



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Eemeli Paasonen

# Henkilöauton kesärenkaiden tekniikka tänään ja huomenna

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

26.11.2019

Tekijä Otsikko	Eemeli Paasonen Henkilöauton kesärenkaiden tekniikka tänään ja huomenna
Sivumäärä Aika	49 sivua 26.11.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Ohjaaja Lehtori Pasi Oikarinen
<p>Insinööriyössä selvitettiin henkilöautojen kesärenkaiden tekniikkaa nykyhetkellä ja tulevaisuudessa rengasteknologian näkökulmasta. Insinööriyön tavoitteena on kuvata renkaiden tekniikkaa perustiedoista ja ajodynaamisesta käyttäytymisestä lähtien syvälliseen materiaalitekniikkaan asti. Työn pääpaino on nimenomaan renkaiden materiaalitekniikassa ja niissä käytettyjen kumiseosten viskoelastisissa ominaisuuksissa. Työ on tehty kirjallisuustutkimuksena.</p> <p>Työssä tarkastellaan aluksi renkaiden perustietoja ja fysiikkaan liittyviä ominaisuuksia. Näitä ovat esimerkiksi rengastyypit, kitkaominaisuudet ja renkaisiin kohdistuvat erilaiset voimat. Perustietojen jälkeen käsitellään renkaiden valmistusprosessia ja raaka-aineita.</p> <p>Työn materiaalitekniikkaan keskittyvissä osioissa kuvataan eri materiaalien käytön tarkoitus renkaassa ja kuinka materiaalit vaikuttavat renkaan käyttäytymiseen. Renkaiden materiaaliominaisuuksista todettiin, että renkaiden kitkaominaisuudet ja alhainen vierintävastus ovat hyvin keskeisiä ominaisuuksia, joihin voidaan vaikuttaa eri materiaaleilla. Työssä kuvataan myös, miten rengasmateriaaleja voidaan tutkia ja testata. Sopiviksi menetelmiksi todettiin erilaiset kokeelliset ja matemaattiset mallit.</p> <p>Renkaiden tulevaisuuteen keskittyvässä osiossa tarkastellaan erilaisia rengasteknologian innovaatioita, jotka ovat yleistymässä. Lisäksi pohditaan, mitä haasteita tulevaisuus tuo tullessaan. Myös erilaiset säännökset ja ympäristöasiat vaikuttavat merkittävästi rengasteknologian tulevaisuuteen.</p> <p>Työssä päädytään siihen, että rengasteknologia on jatkuvassa kehityksessä oleva auto-teollisuuden ala. Tulevaisuudessa yleistyvät useat erilaiset rengasteknologian innovaatiot. Samalla päädytään myös siihen, että rengasvalmistajien on kuitenkin otettava huomioon autojen modernisoituminen, erilaiset vaatimukset ja ympäristöpolitiikka.</p>	
Avainsanat	rengas, rengasmateriaali, viskoelastisuus, kumi, elastomeerit, rengastekniikka

Author Title	Eemeli Paasonen Summer Tire Technology of Passenger Cars Today and Tomorrow
Number of Pages Date	49 pages 26 November 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive Design Engineering
Instructors	Pasi Oikarinen, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to investigate the technology of summer tires for passenger cars from the perspective of tire technology at present and in the future. Tire technology was described starting from basic tire knowledge and continuing then in depth to material technology. The main focus in the thesis was on the material technology of the tires and the viscoelastic properties of the rubber compounds. The work was carried out as a literature study.</p> <p>In the first part of the thesis the basic data and physics-related properties of the tires are examined. This part includes, for example tire types, frictional properties and different kind of tire forces. Following the basic information, the tire manufacturing process and the raw materials are discussed.</p> <p>The material technology sections of this Bachelor's thesis describes the purpose of using different materials in a tire and how materials affect the behavior of the tire. It was found that such key properties as friction and low rolling resistance of tires could be significantly influenced by different material components used in tire rubbers. The Bachelor's thesis also describes how tire materials could be studied and tested. Various experimental and mathematical models were found to be suitable methods.</p> <p>The future section of this Bachelor's thesis describes various tire technology innovations that are becoming more common. The future section also discusses what kind of challenges the future may bring. Different regulations and environmental issues will have also a major impact on the future of tire technology.</p> <p>In conclusion, it could be stated that tire technology will be a constantly evolving field of the automotive industry. Many tire material and design technology innovations will become more common in the future. At the same time, it could be concluded that tire manufacturers must take into account the modernization of cars, different requirements and environmental policy.</p>	
Keywords	tire, materials, rubber, elastomers, viscoelastic, elastomers

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taustatietoa renkaiden tekniikasta	2
2.1	Renkaiden kehityshistoria	2
2.2	Renkaiden päätehtävät ja vaikutukset autoon	3
2.2.1	Renkaiden tehtävä henkilöautossa	3
2.2.2	Renkaiden kitkaominaisuudet	4
2.2.3	Vetävä ja vierivä rengas	6
2.2.4	Renkaiden sivuttaisvoimat	7
2.3	Rengastyypit	9
2.3.1	Ristikudosrenkaat	9
2.3.2	Vyörengas	9
2.3.3	Run flat -renkaat	11
2.3.4	Off road -renkaat	12
2.4	Renkaiden valmistus	12
2.4.1	Raaka-aineet	12
2.4.2	Sekoitus	13
2.4.3	Kokoonpano	13
2.4.4	Vulkanointi	14
2.4.5	Tarkastus ja testaus	14
3	Renkaiden materiaalitekniikka	15
3.1	Rengasmateriaalien tavoitteet	15
3.1.1	Vierintävastus	15
3.1.2	Kulutuskestävyys	16
3.1.3	Märän kelin ajo-ominaisuudet	17
3.1.4	Kaarrajo-ominaisuudet	17
3.1.5	Ajo-ominaisuudet suurilla nopeuksilla	18
3.1.6	Lämpötilan hallinta	19
3.1.7	Rengasmelu	20
3.1.8	Ajomukavuus	20
3.2	Rengasmateriaalien perustiedot	21
3.3	Pintakumimateriaalit	23
3.3.1	Tyypilliset pintakumimateriaalit	23



3.3.2	Pintakumimateriaalien kehitys	25
3.4	Tekstiilivahvikkeet	28
3.5	Kumin viskoelastiset ominaisuudet	29
3.5.1	Viskoelastisuuden taustaa rengasmateriaalitekniikassa	29
3.5.2	Viskoelastisuuden testaus	29
3.5.3	Viskoelastisuuden vaikutus vierintävastukseen ja kitkaan	32
3.6	Renkaan vierintävastuksen ja lämmönkehityksen simulointi	35
4	Rengastekniikan tulevaisuus	39
4.1	Taustatietoa rengastekniikan tulevaisuudesta	39
4.2	Merkittäviä innovaatioita	40
4.2.1	Ilmattomat renkaat	40
4.2.2	Anturitekniologian lisääntyminen rengasteknologiassa	41
4.2.3	Futuristiset renkaat	42
4.2.4	Nanotäyteaineet	42
4.2.5	Itse itsensä paikkaavat renkaat	43
4.2.6	Ekoystävälliset renkaat	43
4.3	Kestävän kehityksen vaatimukset renkaille	43
4.4	Tulevaisuuden haasteet	45
4.4.1	Renkaiden ympäristöystävällisyys	45
4.4.2	Autonomisten ajoneuvojen tarpeisiin vastaaminen	45
4.4.3	Turvallisuus	46
4.4.4	Markkinoiden välinen kilpailu ja tarpeisiin vastaaminen	46
5	Yhteenveto	47
5.1	Päätelmiä rengastekniologian nykyhetkestä ja tulevaisuudesta	47
5.2	Pohdintaa selvityksen onnistumisesta	48
	Lähteet	49

## Lyhenteet

BIIR	bromo-butyl rubber
BR	butadiene rubber
CIIR	chloro-butyl rubber
DOE	design of experiments
DOT	department of transportation
FEF	fast extruding furnace
HAF	high abrasion furnace
IRHD	international rubber hardness degree
ISAF	intermediate super abrasion furnace
MC	microcrystalline
NR	natural rubber
SBR	styrene-butadiene-rubber
UHP	ultra high performance
UPTIS	unique puncture-proof tyre system
WLF	Williams Landel Ferry
XNBR	carboxylated nitrile rubber

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön aiheena on tehdä selvitys henkilöauton kesärenkaiden tekniikasta nykyaikana ja arvioida myös rengastekniikan tulevaisuutta. Selvityksen pääpaino on renkaiden materiaalitekniikassa. Tämän lisäksi käydään läpi myös renkaiden fysiikkaa, rakennetta ja valmistusta. Tavoitteena on luoda tiivistetty tietopaketti edellä mainituista aiheista ja pohtia erilaisia ominaisuuksia, ongelmatilanteita ja tulevaisuuden näkymiä rengastekniikkaan liittyen. Insinööriyön aiheen idea perustuu henkilökohtaiseen kiinnostukseen rengastekniikkaa kohti. Aiheen tärkeydestä huolimatta kyseisestä aiheesta on tehty vähän tutkimus- ja opinnäytetöitä Suomessa.

Selvitys tehdään itsenäisesti ilman yhteistyökumppania. Tarkoituksena on kerätä tietoa kirjallisuuslähteistä, kuten esimerkiksi rengastutkimuksista, oppimateriaaleista, lehdistä, kirjoista ja raporteista. Tietoa voidaan saada myös rengasvalmistajilta, opettajilta tai muilta alan asiantuntijoilta. Selvitykseen liitetään tekstin lisäksi havainnollistavia kuvia ja taulukoita tai diagrammeja.

## 2 Taustatietoa renkaiden tekniikasta

### 2.1 Renkaiden kehityshistoria

Renkaiden historiaan sisältyy monenlaisia vaiheita (kuva 1). Varsinaisena renkaiden historian alkuna voidaan pitää ilmatäytteisen renkaan keksimistä. Tämän saavutuksen sai aikaan Dunlop-rengasvalmistajan luoja John Boyd Dunlop vuonna 1888. On huomioitavaa, että ilmatäytteisen renkaan oli keksinyt tätä ennen R.W. Thompson vuonna 1845, mutta yleisessä käsityksessä on, että Dunlop oli renkaiden keksijä, koska hän myös patentoi keksintönsä.

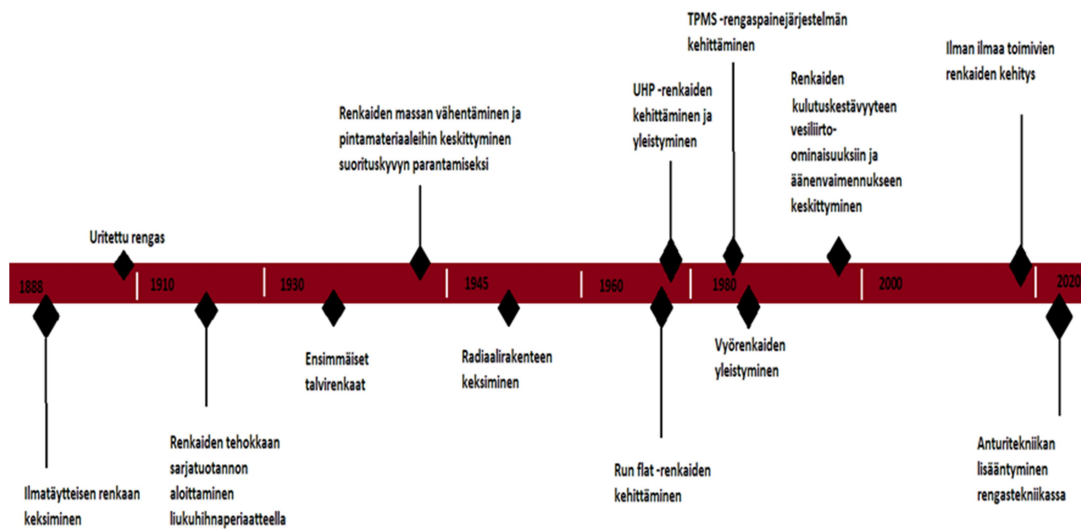
Ensimmäinen uritettu rengas valmistettiin vuonna 1908. Tämä paransi huomattavasti ajoneuvojen pito-ominaisuuksia ja turvallisuutta. Tehokas renkaiden sarjatuotanto alkoi 1910-luvulla, kun liukuhihnaperiaatteella toimivan linjaston käyttö renkaiden valmistamiseksi yleistyi. Tämä mullisti renkaiden valmistustehokkuuden ja laadun. 1940-luvulta eteenpäin insinöörit alkoivat pohtia, onko rengasmateriaaleilla ja urilla vaikutusta ajoneuvon suorituskyvyn lisäksi myös polttoaineenkulutukseen. Tämän johdosta keksittiin useita erilaisia ratkaisuja renkaiden massan vähentämiseksi, joista yksi esimerkki on renkaat joihin ei tarvittu sisäkumia. Ajoneuvon suorituskyvyn parantamisen lisäksi kumimateriaalien säästämisen motiivina oli myös kohonnut öljyn hinta, joka lisäsi renkaiden valmistuskustannuksia.

Hieman ennen 1940-lukua alettiin myös valmistaa ensimmäisiä talvirenkaita. Tässä yhtenä edelläkävijänä oli Suomen Gummitehdas. 1950-luvulla keksittiin yksi rengas-tekniikan historian suurimmista ratkaisuista, joka oli niin sanotun ristikudosrakenteen keksiminen renkaaseen. Tässä rengastyypissä kudusrunkoon sisältyy jalka-alueesta jalka-alueeseen ulottuvat tekstiilirakenteet, jotka kulkevat 90 asteen suunnassa renkaan pyörimissuuntaan nähden.

2000-lukua kohti mentäessä vyörenkaat ovat yleistyneet huomattavasti ja lähes korvanneet ristikudosrenkaat. Renkaan vyöt koostetaan eri menetelmillä, jolloin renkaiden osa-alueilla on omat tehtävänsä. Vyörenkaiden ohella on kehitetty useita UHP (Ultra high performance) -renkaita, joiden tarkoitus on kestää suuria massoja, tehoja ja nopeuksia. Muita keksintöjä ennen 2000-lukua ovat niin sanotut run flat -renkaat, joilla voidaan renkaan puhjettua kulkea vielä kohtuullinen matka eteenpäin renkaan vaihtoa

varten. 2000-luvun puolella rengastekniikka on keskittynyt enimmäkseen vierintävas-  
tuksen pienentämiseen (polttoaine- ja sähköenergian säästön vuoksi), kulutuskestävyy-  
teen, äänenvaimennukseen ja vesiliirtoon liittyviin pito-ominaisuuksiin. Tulevaisuuden  
kehitys puolestaan keskittyy muun muassa antureilla varustettuihin renkaisiin ja täysin  
ilman ilmaa toimiviin renkaisiin. (1)

### Rengastekniikan historian kehitysvaiheita



Kuva 1. Rengastekniikan historian kohokohtia 1800-luvun lopulta nykyhetkeen.

## 2.2 Renkaiden päätehtävät ja vaikutukset autoon

### 2.2.1 Renkaiden tehtävä henkilöautossa

Renkaita käytetään ajoneuvossa vanteiden päällä, ja niiden funktiona on ohjata, suoja-  
ta ajoneuvoa teiden epätasaisuuksilta, vaimentaa iskuja, alentaa melutasoa, kannatella  
ajoneuvon massaa ja välittää akselin vääntömomentti kitkan avulla tien pintaan. Henki-  
löautossa käytetään lähes poikkeuksetta erilaisista kumimateriaaleista koostuvia ilma-  
täytteisiä renkaita. Renkaita on olemassa autotekniikassa moneen erilaiseen käyttöön,  
kuten esimerkiksi normaaliin liikennekäyttöön, maastoon, kilpa-ajoneuvoihin ja poik-  
keaviin sääolosuhteisiin. (2, s. 3 - 10.)

## 2.2.2 Renkaiden kitkaominaisuudet

Renkaan ja alustan välistä kitkaa selitetään usein kahden osatekijän eli hystereesi- ja adheesiokomponentin summana (kuva 2). Muodonmuutoskomponentiksi luokiteltu hystereesikomponentti on parhaimmillaan vain noin kolmasosa koko kitkavoimasta olosuhteista riippuen. Tasaisella ja kuivalla alustalla tämän kitkan merkitys ei ole kovin suuri, mutta märällä kelillä merkitys on erittäin suuri. Hystereesikitkaa määriteltäessä on muistettava, että se riippuu liukunopeudesta. Renkasiin voi paikoin kohdistua hyvin suuria pintapaineita. Näistä seuraa molekyylien välisiä voimia vastinpintojen välille. Kun pinnat liikkuvat, syntyy työntövoimia, joiden vaakasuoraa vektoria kutsutaan adheesiovoimaksi. Adheesiovitka voi olla täysin määräävä alhaisissa nopeuksissa ja todella hyvissä olosuhteissa. Adheesiovitka riippuu myös liukunopeudesta. Kumikitkaa määriteltäessä on syytä muistaa, että sen arvo voi olla suurempi kuin 1. Kumilla kitkakerroin laskee pintapaineen kasvaessa. Rengaspaineet vaihtelevat tyypillisesti välillä 1,7 - 2,7 bar. Karkeasti määriteltynä rengaspaineen täytyy olla sitä suurempi, mitä suurempi on henkilöauton massa. Henkilöauton ominaisuudet vaikuttavat myös rengaskitkaan. Näitä ovat esimerkiksi akselistokonstruktiot, pyörien asentokulmat, jousitus, vakaajat, vanteet ja aerodynamiikka. (3)

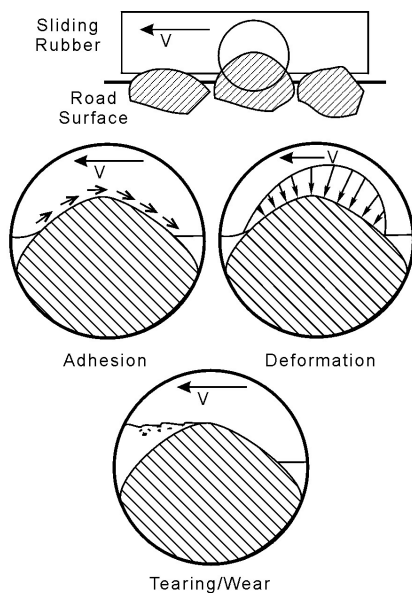
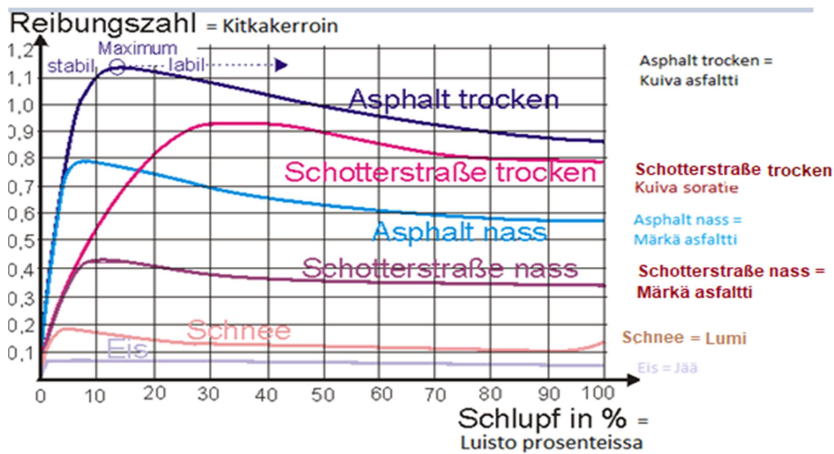


Fig. 3.2 Major Components of Rubber Friction

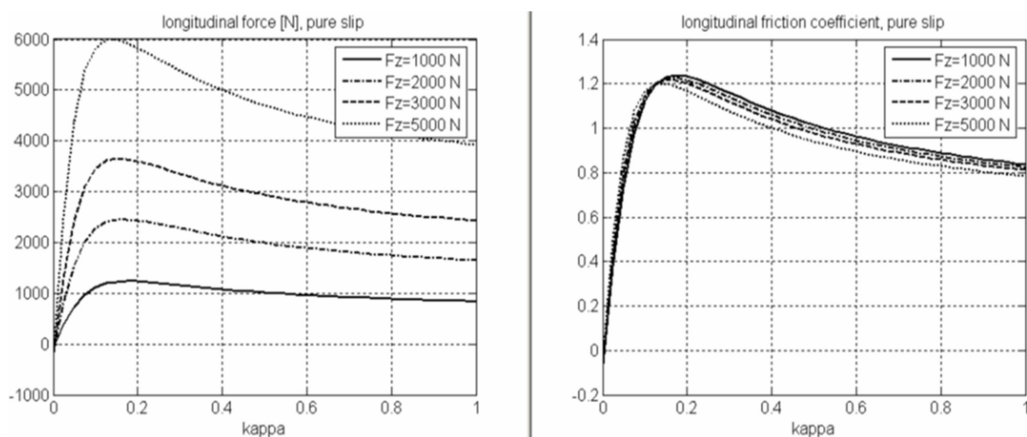
Kuva 2. Rengaskitkan pääkomponentit. Kuvassa on näytetty kitkakomponenttien käyttäytymistä. (3)

Kitkakerroin vaihtelee myös hyvin paljon tien alustasta riippuen (kuva 3). Pidon suhteen optimaalisimmilla alustoilla kitkakerroin voi olla jopa yli 1. (4)



Kuva 3. Kitkakerroin ja luisto. Esimerkkikuvaaja kesärenkaiden kitkakertoimesta luiston funktiona erilaisilla tiealustoilla. (4)

Kuvan 4 perusteella pyöräkuorman noustessa pitkittäissuuntaisen jarruvoiman huippuarvo kasvaa lähes samassa suhteessa. Itse kitkakertoimeen pyöräkuormalla on marginaalinen vaikutus. Tarkkaan katsoen kitkakerroin pysyttelee hieman korkeampana suuremmalla pyöräkuormalla alkuvaiheessa eli ennen kuin saavutetaan noin 0,1 luisto. Huippuarvon jälkeen eli luiston ollessa vaikeasti hallittavalla alueella kitka on suurempi matalammalla pyöräkuormalla. Autojen ABS-jarrujärjestelmä säädetäänkin toimimaan alueella, joka on ennen luiston huippuarvoa. (2, s. 10 - 19.)



Kuva 4. Jarrutusvoima ( $F_x$ ) ja kitka ( $\mu_x$ ) pitkittäisen luiston ( $\kappa$ ) funktiona, parametrina pyöräkuorma ( $F_z$ ) (2, s. 10).



Kuvassa 5 taas on esitetty vastaavat käyrät sivuttaisvoimille sortokulman funktiona. Poikittaisvoimatapauksessa kitkakerroin alenee jonkin verran pyöräkuorman kasvaessa koko tarkastellulla sortokulma-alueella.

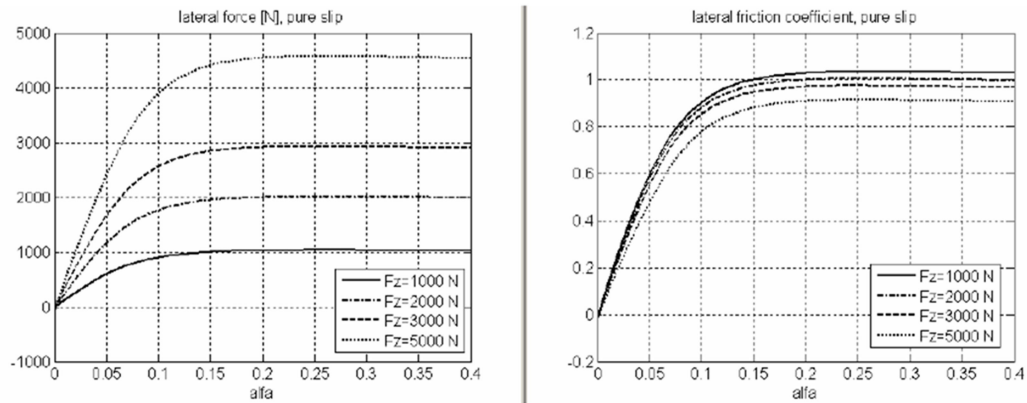
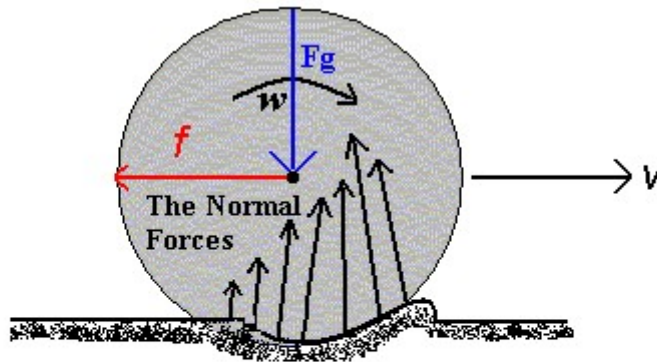


Figure 18.: Cornering force vs. slipangle, camber angle = 0

Kuva 5. Renkaan poikittaisvoima sortokulman funktiona. Parametrina pyöräkuorma. (2, s. 18.)

### 2.2.3 Vetävä ja vierivä rengas

Renkaiden kitka ja pito-ominaisuudet käyttäytyvät eri tavalla riippuen siitä, onko kyseessä vetävä vai vierivä rengas. Vierivä rengas pyörii ajotilanteessa vapaasti, kun taas vetävä rengas välittää momenttia. Momentin välitys voidaan selittää niin sanotulla lamelliteorialla, jossa vetotilanteessa renkaan kohtisuora kudusrunko taipuu kulkusuuntaan päin (kuva 6). Kyseinen tapahtuma voidaan myös selventää nappulateorialla, jossa renkaan nappula tai kosketuspinta on kosketuksissa tiehen. Kulutuspuunnan etuosassa oleva nappula kuluu etureunasta. Siihen asti, kunnes tämä ilmiö perustuu renkaan joustoon, puhutaan sisäisestä muodonmuutosluistosta. Kuormituksen alaisiin renkaisiin syntyy vierintävastusvoimia, joiden suuruus riippuu renkaan kokeman muodonmuutokseen. Vierintävastusta voidaan pienentää minimoimalla reseptiteknisesti kumimateriaalien taipumusta sisäiseen hystereesiin. (5)

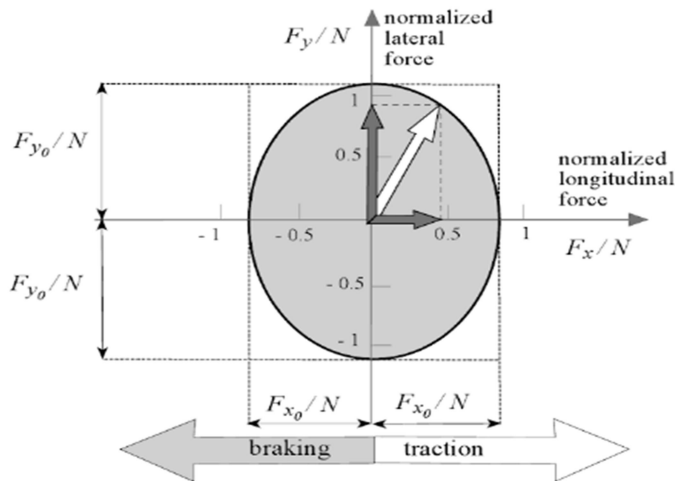


**The actual forces acting on the wheel and the surface. As one can see in this exaggerated view, both the wheel and the surface undergo deformation to an extent determined by the elastic properties of the two surfaces.**

Kuva 6. Renkaan ja alustan väliset voimat. Kuvassa näkyy, kuinka alusta ja rengas kokevat muodonmuutosta. (5)

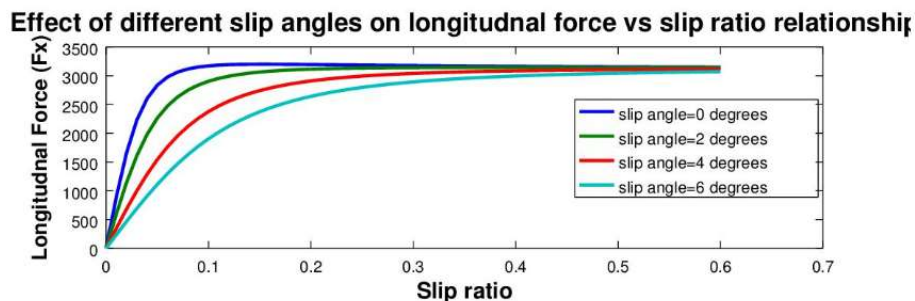
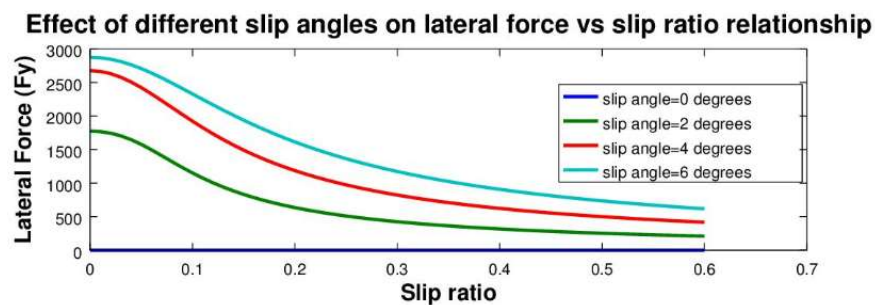
#### 2.2.4 Renkaiden sivuttaisvoimat

Renkaan sivuttaisvoimista puhutaan, kun on kyse kaarrenopeuksista, ohjattavuudesta, turvallisuudesta tai auton ajo-ominaisuuksista. Sortoilmiössä kulutuspinna ja kudusrunko taipuvat ja joustavat sivuttaissuunnassa. Tällöin renkaan kosketusvoima siirtyy taaksepäin, jolloin pito tiehen alkaa heikentyä. Voidaan päätellä, että sivuvoiman edellytyksenä on renkaan sortaminen. Sivuvoiman suuruuteen voivat vaikuttaa esimerkiksi pyöräkuorma, sortokulma, tie, renkaan geometria, renkaan kuviointi ja renkaan paine. Renkaan kitkavoimista voidaan tiivistettynä todeta, että kitkavoiman saavuttaminen yhteen suuntaan heikentää kitkaresursseja voimakkaasti vastakkaisessa suunnassa. Tämä voidaan todeta kitkaympyrästä (kuva 7) (6).



Kuva 7. Kitkaympyrä. Kitkaympyrässä näkyy voimien käyttäytyminen pitkittäis- ja poikittais-suunnassa. (6)

Hans B. Pacjeckan on luonut empiirisen Matlab-koodatun simulointimallin sivuttais- ja pitkittäisvoimille luiston funktiona (kuva 8). Kyseisten kuvaajien määrittämisessä pyöräkuorman ja luiston ohella tarvittavia lähtötietoja ovat tiedot renkaiden rakenteesta, tangentiaalisesta ja poikittaisesta jäykkyydestä, kitkakertoimesta ja kontaktipinnan suuruudesta. (7)

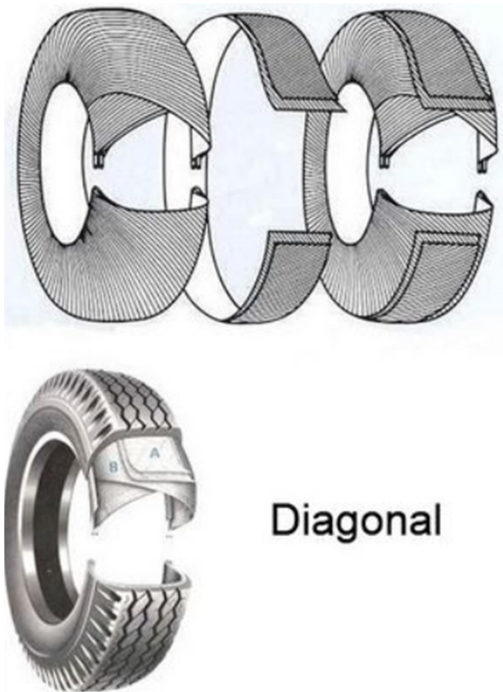


Kuva 8. Renkaan sivuttais- ja pitkittäisvoimat luiston funktiona. Kuvaajassa sortokulmaa on käytetty parametrina. (7)

## 2.3 Rengastyypit

### 2.3.1 Ristikudosrenkaat

Ristikudosrenkas oli hallitseva rengastyyppeä noin 1960-luvulle asti. Renkaan tyypillinen ominaisuus on vinoittain kulkevat kudoslangat (kuva 9). Renkaissa on useita kudokerroksia ja niissä langat menevät toistensa ylitse. Ristikudosrenkaan hyviä ominaisuuksia ovat esimerkiksi pehmeys alhaisissa nopeuksissa ja pieni staattinen momentti. Myös sivuttaishuojunta on alhaisempaa vyörenkaisiin verrattuna. Ristikudosrenkaita käytetään tänäkin päivänä moottoripyörissä, työkonneissa ja kiihdytysautoissa. (8)

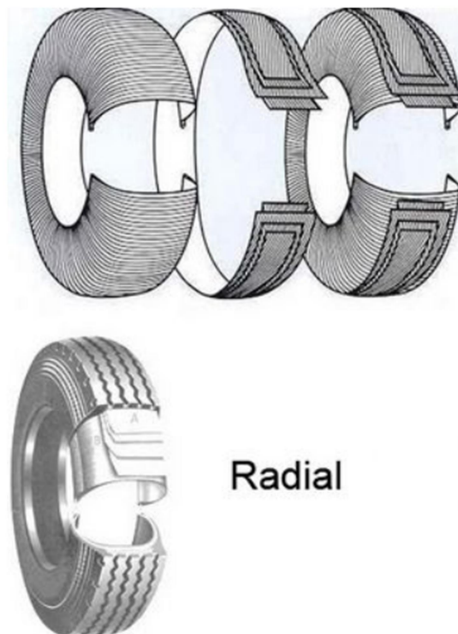


Kuva 9. Ristikudosrenkas. Rengas halkaistuna, kudokerrokset ovat viistottain päällekkäin. (8)

### 2.3.2 Vyörenkas

Vyörenkas on syrjäyttänyt ristikudosrenkaat henkilöautokäytössä. Vyörenkaan rakenne eroaa ristikudosrenkaista siten, että sen peruskudoksen teräslangat kulkevat radiaalisesti jalan reunalta toiselle (kuva 10). Tästä seuraa ajomukavuusetu. Renkaassa oleva vyökudos puolestaan jäykistää rengasta ja luo pitojäykkyyttä. Tämä kudoks myös pitää

renkaan kasassa keskeiskiihtyvyydestä huolimatta ja ottaa vastaan tien epätasaisuuksia. Laadukkaissa vyörenkaissa kudospohja on reilusti. Vyörenkaan sivuseinämä joustaa vain hieman, ja kun rengas pyörii, kumin kudokset vääntyvät tien pintaa vastaan. Tämän vuoksi vyörengas mahdollistaa suuren kontaktipinnan suurissakin kallistuskulmissa. Vyörengas ei rakenteensa vuoksi myöskään kuumene liikaa ja kulutuspinna on mahdollista käyttää pehmeämpää kumiseosta ilman merkittävää kulutuskestävyyden häviämistä, koska vyörenkaan sisäinen kitka säilyy pienenä. Vyörenkaiden etuja ovat hyvät pito-ominaisuudet, alhaisempi vierintävastus, parempi kulutuskestävyys ja paremmuus suurilla ajonopeuksilla. Vyörenkaan leikkausjännitys on varsinkin renkaan reunoilla huomattavasti pienempi kuin ristikudosrenkaalla. Tämä johtuu vyörenkaan vahvikekudosten radiaalisesta ja tangentialisesta suuntauksesta. (8)



Kuva 10. Vyörengas. Kuvassa näkyvät, kuinka kudokset kulkevat vyömäisesti päällekkäin. (8)

Vyörenkaan ja ristikudosrenkaan poikittainen leikkausjännitys käyttäytyy hyvin eri tavalla kuin ristikudosrenkaalla (kuva 11). Tämä johtuu vyörenkaan erilaisista rakenteista kudospohjissa. Vyörenkaan kulutuspinna liikehdintä on alhaisempaa. (2, s. 4.)

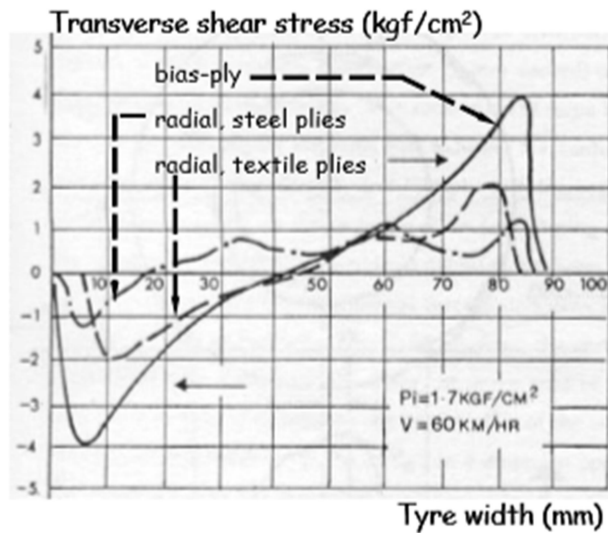
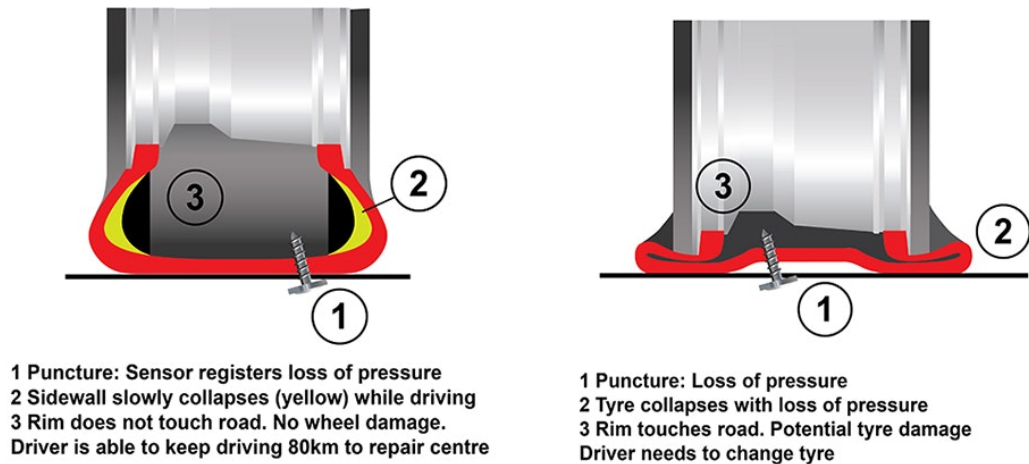


Figure 3.: Transverse shear stress for bias-ply and radial-ply tyres, from [20]

Kuva 11. Poikittaissuuntainen leikkausjännitysprofiili ristikudos- ja vyörenkailla (2, s. 4).

### 2.3.3 Run flat -renkaat

Run flat -renkailla tarkoitetaan renkaita, joilla voidaan ajaa myös tyhjänä renkaan sisällä olevan tukikonstruktion ansiosta (kuva 12). Nämä renkaat voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, jotka ovat: self supporting sidewall -renkaat ja support ring -renkaat. Self supporting sidewall -renkaissa tukirakenne on rakennettu renkaan sivuille, kun taas support ring -rakenteessa on tehty renkaan keskelle tukikehä. Molempien renkaiden käyttö vaatii autolta automaattisen rengaspainejärjestelmän. Osa run flat -renkaista vaatii myös vanteeseen erillisen niin sanotun hump -osan. On huomattavaa, että run flat -renkaat ovat usein muita rengastyyppejä massaltaan raskaampia rakenteensa vuoksi. (9)



Kuva 12. Run flat -renkas. Tavallisen renkaan ja run flat -renkaan eroavaisuudet (9).

### 2.3.4 Off road -renkaat

Off road -renkaat ovat maastoajoon suunnattuja renkaita, joissa kuduskerroksia on huomattavasti enemmän ja ne ovat myös paksumpia. Off road -renkaat ovat tyypillisesti vyörengasrakenteisia. Moderneissa off road -renkaissa käytetään hybridikulutuspinnoja ja vahvempia materiaaliyhdisteitä, jotta saavutetaan parempi kulutuskestävyys ja myös, jotta rengasta voidaan käyttää useilla erilaisilla pinnoilla. Off road -renkaiden pito-ominaisuudet ovat kuitenkin suunnattu pehmeille pinnoille maastossa ja kulutuspinnoilla pyritään saamaan pitoa, kun rengas painautuu maahan. Tämän vuoksi asfaltilla katurenkailla saavutetaan parempi pito kuin off road -renkailla. (2, s. 94.)

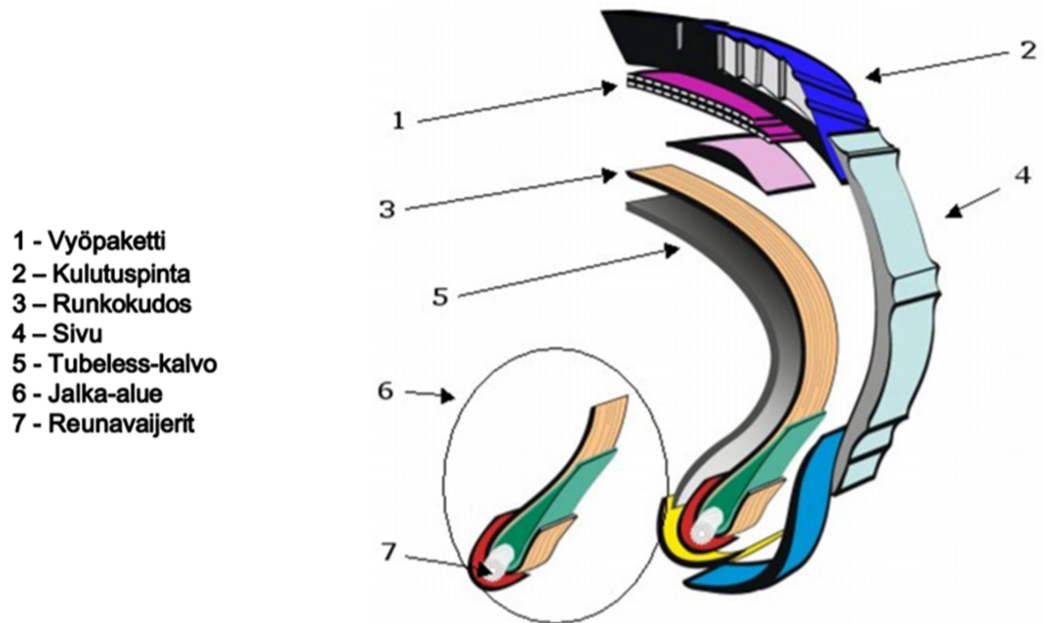
## 2.4 Renkaiden valmistus

### 2.4.1 Raaka-aineet

Renkaiden pintakumimateriaalit koostuvat kahden synteettisen elastomeerin, styreenibutadieeni- ja butadieenikumin, sekä luonnonkumin seoksesta (kuva 13). Näihin lisätään täyte-, vulkanointi-, prosessointi- ja suoja-aineet. Kumiseosreseptejä tarkastellaan enemmän kappaleessa 3. Sisäpinnan muodostama tubeless-kalvo valmistetaan



yleensä klooributyylimistä, koska tällä elastomeerillä on erittäin pieni kaasunläpäisevyys. Rengasta tukevan rakennekomponenttiryhmän muodostavat vahvikkeet ja renkaan vanteeseen lukitseva reunavaijeri. (10)



Kuva 13. Renkaan perusrakenne. Kuvassa on esitetty tyypillinen renkaan rakenne ja siitä nähdään, kuinka rengas koostuu eri komponenteista, joilla jokaisella on oma roolinsa renkaan lopputuotteen ominaisuuksien kannalta. (11, s. 6.)

#### 2.4.2 Sekoitus

Kun kaikki materiaalit ovat saatavilla, siirrytään sekoitusvaiheeseen. Tässä prosessissa raaka-aineet kuumennetaan noin 100 - 150 °C:n lämpötilaan ja sekoitetaan keskenään. Seosten koostumus vaihtelee renkaan alueiden mukaan. Seoksen koostumus riippuu luonnollisesti myös renkaan käyttötarkoituksesta, mallista ja valmistajasta. On huomiotavaa, että kesärenkaiden kumiseos on hyvin erilainen kuin talvirenkaiden. Rengasreseptien kehitystyö on merkittävä valttikortti, jolla rengasvalmistajat kilpailevat keskenään. (10)

#### 2.4.3 Kokoonpano

Komponenttivaiheessa komponenteista tehdään rengasaihio kokoonpanokoneella. Rengas valmistetaan yleensä noin 10 - 30 komponentista. Kokoonpanokoneessa on

niin sanottu vyörumpu, joka siirtorenkain avulla siirtää renkaan pinnan ja vyön muodostaman kokonaisuuden renkaan rungon päälle. Tämän työvaiheen jälkeen renkaan runkoon johdetaan paine, jonka seurauksena runko venyy pinnan ja vyön muodostamaan kokonaisuuteen kiinni. Näiden prosessivaiheiden jälkeistä aikaansaannosta kutsutaan rengasaihioksi. (10)

#### 2.4.4 Vulkanointi

Vulkanoinnissa aihiot vulkanoidaan paistopuristimessa. Vulkanoinnilla tarkoitetaan kumin valmistusprosessin vaihetta, jossa raakakumin molekyylit silloitetaan kuumennuksen ja rikin avulla toisiinsa, josta seuraa kemiallisia sidoksia. Paistopuristimessa on paistotyyny, johon johtuu korkea höyrypaine. Tämä tyyny painaa rengasaihion muotin sisäpintaa ja pintakuvioita vasten, jolloin syntyy renkaan lopullinen muoto, renkaan sivutekstit ja renkaan urat sekä kuviointi. (10)

#### 2.4.5 Tarkastus ja testaus

Tuotantovaiheiden jälkeen rengas tarkastetaan visuaalisesti ja myös koneella. Tarkastuksissa keskitytään mahdollisiin ulkonäkövirheisiin. Tarkistuskoneet puolestaan kykenevät mittaamaan renkaiden muodon, säteisyyden ja vaihtelun sivuttaisvoimissa. Tarkastuksien jälkeen rengas testataan, laitetaan etiketit ja lopuksi rengas varastoidaan. (10)

### 3 Renkaiden materiaalitekniikka

Tässä luvussa tarkastellaan renkaiden materiaaleja ja niiden ominaisuuksia. Luvussa tarkastellaan myös erilaisia menetelmiä, joiden avulla rengasmateriaaleja voidaan testata ja tutkia.

#### 3.1 Rengasmateriaalien tavoitteet

##### 3.1.1 Vierintävastus

Renkaiden materiaaleilla pyritään useisiin tavoitteisiin, jotka hyödyttävät auto- ja rengasvalmistajaa, kuluttajaa ja ympäristöä. 1990-luvun lopulta nykyhetkeen on erityisen paljon keskitytty renkaiden vierintävastuksen pienentämiseen. Tämä alentaa polttoaineen kulutusta, renkaan kulumista ja parantaa auton käyttäytymistä. Vierintävastukseen vaikuttavat lähes kaikki renkaan komponentit (kuva 14). Vierintävastus vaikuttaa välillisesti huomattavasti myös ympäristövaikutuksiin. (12)

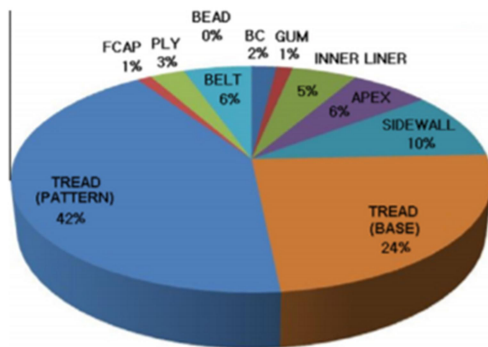
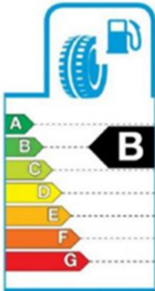


Fig. 15. Rolling resistance contributions of tire components.

Kuva 14. Renkaiden komponenttien vaikutus vierintävastukseen. Ympyräkuvaajassa on jaoteltu renkaan komponentit sen mukaan, kuinka paljon kukin komponentti vaikuttaa renkaan vierintävastukseen. (12, s. 9.)

Renkaan polttoainekulutuksen pohjalta renkailla on määritelty energiatehokkuusluokat, jotka mukautuvat sen mukaan kuinka paljon renkaista koituu polttoainekustannuksia ja hiilidioksidipäästöjä. Luokitukset ovat A:sta G:hen, joista A-luokka on paras kategoria (kuva 15). D-luokka ei ainakaan tällä hetkellä ole käytössä. Rengasluokat määräytyvät EU:n antamien kriteerien perusteella. Luokitukset perustuvat vierintävastukseen ja polttoainekulutukseen. Esimerkiksi, jotta päästään A-luokan energiatehokkuuteen, C1-

rengasluokan renkaille on määritelty, että vierintävastuksen täytyy olla alle 6,5 kg/t. Renkaan omien vierintävastusominaisuuksien lisäksi myös rengaspaineella on suuri vaikutus vierintävastukseen. Materiaaleissa on siis keskityttävä renkaan vierintävastuksen alhaisuuteen. (13)



C1 tyres		C2 tyres		C3 tyres	
RRC in kg/t	Energy efficiency class	RRC in kg/t	Energy efficiency class	RRC in kg/t	Energy efficiency class
$RRC \leq 6,5$	A	$RRC \leq 5,5$	A	$RRC \leq 4,0$	A
$6,6 \leq RRC \leq 7,7$	B	$5,6 \leq RRC \leq 6,7$	B	$4,1 \leq RRC \leq 5,0$	B
$7,8 \leq RRC \leq 9,0$	C	$6,8 \leq RRC \leq 8,0$	C	$5,1 \leq RRC \leq 6,0$	C
Empty	D	Empty	D	$6,1 \leq RRC \leq 7,0$	D
$9,1 \leq RRC \leq 10,5$	E	$8,1 \leq RRC \leq 9,2$	E	$7,1 \leq RRC \leq 8,0$	E
$10,6 \leq RRC \leq 12,0$	F	$9,3 \leq RRC \leq 10,5$	F	$RRC \geq 8,1$	F
$RRC \geq 12,1$	G	$RRC \geq 10,6$	G	Empty	G

Fig 1: EC Regulation 1222/2009 Labeling (Rolling resistance coefficient values for energy efficiency)

Kuva 15. Vierintävastus ja polttoaineenkulutus. Renkaat voidaan luokitella sen mukaan, kuinka paljon ne vaikuttavat polttoaineenkulutukseen. (13)

### 3.1.2 Kulutuskestävyys

Renkaiden kulutuskestävyys on toinen tärkeä asia, jota rengasvalmistajat pohtivat. Kulutuskestävyydellä on myös oma roolinsa ympäristövaikutuksien muodostumisessa, sillä mitä hitaammin renkaat kuluvat loppuun, sitä pienemmällä tahdilla renkaita heitetään pois. Voisi olettaa, että rengasvalmistajat pyrkivät pitkäikäiseen kulutuskestävyyteen, mutta pyrkivät valmistuksessa myös siihen, että heidän renkaidensa kysyntä ei laske, joka voisi käydä, jos renkaiden kulutuskestävyys olisi erittäin pitkäaikainen.

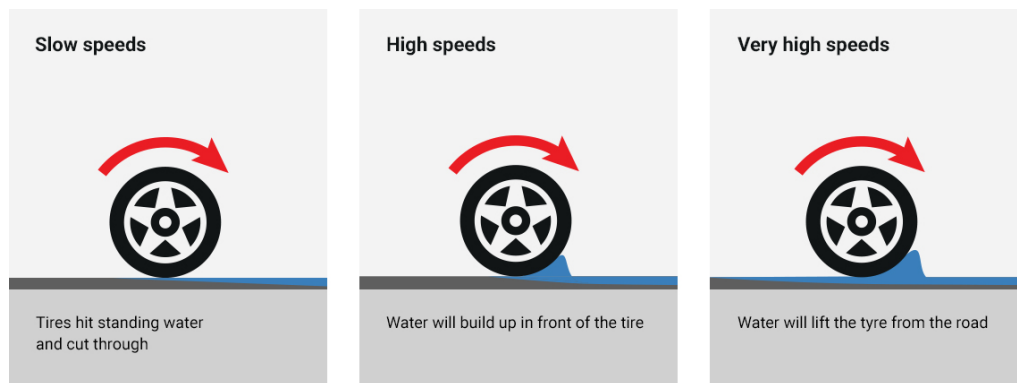
Kulutuskestävyys ei koske pelkästään renkaan urasyvyyden kulumista, vaan myös renkaan sivujen ja rakenteen väsymistä. Ympäristövaikutukset kuten aurinko ja happi saavat aikaan renkaaseen halkeamia ja kovettavat renkaan pintaa. Valmistajat ottavat huomioon ympäristöstä tulevat vaikutukset ja määrittelevät renkaalleen yleensä keskiön käyttöönottohetkestä lähtien. Renkaan valmistusaika näkyy renkaiden sivuteksteissä DOT-merkintänä.

Renkaat eivät myöskään saa olla valmistuksen jälkeen säilössä tai varastoissa rengasliikkeissä liian pitkiä aikoja, ja onkin määritelty, että uusina myytävät renkaat saavat olla enintään viisi vuotta vanhat valmistushetkestä lähtien. On huomioitavaa, että renkaiden

varastointitavalla ja tilan lämpötilallakin on vaikutusta renkaan kestävyysikään. Renkaiden sopivaksi kestävyysiäksi määritellään usein 5 - 10 vuotta, mutta kuitenkin jo viiden vuoden jälkeen renkaat ovat jo selkeästi kovempia ja hauraampia kuin uudet renkaat. (14)

### 3.1.3 Märän kelin ajo-ominaisuudet

Märän kelin ajo-ominaisuudet ovat yksi tärkeimmistä seikoista koko auton turvallisuudessa. Rengasvalmistajat suunnittelevat tarkasti renkaiden urat ja materiaalit siten, että vesi ohjautuu ulos renkaan alta ja vesiliirroilta vältyttäisiin (kuva 16). On siis tärkeää, että märälläkin pinnalla renkaan kontaktipinta säilyisi mahdollisimman suurena sekä, että tien ja renkaan välinen vesipatja ei aiheuttaisi vaaratilanteita. (15)

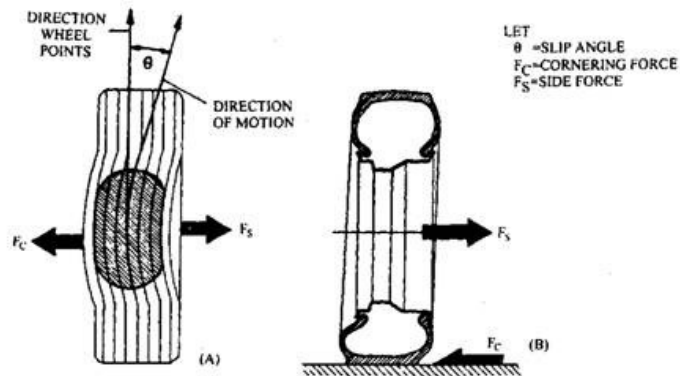


Kuva 16. Vesipatja renkaan ja tien välissä. Vesipatja kertyy renkaan etuosaan ja pyrkii nostamaan rengasta ylös tien pinnasta. (15)

### 3.1.4 Kaarreajo-ominaisuudet

Teiden kaarteet vaativat renkaiden materiaaleilta hyvää sivuttaispitoa. Renkaiden käyttäytymistä tutkittaessa rengasvalmistajat voivat laskea esimerkiksi kaltevissa kaarteissa optiminopeuden, jolla kallistunut kaarre voidaan ajaa ilman sivuttaisvoimia. Kyseisessä menetelmässä voidaan määrittää sopiva kitkakerroin, jolla kaarre voidaan ajaa toivotulla nopeudella. Renkaiden kaarreajo-ominaisuuksia pohdittaessa on tärkeää kuitenkin ottaa huomioon myös auton korin kallistuminen, massan siirtyminen ja aerodynamiikka. Muita renkaiden kitkaan liittyviä ominaisuuksia ja fysiikkaa on tarkasteltu aiemmin luvussa 2.

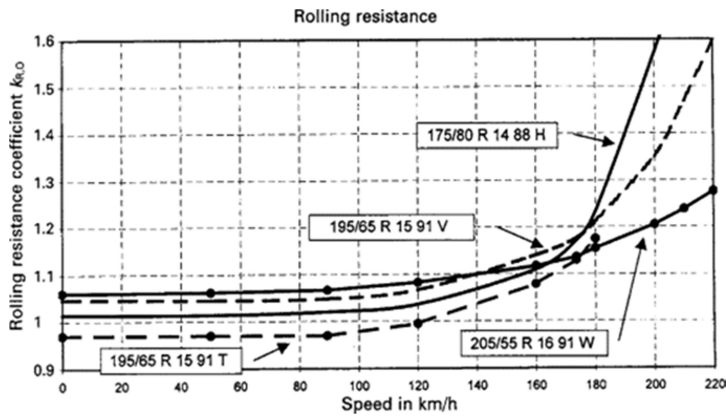
Kun rengas sortaa kaarreajotilanteessa, renkaan kulutuspinta ja kudokset joustavat ja taipuvat sivuttaissuunnassa (kuva 17). Tällöin kosketusvoima kohtisuoraan rengasta vasten alkaa kasvaa taaksepäin ja pito alustasta alkaa kadota. Tätä tapahtumaa kutsutaan luistorajaksi, joka on määriteltävä sopivaksi rengassuunnittelua tehdessä. On siis oleellista, että renkaan kulutuspinta ja kudokset joustavat ja taipuvat juuri sopivalla jäykkyydellä kääntymis- ja kaarreajotilanteissa. (16)



Kuva 17. Renkaan rakenteen käyttäytyminen kaarreajotilanteessa. Kitka ja sivuttaisvoima saavat aikaan renkaan rakenteen taipumista (16)

### 3.1.5 Ajo-ominaisuudet suurilla nopeuksilla

Auton on olennaista käyttäytyä suurilla nopeuksilla hallitusti. Renkaiden materiaalien ja rungon on kestävä suuria pyörimisnopeuksia tietä vasten ja renkaiden lämpötilan, vierintävastuksen ja pito-ominaisuuksien on säilyttävä riittävän sopivana. Renkaille on määritelty erilliset nopeusluokat, joista tärkeimmät ja yleisimmät ovat Q, R, S, T, H, V, W ja Y. Eri nopeusluokkien renkaiden materiaalikoostumukset ovat erilaiset ja esimerkiksi vierintävastukset käyttäytyvät eri tavalla luokasta riippuen (kuva 18). Myös pintamateriaalien ja kudosten jäykkyydet eroavat toisistaan. On siis oleellista, että rengassuunnittelussa on tarkka visio siitä, mitkä materiaalit ja seoskoostumukset ovat juuri sopivia kullekin nopeusluokalle. (17)

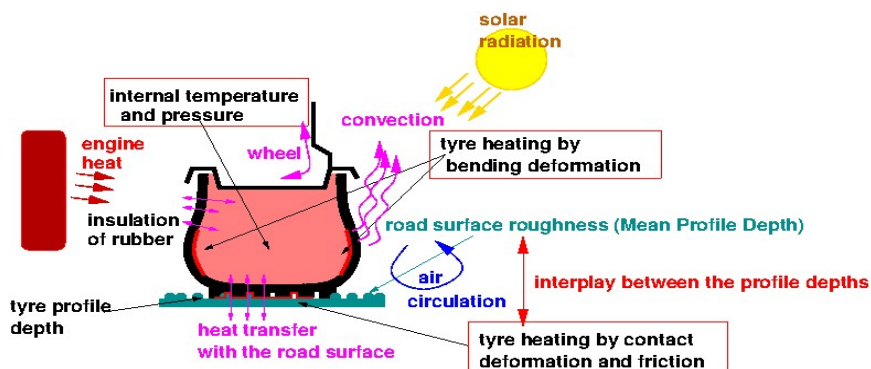


Kuva 18. Vierintävastus eri nopeusluokilla. Vierintävastukset ovat erilaiset riippuen renkaan nopeusluokasta. Kuvaajassa on otettava huomioon, että myös rengaskoot vaihtelevat. (17)

### 3.1.6 Lämpötilan hallinta

Lämpötila on rengastekniikassa hyvin merkittävä osatekijä. Renkaat lämpenevät ajaessa ja luistaessa. Renkaat eivät lämpene pelkästään kitkasta, vaan lämmön kerääntyminen renkaassa on hyvin monimutkainen kokonaisuus, johon vaikuttaa paitsi muodonmuutokset itse renkaassa, myös esimerkiksi sääolosuhteet, moottorin lämpö, jarrujen lämpö, aurinko ja alustan karheus (kuva 19).

On pyrittävä siihen, että rengasmateriaalien normaaliajossa syntyvä lämpiäminen parantaa pito-ominaisuuksia ja pehmentää renkaan pintaa sopivasti. Vastapainona on myös tärkeää ottaa materiaaleissa huomioon, että renkaan lämpiäminen ei vaurioita itse renkaan rakennetta tai vaikuta kulutuskestävyyteen liian merkittävästi. (18)



Kuva 19. Renkaan lämpötilaan vaikuttavat tekijät. Renkaiden lämpötila koostuu useasta tekijästä ja on hyvin monimutkainen lämmönsiirtotapahtuma. (18)



### 3.1.7 Rengasmelu

Nykypäivänä ajo-ominaisuuksien lisäksi myös hiljainen renkaista koitua ääni on kuluttajalle ja autovalmistajille tärkeää mukavuuden vuoksi. Renkaiden äänien taajuus muuttuu ajonopeuden mukaan ja renkaat voivat resonoida hyvinkin voimakkaasti tietyillä nopeuksilla. Tämä voi ilmetä poikkeavana värähtelynä renkaassa ja jopa vaikuttaa ajettavuuteen. Materiaalien tulee siis pitää huoli, ettei renkaista tule liian kovaäänisiä tai turvattomia taajuuksien aiheuttamien värähtelyjen vuoksi. (2, s. 103 - 112.)

### 3.1.8 Ajomukavuus

Kuljettajille on tärkeää, että renkaan ajomukavuus on sopiva. Ajomukavuudella voidaan tarkoittaa esimerkiksi sitä, ettei renkaan reagointi epätasaisella alustalla tunnu kuljettajasta häiritsevältä. Renkaiden ajomukavuudessa on myös kyse muun muassa ohjauksen herkkyydestä, vakaudesta kiihdytystilanteissa ja niin sanotusta ohjaustuntumusta eli siitä, kuinka kuljettaja saa palautetta auton reagoimisesta ohjaukseen. Yksi haasteista on esimerkiksi luoda sopivilla rengasmateriaaleilla matalaprofiilisista renkaista edistyksellisiä ajomukavuuden suhteen. Matalaprofiiliset renkaat eivät usein ole kovinkaan ajomukavia, sillä renkaan ilmatila on pieni ja renkaan runkorakenne on jäykempi.

Renkaiden paineella on myös vaikutusta ajomukavuuteen. Liian suuri paine tekee renkaista jäykemmät ja tien epätasaisuudet tuntuvat kuljettajalle herkemmin. Liian pieni paine puolestaan tekee renkaista epävakaat ja vierintävastus kasvaa huomattavasti. Oikea rengaspaine myötävaikuttaa renkaan tasaiseen kulumiseen ja on myös merkittävä turvallisuustekijä.

Alustan ja jousituksen jäykkyys toimivat käsi kädessä renkaiden kanssa. Vääränlaiset renkaat esimerkiksi jäykällä alustalla tai jousituksella saattavat aiheuttaa sen, että rengas ei seuraa tiessä olevia epätasaisuuksia vaan hyppii niiden yli. Myös löysällä alustalla on oleellista käyttää oikeanlaisia renkaita. On oletettavaa, että hyvin jäykkärakenteiset renkaat löysällä alustalla voivat tehdä mutkien ajamisesta epämiellyttävää. (19)

### 3.2 Rengasmateriaalien perustiedot

Ilmarenkaiden kumimateriaalit ja vahvikkeet koostuvat useista erilaisista aineista (taulukko 1). Materiaalit tulevat ympäri maailmaa. Kaakkois-Aasian osuus luonnonkumin (NR) globaalista tuotannosta on noin 80 %. Styreenibutadieenikumin (SBR) tuotantoa on eniten Aasiassa (yli 50 %), Euroopassa (noin 20 %) ja Pohjois-Amerikassa (noin 15 %).

Rengasmateriaaleja tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti laboratorio-olosuhteissa. Tutkimukset keskittyvät pääosin esimerkiksi materiaalien pito- ja vierintävastusominaisuuksiin, kulutuskestävyyteen, ympäristöystävällisyyteen, kovuuteen, pito-ominaisuuksiin, rakennelujuuteen ja soveltuvuuksiin monipuolisilla alustoilla. Rengasmateriaaleja on kehitetty kumirenkaiden syntyhetkestä lähtien ja materiaalien ominaisuudet ovat merkittävässä roolissa rengasvalmistajien välisessä kilpailussa. Materiaalien ominaisuuksien lisäksi valmistajille on tärkeää materiaalien kustannustehokkuus ja saatavuus.

Renkaiden kumiosien peruskomponentti on elastomeeri tai niiden yhdistelmä. Elastomeeri on joustava ja venyvä kumi, joka kykenee muodonmuutoksen jälkeen palautumaan vähintään lähelle alkuperäistä muotoaan. Näiden lisäksi renkaat sisältävät useita täyteaineita, joilla säädetään muun muassa kumin kovuutta, lujuutta ja kulutuskestävyyttä. Nykyrenkaissa käytetyillä piidioksiditäyteaineilla voidaan kytkeä kemialliset sidokset elastomeereihin ja saavuttaa siten edelleen renkaan rakennetta lujittavia ominaisuuksia. Renkaissa on myös hyvin paljon erilaisia kemiallisia aineita, jotka nopeuttavat renkaan valmistusprosessia, pidentävät renkaan elinikää, suojaavat ilmastolta ja ehkäisevät lämpötilan haittavaikutuksilta. (20)

Taulukko 1. Renkaiden päämateriaalit ja käyttötarkoitukset (21, s. 37 - 51.)

<b><u>Materiaali</u></b>	<b><u>Materiaalin käyttökohde/tarkoitus</u></b>
<b>Luonnonkumi (NR)</b>	Hyvät kitkaominaisuudet myös kylmissä olosuhteissa. Alhainen sisäinen kitka. Edesauttaa tartuntaa muihin renkaan rakenneseisiin.
<b>Styreenibutadieeni (SBR)</b>	Synteettinen elastomeeri. Peruselastomeeri ja sillä on päärooli myös ns. Green Tire -resepteissä, joilla tähdätään vierintävastuksen minimointiin.
<b>Polybutadieeni (BR)</b>	Käytetään yhdessä muiden elastomeerien kanssa parantamaan kulutuskestävyyttä ja alentamaan sisäistä lämmönkehitystä.
<b>Halobutylikumi (CIIR)(BIIR)</b>	Käytetään renkaan sisäpuolella alhaisen ilmanläpäisyvyyden vuoksi. Halogeeniatomit luovat sidoksia luonnonkumin yhdisteisiin. Halobutyylejä on olemassa klooributyilin muodossa ja paremmassa, mutta kalliimmassa bromibutyilin muodossa.
<b>Noki</b>	Suuri osuus kumiyhdisteissä. Parantaa lujuutta ja kulutuskestävyyttä sekä myös säätää kovuutta.
<b>Silika</b>	Käytetään yhdessä noen kanssa. Usein reilusti käytössä performance- ja green tire renkaissa minimoimassa sisäistä lämmönkehitystä.
<b>Rikki</b>	Silloittaa kumimolekyylit vulkanointiprosessissa.
<b>Vulkanoinnin katalyytit ja aktivaattorit</b>	Monimutkaisia orgaanisia yhdisteitä, jotka nopeuttavat ja auttavat vulkanoinnin prosessia. Yksi tärkeimmistä aktivaattoreista on sinkkidioksidi.
<b>Antioksidantit ja antiotsodantit</b>	Ehkäisee renkaan sivun halkeilua auringonvalon ja otsonin vaikutuksilta.
<b>Tekstiilivahvikkeet</b>	Tekstiilivahvikkeina käytetään renkaissa koordinauhoja, joissa vahvikelangat on yhdensuuntaistettu. Yleisimmät koordilankamateriaalit ovat rayon, polyamidi, polyesteri ja teräs.

Taulukkoon on koottu renkaan pääasialliset materiaalit ja niiden yleiset tiedot sekä käyttötarkoitukset. (21, s. 37 - 51.)

### 3.3 Pintakumimateriaalit

#### 3.3.1 Tyypilliset pintakumimateriaalit

Pintakumimateriaaleilla pyritään saavuttamaan edellä mainitut tavoitteet renkaan dynamiikassa. Taulukossa 2 on esimerkki hyvänlaatuisen kulutusintakumin reseptistä. Kuten nähdään, se koostuu pitkälti taulukon 1 materiaaleista, mutta tällä kertaa tarkemmin spesifioituna. Taulukkoon on koottu vyörenkaan tyypillinen resepti Keski-Euroopan olosuhteisiin. Arvot ovat ohjeellisia. Näitä rengasvalmistajat muokkaavat tarpeidensa mukaan. Taulukossa on myös annettu arvoja vulkanointiin ja renkaan fyysisiin ominaisuuksiin liittyen.

Kumireseptejä tutkiessa on oleellista tietää, että elastomeerit jaotellaan osiin ja niiden yhteismäärä on 100 osaa. Taulukon 2 materiaaleissa on huomioitavaa, että SBR 1712-kumista ja BR-kumista tulee yhteen laskiessa enemmän kuin edellä mainittu 100 osaa (55 osaa + 82,5 osaa = 137,5 osaa). Tämä johtuu siitä, että SBR-1712-kumia on jatkettu öljyllä. Öljyn määrä vastaa 100 osan ylimenevää osuutta, joka siis on 37,5 osaa. Elastomeerien päälle lasketaan vielä täyteaineet erillisinä osina, joten reseptin lopputulos on > 100 osaa. Kumireseptin koostumuksia ei siis yleensä käsitellä prosenttiyksiköissä.

Laboratoriotestikappaleiden valmistuksessa raakaseoskappaleet vulkanoidaan (lämpökäsitellään) rengasvalmistusta simuloivassa lämpötilassa. Tässä tapauksessa lämpötila on 150 °C, mutta valmistajat hienosäätävät tätä ohjelämpötilaa tarkemmaksi ja sopivammaksi tarpeidensa mukaan. Renkaiden esivulkanointiaika on usein hieman alle 10 minuuttia ja kokonaisvulkanointiaika puolestaan hieman alle 20 minuuttia. Esivulkanointisajalla tarkoitetaan aikaa, jolloin kumi on vielä plastista ja painuu muotin sisäpinnan kuviorakenteisiin tarkasti ennen kuin varsinainen kovettumisreaktio alkaa.

Taulukon 2 reseptin kumin ominaisuuksia on tutkittu reometrillä, joka mittaa viskositeettia ajan funktiona. Resepteillä pyritään saavuttamaan tiettyjä fysikaalisia arvoja, joista esimerkiksi vetolujuus pintakumilla on noin 22 MPa ja kovuus 65 IRHD. IRHD tulee englanninkielien sanoista: International rubber hardness degree. Murtovenymä on rengaskumilla noin 600 %. Renkaan rungon kumilla kovuus, vetolujuus ja murtolujuus ovat puolestaan alhaisempia, kuten taulukossa 2 nähdään.

Taulukko 2 luo myös käsityksen, että renkaan pintamateriaaleissa ei ole käytetty luonnonkumia. Tämä johtuu siitä, että taulukon kyseinen rengasreseptiesimerkki on suunnattu Keski-Euroopan olosuhteisiin. Luonnonkumia ei käytetä yleensä Keski-Euroopassa pintamateriaaleissa juurikaan, koska siellä ei tarvita kylmän sään kestävyttä. Reseptin SBR-kumi antaa renkaalle puolestaan hyvät lujuusominaisuudet ja BR-kumi luo kulutuskestävyyttä ja hyviä kimmo-ominaisuuksia. Täyteaineena on käytetty nokea. Noet numeroidaan, jonka perusteella määritellään noen partikkelikoko, jotta saadaan sopiva seos täyteaineeksi. Aktivaattorina reseptissä on sinkkioksidi ja steariinihappo. Rikki puolestaan on vulkanointiaine. Vulkanoinnin apuaineina toimivat kiihdyttäjät ja MC wax. MC wax on vaha, joka suojaa kumipintaa ympäristöolosuhteilta kuten hapelta, otsonilta ja auringolta. (22, s. 37 - 60.)

Taulukko 2. Tyypillinen henkilöauton vyörenkaan kumiresepti (22)

<b>3. Typical Passenger Car Tyre Formulations (Radials)</b>		
<b>Ingredients</b>	<b>Tread</b>	<b>Carcass</b>
NR (RSS)	-	70
Peptizer	-	0.07
SBR 1502	-	-
SBR 1712	82.5	20.5
BR	55	15
Zinc Oxide	3.0	3.0
Stearic Acid	2.0	2.0
Pilflex 13	2.5	0.5
Pilnox TDQ	1.5	1.0
N 220 Carbon Black	70	-
N 330 Carbon Black	-	-
N 660 Carbon Black	-	40
Ppt. Silica	-	-
TSPT	-	-
Aromatic Oil	-	-
Naphthenic Oil	-	12
Petroleum Resin	-	2.0
MC wax	3.0	-
Pilcure NS	1.0	0.7
Pilcure MBTS	-	0.1
Accelerator DPG	-	-
Pilgard PVI	-	0.1
Sulfur	2.0	-
Insol. Sulfur (100%)	-	2.2
<b>Typical Properties</b>		
Rheometer (ODR) @ , °C	150	150
Scorch Time ts2 , min	9.23	5.58
Opt. Cure Time t'c90 , min	19.11	12.24
Maximum Torque MHR, lb.in		
<b>Unaged Physicals @ OCT</b>		
Tensile Strength, MPa	22.0	17.0
Elongation at Break, %	600	570
300% Modulus, MPa	8.2	5.4
Hardness, IRHD	65	53

Taulukossa kerrotaan kumireseptin sisältämistä materiaaleista. (22)

### 3.3.2 Pintakumimateriaalien kehitys

Piidioksidin käyttö täyteaineena rengastekniikassa käynnistyi 90-luvulla. Sillä on saavutettu parempi kulutuskestävyys, märkäpito, kitka ja vierintävastus verrattuna nokeen. Näitä ominaisuuksia voidaan edelleen kehittää luomalla optimaalinen elastomeerikoostumus. Piidioksidin seurauksena green tyre -termin käyttö rengasteknologiassa yleistyi. Piidioksidia kutsutaan myös silikaksi.

Esimerkkinä taulukossa 3 on tutkittu butadieenikumin lisäyksen vaikutusta luonnonkumipohjaisen kulutuspintakumin ominaisuuksiin. Taulukossa 3 on esitetty piidioksidilla täytettyjen luonnonkumien, luonnonkumi/butadieenikumien ja nokitäytteisten luonnonkumi/butadieenikumien koereseptejä. Kokeessa on tutkittu miten BR-40 -butadieenikumin lisäys vaikuttaa, kun sen osuus vaihtelee välillä 0 - 30 osaa. (23)

Taulukko 3. Silikalla täytetyt koereseptit (23, s. 2.)

Table 1: Formulations of silica filled ENR, ENR/BR and carbon black filled NR/BR compound.

Ingredients	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6
ENR-25	100	100	90	80	70	
SMR 10						70
<b>BR 40</b>		<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	30
Silica Zeosil 1165MP	55	55	55	55	55	
N330 Black	5	3	3	3	3	
N234 Black						53
Zinc oxide	3	3	3	3	3	3.5
Stearic acid	3	3	3	3	3	2.5
Calcium stearate	2	2	2	2	2	
Antioxidants	2	2	2	2	2	3.5
Antilux 654	1	1	1	1	1	1
X50S (50% Si69 on CB)	-	4.4	4.4	4.4	4.4	
Sulphur	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.2
Accelerators	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1

Reseptimixaukset silikatäytteisten luonnonkumien, luonnonkumi/butadieenikumien ja nokitäytteisten luonnonkumi/butadieenikumien koereseptistä. (23, s. 2.)

Taulukossa 4 on puolestaan kerrottu miten tämä BR-40-butadieenikumin lisäys vaikuttaa fysikaalisiin ominaisuuksiin. Taulukon 4 tuloksista nähdään, että lujuuteen ja kovuuteen BR-40:n lisäys vaikuttaa marginaalisesti, mutta kulutuskestävyyteen merkittävän paljon.

Taulukko sisältää silikatäytteisten luonnonkumien, luonnonkumi/butadieenikumien ja nokitäytteisten luonnonkumi/butadieenikumien koereseptien fysikaaliset ominaisuudet.

Mitattuja fysikaalisia ominaisuuksia ovat vetolujuus, venymälujuus, IRHD-kovuus, Modulus M100 -venymäarvo ja DIN Abrasion -kulutuskestävyysprosentti.

Taulukon 4 kulutuskestävyysarvot ovat mitattu DIN Abrasion Tester -kulutuskestävyytestauslaitteella. Laitteessa on sylinteri, joka on halkaisijaltaan 150 mm, pituudeltaan 460 mm ja pyörii kierrosnopeudella 40 rpm. Sylinteri on päällystetty hiomapaperilla. Sylinterin päällä on testikappaleen pidin, jonka alla on rengasreseptin testikappale. Testikappaletta kuormitetaan testin aikana 1 kg:n punnuksella. Sylinterin pinta hio testikappaleesta materiaalia pois 40 metrin kulkumatkalta. Tällä menetelmällä saadaan tutkittua, paljonko rengasreseptin koekappale on kulunut. Kappaleen tilavuus mitataan kuutiomillimetreinä ennen ja jälkeen testin. (23)

Taulukko 4. Fysikaaliset ominaisuudet taulukon 3 koeresepteistä (23, s. 5.)

Table 5: Physical properties of ENR/silica and ENR/BR blend compounds.

Properties	Mix 1	Mix 2	Mix 3*	Mix 4*	Mix 5*	Mix 6
	ENR Control	ENR100:BR 0	ENR90:BR10	ENR80:BR20	ENR70:BR30	NR70:BR30
Tensile Strength, MPa	20.2	23.4	22.7	24.2	23.3	26.8
Elongation @ break, %	429	434	419	495	513	573
Modulus, M100	1.6	2.1	2.4	2.3	2.3	2.2
Hardness (IRHD)	63	63	64	66	69	72
DIN Abrasion Resistant Index, %	80	98	139	183	227	163

\*added X50S during mixing

Taulukossa on kuvattu koereseptin erilaisia ominaisuuksia. (23, s. 5.)

Silikan, täyteaineiden ja elastomeerien kemiallisia sidoksia luovan silaanin sekä noen täyteaineiden vaikutuksia on tutkittu käyttäen elastomeeripohjana styreenibutadieeni-, butadieenikumi- ja luonnonkumiseoksia. Tutkimuksissa on käytetty hyväksi DOE-koesuunnittelua (Design Of Experiments) ja tätä kautta on löydetty resepteille optimi-koostumuksia.

Taulukko 5 on esimerkki DOE-tekniikalla luodusta koejärjestelyistä. Kokeessa on tehty yhdeksän erilaista sekoitusta. Experimental design -tekniikalla voidaan pienellä koereseptimäärällä kattaa hyvin laaja koejärjestelyjoukko tilastomatematiikan avulla. Taulukon tutkimusaineisto analysoitiin Minitab-ohjelmistolla, joka on DOE-tekniikassa laajalti käytössä. (24)



Taulukko 5. DOE-menetelmällä luodut seokset (24, s. 3.)

TABLE-1  
FORMULATIONS, ACCORDING TO THE TAGUCHI DESIGN

Comp. No.	Refrence	BR, Silica	BR, Silica	NR, Silica	BR, NR, Silica	BR, NR	NR, Silica	BR, NR	BR, NR, Silica
SBR1712	100	90	80	90	80	70	80	70	60
BR <i>cis</i>	0	10	20	0	10	20	0	10	20
NR	0	0	0	10	10	10	20	20	20
N234	50	50	50	50	50	50	50	50	50
N330	20	0	0	0	0	20	0	20	0
Silica	0	15	20	15	20	0	20	0	15
Silane	0	1.5	2	1.5	2	0	2	0	1.5
Oil	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
Chemicals	12.88	12.88	12.88	12.88	12.88	12.88	12.88	12.88	12.88
Total	188.38	184.88	190.38	184.88	190.38	188.38	190.38	188.38	184.88

BR: *cis*-Butadiene rubber, NR: Natural rubber.

Koejärjestelyssä on tehty yhdeksän erilaista reseptikoostumusta. (24, s. 3.)

Taulukossa 6 on kerrottu puolestaan, mitä fysikaalisia ja mekaanisia ominaisuuksia edellä mainitulla DOE-tekniikalla on saatu aikaiseksi taulukon 5 resepteistä. Analysoimalla tuloksia Minitab-ohjelmalla voidaan löytää lopputuotteelle se resepti, joka tuottaa parhaan tasapainon tavoiteltujen ominaisuuksien kannalta. (24)

Taulukko 6. Fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet DOE-menetelmällä luoduista seoksista. (24, s. 4.)

TABLE-3  
PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RUBBER COMPOUNDS

Comp. No.	Hardness (shore A)	Resilience (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Abrasion (mm <sup>3</sup> )	Dispersion	Tensile (Mpa)	Elongation	M300 (Mpa)	Tear (KN/m)	CG4000 (mm)
1	64	15.1	1.165	117.6	6.6	16.5	431.8	10.3	33.9	13.6
2	63	18.2	1.167	97.1	4.5	18.5	494.3	10.03	79.3	10.9
3	66	19.0	1.174	93.7	4.4	17.3	419.1	11.5	72.2	14.0
4	63	17.3	1.170	99.7	5.8	18.3	460.9	10.5	57.6	11.4
5	66	18.3	1.176	104.8	5.3	17.0	425.6	11.2	69.2	10.4
6	68	17.0	1.163	91.7	6.0	17.1	372.5	13.4	61.1	21.0
7	65	17.9	1.178	118.8	5.2	17.3	434.5	10.9	69.6	10.7
8	68	17.9	1.163	92.0	6.1	17.2	384.8	12.5	60.4	15.4
9	65	20.0	1.156	83.9	4.8	17.5	437.4	10.7	68.0	10.6

DOE-menetelmällä pyritään saamaan seossuhteille optimaalinen keskiarvo ja varianssi, jotta halutut fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet ovat mahdollisimman optimaalisia. (24, s. 4.)

### 3.4 Tekstiilivahvikkeet

Renkaan tekstiilikerroksen vahvike eli niin sanottu koordi koostuu loimilangoista, jotka ovat suunnattu pituussuunnassa ja lujuudeltaan heikommista kudelangoista, jotka puolestaan ovat suunnattu poikkisuunnassa. Loimilankoja käytetään ilmarenkaiden vahvistamiseen. Tekstiilikerroksen ominaisuudet riippuvat vahvikekerrosten ja kuitujen kierteiden lukumäärästä. Kaikki vahvikkeet käsitellään tartuntaa edistäväillä pintakäsittelyillä. Tekstiilikerroksessa käytetään useita erilaisia vahvikemateriaaleja, joista päätyypit ovat rayon, teräskuitu, polyesteri sekä nylon 66. Tekstiilien suorituskyky määräytyy lujuuden, venyvyyden, elastisuuden ja kutistumisen perusteella.

Nylon 66 pyrkii muodostamaan vetysidosten välisiä ketjuja. Tämän vuoksi se sulaa ja pehmenee suhteellisen korkeassa lämpötilassa. Nylon 66:lla on hyvä väsymislujuus, ja se on sitkeä antaen hyvän puhkaisulujuuden. Materiaali kutistuu lämmitessään, joten rengas säilyttää ajossa hyvin mittansa. Myös pienempi herkkyys resonanssin suhteen on nylon 66:n etu, kun esimerkiksi pyritään vähentämään renkaiden taajuuksien aiheuttamia värähtelyjä. Nylonia käytetään myös valmistuskustannuksien pienentämiseen.

Polyesteria käytetään, koska sillä on samoja positiivisia ominaisuuksia kuten nylonilla, joita ovat vahva lujuus ja vähäinen kutistuminen. Polyesteri on myös monipuolinen käyttömahdollisuuksiltaan. Polyesteri saa renkaalle aikaan myös hyvän ryömintävasituksen.

Rayon on selluloosasta jalostettu synteettinen kuitumateriaali. Rayon on vahva tekstiilikuitu, jota käytetään erityisesti ultra high performance -renkaissa ja kilparenkaissa. Rayonia käytetään myös, jotta saadaan vähennettyä renkaan lämpötilan haittavaikutuksia. Rayon on parhaimmillaan 30 - 70 °C: n käyttölämpötilassa. Rayon-kuidulla on hyvä väsymislujuus.

Teräskuitujen etuja ovat vahva vetolujuus, venyminen pituussuunnassa, jäykkyys, kestävyys korroosiota vastaan ja korkea kimmomoduuli. Teräsvahvikkeita käytetään erityisesti renkaan sisäpinnoilla. Teräskuituja käytetään reilusti, jos tarvitaan suurta kantavuutta renkailta. (25)

### 3.5 Kumin viskoelastiset ominaisuudet

#### 3.5.1 Viskoelastisuuden taustaa rengasmateriaalitekniikassa

Viskoelastisuudella tarkoitetaan sitä, että materiaalilla on sekä viskoosisia, että elastisia ominaisuuksia muodonmuutostilanteissa. Viskoelastisuudesta puhuttaessa kumin kimmomoduuli jaetaan kahteen komponenttiin, jotka ovat viskoosinen moduuli ja elastinen moduuli. Esimerkiksi renkaiden kulutuskumin muodonmuutoksessa viskoosikomponentti vastaa mekaanisen energian muuttumisesta lämpöenergiaksi. Viskoelastisuus luo renkaalle pitoa, mutta aiheuttaa myös vierintävastusta. Tämä onkin yksi rengasteknologian haasteista tasapainotella molempien fysikaalisten ominaisuuksien välillä.

Viskoelastisuuden vuoksi renkaan pintapaine ei kohdistu symmetrisesti renkaan kontaktipinnan keskiosaan, vaan enemmän vetävän renkaan kontaktipinnan etuosaan. Tätä kuvaa myös kappaleessa 2.2.3 esitelty nappulateoria. Viskoelastisuudessa on huomioitavaa, että renkaan kumi ei palaudu heti, vaan viiveellä alkuperäismuotoonsa, kun kuormitustilanne on ohi. Kumin viskoelastiset ominaisuudet riippuvat lämpötilasta ja kuormitustaajuudesta.

Viskoelastisuudesta seuraa se, että renkaiden kumiosissa syntyy sisäisestä kitkasta johtuvia energiahäviöitä, jotka muodostavat merkittävän osan renkaan vierintävastuksesta. Kumin viskoelastisia ominaisuuksia mitattaessa kumista määritellään sekä viskoosinen, että elastinen moduuli, sekä näiden suhde eli häviökerroin. Mitä pienempi häviökerroin, sitä pienempi on myös kumin hystereesi ja sitä myöten myös renkaan vierintävastus. Häviökertoimen ohella vierintävastukseen vaikuttavat luonnollisesti myös monet muut tekijät, kuten kumin muodonmuutosamplitudi (renkaan rakenne, alusta, kumin kovuus, pyöräkuorma) ja muodonmuutostaajuus. (26, s. 11 - 18.)

#### 3.5.2 Viskoelastisuuden testaus

Viskoelastisuutta testataan rengastekniikassa DMA-testeillä (Dynamic Mechanical Analysis). DMA-testissä laite deformoi rengaskumin näytepalaa mekaanisesti ja mittaa näytteeseen syntyvän jännityksen. Testikappaleen jännitystä voidaan seurata lämpötilan tai ajan funktiona. DMA-testissä käytännössä aiheutetaan testikappaleelle sinimuotoinen muodonmuutosrasitus ja laitteessa oleva voima-anturi seuraa kappaleeseen syntyvää jännitystilaa. Viskoelastisessa muodonmuutoksessa testikappaleen jännitys

seuraa muodonmuutosta viiveellä, joka on mitattavalle materiaalille ominainen. Laite siis mittaa ja rekisteröi näytteen dynaamis-mekaanisia ominaisuuksia valitun muodonmuutoksen, mittaustaajuuden ja lämpötilaohjelman aikana.

DMA-mittauksella saadaan viskoelastisuudesta selville elastinen moduuli, viskoosinen moduuli ja häviökerroin. Haluttaessa voidaan selvittää myös lasisiirtymälämpötila ja tutkia molekyylien liikehdintää. DMA-testissä kumin näytekappaletta voidaan rasittaa esimerkiksi puristamalla, vetämällä, taivuttamalla tai kiertämällä. (27)

DMA-testin viskoelastisia parametreja ovat seuraavat:

*Moduuli.* Materiaalin kokonaismoduuli:

$$E^* = \left( \frac{\text{Jännitys}^*}{\text{Muodonmuutos}} \right)$$

*Elastinen moduuli.* Materiaalin kyky varastoida energiaa:

$$E' = \left( \frac{\text{Jännitys}^*}{\text{Muodonmuutos}} \right) \cos \delta$$

*Viskoosinen moduuli.* Materiaalin kyky kuluttaa energiaa ja lämpönä menetetty energia:

$$E'' = \left( \frac{\text{Jännitys}^*}{\text{Muodonmuutos}} \right) \sin \delta$$

*Tan Delta.* Häviökerroin joka kuvaa vaimentumisen määrää viskoosisen ja elastisen moduulin suhteena. Delta on se vaihesiirtokulma, joka sinimuotoisessa muodonmuutoksessa on elastisen ja viskoosisen muodonmuutoksen välillä:

$$\tan \delta = \left( \frac{E''}{E'} \right)$$

Edellä mainittuja kaavoja käytetään DMA-testauksessa, kun halutaan esimerkiksi selvittää kumin käyttäytymistä erilaisissa lämpötiloissa ja rasiustilanteissa. (27, s. 7.)

DMA-testauksella saadaan oivasti selville kumin käyttäytymistä eri lämpötiloissa. Testauksessa nähdään kuinka rengasmateriaalin päällekkäiset kerrokset käyttäytyvät eri

tavalla eri lämpötilassa (kuva 20). Testauksen kuvaajista nähdään edellä mainittu tangentti eli häviökerroin. Kuvaajasta nähdään myös kuinka kokonaismoduuli on suhteellisen tasainen tyypillisellä käyttölämpötila-alueella (-30 → 80 °C), mutta huomattavan korkea, kun siirrytään lasisiirtymäalueen kylmemmälle puolelle (noin 100-kertainen renkaan normaaliin käyttölämpötilaan verrattuna). Kohtaa, jossa moduuli alkaa jyrkästi laskea, kutsutaan lasisiirtymälämpötilaksi ( $T_g$ ). (28)

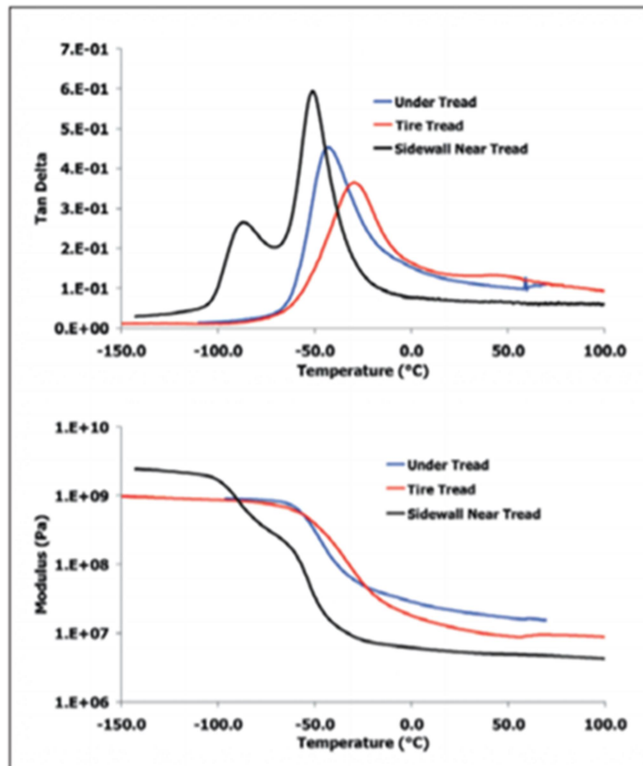


Figure 1. Glass transition of tire rubber.

Equipment	Experimental Conditions	
DMA 8000	Sample:	Michelin® Car Tire
IL Dewar	Geometry:	Single Cantilever Bending
	Dimensions:	7.5–12.5 (l) x 4.9–9.0 (w) x 2.5–4.6 (t) mm
	Temperature:	-150 °C to 100 °C at 3 °C min <sup>-1</sup>
	Frequency:	1.0 Hz

Kuva 20. Michelinin renkaan DMA-testaus. Ylempi kuvaaja kuvaa tangentti deltaa eli häviökerrointa ja alempi kuvaaja puolestaan kokonaismoduulia. Kuvaajissa verrataan kuinka eri tavalla renkaan pohjaosa, sivuseinä ja kulutuspinna käyttäytyvät. (28, s. 2.)

DMA-mittalaitteilla voidaan tutkia viskoelastisia ominaisuuksia vain melko rajatulla mitaustaajuusalueella, tyypillisesti vain alueella: 0 - 30 Hz. Kuitenkin renkaiden muodonmuutostaajuudet voivat esimerkiksi kitkatilanteissa ulottua jopa 100000 Hz:iin.

Tämän haasteen ratkaisemiseen voidaan käyttää ns. WLF-yhtälöä (Williams-Landel-Ferry -yhtälö). WLF-yhtälö on empiirinen yhtälö, joka perustuu ajan ja lämpötilan superpositioon. WLF-yhtälöllä voidaan määrittellä ajan tai myös taajuuden muutoskerrointa hyväksikäyttäen, uutta taajuutta vastaava lämpötilapiste jo mitatulta viskoelastiselta ominaisuuskäyrältä. WLF-yhtälöllä voidaan siis ennustaa viskoelastisuuden elastisen ja viskoosisen komponentin käyttäytymistä sekä ekstrapoloida viskoelastisuuden taajuusanalyysi hyvin laajalle alueelle. On huomioitavaa, että WLF-yhtälöä voidaan soveltaa vain lämpötiloihin, jotka ovat lasisiirtymälämpötilaa  $T_g$  korkeampia. (26, s. 13.)

#### WLF-yhtälö:

$$\log(\alpha_T) = \frac{-8,86(T - T_0)}{101,5 + (T - T_0)}$$

Yhtälön muuttujat:

T on Lämpötila [K]

$T_0$  on valittu referenssilämpötila [K]. Tyypillisesti noin 50 °C lasisiirtymälämpötilaa korkeampi.

$\alpha_T$  on siirtokerroin kohdassa T (esimerkiksi tutkittavan ja mittaustaajuuden suhde)

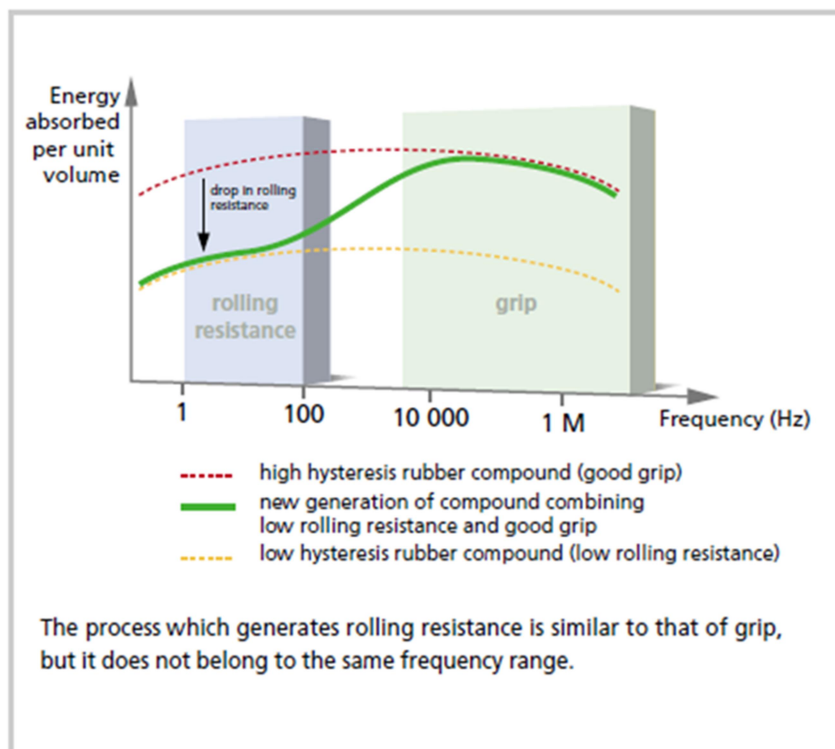
Yhtälön vakiot 8,86 ja 101,5 ovat empiirisiä vakioita, jotka ovat säädetty sopimaan superpositioparametrin  $\alpha_T$  arvoihin. Renkaan viskoelastisuutta tutkiessa nämä numeroarvot ovat sopivia. (29, s. 48.)

### 3.5.3 Viskoelastisuuden vaikutus vierintävastukseen ja kitkaan

Noin 1990-luvun puolivälissä rengastekniikassa polttoaineen kulutuksen pienennystavoitteiden myötä yleistyivät niin sanotut green tyre -renkaat, joilla pystyttiin vähentämään vierintävastusta jopa 20 prosenttia. Ennen tätä renkaissa pyrittiin hyvin paljon

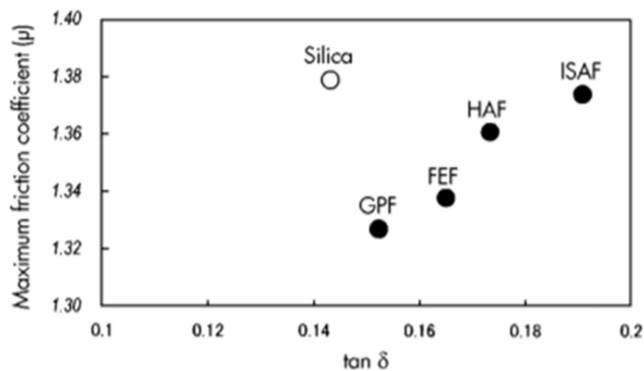
noen avulla säätämään reseptin viskoelastisia ominaisuuksia vierintävastuksen ja kitkan suhteen. Rengaskumien viskoelastisia ominaisuuksia tutkittaessa oli opittu huomaamaan, että olisi hyvä pyrkiä vierintävastuksen optimoinnissa 1 - 100 Hz:n taajuusalueella mahdollisimman alhaiseen tan deltan tasoon noin 50 °C: n lämpötilassa ja toisaalta kitkan kannalta  $10^3 - 10^{10}$  Hz:n taajuusalueella 0 °C: n lämpötilassa taas mahdollisimman korkeaan tan deltan arvoon. Noen avulla optimaalista ratkaisua näiden kahden parametrin välillä oli vaikea saavuttaa. Tämän vuoksi renkaiden seoskoostumukset jakautuivat viskoelastisuuden suhteen kahdentyyppisiksi: renkaat joiden vierintävastus oli alhainen ja kitkan määrä vähäinen, sekä renkaat, joiden vierintävastus oli korkea ja kitkan määrä suuri.

Noen ongelmien vuoksi rengasvalmistajat onnistuivat löytämään ratkaisun ja siirtyivät Green tyre -teknologiassaan käyttämään silikaa eli hienojakoista piidioksidia osittaisena noen korvaajana. Tämän ratkaisun ideaa demonstroi hyvin kuva 21. (30, s. 90.)



Kuva 21. Nokitäytteisten renkaiden ja green tyre -renkaiden vertailu vierintävastuksen ja kitkan suhteen. Kuvaajasta nähdään, että green tyre -renkailla pystytään saavuttamaan alhainen vierintävastus ja korkea kitkataso. (30, s. 90.)

Silikan avulla saavutettiin hyviä tuloksia alhaisen vierintävastuksen suhteen kitkasta tinkimättä (kuva 22). Silika toimii yhdessä aktivointiaineiden kanssa. Edes hyvin hienojakoisetkaan noet (HAF ja ISAF) eivät ole vetäneet vertoja silikalle ominaisuuksien suhteen. Silikan avulla myös renkaiden märkäpitoa on saatu parannettua huomattavasti. (31)



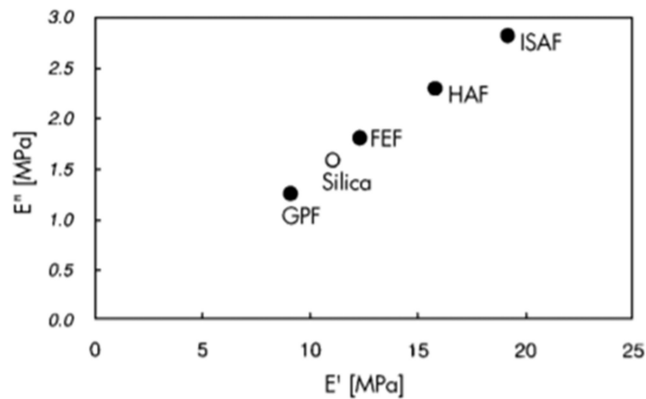
**Figure 8.** Measurement results of rolling resistance tan delta (70°C) of rubber specimens vs. maximum friction coefficient on wet roads.

Kuva 22. Silikan ja noen ominaisuuksien vertailu kitkan ja vierintävastuksen tan deltan suhteen 70 °C:n lämpötilassa. GRP, FEF, HAF ja ISAF ovat nokilaatuja hienojakoisuusjärjestyksessä. Kuvaajasta nähdään kuinka silikalla on saavutettu alhaisin vierintävastus ja korkein kitka. (31, s. 5.)

Kuvassa 23 on vuorostaan esitetty silika- ja nokitäyteisten seosten viskoosinen ja elastinen komponentti mitattuna 0 °C:n lämpötilassa. Tässä lämpötilassa mitattujen viskoelastisten ominaisuuksien pitäisi vallitsevan näkemyksen perusteella havainnollistaa eri täyteaineiden roolia renkaiden pidon suhteen, koska oletusten mukaan hienojakoisemmat nokilaadut ovat hyviä kitkan tuottajia ja karkeammat noet taas ei niinkään.

Kuvan 23 perusteella silika asettuisi karkeampien nokilaatujen GPF ja FEF välimaastoon. Toisin sanoen edellä mainittu näkemys ei suoraan päde. Siksi on päädytty sellaiseen päätelmään, että silikapitoisten reseptien sisältämät silanoliryhmät synnyttävät sellaisia molekulaarisia vuorovaikutuksia märän tienpinnan vesifilmin kanssa, jotka nostavat adheesiokitkaa. (31)





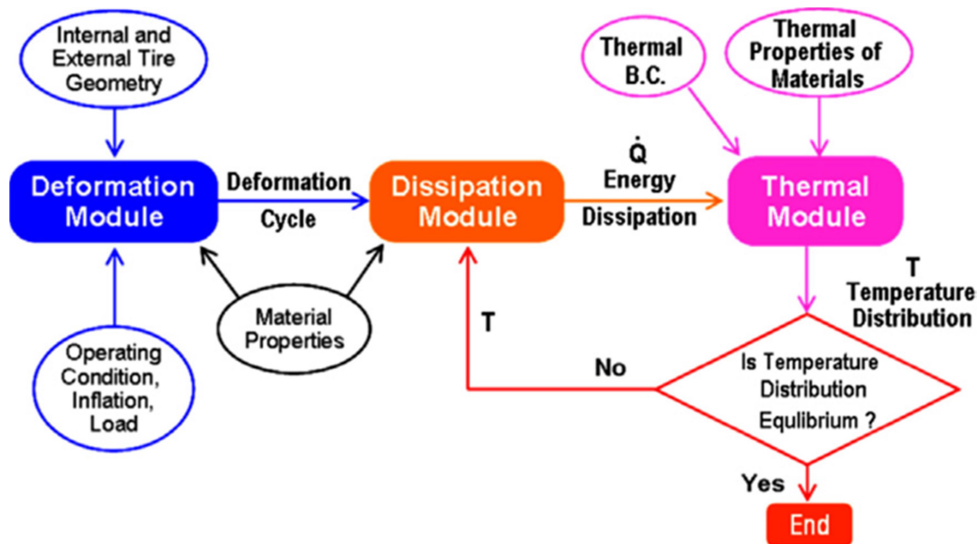
**Figure 9.** Results of measurement of viscoelastic characteristics at 0°C

Kuva 23. Silika- ja nokitäyteisten seosten viskoosinen ( $E''$ ) ja elastinen ( $E'$ ) komponentti mitattuna 0 °C:een lämpötilassa (31, s. 5).

### 3.6 Renkaan vierintävastuksen ja lämmönkehityksen simulointi

Rengaskehityksessä hyödynnetään nykypäivänä hyvin paljon erilaisia simulointimalleja, joiden avulla voidaan nopeuttaa renkaan kehitysprosessia, sillä reseptejä ei tarvitse kokeellisesti testata niin laajalta joukolta. Simuloinnit keskittyvät erityisesti renkaan uramuotoiluun, vierintävastukseen ja renkaan sisäiseen lämmönkehitykseen.

J. R. Cho ym:n kehittämä numeerinen simulointimalli on hyvä esimerkki tehokkaasta simulointityökalusta. Kyseisellä mallilla voidaan laskea renkaan vierintävastus ja renkaaseen ajossa sisäisen lämmönkehityksen kautta syntyvä lämpötilakartta, kun materiaaliominaisuudet, renkaan rakenne ja ajo-olosuhteet tunnetaan. Kuvassa 24 on esitelty vuokaavio laskentamallista. (12, s. 1 - 6.)



Kuva 24. Iteratiivinen laskentamalli renkaan vierintävastukselle ja sisäiselle lämmönkehitykselle. Simulointimallin avulla voidaan ennustaa tehokkaasti renkaan käyttäytymistä. (12, s. 5.)

Simulointimallissa hyödynnetään renkaan kumirakenteista mitattuja viskoelastisia ominaisuuksia. Tässä mallissa taajuusmuunnokseen käytetään WLF-yhtälön asemesta laskettavien renkaiden kumeista eri taajuuksilla mitattujen ominaisuuksien pohjalta kehitettyä potenssikaavaa. Mallin mukaan rengasmateriaalissa yhtä kierrosta ja materiaalitilavuusyksikköä kohden laskettu energia(hystereesi)häviö on:

$$\Delta W = \pi G'' * \varepsilon^2$$

Tai, koska:  $G'' = G' \tan \Delta$

niin pätee myös, että:

$$\Delta W = \pi G' \tan \Delta * \varepsilon^2$$

Yhtälön muuttujat:

$\Delta W$  on energiahäviö

$G''$  on viskoosinen moduuli

$G'$  on elastinen moduuli

$\tan \Delta$  on häviökerroin

$\varepsilon$  on muodonmuutoksen amplitudin puolikas laskettavassa materiaalielementissä

Kaavasta nähdään, että energiahäviö on suoraan verrannollinen häviökertoimeen ( $\tan \Delta$ ), elastiseen moduuliin  $G'$  sekä muodonmuutoksen neliöön. Pintakumin kovuuutta ja moduulia on siis pidettävä sopivan korkeana, jottei muodonmuutoksen kautta aiheutuisi tarpeetonta vierintävastusta. (12, s. 1 - 10.)

Taulukossa 7 ja 8 on esitetty esimerkkilaskelmat tutkittavalle rengastyypille. Taulukossa 7 on lähtöarvot ja taulukko 8:ssa puolestaan on yhteenveto laskentatuloksista nopeuksille: 40, 60, 80, 100, 120 ja 140 km/h.

Taulukko 7. Materiaali- ja simulointidata numeerista laskentamallia varten (12, s. 8.)

**Table 1**  
Material and simulation data taken for the numerical experiments.

Item	Parameters	Smooth tire	Patterned tires
Mesh	Element numbers per sector	722	1236 (model I) 1538 (model II)
Viscoelastic material properties	Element types	C3D8H, C3D6H, R3D4, DC3D6, DC3D8	C3D8H, C3D6H, SFM3D4R, R3D4, DC3D6, DC3D8
	Shear modulus of rubber <sup>a</sup> $G$ (MPa)	1.3–6.83	
	Exponent <sup>a</sup> $m$	0.032–0.155	
	Loss factor <sup>a</sup> $\eta$	0.1014–0.2942	
Steady-state heat transfer	Interpolation constant <sup>a</sup> $d$	–0.0060–0.0058	
	Tire velocity $V$ (km/h)	80	
	Effective radius $\rho_e$ (m)	0.29750	0.29749
	Slip ratio	0	
	Density <sup>a</sup> $\rho$ (Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	$1.13 \times 10^{-3}$ – $1.19 \times 10^{-9}$	
	Specific heat <sup>a</sup> $c$ (J/kg °C)	1020.0–1742.5	
	Thermal conductivity <sup>a</sup> $\kappa$ (W/m °C)	0.2767–0.3458	
	Conduction coefficient $h$ (W/m <sup>2</sup> °C)	45 on $\Gamma_3$	
	Convection coefficient $h_c$ (W/m <sup>2</sup> °C)	81 on $\Gamma_1$ , 8 on $\Gamma_2$	
	Room temperature $T_0$ (°C)	25.0	
Stefan-Boltzman constant $\sigma$ (N/s m °C <sup>4</sup> )	$5.6697 \times 10^{-8}$		
Emissivity $\epsilon$	0.95		

<sup>a</sup> Indicates the values which are dependent on the tire components.

Laskentamallin lähtöarvoihin tarvitaan useita eri muuttujia, joita ovat esimerkiksi renkaan elementtityyppi, lämpötila, tiheys, fyysiset mitat ja nopeus. (12, s. 8.)

Kuten odottaa sopii, sisäinen lämmönkehitys kasvaa lähes lineaarisesti nopeuden funktiona. Hystereesihäviö ja vierintävastus puolestaan pysyvät melko stabiilina. Syy tälle on, että nopeuden kasvaessa muodonmuutostaajuus kasvaa, mutta toisaalta myös renkaan lämpötila nousee, ja nämä kompensoivat toistensa vaikutuksia.

Taulukon 8 laskentatuloksia on myös verrattu testipenkissä mitattuihin arvoihin. Yleinen havainto on se, että testeissä vierintävastus on luokkaa 13 prosenttia korkeampi kuin laskentatulokset. Tutkijoiden mukaan tätä tulosta selittää se, että laskenta tehdään ideaaliselle symmetriselle tapaukselle, kun taas testissä esiintyy aina ylimääräistä kuormitusvaihtelua esimerkiksi epätasaisen kuormituksen muodossa. Joka tapauksessa simulointimalli oli osoittautunut oivaksi työkaluksi renkaiden tuotekehityksessä ja suorituskyvyn arvioinnissa. (12, s. 8 - 11.)

Taulukko 8. Laskentamallin tulokset (12, s. 9.)

**Table 4**

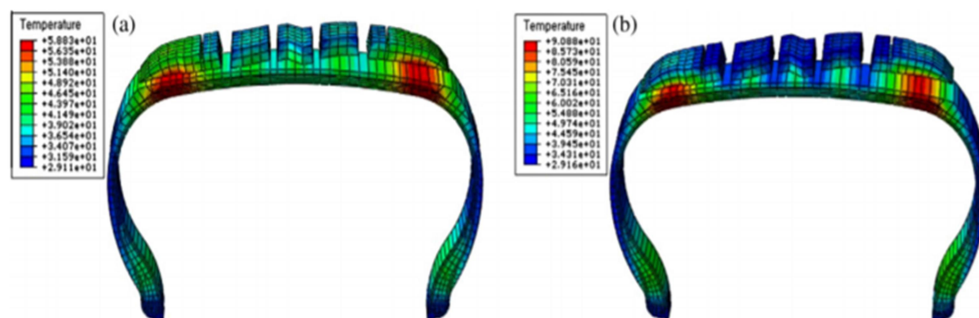
Variations of the total hysteretic loss, rolling resistance and peak temperature to the vehicle velocity.

Items	Velocity V(km/h)					
	40	60	80	100	120	140
Total hysteretic loss W(J)	78.78	78.09	77.41	76.89	76.42	75.96
Heat generation rate $\dot{Q}$ (Watt)	468.59	696.70	920.92	1143.36	1363.61	1581.34
Rolling resistance RR (N)	42.15	41.78	41.42	41.14	40.89	40.64
Peak temperature $T_{max}$ (°C)	58.83	65.62	72.66	79.06	85.05	90.89

Tuloksissa vertaillaan renkaan energiahystereesihäviötä, lämpötilakertymää, vierintävastusta ja huippulämpötilaa mitatuissa nopeuksissa. (12, s. 9.)

Kuvassa 25 taas on kartta renkaaseen syntyvästä lämpötilajakaumasta kahdella eri nopeudella. Lämpötilakartan avulla voidaan kaksi- tai kolmiulotteisesti tutkia mihin kohtiin rengasta lämpöä kertyy ja kuinka paljon. Tämän avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä renkaan käyttäytymisestä esimerkiksi eri nopeuksissa. (12, s. 8 - 12.)

*J.R. Cho et al. / International Journal of Solids and Structures 50 (2013) 86–96*



**Fig. 16.** Temperature distributions of patterned tire model I (°C): (a) at 40 km/h and (b) at 140 km/h.

Kuva 25. Lämpötilajakaumat uritetussa rengasmallissa vauhdissa 40 km/h ja 140 km/h. Lämpötilakartasta nähdään, että korkeammassa nopeudessa renkaan kulutuspinnan keskiosa pysyy viileämpänä. Molempien nopeuksien lämpötilakartasta havaitaan myös, että korkein lämpötila syntyy renkaan reunojen sisäpinnalle. On huomioitavaa, että näiden kahden lämpötilakarttojen vieressä olevat taulukot eroavat toisistaan lämpötilaskaalan suhteen. (12, s. 10.)

## 4 Rengastekniikan tulevaisuus

### 4.1 Taustatietoa rengastekniikan tulevaisuudesta

Rengastekniikka on kehittyvä ala, ja tulevaisuus tuo varmasti tullessaan monenlaisia erilaisia ratkaisuja, joilla pyritään lisäämään turvallisuutta, ajomukavuutta ja suorituskykyä. Voi myös selvästi olettaa, että ilmastopäästöjä pyritään vähentämään merkittävästi kaikissa renkaan elinkaaren vaiheissa, joita ovat: valmistus, kulutuskäyttö ja kierrätys. Rengastekniikka on fysiikan lisäksi hyvin pitkälti kemiaa ja materiaalitekniikkaa, joka tarkoittaa, että sopivia aineita kehitetään laboratorio-olosuhteissa jatkuvasti.

Renkaista johtuvat päästöt eivät ole rengasvalmistajien ainoa ympäristöhuoli, sillä myös luonnonvarat vaikuttavat renkaiden valmistukseen. Vaikka useat raaka-aineet ovat uusiutuvia luonnonvarjoja kuten esimerkiksi kumipuu, on otettava huomioon ympäristöpolitiikka sekä luonnonvarojen rajallinen uudelleenkasvu.

Aineiden lisäksi rengastekniikka tuo tullessaan monenlaisia innovaatioita, joilla pyritään kehittämään autoilijan turvallisuutta. Esimerkiksi anturitekniikka ja elektroniikan lisääminen rengastekniikkaan yleistyy jatkuvasti. Elektroniikan lisäksi myös itse renkaan rakenteen suhteen halutaan tuoda uusia vaihtoehtoja. Uusia rengasprofiileja ja konstruktioita innovoidaan siis paljon.

Kaiken edellä mainitun lisäksi myös lainsäädäntö ja erilaiset patentit sääntelevät hyvin tarkasti rengasvalmistajien tuotantoa ja kehitystä. Siksi on tärkeää, että rengasvalmistajat noudattavat säännöksiä ja pyrkivät luomaan keksintöjä, joita muut eivät vielä ole innovoineet. Esimerkiksi on yleisessä oletuksessa, että tarkat reseptitekniset yksityiskohdat ovat hyvin salaisia ja sellaisia, joita rengasvalmistajat eivät halua yleensä paljastaa. Reseptitekniisiä yksityiskohtia voivat olla esimerkiksi seossuhteet, materiaalilaa-  
dut ja käytetyt raaka-aineet.

## 4.2 Merkittäviä innovaatioita

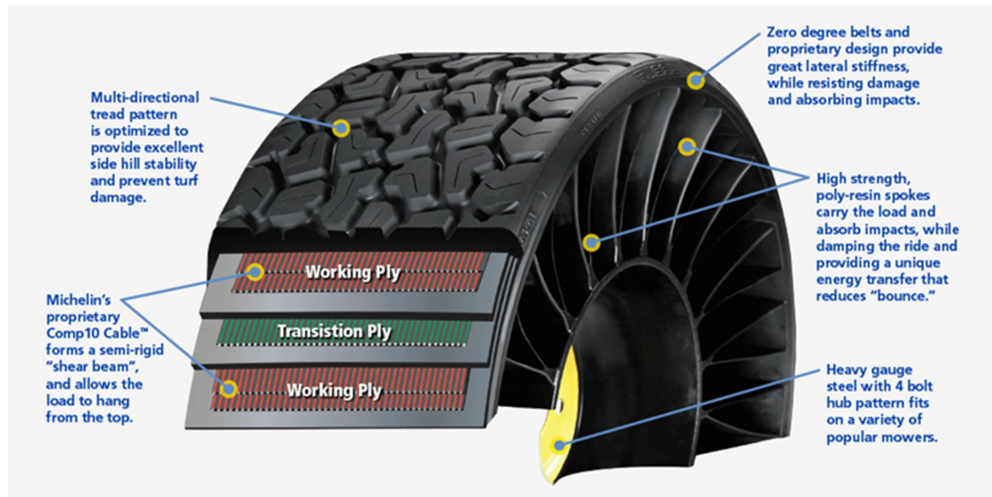
### 4.2.1 Ilmattomat renkaat

Jo 2000-luvulla on kehitetty ilmattomia renkaita, joiden rakenne perustuu renkaan sisälle suunniteltuun konstruktion, joka pitää renkaan kasassa ilman ilmaa. Renkaan sisällä on usein kulmikkaita kennorakenteita, jotka kykenevät joustamaan (kuva 26). Ilmattomien renkaiden etuna on niin sanottu puhkeamattomuus.

Ilmattomien renkaiden yleistyminen on tapahtunut ajan kuluessa ja odotettavissa on, että niitä käytetään yhä enemmän myös tulevaisuudessa. Michelinia pidetään yhtenä ilmattomien renkaiden kehittäjänä ja he ovat kehittäneet kyseisiä renkaita jo noin 2005 vuodesta lähtien. Ilmattomien renkaiden haasteeksi on koettu suuren massan kannattelu, joustavuus ja vierintävastuksen suuruus.

Ilmattomien renkaiden tekniikka on kuitenkin muuttumassa, sillä on ennustettu, että Michelin ja General Motors esittelevät vuonna 2024 niin sanotut Uptis-renkaat. Uptis tulee sanoista Unique puncture-proof tyre system. Näiden renkaiden päämääränä on käyttäytyä dynamiikaltaan hyvin samalla tavalla kuin nykyiset ilmarenkaat. Uptis-renkaiden materiaalina käytetään komposiittikumia ja hartsitäytteistä lasikuitua. Näiden materiaalien avulla pyritään hallitsemaan auton massa suuremmissakin nopeuksissa. Ilmattomat renkaat sopivat normaalin henkilöauton lisäksi myös autonomisiin ajoneuvoihin, koska rengasrikon aiheuttamat vahingot vähentyisivät.

Ilmattomilla renkailla pyritään myös siihen, että renkaita tarvitsisi hävittää harvemmin, koska rengasrikkojen määrä vähenisi. Jopa 200 miljoonaa rengasta tuhoutuu vuosittain rengasvahingon vuoksi. (32)



Kuva 26. Michelinin ilmatton renkaan rakenne. Ilmaton rengas koostuu kennorakenteesta renkaan sisällä ja erilaisista pintakumikerroksista (33).

#### 4.2.2 Anturitekniikan lisääntyminen rengasteknologiassa

Continental on esitellyt niin sanottuja ContiSense-renkaita, joissa on sähköä johtavia kumiyhdisteitä, jotka kykenevät lähettämään renkaassa olevan anturin kautta sähköisiä signaaleja autossa olevaan vastaanottimeen. Tämän teknologian avulla voidaan mitata esimerkiksi renkaiden lämpötilaa ja urasyvyyttä. Jos mitatut suureet ovat sopivien rajojen ulkopuolella, järjestelmä varoittaa tästä kuljettajalle.

Continental on myös esitellyt niin sanotun ContiAdapt-järjestelmän, joka yhdistää pyörään integroidut rengaspaineen säätämistä varten olevat mikrokompressorit renkaan kanssa. Järjestelmä voi siten muuttaa renkaan kosketuspinta-alan kokoa, mikä erilaisissa tieolosuhteissa on ratkaiseva tekijä sekä turvallisuudelle että mukavuudelle.

Järjestelmän neljä erilaista yhdistelmää mahdollistaa sopeutumisen märkiin, epätasaisiin, liukkaisiin ja normaaleihin tieolosuhteisiin. Esimerkiksi renkaan pienempi kosketuspinta-ala tiehen yhdessä korkean rengaspaineen kanssa vähentää vierintävastusta ja lisää energiatehokasta ajamista tasaisilla ja kuivilla teillä. Sitä vastoin järjestelmä suurentaa kosketuspinta-alaa alentamalla rengaspainetta ja luo ihanteellisen pidon liukkailla teillä. (34)

Anturiteknologialla varustettuja renkaita on tutkittu myös Suomessa Aalto-yliopistossa. Tutkimuksissa käytetyissä renkaissa on käytetty kiihtyvyyssanturia. Tutkimuksissa keskityttiin siihen, miten rengas käyttäytyy esimerkiksi vesiliirrossa. (35)

#### 4.2.3 Futuristiset renkaat

Rengasvalmistajat haluavat näyttää kykyjään erilaisilla futuristisilla konseptirenkailla, jotka eivät välttämättä ainakaan vielä lähitulevaisuudessa ole ajankohtaisia. Goodyear on yksi tunnetuimmista valmistajista kyseisessä generaatiossa, ja se on jo esitellyt monia ja monenmuotoisia tulevaisuuden renkaita. Yksi esimerkki näistä on niin sanottu Eagle 360 -rengas, joka on muodoltaan pallo. Rengasta voitaisiin käyttää tulevaisuuden autonomisissa kulkuneuvoissa.

Renkaat pyörisivät yhdessä auton alustassa olevien sähkömagneettisten napojen avulla. Pallomaisen renkaan kulutuspinna voitaisiin 3D-tulostaa ja muokata ajoneuvon tehtävän ja sijainnin mukaan. Renkaat voitaisiin myös varustaa anturiteknologialla. Renkaan etuna olisi esimerkiksi se, että ajoneuvo voisi liikkua paikoiltaan kaikkiin suuntiin ja vauhdissa väistää esteitä ketterämmin. (36)

#### 4.2.4 Nanotäyteaineet

Kiinnostus nanokokoluokan täyteaineiden käyttöön rengaskumien ominaisuuksien mahdollisena parannuskeinona on kasvanut. Vaikkakin pienimmillään rengaskumiresepteissä käytetyt noki- ja silikatäyteaineiden partikkelikoko on halkaisijaltaan 5 - 100 nm:n luokkaa, niin nanopartikkeleissa ainakin yksi dimensio on tyypillisesti vain 1 - 3 nm.

Nanokaoliinilla (Na-montmoriloniitti) yhdistettynä silikaan tai nokeen on voitu pienentää vierintävastusta noin 20 %:lla ja samalla on voitu säilyttää muut ominaisuudet vähintään vastaavina kuin referenssimateriaalilla. Haasteena nanokaoliinilla on ollut saavuttaa riittävän hyvä dispersio ja kytkeä elastomeereihin. Tämän onnistumiseksi on vaadittu tavanomaisen SBR/BR-yhdistelmän ohella XNBR-kumia (XNBR = karboksyloitu nitriliikumi) mukaan reseptiin. Polaarisen elastomeerinä XNBR parantaa dispersiota sekä vahvistaa elastomeerin ja täyteaineen välisiä sidoksia. (21, s. 141 - 142.)



#### 4.2.5 Itse itsensä paikkaavat renkaat

Michelin on kehittänyt niin sanottua Selfseal-teknologiaa, joka pystyy tiivistämään renkaaseen tulleen reiän, joka on peräisin esimerkiksi ruuvista tai naulasta. Teknologian päämääränä on pitää rengas ajokuntoisena siihen asti, kunnes rengas tarkastetaan, paikataan tai vaihdetaan.

Teknologia kykenee suojaamaan reikiä 6 mm:n halkaisijaan asti. Renkaan sisään on asennettu tiivisteainetta puhkaisevan esineen ympäröimiseksi ja syntyneen aukon täyttämiseksi, jotta voidaan estää ilmavuodot ja pitämään paine yllä mahdollisimman hyvin. Kyseisen teknologian renkaita on tällä hetkellä saatavilla 2017 vuoden ja uudempiin Chevrolet Bolt malleihin sekä vuoden 2020 Ford Exploreriin. (37)

#### 4.2.6 Ekoystävälliset renkaat

Tulevaisuudessa halutaan panostaa entistä enemmän ympäristöystävällisiin renkaihin. Renkaiden ympäristöystävällisyys perustuu usein alhaiseen vierintävastukseen ja sitä kautta vähäisiin polttoainekuluihin ja hiilidioksidipäästöihin. Tämän lisäksi myös materiaalivalinnoilla pyritään parantamaan renkaiden ympäristöystävällisyyttä. Osa renkaista nimittäin valmistetaan osittain kierrätettävistä materiaaleista.

Yokohama on keksinyt niin sanotut BlueEarth-renkaat, jotka on suunniteltu vähentämään renkaan imevän ilman määrää. Asianmukaisen ilmanpitoisuuden ylläpitäminen on ratkaisevan tärkeää, koska alipaineistetut renkaat vaativat enemmän voimaa, jolloin polttoainetta kuluu enemmän. Useilla valmistajilla on omia ekoystävällisiä rengasmalleja, joita ovat esimerkiksi Michelin Energy saver, Bridgestone Ecopia, Pirelli Cinturato ja Hankook Kinergy eco. (38)

#### 4.3 Kestävän kehityksen vaatimukset renkailla

EU:n autonrenkaille 2000-luvulla rakentamaa säännöstöä voidaan pitää globaalina perustana ja suunnannäyttäjänä renkailla asetettaville vaatimuksille. Päämääränä on minimoida haitat ympäristölle. Kuvassa 27 on esitetty jo voimaan tulleet säännös. (21, s.13 - 14.)

### European Legislation on CO<sub>2</sub> Emissions Affecting Tires

**REGULATION (EC) No 443/2009**

OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO<sub>2</sub> emissions from light-duty vehicles

**REGULATION (EC) No 661/2009**

OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 July 2009 concerning type-approval requirements for the general safety of motor vehicles, their trailers and systems, components and separate technical units intended therefore.

**REGULATION (EC) No 1222/2009**

OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 November 2009 on the labeling of tires with respect to fuel efficiency and other essential parameters



Fig. 2.9- EU legislation on tire labeling

[4<sup>th</sup> Dresden Tire Workshop (2011) on Green Tire Materials-Dr. Seven Thiele]

Kuva 27. Henkilöautojen renkaita koskeva EU-lainsäädäntö. Lainsäädännössä määritellään renkaiden hiilidioksidipäästöjä koskevia säännöksiä. (21, s. 14.)

Kuten kappaleessa 3.1.1 on kerrottu, niin vierintävastuksen minimointiin ja sitä kautta polttoaine- ja energiankulutuksen vähentämiseksi on luotu oma asteikkonsa (kuva 28). Samantyyppinen asteikko on myös laadittu märkäpidolle ja erikseen renkaalle tehdään vielä merkintä tietyissä ajo-olosuhteissa aiheutuvasta melutasosta desibeleinä. (21, s. 13 - 14.)

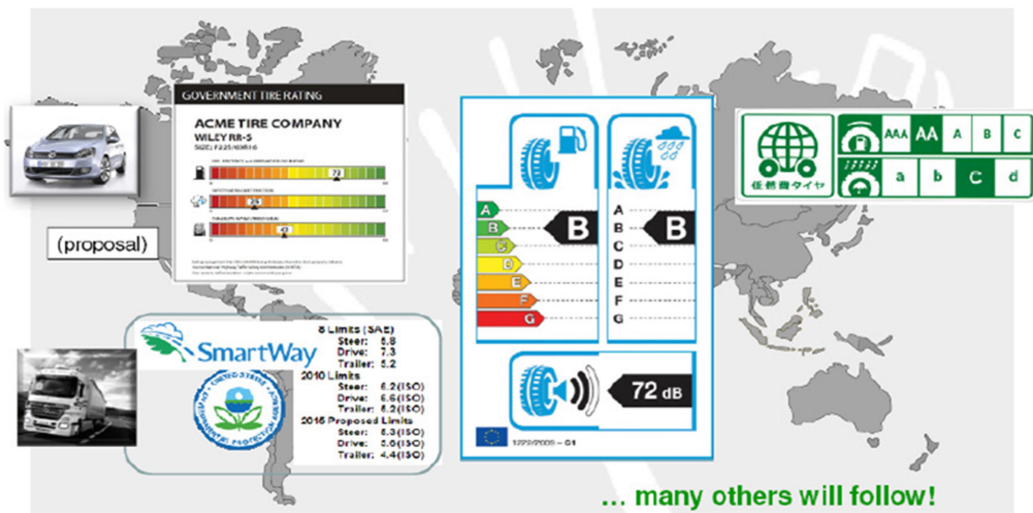


Fig. 2.10- The world wide tire labeling

[4<sup>th</sup> Dresden Tire Workshop (2011) on Green Tire Materials-Dr. Holger Lange]

Kuva 28. Yhteenveto rengasmerkinnöistä. Kuvassa on kerrottu renkaiden luokittelumisesta esimerkiksi energiatehokkuuden, märkäpidon ja desibelitason perusteella. (21, s. 14.)

EU:n komissio on arvioinut vuonna 2017 uusien merkintöjen toteutumista teettämänsä selvityksensä kautta. Selvityksen mukaan parhaiden energiatehokkuusluokkien eli A- ja B -luokkien markkinaosuus on melko pieni (alle prosentti kaikista rengastyypeistä). Tätä ongelmaa halutaan parantaa. Selvityksessä on myös kysytty kuluttajilta heidän tietoisuudestaan renkaiden energialuokista. Kuluttajakyselyn perusteella yli puolet ei ollut tietoinen rengasmerkinnöistä. Näiden aiheiden lisäksi EU:n selvityksessä on otettu mukaan myös yhtenä uutena kohteena renkaiden kulumiskestävyys, joten tämänkin osalta voi olla odotettavissa vaatimustason nostoa. (39)

#### 4.4 Tulevaisuuden haasteet

##### 4.4.1 Renkaiden ympäristöystävällisyys

Kuten edellisissä kappaleissa on kerrottu, on renkaiden ympäristöystävällisyydessä otettava huomioon materiaalien valinta ja alhainen vierintävastus. Näiden lisäksi on myös otettava huomioon renkaasta irtoavan kumipölyn määrä, aivan kuten jarruissakin pohditaan syntyvän jarrupölyn määrää. Renkaista nimittäin voi hioutua elinkaarensa aikana peräti puolitoista kiloa pölyä. Ympäristön kannalta on haitallista, jos kumipölyä päätyy käsittelemättömiin vesistöihin, koska rengas sisältää synteettistä kumia, luonnonkumia ja erilaisia kemikaaleja. Kumipöly on myös haitallista hengitysillemme. (40)

##### 4.4.2 Autonomisten ajoneuvojen tarpeisiin vastaaminen

Autonomiset autot ovat näillä näkymin yleistymässä tulevaisuudessa ja myös rengas-tekniikan täytyisi sopeutua tähän muutokseen. Autonomisten autojen renkaiden tulisi olla hyvin luotettavia ja turvallisia. Autonomiset ajoneuvot vaativat usein tietoa tien kunnosta ja pinnan laadusta. Tätä varten antureilla varustettuja renkaita tarvitaan, jotta tieto alustan laadusta saadaan välitettyä ajoneuville. Puhutaankin, että niin sanottua smart tyre -teknologiaa tarvitaan tulevaisuudessa. Kyseisen tyyppisiä renkaita kehittää esimerkiksi Pirelli, Goodyear ja Continental. On myös pohdittu, että täytyisikö renkaiden muodon muuttua tulevaisuudessa esimerkiksi autonomisissa autoissa. Tästä esimerkkinä luvussa 4.2.3 aiemmin mainittu Goodyearin Eagle 360 -rengas. (41)

#### 4.4.3 Turvallisuus

Turvallisuus on rengasmaailmassa hyvin oleellista. Renkaita täytyisi pyrkiä jatkuvasti kehittämään, jotta esimerkiksi rengasrikoilta ja huonoilta pito-ominaisuuksilta vältyttäisiin. Turvallisuuden yksi osa-alue on renkaiden soveltuvuus vaihtelevissa ympäristö- ja sääolosuhteissa. Esimerkiksi Kiinassa rengasvalmistajat tekevät jo parannetulla pintakuviolla ja märkäpidolla varustettuja renkaita, jotka ovat ihanteellisia vaihteleviin maastoihin ja sääolosuhteisiin. Brasilia ja Yhdysvallat ovat muita maita, jotka keskittyvät tämän uuden sukupolven rengasturvallisuuteen. (41)

#### 4.4.4 Markkinoiden välinen kilpailu ja tarpeisiin vastaaminen

Muiden paineiden lisäksi rengasteollisuus kamppailee tulevaisuudessakin toimitusketjujen monimutkaisuuden, kustannusten optimoinnin ja lyhyempien toimitusjaksojen parissa. Näiden nousevien vaatimusten täyttäminen on ratkaisevaa rengasteollisuuden liikkuvuuden, kestävyuden ja kasvun kehittämiseksi. Kiina johtaa rengasmarkkinoita maailmassa autoteollisuuden valtavan kasvunsa ansiosta. Muita merkittäviä rengasmarkkinoita maailmassa on Euroopassa, Japanissa ja Yhdysvalloissa. Aasian ja Tyynenmeren alueen maiden on kuitenkin arvioitu johtavan rengasteollisuuden maailmanlaajuista kasvua arvioiden mukaan.

Kiinan, Japanin, Intian ja Australian kaltaisten maiden odotetaan olevan avainasemassa renkaiden kaupan määrittelemisessä tulevina vuosina. Vuoteen 2021 mennessä autorenkaiden markkinoiden arvo on 298,15 miljardia dollaria maailmanlaajuisesti, ja vuonna 2019 lähes 50 prosenttia renkaista odotetaan myytävän pelkästään Aasian ja Tyynenmeren maissa. Itse asiassa Aasian ja Tyynenmeren päärooli renkaiden kaupassa tuli Tyrexpo Asian keskipisteeksi, joka esitteli rengasteollisuuden uusia linjauksia, laitteita ja haasteita.

Nopea tekniikan kehitys on edelleen yksi rengasteollisuuden keskeisistä haasteista. Tulevaisuus voi mahdollisesti hyvin riippua siitä, kuinka hyvin teollisuus mukautuu teknologisiin innovaatioihin. Rengasteollisuuden asiantuntijat uskovat, että autonominen ajaminen on tulevaisuudessa markkinoiden suurimpia vetureita, mikä vaatii jatkuvaa valppautta. (41)

## 5 Yhteenveto

### 5.1 Päätelmiä rengasteknologian nykyhetkestä ja tulevaisuudesta

Rengasteknologian nykyhetken, että tulevaisuuden suhteen voi päätellä, että rengasteknologia on jatkuvassa kehityksessä oleva tekniikan ala, jossa valmistajat kilpailevat keskenään omien innovaatioidensa avulla. Tämän selvityksen pohjalta voisi ajatella, että nykyhetkellä ja tulevaisuudessa tärkeimpiä ominaisuuksia renkaissa ovat ainakin alhainen vierintävastus, hyvät kitkaominaisuudet ja ekoystävällisyys. Erityisesti renkaiden materiaalitekniikka on hyvin keskeisessä roolissa renkaiden ominaisuuksien suhteen ja vaikuttaa siltä, että rengasvalmistajat kehittävät hyvin tarkasti omia materiaaliyhdisteitä, joilla saataisiin parannettua renkaiden ajo-ominaisuuksia ja ovat tarkkoja siitä, ettei kaikkia reseptitietoja tuoda julki.

Materiaalien ominaisuuksien lisäksi on otettava huomioon se mistä materiaalit saadaan ja kuinka paljon niitä on käytettävissä. Kuten selvityksen pohjalta nähdään, luonnonkumin käyttö oletettavasti vähenee joissain määrin, mutta silti monet synteettiset materiaalit vaativat luonnonvaroja. Materiaalien käytössä on otettava huomioon kiristyvä ympäristöpolitiikka ja erityisesti se kuinka ympäristöystävällisesti materiaalit voidaan jatkojalostaa.

On selkeästi oletettavaa, että rengasalalla on kysyntää paljon, sillä renkaat ovat kulu-  
tustavaraa, joita tarvitaan jatkuvasti uusia. Onkin mielenkiintoista nähdä tulevaisuudessa, kuinka valmistajat tasapainoilevat renkaiden kulutuskestävyyden suhteen tulevaisuudessa, sillä ominaisuuksien ja imagon kannalta on hienoa, jos renkaat kestävät pitkään, mutta tällöin ilmiselvästi kulutusjakso pidentyisi ja renkaita ostettaisiin vähemmän. Myös erilaiset säännökset ja vaatimukset asettavat haasteita rengasvalmistajille myös tulevaisuudessa.

Rengasvalmistajien on oltava tulevaisuuden suhteen valppaina, sillä autojen modernisoitumisesta on vielä olemassa hyvin erilaisia käsityksiä. On esimerkiksi olemassa todella erilaisia aikatauluarvioita, milloin autonomiset autot aidosti tulevat yleisesti käyttöön. Rengasvalmistajat siis oletettavasti joutuvat mukautumaan autonvalmistajien vaatimuksiin ja luonnollisesti teknologisesti edistyksellisimmät rengasvalmistajat kykenevät

ketterimmin reagoimaan kyseisiin vaatimuksiin. Rengasvalmistajien omat innovaatiot ja konseptit luovatkin vaikutelmaa maailmalle omasta kyvykkyydestään.

## 5.2 Pohdintaa selvityksen onnistumisesta

Tämän insinööriyön alkuperäisenä tarkoituksena oli luoda laaja selvitys henkilöautojen kesärenkaiden rengasteknologiasta nykyhetkellä ja tulevaisuudessa. Työn pääpaino oli renkaiden materiaalitekniikassa. Selvityksen toteutuminen onnistui hyvin ja alkuperäisiin tavoitteisiin päästiin. Tästä selvityksessä voi olla hyvää informaatiota esimerkiksi autoalan opiskelijoille, jotka haluavat oppia rengasteknologiasta. Rengasteknologia on hyvin mielenkiintoinen aihe selvitettäväksi ja aiheesta on paljon kerrottavaa, vaikka selvitystä tehdessä kävikin ilmi, että tarkkoja tietoja renkaiden materiaaleista on osittain haastavaa saada. Erityisesti reseptiteknisissä asioissa joutui tiedon hakuun käyttämään reilusti aikaa. Mainittakoon myös, että tämä insinööriyö esiteltiin vuoden 2019 insinööriyögaalassa.

Selvitystä tehdessä kävi lisäksi ilmi, että Suomessa ei rengasteknologiasta ole tehty kovin montaa selvitystä tai opinnäytetyötä, joka keskittyisi syvällisesti materiaalitekniikkaan. Tämän vuoksi tietoa täytyi lähteä etsimään ulkomaisista lähteistä. Lähteitä etsiessä tuli mielenkiintoisena seikkana ilmi, että Aasian maissa kuten esimerkiksi Kiinassa, Intiassa ja Japanissa on tutkittu viime aikoina rengasteknologiaa yllättävän paljon.

Rengasteknologiaan perehtyminen sopii hyvin henkilölle, joka on fysiikan ja materiaalitekniikan lisäksi kiinnostunut myös kemiasta. Renkaat nimittäin sisältävät niin monenlaisia kemiallisia aineita ja prosesseja. Rengasteknologia onkin oiva esimerkki siitä, että autoteknologia ei ole pelkästään fysiikkaa. Selvityksen tekemisessä oppi paljon elastomeerien käyttäytymisestä ja kuinka niiden ominaisuuksia voidaan testata. Oli myös erittäin mielenkiintoista saada käsitys siitä, mitä kaikkia osa-alueita rengasteknologiassa on nyt jo olemassa ja mitä tulevaisuus tuo tullessaan.

## Lähteet

- 1 Rader, Freddy. 2017. The history of tires. Verkkoaineisto. Tire Recappers News. <<https://www.tirerecappers.com/tire-recappers-news/the-history-of-tires/>>. 13.4.2017. Luettu 3.9.2019.
- 2 Pauwelussen, Joop P; Dalhuijsen, Wouter & Merts, Menno. 2007. Tyre dynamics, tyre as a vehicle component Part 1: Tyre handling performance. HAN University.
- 3 Haney, Paul. 2004. Rubber friction. Verkkoaineisto. Inside racing technology. <<http://insideracingtechnology.com/tirebkexerpt1.htm>>. 27.1.2004. Luettu 3.9.2019.
- 4 Reifen aus Gummi – ein kompliziertes Reibungsproblem. Verkkoaineisto. <Leifiphysik. <https://www.leifiphysik.de/mechanik/reibung-und-fortbewegung/ausblick/reifen-aus-gummi-ein-kompliziertes-reibungsproblem>>. Luettu 16.9.2019.
- 5 Steeven (nimimerkki). Is there any friction between wheel and road? Verkkoaineisto. Physics stack exchange. <<https://physics.stackexchange.com/questions/223283/is-there-any-friction-between-wheel-and-road/223300>>. Luettu 4.9.2019.
- 6 Walia, Oshit. 2018. What is friction circle? Verkkoaineisto. Quora. <<https://www.quora.com/What-is-friction-circle>>. 19.2.2018. Luettu 5.9.2019.
- 7 Anas Imam Khan, Mohammad. Combined slip tire models (brush tire and pacejka tire). Verkkoaineisto. Project skill lync. <<https://projects.skill-lync.com/projects/Combined-Slip-Brush-Tire-Model-15854>>. Luettu 16.9.2019.
- 8 Tyre Leader. Number of plies and load index. Verkkoaineisto. Tyre leader. <<https://www.tyreleader.co.uk/tyres-advice/number-tyre-plies>>. Luettu 10.9.2019.
- 9 T-Marts, Bob Jane. Run flat tyre guide. Verkkoaineisto. Bobjane. <<https://www.bobjane.com.au/blog/run-flat-tyre-guide>>. 22.8.2018. Luettu 10.9.2019.
- 10 Renkaiden tuotantoprosessi. Verkkoaineisto. Nokian renkaat. <<https://www.nokianrenkaat.fi/innovatiivisuus/rengastietoa/renkaan-tuotantoprosessi/>>. Luettu 10.9.2019.
- 11 Oikarinen, Pasi. Auton ajodynamiikka. Oppimateriaali. Dynamiikka ja sovellukset. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

- 12 J. R. Cho; H.W Lee; W.B Jeong; K. M. Jeong & K.W. Kim. 2012. Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution of 3-D periodic patterned tire. International Journal of Solids and Structures. International Journal of Solids and Structures. 14.9.2012.
- 13 Rolling resistance Vital to fuel economy. Verkkoaineisto. Rubber Asia. <<https://rubberasia.com/2017/02/28/rolling-resistance-vital-fuel-economy/>>. Luettu 21.9.2019.
- 14 Renkaiden ikä. Verkkoaineisto. Nokian renkaat. <<https://www.nokianrenkaat.fi/asiakaspalvelu/renkaiden-vaihto-ja-huolto/renkaiden-ika/>>. Luettu 4.10.2019.
- 15 What is aquaplaning? Verkkoaineisto. Uniroyal tyres. <<https://www.uniroyal-tyres.com/car/tyre-guide/driving-tips/what-is-aquaplaning>>. Luettu 21.9.2019
- 16 Cornering properties to tyres cornering force and slip angle. Verkkoaineisto. What When How. <<http://what-when-how.com/automobile/vehicle-steady-state-directional-stability-automobile/>>. Luettu 21.9.2019
- 17 Reimpell, Jörnsen. Stoll, Helmut & Betzler, Jürgen W. 2001. Rolling resistance, Automotive chassis (second edition). <<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/rolling-resistance>>. Luettu 21.9.2019.
- 18 Ligterin, Norberg E. Correction algorithms for WLTP chassis dynamometer and coast-down testing. Verkkoaineisto. Researchgate. <[https://www.researchgate.net/figure/The-heat-generation-and-heat-transfer-of-a-tyre-is-a-complex-process-with-many-variables\\_fig11\\_309721812](https://www.researchgate.net/figure/The-heat-generation-and-heat-transfer-of-a-tyre-is-a-complex-process-with-many-variables_fig11_309721812)>. Luettu 21.9.2019.
- 19 Valitse kesären gas oikein - tässä vinkit. 2018. Verkkoaineisto. Apu. <<https://www.apu.fi/artikkelit/valitse-kesarengas-oikein-tassa-vinkit>>. 12.4.2018. Luettu 4.10.2019.
- 20 Miller, Robert C. How tire is made. Verkkoaineisto. Madehow. <<http://www.madehow.com/Volume-1/Tire.html>>. Luettu 17.9.2019.
- 21 Gosh, Sarat. 2011. Investigation on role of fillers on viscoelastic properties of tire tread compounds. University of Baroda.
- 22 Starting point rubber compound properties. Verkkoaineisto. Nocil. <<http://www.nocil.com/Downloadfile/CCompoundingFormulations&UsefulInfo-Dec2010.pdf>>. Luettu 18.9.2019.
- 23 Zaeimoedin, Zeku Takwan & Clarke, Jane. 2017. Improving the Abrasion Resistance of "Green" Tyre Compounds. Loughborough University, Department of Materials.



- 24 Atashi, M. & Shiva, M. 2010. Formulation for Passenger Tread Tire Compound Based on Styrene Butadiene Rubber/cis-Butadiene Rubber/Natural Rubber Blend and Semi-Dispersible Silica/Carbon Black Filler System. Vol 22, No 10. Asian Journal of Chemistry.
- 25 Tyre cord - Technical textures. Verkkoaineisto. Scribd. <<https://www.scribd.com/presentation/174415596/Tyre-Cord-Srk>>. Luettu 2.10.2019.
- 26 Van der Steen, R. 2007. Tyre/road friction modeling. Eindhoven University of Technology Department of Mechanical Engineering Dynamics and Control group.
- 27 Mackenzie, Geiger. 2017. Introduction to Dynamic Mechanical Testing for Rubbers and Elastomers. Verkkoaineisto. Tainstruments. <[http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/Introduction-to-Dynamic-Mechanical-Analysis\\_Akron-Workshop.pdf](http://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/Introduction-to-Dynamic-Mechanical-Analysis_Akron-Workshop.pdf)>. 6.9.2017. Luettu 8.10.2019.
- 28 Characterization of Car Tire Rubber. Verkkoaineisto. PerkinElmer. <[https://www.perkinelmer.com/labsolutions/resources/docs/APP\\_007771B\\_15\\_Characterization\\_of\\_Car\\_Tire\\_Rubber.pdf](https://www.perkinelmer.com/labsolutions/resources/docs/APP_007771B_15_Characterization_of_Car_Tire_Rubber.pdf)>. Luettu 8.10.2019.
- 29 Rubber Physics. 2007. Alexander Dubeck University of Trencin. Virtual Education in Rubber Technology (VERT). Program is supported by EU within the Leonardo da Vinci program.
- 30 The tyre grip. 2001. Société de Technologie Michelin. Article / Japa.
- 31 Muraoka, K. 2002. Viscoelastic properties of rubber compounds for tyre applications. International Polymer Science and Technology, 28, No. 8, 2001, reference NG 02/06/242; transl. serial no. 14822.
- 32 Harrison, Tom. 2019. Airless tyres will be a thing in 2024. Verkkoaineisto. BBC Top Gear News. <<https://www.topgear.com/car-news/future-tech/airless-tyres-will-be-thing-2024>>. 6.6.2019. Luettu 23.10.2019.
- 33 Goregam, John. 2014. Why don't cars use these indestructible airless tires? Verkkoaineisto. BestRide. <<http://bestride.com/news/technology/why-dont-cars-use-these-indestructible-airless-tires-video>>. 17.11.2014. Luettu 23.10.2019.
- 34 Continental presents two new tyre technology concepts for greater safety and comfort. 2018. Verkkoaineisto. Continental. <<https://www.continental-oman.com/car/media-services/newsroom/20180329-two-new-tire-technology-concepts>>. 9.4.2018. Luettu 26.10.2019.
- 35 Niskanen, Arto. 2017. Sensing the tyre-road contact by intelligent tyre. Espoo: Aalto University.

- 36 Cariou, Laurent; Cosson, Mathis; Glorennec, Hugo & Moulin, Alexandre. 2017. Goodyear Unveils the Eagle 360 Urban, a Concept Tire Powered by Artificial Intelligence. Verkkoaineisto. News Goodyear EU. <<https://news.goodyear.eu/goodyear-unveils-the-eagle-360-urban-a-concept-tire-powered-by-artificial-intelligence/>>. 7.3.2017. Luettu 26.10.2019.
- 37 Michelin® Selfseal® Technology fixes flats before they happen. Verkkoaineisto. Michelinman. <<https://www.michelinman.com/michelin-selfseal-technology.html>>. Luettu 27.10.2019
- 38 T-marts, Bob Jane. 2018. Fuel Efficient, Eco-Friendly Tyres Overview. Verkkoaineisto. <<https://www.bobjane.com.au/blog/eco-friendly-tyres-overview>>. 31.8.2018. Luettu 28.10.2019.
- 39 Komission kertomus Euroopan parlamentille ja neuvostolle. 2017. Euroopan komissio COM (2017).
- 40 Autonrenkaasta hioutuu elinkaaren aikana toista kiloa pölynä ilmaan. 2018. Verkkoaineisto. Keski-suomalainen. <<https://www.ksml.fi/kotimaa/Autonrenkaasta-hioutuu-elinkaaren-aikana-toista-kiloa-p%C3%B6lyn%C3%A4-ilmaan/1183704>>. 16.4.2018. Luettu 29.10.2019.
- 41 Lee, Zann. 2018. Current Trends and Challenges in the Tyre Industry. Verkkoaineisto. Tyrexpo series. <<http://www.tyrexposeries.com/tyre-talks/current-trends-and-challenges-in-the-tyre-industry/>>. 20.9.2018. Luettu 29.10.2019.

