28
4.4.2 Talvirenkaat	29
4.5 Rengaspaineiden vaikutus kontaktipintaan	30
4.6 Alustan säätöjen vaikutus kontaktipintaan.....	30
4.6.1 Pyöränkallistuskulma (Camber-kulma).....	30
4.6.2 Aoraus (Toe in) ja haritus (toe out)	33
5 YHTEENVETO	34
LÄHDELUETTELO	35

MERKINNÄT JA LYHENTEET

F	voima, joka painaa kappaleita toisiinsa.
F_{ad}	adheesion kitkavoima
F_c	keskipakovoiman suuruus
F_{def}	deformaation kitkavoima
$F_{kokonais}$	kokonaiskitkavoima
F_{kuluma}	kulumisen aiheuttama kitkavoima
f_d	kappaletta liikuttava voima
f_s	kappaleen liikuttamiseen tarvittava voima
G'	varastomuoduli (elastisuus)
G''	häviömoduuli
M	ajoneuvon massa
$p_{myötö}$	pehmeämmän materiaalin myötöraja
R	pyörimishalkaisija
R_b	ajettavan mutkan halkaisija
U_d	yhden syklin hukkaama energia
V	ajoneuvon nopeus
X	pitkittäinen kitkavoima yhteensä etu- ja taka-akselilta
Y	kokonaiskitkavoima sivuttaissuunnassa
Z	ajoneuvon painosta aiheutuva voima.
Σ_{eff}	kappaleiden efektiivinen pinta-ala.
γ_m^2	liukukulman amplitudi.
δ	kuvaa siirtymän (deformaation) voiman välistä vaihe-eroa
μ_d	kappaleiden välinen liikekitkakerroin.
μ_p	tien ja renkaan välinen pitkittäinen kitkakerroin
μ_s	kappaleiden välinen lepokitkakerroin
$\sigma_{leikkaus}$	pehmeämmän materiaalin leikkausvoima
τ	tien ja renkaiden välinen sivuttaissuuntainen kitkakerroin.
ω	renkaan kulmanopeus
ωR	renkaan pyörimisnopeus.

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä käydään läpi ajoneuvoissa käytettävien ilmatäytteisten kumirenkaiden toimintaa lähinnä kirjallisuuslähteiden avulla. Työn tarkoituksena on tuoda esille renkaan toimintaa ja ominaisuuksia.

Aihetta tutkiessa huomasin, että yhtä suoraa lähdettä renkaan tiekontaktin toiminnasta ei ole. Monissa lähteissä, joissa käytiin läpi ajoneuvon alustan suunnittelua, sivuttiin hieman renkaita ja niiden toimintaa.

Renkaat ovat alustan komponentti, joka on kontaktissa tien kanssa, joten renkaat ovat suuressa osassa ajoneuvon tiellä pitämiseen ja ajoneuvon liikkeelle saamiseen sekä pysäyttämiseen. Renkaiden valinnassa on tunnettava erilaiset kumiseokset, renkaan rakenteet, alustan säädöt ja olosuhteet. Renkaat siirtävät erilaisia voimia kuten sivuttaisia ja pitkittäisiä kitkavoimat, ja lisäksi ne kantavat myös kuormat.

2 HISTORIA

Kappaleessa esitellään lyhyesti ilmatäytteisen kumipyörän kehitystä. Renkaan rakennetta tarkastellaan tarkemmin työn loppupuolella. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi kumin kitka- ja materiaaliominaisuuksia.

2.1 Ilmatäytteisen kumipyörän keksiminen

Vuonna 1845 Robert William Thomson sai patentin elastiselle, ilmatäytteiselle renkaalle, joka oli valmistettu kumipäällysteisestä kankaasta ja nahasta. Thomson oli aikanaan muita edellä renkaan kehityksessä. Hänen patenttinsa sisälsi renkaan kuvioinnin, jonka tarkoituksena olisi vähentää luistoa. (Braess, Seiffert 2005)

John Boyd Dunlop keksi ilmatäytteisen renkaan toisen kerran vuonna 1888. Dunlop pystyi patentoimaan keksintönsä vain Britanniassa, koska keksintö oli jo tunnettu. (Braess, Seiffert 2005)

Thomsonin sekä Dunlopin keksinnöt hyötyivät amerikkalaisen kemistin Charles Goodyearin löydöstä. Goodyear huomasi vuonna 1839, että luonnonkumia voidaan vulkanoida rikillä, mikä muuttaa luonnonkumin huomattavasti kovemmaksi ja kestävämmäksi. (Braess, Seiffert 2005)

2.2 Ilmatäytteisen kumipyörän kehitys

Dunlopin aikaan polkupyörät kehittyivät nopeasti. Pyörissä alettiin käyttämään täysikumisia tai onttoja paineistamattomia kumirenkaita. Ilmatäyteinen rengas vei mukavuutta eteenpäin ja pienempi pyörimisvastus lisäsi mukavuutta entisestään. Keksinnöstä innostuneena rengasvalmistajat lähtivät kehittämään samantyyppisiä renkaita autoihin. (Braess, Seiffert 2005)

Seuraava iso kehitysaskel oli radiaalirenkaiden (radial tire) tuominen markkinoille. Radiaalirenkaat kestävät paremmin kulutusta, pyörimisvastus on pienempi ja ajettavuus on parempi verrattuna ristikudosrenkaisiin. (Braess, Seiffert 2005)

3 TEORIA

Kappaleessa esitellään lyhyesti kitkateoriaa ja miten kitkavoimat esiintyvät kumissa. Lisäksi tutustutaan kumiin materiaalina ja sen yleisiin ominaisuuksiin. Kappaleen tarkoituksena on pohjustaa ilmatäytteen kumipyörän pito-ominaisuuksia. Renkaan pito ja tiekontakti käydään läpi seuraavassa kappaleessa.

3.1 Kitka

Kitka on kahden materiaalin välillä oleva, liikettä vastustava voima. Perinteisessä kitkateoriassa vastustavan voiman suuruus riippuu kappaleisiin kohdistuvasta voimasta ja niiden kitkakertoimesta. Kumissa kitka esiintyy kuitenkin eri tavalla kuin perinteisessä teoriassa, jonka juuret vievät 1600-luvulle.

3.1.1 Kitkan historiaa

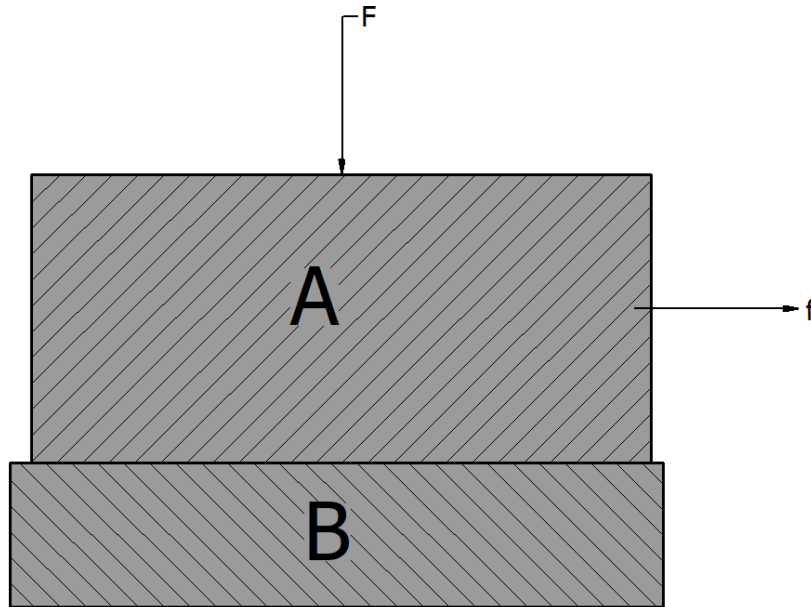
Kitkan löytämisen juuret yltävät 1600-luvulle, jolloin Leonardo da Vinci kehitti kaksi kitkan peruslakia, joiden mukaan kitkan vastus on suoraan verrannollinen voimaan ja riippumaton pinta-alasta. Myöhemmin Amontonos (1699) ja Coulomb (1781) muotoilivat kitkan lait, joita käytetään ja opetetaan edelleen. (Persson, Tosatti 1996)

3.1.2 Amontonosin-Coulombin lait

Kun kappale on paikallaan, sen vetämiseen tarvittava voima on yhtä suuri kuin kappaleiden kitkakertoimen ja kappaleita yhteen painava voima.

$$f_s = \mu_s F \quad (1)$$

Kaavassa 1 f_s on kappaleen liikuttamiseen tarvittava voima, μ_s on kappaleiden välinen lepokitkakerroin ja F on voima, joka painaa kappaleita toisiinsa.



Kuva 1. yksinkertainen kahden kappaleen välinen kitkaesimerkki

Kuvassa 1 kappaleita A ja B painaa voima F. Kappaleiden välissä on materiaalien välinen kitkakerroin μ_s . Kappaletta A joudutaan vetämään voimalla f, jotta kappale saadaan liikkeelle.

Kun kappale on liikkeessä ja liikkuu nopeudella v, kitkavoima on kappaleiden kitkakertoimen ja kappaleita yhteen painavan voiman tulo:

$$f_d = \mu_d F \quad (2)$$

Missä, f_d on tarvittava voima liikuttamaan kappaletta ja μ_d on kappaleiden välinen liikekitkakerroin.

Kitkakertoimet μ_s ja μ_d ovat riippumattomia voimasta F. Kitkakertoimet μ_s ja μ_d riippuvat vain materiaalikontaktista ja ovat suuruudeltaan yleensä välillä 0,1 ja 1. Liikekitkakerroin on yleensä pienempi kuin lepokitkakerroin. (Persson, Tosatti, 2013)

Amontonsin ja Coulombin lait pysyivät empiirisinä, kunnes Bowden ja Tabor toivat mikroskooppisen näkökulman, jossa efektiivinen kosketuspinta-ala on pieni osa koko kosketuspinta-alasta, mikä johtaa kappaleiden välisiin mikrokosketuksiin. Yleensä paine

mikrokosketuksissa ylittää materiaalin elastiset ominaisuudet, jolloin muovautuu plastisesti. (Persson, Tosatti 1996)

Tasapainotilassa normaalivoima on tasapainotettu myötörajalalla:

$$F = p_{myötö} \Sigma_{eff} \quad (3)$$

missä $p_{myötö}$ pehmeämmän materiaalin myötöraja ja Σ_{eff} on kappaleiden efektiivinen pinta-ala.

Mikrokontaktien leikkausvoimasta johtuva kitkavoima saadaan kaavalla:

$$f = \sigma_{leikkaus} \Sigma_{eff} \quad (4)$$

missä $\sigma_{leikkaus}$ on pehmeämmän materiaalin leikkausvoima ja Σ_{eff} on kappaleiden efektiivinen pinta-ala.

Kun yhdistetään kaavat (3) ja (4), saadaan kitkakerroin, joka johtuu vain materiaalin mekaanisista ominaisuuksista.

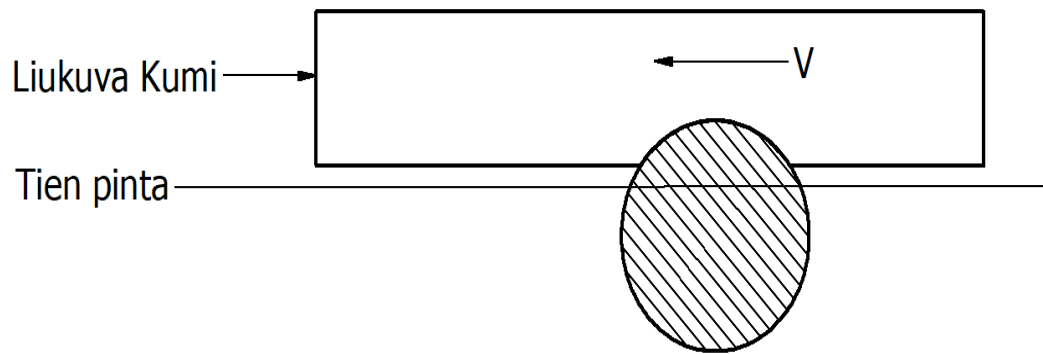
$$\mu = \sigma_{leikkaus} / p_{myötö} \quad (5)$$

3.1.3 Kitka kumissa

Kumi eroaa monista muista materiaaleista esimerkiksi sen kitkaominaisuuksien perusteella. Kuvassa 2 on tilanne, jossa kumi liukuu tienpintaa pitkin. Kumiin voi muodostua tällöin kitkaa kolmella eri tavalla: adheesio eli liimaantuminen, deformaatio eli muodonmuutos ja kuluminen. Kumin kokonaiskitkavoiman yleinen yhtälö on muotoa.

$$F_{kokonais} = F_{ad} + F_{def} + F_{kuluma} \quad (6)$$

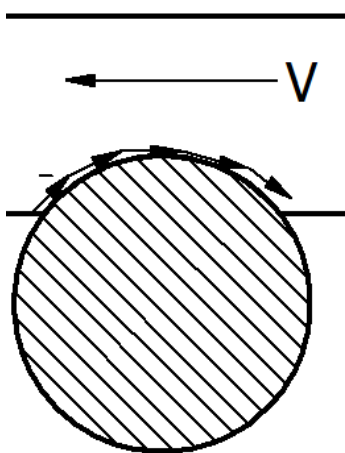
Missä $F_{kokonais}$ on kokonaiskitkavoima, F_{ad} on adheesio kitkavoima, F_{def} on deformaation kitkavoima ja F_{kuluma} on kulumisen aiheuttama kitkavoima.



Kuva 2. Liukuvan kumin ja tienpinnan välinen kosketus

3.1.4 Adheesio

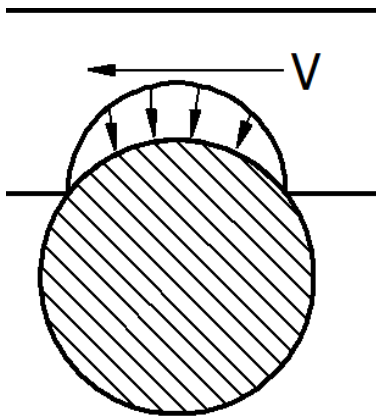
Adheesio on kumin ominaisuus, jonka ansiosta kumi liimautuu muihin materiaaleihin (kuva 3). Adheesio on yleisesti ajateltu johtuvan väliaikaisesta materiaalien molekyyli-tason yhdistymisestä. Jos yhdistävä voima on sama molemmilla pinnoilla, liukumista vastustava voima on verrannollinen kontaktialueeseen. Jos pinnat olisivat täydellisen tasaisia, olisivat kosketuspinta-alat samat kuin koskettavat pinta-alat, mutta näin ei reaali-maailmassa ole. Oikea kosketuspinta-ala riippuu materiaalien pinnanmuodosta, materiaaliominaisuuksista ja pinta-alaan vaikuttavasta paineesta. (Haney 2003)



Kuva 3. Adheesio

3.1.5 Deformaatio

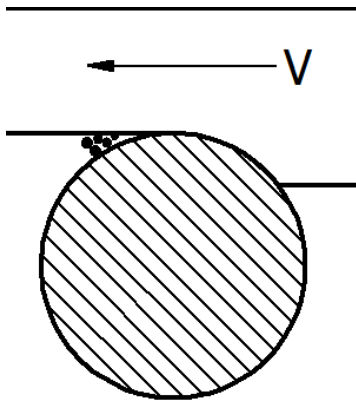
Kun kumi on kontaktissa tasaisen pinnan kanssa, välille syntyvät kitkavoimat ovat pääasiallisesti adheesion synnyttämiä. Kun kumi on kosketuksissa karhean pinnan kanssa, tulee mukaan myös deformaation vaikutukset. Kumin liikkuminen karkealla pinnalla aiheuttaa kumiin muodonmuutosta (kuva 4). Pinnankarheudet voivat läpäistä kumin pintaa. Märällä pinnalla adheesiota ei juurikaan tapahdu, jolloin kitkavoimat johtuvat pääasiassa deformaatiosta. (Haney 2003)



Kuva 4. Deformaatio

3.1.6 Repeytyminen ja kuluminen

Adheesion ja deformaation lisäksi kumi muodostaa kitkavoimia repeytymällä ja kulumalla. Kun deformaatiovoimat kasvavat ja liukuminen nopeutuu, paikalliset jännitykset voivat ylittää kumin vetolujuuden, jolloin kumin polymeerien sisäiset kytkennät voivat rikkoutua, eikä kumi enää palaudu takaisin normaaliin muotoonsa repeämien takia (kuva 5). Kuluminen on repeämien lopullinen muoto. Kun paikalliset jännitykset ylittävät pitkäksi aikaa kumin vetolujuuden, voi kumin repeytyminen johtaa siihen, että kumista alkaa irrota palasia. Näitä palasia voi nähdä esimerkiksi kisaratojen ajolinjojen ulkopuolella. (Haney 2003)



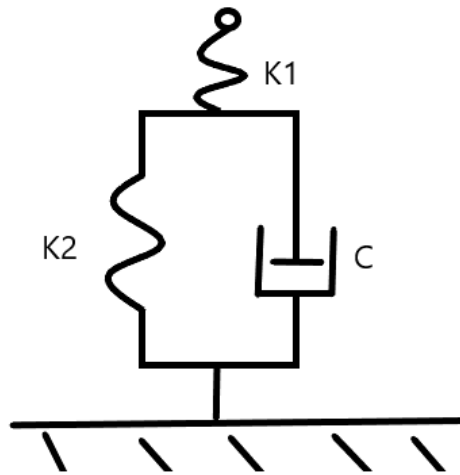
Kuva 5. Repeytyminen ja kuluminen

3.2 Kumi materiaalina

Kappaleessa käydään tarkemmin kumin materiaaliominaisuuksia. Kumi kuuluu elastomeereihin, ja sen ominaisuuksiin perustuu suurin osa kumin pito-ominaisuuksista. Kumi on viskoelastinen materiaali eli sillä on sekä elastisia että viskoosisia ominaisuuksia.

3.2.1 Materiaaliominaisuudet

Kaupallisen kumin tiheys on välillä 1100 ja 1200 Kg/m^3 . Renkaissa käytettävä kumi sisältää kumin lisäksi erilaisia lisäaineita kuten hiilimustaa ja öljyä. Renkaissa käytettävän kumin tiheys on noin 1200 Kg/m^3 . Kumi on viskoelastinen materiaali. Tämä tarkoittaa sitä, että kun kumi vastustaa muodonmuutosta voimalla, mutta myös rentoutuu viskoosisten ominaisuuksien takia, jolloin voima katoaa. (Dixon 1996)

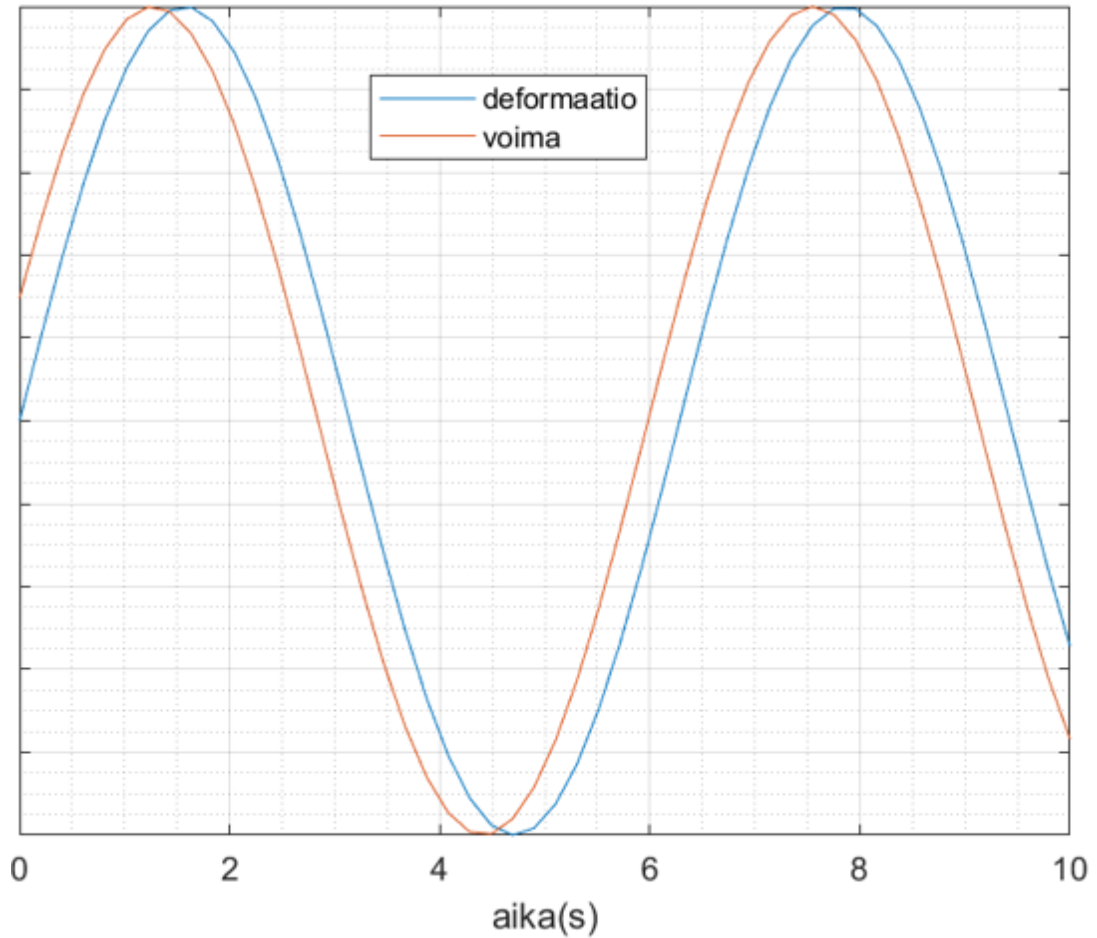


Kuva 6. Kumin mekaaninen malli.

Kuvasta 6. huomataan että mallissa on jouset k_1 ja k_2 , joiden takia kumilla on elastisia ominaisuuksia. Vaimennusvakion C vuoksi kumilla on viskoosisia ominaisuuksia.

3.2.2 Viskoelastinen materiaali

Kuten edellisessä kappaleessa tuli esille, kumi on viskoelastinen materiaali. Eli kumi omaa sekä elastisia eli esimerkiksi jousen tyyppisiä ominaisuuksia ja viskoosisia ominaisuuksia. Viskoelastista materiaalia voidaan kuvata kuvan 6 osoittamalla tavalla. Kun kumiin kohdistetaan puristavaa tai vetävää voimaa, kumin deformaatio tapahtuu pienellä viiveellä, mutta kyseinen viive on pienempi kuin täysin viskoosisilla materiaaleilla. Tätä viivettä kutsutaan hystereesiksi. (Michelin. 2001) Kuva 7 havainnollistaa hystereesiä.



Kuva 7. Hystereesi

3.2.3 Kumin elastisuus

Kumin ainutlaatuinen ominaisuus on sen elastisuus. Kumiä voidaan venyttää suuria määriä, ja silti kumi palautuu alkuperäiseen muotoon. Elastisuus johtuu kumin pitkistä molekyyliketjuista, jotka ovat osittain sidottu toisiinsa rikkisilloilla. Molekyylit värähtelevät käyden läpi samassa energiatasossa olevia tiloja. Lämpötila vaikuttaa molekyylien värähtelyyn. Kun lämpötilaa nostetaan, värähtely kasvaa, minkä takia kumi pehmenee. Lämpötilaa laskettaessa kumin molekyylien värähtely hidastuu, minkä takia kumi voi kovettua jopa lasimaisen kovaksi. (Tuononen, Koisaari 2010)

Kumiin ei sitoudu kaikkea siihen tuotua energiaa, vaan se muuttuu osittain lämmöksi. Tätä tapahtumaa kuvaa häviökerroin:

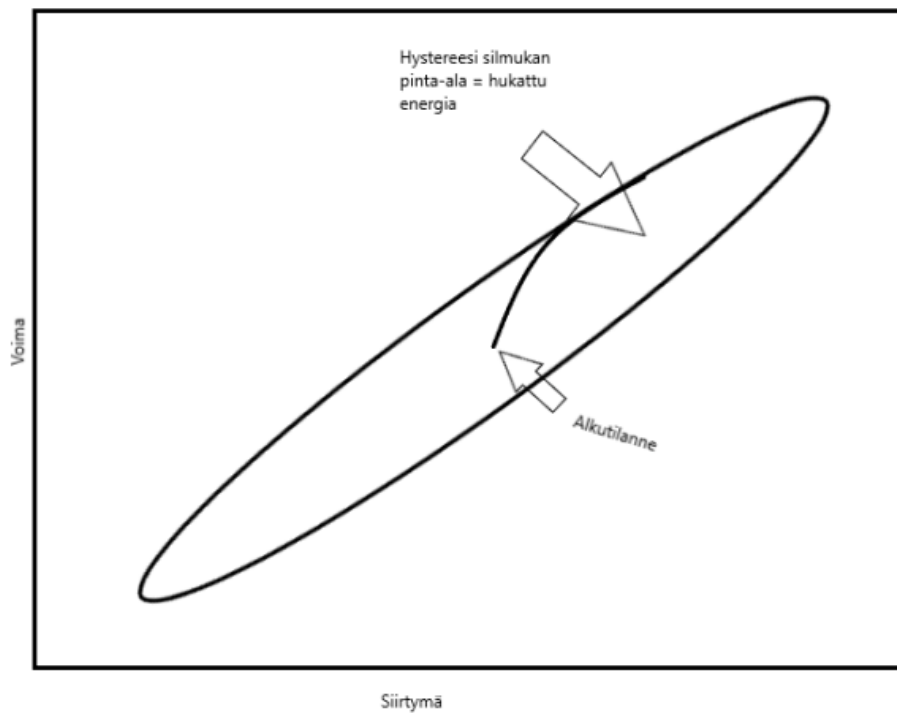
$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (7)$$

missä G'' on häviömoduuli, G' on varastomoduli (elastisuus), δ kuvaa siirtymän (deformaation) ja voiman välistä vaihe-eroa (kuva 7).

Syklisessä kuormituksessa saadaan voiman ja siirtymän välille ns. hystereesisilmukka (kuva 8). Silmukan sisään jäävä pinta-ala kuvaa syklissä hukattua energiaa, joka muuttuu suoraan lämpöenergiaksi. Yhden syklin hukkaama energia yksikkötilavuudelle saadaan häviömoduulin avulla:

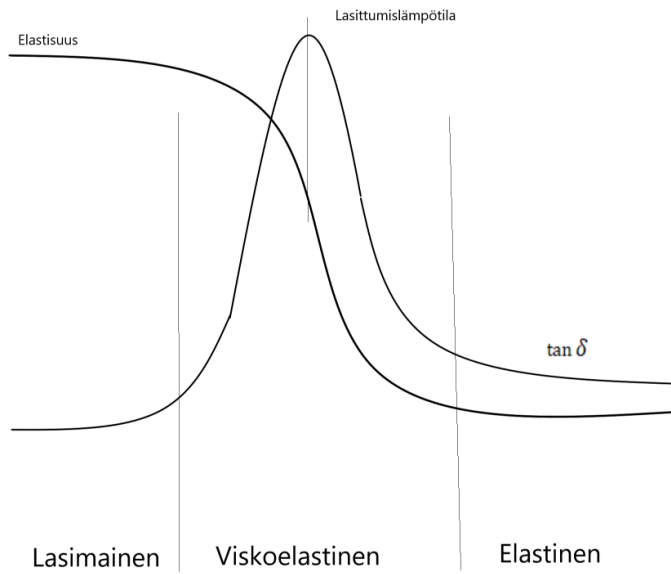
$$U_d = \pi G'' \gamma_m^2 \quad (8)$$

missä U_d on yhden syklin hukkaama energia ja γ_m^2 on liukukulman amplitudi.

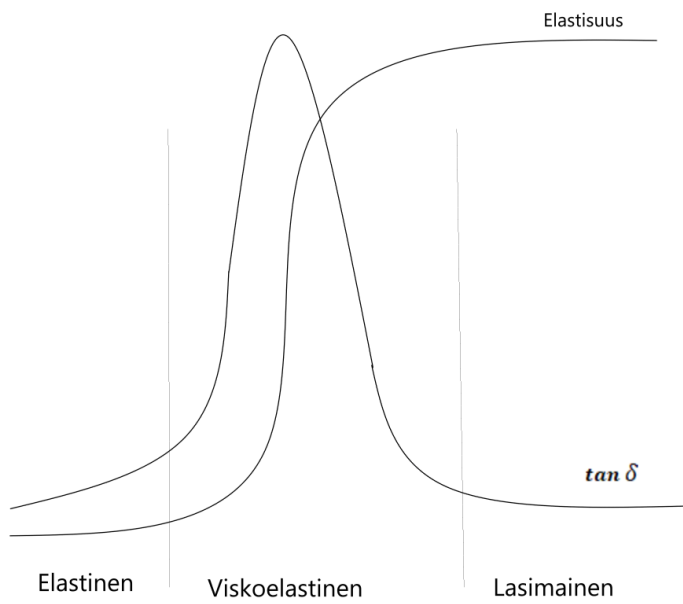


Kuva 8. Hystereesisilmukka

Kumin elastisuus ja energiahäviö ($\tan \delta$) riippuvat kuormitustaajuudesta, että lämpötilasta. Kun taajuus kasvaa, kumin elastisuus katoaa ja kumista tulee erittäin haurasta (kuva 10). Sama haurastuminen huomataan erittäin kylmässä lämpötilassa (kuva 9). Tätä lämpötilaa kutsutaan lasittumislämpötilaksi. Lasittumislämpötilassa energiahäviötä kuvaava $\tan \delta$ saa maksimiarvonsa. (Tuononen, Koisaari 2010)



Kuva 9. Kumin elastisuus ja $\tan \delta$ lämpötilan funktiona



Kuva 10. Kumin elastisuus ja $\tan \delta$ taajuuden funktiona

4 RENKAAN TIEKONTAKTI

4.1 Rengas yleisesti

Ajoneuvon liikkeet ovat melkein kokonaan ohjattavissa renkaan kautta. Renkaan ominaisuuksilla on suuri vaikutus ajoneuvon hallintaan. Renkaan tarkoituksena on vuorovaikuttaa ja siten tukea ajoneuvon liikettä. Renkaiden tulee välittää erilaisia voimia kuten kiihtyvyydestä, jarrutuksesta, kääntymisestä ja ajoneuvon massasta syntyvät voimat. Voimien välittämiseen vaaditaan renkaalta kosketuspintaa eli tässä tapauksessa tiekontaktia.

4.2 Ilmatäytteisen renkaan rakenne

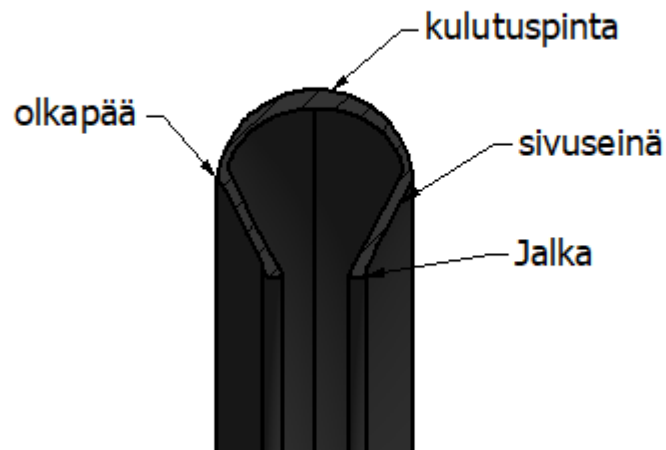
Ilmatäytteisen renkaan rakenteen (kuva 11) pääpiirteitä on kankaalla vahvistettu runko. Runko sisältää useita kerroksia kangasta tai muuta kudosta. Vahvisteena voidaan käyttää esimerkiksi nylonia, jolla on suurempi elastinen kerroin, kun kumilla. (Dixon 1996)

Renkaan jalka on renkaan molempien seinämien alaosassa. Jalan avulla rengas kiinnittyy vanteeseen. Jalka on yleensä vahvistettu teräsvaijerilla. (Heisler 1989)

Renkaan sivuseinämien tulee olla taipuisia ja suojella runkoa mahdollisilta ulkoisilta vauriotekijöiltä kuten viilloilta. Sivuseinän ja kulutuspinnan kohtaamiskohtaa kutsutaan olkapääksi. (Heisler 1989)

Vahvikevyö (vyörenkaissa) sijaitsee renkaan rungon ja renkaan kulutuspinnan välissä. Vyön tehtävänä on vahvistaa rengasta. Vyö valmistetaan yleensä kuitunauhasta tai teräsvaijerista. (Heisler 1989)

Renkaan kulutuspinnan tehtävänä on poistaa vettä ja mahdollistaa monipuoliset pito-ominaisuudet. Kuviossa käytetty materiaali on kulutuskestävää kumia. (Heisler 1989)

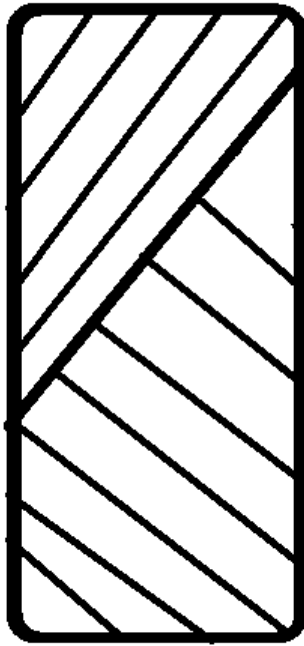


Kuva 11. Renkaan rakenteiden nimityksiä

4.2.1 Ristikudosrenkas

Ristikudos eli diagonaalirenkaissa käytetään samaa kudospelmaa kaikissa kudospelroksissa (kuva 12). Normaali-renkaissa kudospelmat ovat 35–40 astetta kun esimerkiksi kilpa-autojen erikoisrenkaissa kudospelmat ovat 22–30 astetta. (Laine 1979)

Ristikudosrenkaiden hyviin puoliin kuuluu pienten epätasaisuuksien nieleminen ja hyvä ajomukavuus matalissa ajonopeuksissa. Toisaalta ristikudosrenkaiden kuluminen on korkeampaa kuin vyörenkaalla ja ristikudosrenkaiden nopeuskestävyys on huono. (Laine 1979)

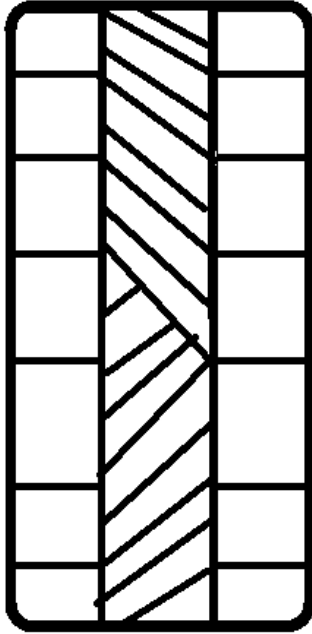


Kuva 12. Ristikudosrenkaan rakenne

4.2.2 Vyörengas

Vyö- eli radiaalirenkaissa kudospelkula on aina lähes 90 astetta (kuva 13). Tästä johtuen rengas olisi liian joustava jarrutus- ja kiihdytysvoimien siirtämisessä. Tämän takia renkaissin on lisätty kudospelkerroksen ja kulutuspinnan väliin tukivöitä. tukivöitä voi olla tilanteesta riippuen 2–4 kappaletta. (Laine 1979)

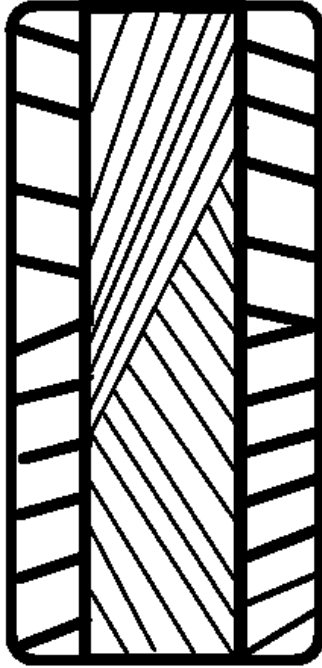
Vyörenkaan hyviin puoliin kuuluu esimerkiksi pieni vierintävastus, kyky välittää tien suurempia voimia ja joustavuus suuremmissa epätasaisuuksissa. Toisaalta vyörengas on herkempi rengaspaineen vaihteluille ja pitokyvyn yläraja tulee terävämmin ja varoittamatta vastaan (Laine 1979)



Kuva 13. Vyörenkaan rakenne

4.2.3 Ristikudosvyörengas

Ristikudosvyörengas on ristikudosrenkaan ja vyörenkaan kompromissi (kuva 14). Renkaan tarkoituksena on parantaa vyörenkaan tärinöitä käyttämällä ristikudoksen terävää kuduskulmaa ja parantaa ristikudosrenkaan huonoa nopeuskestävyyttä lisäämällä tukivöitä. (Laine 1979)



Kuva 14. Ristikudosvyörenkaan rakenne

4.3 Renkaan pito

Renkaan pidon on tarkoitus pitää ajoneuvo tiellä, vaikka ajettaisiin suoraan tasaisella nopeudella. Olosuhteista johtuvat voimat kuten tuuli, tien sivuttaiskulma, tien epätasaisuudet ja vierintävastus vaikuttavat renkaan ja ajoneuvon käyttäytymiseen, vaikka ajetaan suoraan tasaisella nopeudella. Voimien vaikuttaessa ajoneuvon renkaan kontaktipinta alkaa luistamaan, mikä aktivoi kumin adheesio-ominaisuuksia kumin ja tien pinnan välille. (Michelin. 2001)

Pito voidaan jakaa kahteen erityyppiseen pitoon, pitkittäis- ja sivuttaispitoon. Pitkittäinen pito auttaa ajoneuvoa jarruttamaan ja kiihdyttämään. Sivuttaispito auttaa ajoneuvoa kääntymään.

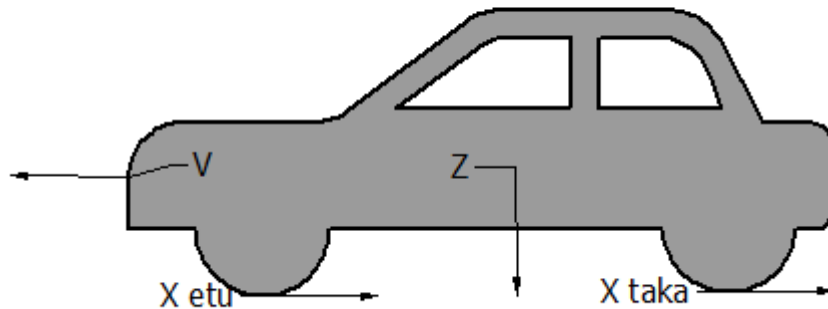
4.3.1 Renkaan pitkittäinen pitokyky

Pitkittäistä pitokykyä syntyy jarrutettaessa ja kiihdytettäessä (kuva 15). Pitkittäisessä suunnassa kitkavoima renkaiden välille saadaan kaavasta:

$$X = \mu_p Z \quad (10)$$

missä X on pitkittäinen kitkavoima yhteensä etu- ja taka-akselilta, μ_p on tien ja renkaan välinen pitkittäinen kitkakerroin, ja Z on ajoneuvon painosta aiheutuva voima.

Kun jarrua painetaan, renkaiden pyörintänopeus alkaa laskea. Vaikka renkaiden pyörintänopeus laskee, ajoneuvon nopeus ei välttämättä hidastu yhtä nopeasti, jolloin rengas voi alkaa liukumaan tien pinnalla eli luistamaan. (Michelin. 2001) Renkaiden luistamisesta lisää kappaleessa 4.3.4.



Kuva 15. Pitkittäisen suunnan kitkavoima

4.3.2 Renkaan sivuttainen pitokyky

Sivuttaista pitokykyä syntyy kaarreajossa. Sivuttaissuunnassa kitkavoima renkaiden välille saadaan kaavasta:

$$Y = \tau Z \quad (11)$$

missä Y on kokonaiskitkavoima sivuttaissuunnassa ja τ on tien ja renkaiden välinen sivuttaissuuntainen kitkakerroin.

Ajoneuvon kääntyessä ajoneuvoon vaikuttaa keskipakovoima, jota renkaiden kontaktipinnat vastustavat. Keskipakovoiman suuruus saadaan laskettua kaavasta:

$$F_c = \frac{MV^2}{R_b} \quad (12)$$

missä F_c on keskipakovoiman suuruus, M on ajoneuvon massa, V on ajoneuvon nopeus ja R_b on ajettavan mutkan halkaisija.

Renkaan kontaktipinnalta vaadittavan voiman suuruus on oltava samansuuruinen kuin keskipakovoiman tuottama voima. Tällöin saadaan yhtälö:

$$Y = -F_c \quad (13)$$

4.3.3 Renkaan vierintävastus

Ajoneuvon vierintävastus on yksi suurimpia liikettä vastustavia voimia. Kovalla maalla ajettaessa vierintävastus on pääasiallinen liikettä vastustava voima. (Gillespie 1992). Kovalla pinnalla ajettaessa vierintävastus johtuu pääasiassa hystereesistä, jota esiintyy renkaan materiaaleissa, joka johtuu renkaan rungon muokkaantumisesta renkaan pyöriessä. (Wong 2001)

Vierintävastus on aina läsnä, kun renkaat ovat liikkeessä. Vierintävastuksella on myös toinen epähaluttu ominaisuus. Suurin osa välitetystä voimasta muuttuu lämpöenergiaksi renkaaseen. Lämmön noustessa liikaa rengas menettää siltä vaaditut ominaisuudet, kuten pito-ominaisuudet ja vaarana on renkaan rakenteen rikkoutuminen (Gillespie 1992)

4.3.4 Renkaan luisto

Renkaiden kuljettaessa pito- tai jarrutusvoimia vierintävastus on suuri johtuen renkaan luistamisesta. Mutkassa syntyvät voimat saavat renkaassa aikaan samat tapahtumat. Suurilla sivuttaiskiihtyvyyksillä vierintävastuskerroin voi jopa kaksinkertaistua. (Gillespie 1992)

Sekä renkaan vetäessä, että jarruttaessa osa renkaan kehänopeudesta kumoutuu kosketuspinnan elastiseen muodonmuutokseen. Muodonmuutoksen kasvaessa tarpeeksi suureksi, rengas pyörii auton liikkumatta lainkaan. (Laine 1979)

Renkaan luisto on siis tulosta ajoneuvon nopeuden ja renkaan pyörimisnopeuden erosta kyseisellä tien kosketuksella. (Michelin 2001) Tästä saadaan luistokerroin:

$$G = \frac{\omega R - V}{V} \quad (14)$$

missä ω on renkaan kulmanopeus, R on pyörimishalkaisija ja ωR tarkoittaa renkaan pyörimisnopeutta.

4.3.5 Ajopinnan laatu

Kitkan muodostamiseen tarvitaan kaksi osapuolta. Kaikki tunnetut pinnanlaadut pitävät hyvin kuivalla kelillä, mutta märällä kelillä ajopintojen kitkakertoimilla voi olla suurtakin eroa. (Laine 1979)

Ajopinnan tulisi olla riittävän rikkonainen, jotta vesi pääsee virtaamaan sekä renkaassa että tiessä olevien urien myötä pois kontaktipinnasta. Lisäksi rikkonaisen pinnan tulisi olla kooltaan ja jaotukseltaan sellainen, että renkaan ja tien pinnan väliin syntyy korkeita pintapaineita vesi-, lumi- ja jääpinnan rikkomiseksi. (Laine 1979)

4.3.6 Rengas märällä

Vesiliirrolla tarkoitetaan renkaan nousemista vesipatjan päälle, jolloin ajoneuvo ”kelluu” veden päällä. Ajonopeuden kasvaessa vesikiila pitenee ja tunkeutuu pidemmälle kontaktipintaan. Suurissa nopeuksissa renkaan kosketuspinnan kosketusaika jää niin lyhyeksi, etteivät renkaissa olevat urat pysty enää siirtämään vettä tarpeeksi tehokkaaksi, vaan vesi patoutuu renkaan alle. (Laine 1979)

4.3.7 Rengas lumella ja jäällä

Lunta on monenlaista ja lumen eri olomuodot vaikuttavat renkaan toimintaan eri tavalla. Loskaa voidaan verrata korkeaviskoosiseen nesteeseen, pakkaantunutta lunta voidaan verrata jäähän ja pehmeää lunta voidaan verrata hienojakoiseen hiekkaan. (Tuononen, Koisaari 2010)

Lumen puristuvuus vaikuttaa suuresti renkaan toimintaan lumella. Renkaan päästessä kosketuksiin lumen kanssa koko kulutuspinnan syvyydeltä syntyy jopa

hammaskosketuksen tyyppinen muotolukitus. Lumi on materiaalina heikkoa, kun sitä verrataan muihin tienpintoihin. (Tuononen, Koisaari 2010)

Jäällä renkaan ja jään välinen kitka riippuu voimakkaasti jään pinnalla olevan veden määrästä. Jään matala kitka johtuu kitkasulamista. Jään pinnankarheuksiin vaikuttava kitkavoima pystyy sulattamaan jäätä riittävän lämpimissä oloissa. Lämpötilan laskiessa tarpeeksi alas kitkasulamista ei enää tapahdu. (Tuononen, Koisaari 2010)

Kumi lämpenee jäällä liukuessaan, vaikka kumin lämmönjohtavuus on heikko [0,15–0,3 W/(m*K)]

4.4 Eri rengastuksien eroja kontaktipintaan

Ajoneuvon rengasvalinnoilla voidaan vaikuttaa suuresti ajoneuvon ajettavuuteen. Valitsemalla oikeanlainen rengastus sään, lämpötilan ja tien pinnan mukaan, saavutetaan optimaalisin pito tiettyyn olosuhteeseen. Tässä osiossa käydään lyhyesti läpi kuitenkin kesä- ja talvirenkaita. Talvirenkaista käyn lyhyesti läpi nast- ja kitkarenkaita.

4.4.1 Kesärenkaat

Kesärenkaiden tehtävänä on siirtää vettä ja mahdollistaa hyvä pito kuivalla ja märällä tien pinnalla. Kesärenkaiden kuvioinnin tarkoituksena on mahdollistaa mahdollisimman hyvä vedensiirto renkaan kehällä ja vaakatasossa (kuva 16). (Heisler 1989)



Kuva 16. Kesärenkas

4.4.2 Talvirenkaat

Talvirenkaiden tehtävänä on siirtää vettä, lunta ja näiden sekoitusta (loskaa) tehokkaasti. Siksi talvirenkaissa kuviointi on leveämpi ja urasyvyys on suurempi. Kuvioinnin leveyden ja syvyyden avulla saadaan optimoitua lumen, veden ja loskan siirtäminen ilman, että renkaan kuvioinnin kosketuspinta-ala pienenee. Talvirenkaissa oleva kuviointi, materiaali ja nastarenkaissa nastat auttavat rengasta pitämään jäällä (kuva 17). (Heisler 1989)

Nastarenkaissa nastojen lukumäärää, massaa, sijoitusta, ulkonemaa ja muotoa on rajoitettu lainsäädännöllä. Nastoilla pyritään kasvattamaan kosketuspinnan pintapainetta jäällä ja kovalla lumella ajettaessa. Nastarenkaan hyödyt tulevat esille, kun lämpötila on nollan tienoilla. Tällöin kumin pito jäähän on heikoimmillaan ja jää on pehmeimmillään, jolloin nastat uppoavat paremmin jäähän. (Tuononen, Koisaari 2010)



Kuva 17. Nastarengas

4.5 Rengaspaineiden vaikutus kontaktipintaan

Rengaspaineilla on suuri merkitys renkaan kestoikään ja kulutuspintaan. Liian alhainen tai liian korkea paine aiheuttaa suuria muodonmuutoksia renkaan rakenteessa. Alhaisessa paineessa etenkin renkaiden reunaosien kuluminen lisääntyy voimakkaasti. Liian korkeilla paineilla ajettaessa renkaiden kontaktipinta-ala pienenee, jolloin renkaat myös kuluvat keskeltä kulutuspinnaa. Korkeilla paineilla ajettaessa renkaan kuluminen on vähemmän vaarallista verrattuna alhaiseen paineeseen. (Laine 1979)

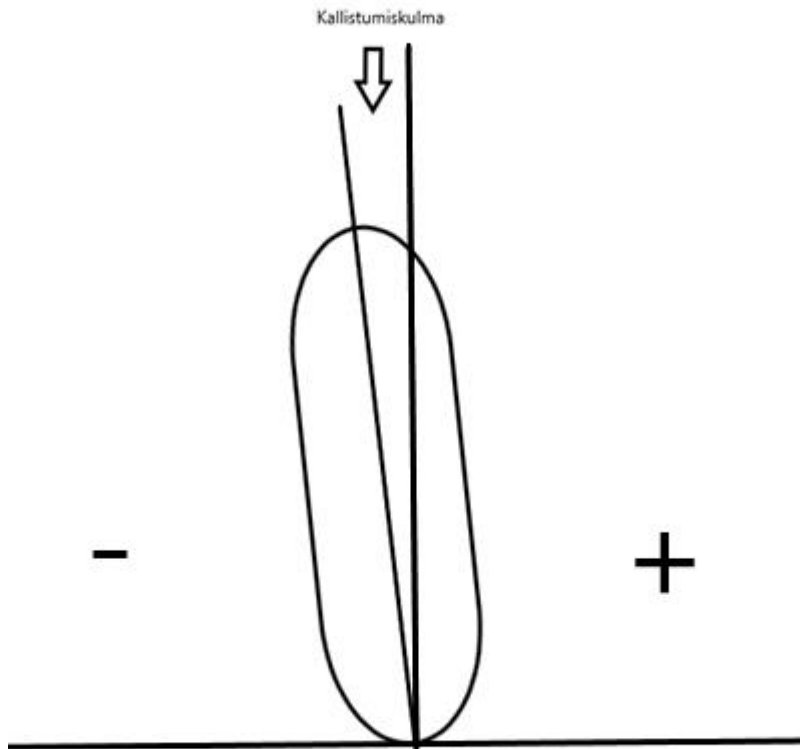
4.6 Alustan säätöjen vaikutus kontaktipintaan

4.6.1 Pyöränkallistuskulma (Camber-kulma)

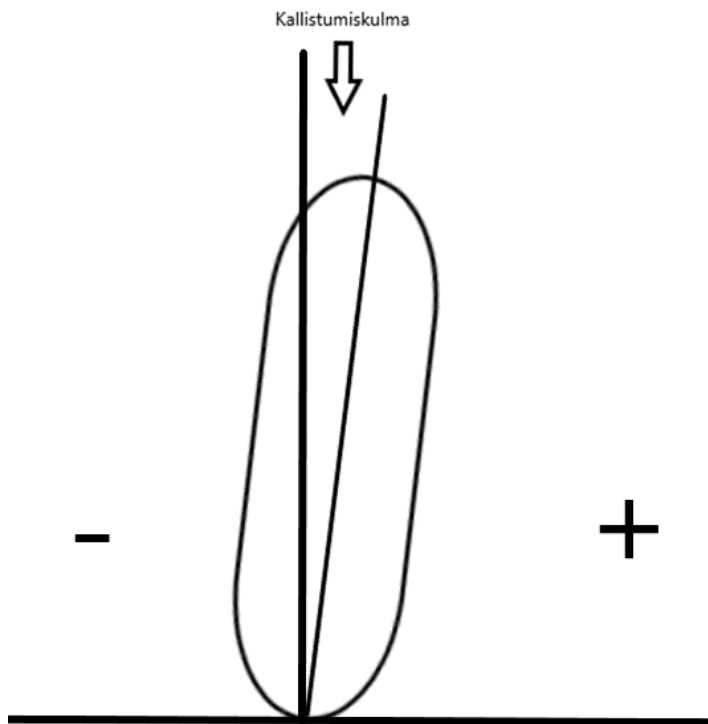
Camber-kulmalla tarkoitetaan renkaan kallistamista sivusuunnassa verrattuna pysty akseliin. Kun rengas kallistuu sisäänpäin, puhutaan negatiivisesta camber-kulmasta (kuva 18) ja renkaan kallistuessa ulospäin puhutaan positiivisesta camber-kulmasta (kuva

19). Positiivinen camber-kulma vähentää sivuttaisvoimaa (cornering force), kun negatiivinen camber-kulma lisää kyseistä voimaa. (Heisler 1989)

Camber-kulma saattaa nostaa renkaasta saatavaa maksimisivuvoimaa. (Tuononen, Koisaari 2010) Suuri camber-kulma (positiivinen tai negatiivinen) aiheuttaa rajua renkaan toispuolista kulumista (Kuva 20).



Kuva 18. Negatiivinen kallistumiskulma



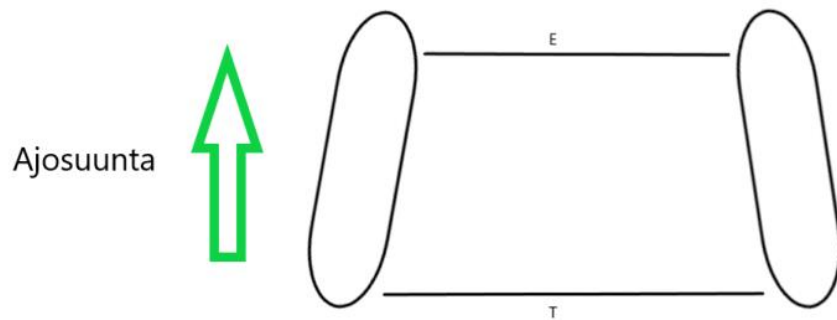
Kuva 19. Positiivinen kallistumiskulma



Kuva 20. Toispuoleisesti kulunut rengas

4.6.2 Auraus (Toe in) ja haritus (toe out)

Aurauksella ja harituksella tarkoitetaan renkaiden pitkittäisvinoutta. Aurausta ja haritusta voidaan mitata monin eri tavoin. Kuva 21 esittää yksinkertaisen tavan mitata onko pyörät säädetty auraukselle vai haritukselle. Auraukseksi kutsutaan tilannetta, kun $T > E$ ja haritusta kun $E > T$. Auraus helpottaa ohjauksen palautumista pienillä auraukskulman suuruusluokkaa olevilla kääntökulmilla. Loivassa vasemmalle kääntyvässä mutkassa vasemmanpuoleinen rengas oikenee ensin, kun oikeanpuoleinen rengas kääntyy kaksinkertaiseen auraukskulmaan. Tämän seurauksena oikeanpuoleisen renkaassa vierintävastus kasvaa huomattavasti. Sama tietenkin tapahtuu oikealle käännettäessä, jolloin oikeanpuoleisen renkaan suoristuessa vasemmanpuoleinen rengas kääntyy kaksinkertaiseen auraukskulmaan. (Laine 1979)



Kuva 21 Auraus (toe in) $T > E$

5 YHTEENVETO

Työssä esiteltiin kumin kitkateoriaa ja miten se eroaa perinteisestä kitkateoriasta. Perinteisestä kitkateoriasta eroten kumissa kitkaa ilmenee kolmella eri tavalla: adheesiolla, deformaatiolla ja kulumisella. Työssä perehdyttiin myös renkaiden rakenteeseen ja toimintaan.

Työn aikana opin etsimään tietoa eri tietokannoista ja aiheeseen liittyvien julkaisujen joukosta. Monissa ajoneuvodynamiikan kirjoissa vähän sivuttiin renkaiden toimintaa ja niiden kontaktia tienpinnan kanssa.

Renkaan ja tien välinen kontakti vaikuttaa suurest ajoneuvon ajettavuuteen. Renkaiden toiminta eri tienpinnoilla ja olosuhteissa on tärkeä tietää, kun suunnitellaan ajoneuvoa. Renkaiden tiekontakti erityisesti talvella on vaikea kuvata. Lumi ja jää luovat yhdessä todella hankalat olosuhteet renkailla. Maksimaalisen pidon tavoittelu on erityisesti kilpa-autoissa tärkeää, kun henkilöauton renkaalta vaaditaan myös monipuolisuutta ja joustavuutta olosuhteiden ja tienpinnan kunnon takia.

Jatkotutkimusaiheet voisivat liittyä renkaiden rakenteen, kuvioinnin ja kumi seosten kehittämiseen. Erityisesti talvirenkaiden kehitykseen ja tutkimukseen olisi täällä pohjoisessa hyvä keskittyä.

LÄHDELUETTELO

BRAESS, H. and SEIFFERT, U., 2005. *Handbook of automotive engineering*. Warrendale, Pa: SAE.

DIXON, J.C., 1996. *Tires, suspension and handling*. 2. ed edn. Warrendale (PA): SAE.

GILLESPIE, T.D., 1992. *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale (PA): SAE.

HANEY, P., 2003. The racing & high-performance tire. *Aufl.SAE, Warrendale*, .

HEISLER, H., 1989. *Advanced vehicle technology*. London: Edward Arnold.

LAINEN, O., 1979. *Autotekniikka. 1. osa, Ajo-ominaisuudet*. 3. täysin uus. p. edn. Tampere: Sonator.

MICHELIN, 2001. The tyre, Grip. http://www.dimnp.unipi.it/guiggiani-m/Michelin_Tire_Grip.pdf [6.2.2021]

PERSSON, B.N.J. and TOSATTI, E.(., 1996. *Physics of sliding friction*. Dordrecht; Boston: Dordrecht; Boston : Kluwer Academic Publishers.

TUONONEN, A. and KOISAARI, T., 2010. *Ajoneuvojen dynamiikka*. Helsinki: Autoalan Koulutuskeskus Oy.

WONG, J.Y., 2001. *Theory of ground vehicles*. 3rd ed edn. New York: Wiley.