



# Renkaan pinnan Cut & Chip - kulumista analysoivan ICCA- laitteen menetelmäkehitys

Johanna Niemi

OPINNÄYTETYÖ  
Maaliskuu 2025

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma

NIEMI, JOHANNA

Renkaan pinnan Cut & Chip -kulumista analysoivan ICCA-laitteen menetelmäkehitys

Opinnäytetyö 68 sivua, joista liitteitä 11 sivua  
Maaliskuu 2025

---

Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Nokian Renkaat Oyj:n kanssa. Työn toiminnallinen osuus suoritettiin yhtiön tuotekehityslaboratoriossa Nokialla. Tavoitteena oli luoda uudelle ICCA-laitteelle (Instrumented Cut & Chip Analyzer) menetelmä renkaan pinnan Cut & Chip -kulumisen (CC) analysointia varten. Laitteen käyttöönoton myötä kenttätestauksen rinnalle saadaan nopea ja edullinen tapa CC-kulumisen tutkimiseen. CC-kulumisella tarkoitetaan kulumisprosessia, jossa epäta-saisilla ajoalustoilla käytettävien renkaiden pintaan syntyy ensin viiltoja, joiden kasvun myötä pinnasta irtoaa lopulta paloja.

Työssä määritettiin ICCA:n käyttöä varten standardiparametrit kahdelle renkaan pintasekoitukselle. Standardiparametreilla testataan kyseisiä sekoituksia tuotekehitystöissä. Pintasekoituksista valmistettiin näytteitä, joita testattiin ICCA:lla useilla eri parametriyhdistelmillä. Testeissä käytettiin rasituksen aiheuttavan iskurin voiman ja kontaktiajan eri yhdistelmiä. Testeistä saatujen tulosten analysoinnin ja näytteiden visuaalisen tarkastelun perusteella määritettiin sopivat standardiparametrit menetelmiksi ICCA:lle.

Eri parametriyhdistelmillä tuli esiin selkeitä tuloseroja ja näytteissä visuaalisesti havaittavia kulumiseroja. Standardiparametreiksi valittiin parametriyhdistelmät, joilla näytteisiin saatiin selkeä kuluminen ja joilla ICCA:n tulos, P-arvo (propensity), oli tuotekehitystöiden analysoinnin kannalta sopivin. Näin valituilla standardiparametreilla testaamalla mahdollistetaan CC-kulumistason muutosten havaitseminen sekoitusten kehitystöiden tuloksissa ja siten saadaan varmuutta parhaan sekoitusversion valintaan. Huomioonotettavana asiana testeissä ilmeni hajontaa rinnakkaisten näytteiden tuloksissa.

Standardiparametreilla testaamalla saadaan pintasekoitusten kehitystöissä eri kehitysversiot CC-kulumisen osalta paremmuusjärjestykseen. Jatkossa kaikille epäta-saisilla alustoilla käytettävien renkaiden pintasekoituksille voidaan tehdä samanlainen testiparametrien määrittäminen. Tulevaisuudessa on myös tärkeää selvittää ICCA-testien ja kenttätestien välinen korrelaatio. Tätä opinnäytetyötä varten tehdyt testit tuottivat paljon tietoa ja mittaustuloksia ICCA:lla tapahtuvasta CC-kulumisesta eri voimilla ja kontaktiajoilla, ja ne toimivat hyvänä tietopohjana tuleviin CC-kulumisen tutkimuksiin.

---

Asiasanat: ICCA, Cut and Chip -ilmiö, kulumiskestävyys, tuotekehitys

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering

NIEMI, JOHANNA

Method Development of the ICCA Instrument for analysing Cut and Chip wear of tire tread

Bachelor's thesis 68 pages, appendices 11 pages  
March 2025

---

This thesis was commissioned by Nokian Tyres plc. The purpose was to create a method for using the new Instrumented Cut and Chip Analyser (ICCA). The ICCA is used for analysing Cut and Chip wear (CC) of tire tread compounds. CC wear occurs when tires are in contact with rough and uneven surfaces. During the CC wear process, small cuts appear on tire tread due to large variations of dynamic forces and eventually pieces come off the tire tread.

The objective was to test two tire tread compounds by ICCA with wide range of parameter variations. After testing, the results were reviewed and samples were visually inspected. Based on these observations, standard parameters for these tread compounds could be determined.

The objective of this thesis was reached successfully. The standard parameters were determined for both compounds. The findings indicate that the development versions of tread compounds can be ranked by using ICCA. However, the variation between parallel samples must be taken into account. In the future, the same parameter determination will be made for other tread compounds as well. In addition, further research is required to find a correlation between field tests and laboratory testing. A large amount of data on CC behaviour at different forces has been gathered during testing, which will be useful in future studies of CC behaviour.

---

Key words: ICCA, Cut and Chip, product development

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	KUMI MATERIAALINA.....	7
	2.1 Kumin raaka-aineet.....	7
	2.2 Resepti.....	9
	2.3 Vulkanoituminen.....	10
	2.4 Kumin ominaisuudet.....	12
	2.4.1 Elastisuus .....	13
	2.4.2 Viskoosisuus .....	14
3	RENKAAN RAKENNE .....	15
	3.1 Runko.....	15
	3.2 Teräsvyöpaketti ja jalka-alue.....	16
4	RENKAAN PINNAN KULUMINEN .....	18
	4.1 Kulumisprosessi ja siihen vaikuttavat tekijät .....	18
	4.2 Cut & Chip -kuluminen .....	20
5	KULUMISKESTÄVYYDEN TUTKIMINEN.....	24
	5.1 Rengastestaus .....	24
	5.2 Laboratoriotestaus .....	25
	5.3 ICCA-laite.....	27
6	CUT & CHIP -TEORIA.....	31
	6.1 P-parametri .....	31
	6.2 Polymeerin ja täyteainemäärän vaikutus Cut & Chip -alittiuteen...	32
7	OPINNÄYTETYÖN TOTEUTUS .....	37
	7.1 Tavoite ja tarkoitus .....	37
	7.2 Toteutussuunnitelman kuvaus .....	37
	7.3 Toteutus .....	38
8	ICCA-TESTITULOKSET .....	42
	8.1 Sekoitus 1 .....	42
	8.2 Sekoitus 2 .....	45
	8.3 Standardiparametrien valinta .....	50
	8.4 Menetelmän toistettavuus .....	50

9 NOKIAN RENKAIDEN CC-TESTAUSMENETELMÄ .....	52
10 POHDINTA .....	53
LÄHTEET .....	56
LIITTEET .....	58
Liite 1. Tulokset sekoituksesta 1 .....	58
Liite 2. Tulokset sekoituksesta 2 .....	64

## 1 JOHDANTO

Maastoisilla ajoalustoilla renkailta vaaditaan erityistä suorituskykyä, sillä ne altistuvat ankarille olosuhteille, jotka voivat lyhentää renkaan käyttöikää (Stocek, Heinrich, Kipscholl & Kratina 2021). Renkaan kuluminen on monivaiheinen prosessi, johon vaikuttavat useat tekijät kuten ajotapa, tien pinnan kunto ja renkaan pinnan ominaisuudet. Erityisesti epätasaisilla alustoilla renkaan kulutuspintaan kohdistuu jatkuvaa dynaamista kuormitusta, joka aiheuttaa pinnan epätasaista Cut & Chip -tyylistä kulumista (CC).

CC-ilmiössä renkaan pinnassa tapahtuu moninaisten voimien aiheuttamia halkeamisia ja halkeamien kasvua, mikä johtaa lopuksi palojen irtoamiseen renkaasta (Stocek ym. 2021). CC-kulumista tapahtuu mm. maa- ja metsätalousajoneuvojen renkailla sekä OTR (off the road) -renkailla.

Rengastestaus on tärkeä osa renkaiden tuotekehitystä. Renkaita testataan, jotta lopputuloksena saadaan turvallisuudeltaan, suorituskyvyltään ja ajotuntumaltaan parhaat mahdolliset renkaat. Renkaiden kulutuskestävyyttä testataan ajamalla tuhansia kilometrejä kenttätesteissä. (Nokian Renkaat Oyj n.d.a.) Laboratoriotesteillä kulutuskestävyyttä voidaan analysoida suoraan pintasekoituksesta valmistetun näytteen testaamisella, mikä nopeuttaa tuotekehitystyötä ja tuo säästöä materiaali- ja testauskuluihin.

Tämä opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Nokian Renkaat Oyj:n kanssa. Työn tavoitteena on luoda tuotekehitysosaston uudelle ICCA-laitteelle (Instrumented Cut and Chip Analyzer) menetelmä CC-alttiuden määrittämistä varten. Työn tarkoituksena on määrittää kahdelle eri pintasekoitukselle standardiparametrit, joilla kyseisiä kumisekoituksia testataan niiden kehitystyössä. Standardiparametrien määrittämistä varten ICCA:lla suoritetaan testejä laajoilla parametrivariaatioilla, joiden tulosten arvioinnin ja näytteiden visuaalisen tarkastelun pohjalta standardiparametrit voidaan määrittää.

## 2 KUMI MATERIAALINA

### 2.1 Kumin raaka-aineet

Kumi ei ole vain yhtä ainetta, vaan se on useasta eri aineesta sekoitettu seos. Tärkein raaka-aine kumiteollisuudessa on elastomeeri eli elastomeerinen polymeeri. Erilaisia elastomeereja on olemassa kymmenittäin, ja niistä luonnonkumi on eniten käytetty. Elastomeeri määrää kumisekoituksen ja siitä tehdyn tuotteen perusominaisuudet, kuten lujuuden, kovuuden, elastisuuden sekä lämmön- ja kemiallisen keston. Elastomeeri sitoo muut aineet sekoitukseen. Kaikilla elastomeereilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Kumisekoitukseen voidaan sisällyttää useita eri elastomeereja, jotta halutut ominaisuudet saavutetaan. (Laurila 2007.)

Kumisekoituksen täyteaineena käytetään eniten nokea. Myös piioksidi eli silika on paljon käytetty täyteaine. Täyteaineiden tehtävä on lujittaa kumisekoitusta. Nimensä mukaisesti ne myös tuovat lisävolyymia eli täytettä sekoitukseen ja laskevat siten valmistuskuluja. Noki valmistetaan polttamalla öljyä kaasun avulla erityisissä tarkoin säädellyissä olosuhteissa. Valmistusprosessissa voidaan säädellä syntyvien nokihiukkasten kokoa. (Laurila 2007.) Taulukossa 1 on esitetty noen pinta-alan, struktuurin ja määrän vaikutus eräisiin kumin ominaisuuksiin. Esimerkiksi kumin viskositeettia saadaan kasvatettua valitsemalla pinta-alaltaan tai struktuuriltaan suurempi noki. Toisaalta suuremman struktuurin omaava noki vaikuttaa vetolujuuteen alentavasti.

TAULUKKO 1. Noen ominaisuuksien vaikutus kumin ominaisuuksiin (Laurila 2007, muokattu).

	Noen pinta-ala kasvaa	Noen struktuuri kasvaa	Noen määrä lisääntyy
<b>Kumin viskositeetti</b>	nousee	nousee	nousee
<b>Kumin kovuus</b>	kasvaa hieman	kasvaa	kasvaa
<b>Kumin vetolujuus</b>	kasvaa	pienenee	ensin kasvaa, sitten pienenee
<b>Kumin kulutus-kesto</b>	paranee	paranee hieman	aluksi paranee, sitten huononee

ASTM on luokitellut noet eri tyyppeihin, joilla kullakin on omat ominaisuutensa. Luokituksen mukaan puhutaan N110-N990-noesta. Rengasteollisuuden päänoet kuuluvat N300-sarjaan. (Laurila 2007.)

Silika täyteaineena eroaa noesta mm. siten, että se nostaa sekoituksen viskositeettia enemmän kuin noki, eikä se sekoitu yhtä hyvin. Vaalean täyteaineen ja elastomeerin vuorovaikutusta halutaan usein parantaa, jotta kumisekoituksen fyysisiä ominaisuuksia saadaan paremmiksi. Tämä saadaan aikaan käyttämällä kaksifunktionaalisia sideaineita, esimerkiksi erilaisia silaaneita, joiden toinen pää reagoi kemiallisesti täyteaineen kanssa ja toinen pää elastomeerin kanssa. (Laurila 2007.)

Kumisekoituksen pehmittimiä käytetään vähentämään kovuutta ja parantamaan työstettävyyttä. Pehmittiminä käytetään erilaisia öljyjä sekä synteettisiä pehmittimiä. Ennen paljon käytettyjä aromaattisia öljyjä korvataan kasviöljyillä, esimerkiksi rypsiöljyllä. Polaariset elastomeerit, esimerkiksi nitrilikumi (NBR), on parempi pehmittää synteettisillä pehmittimillä, sillä öljy ei sekoitu kunnolla nitrilikumin kanssa. Esimerkki tällaisesta pehmittimestä on DBP eli dibutyyliftalaatti. (Laurila 2007.)

Suoja-aineet ryhmitellään sen mukaan, miltä ilmiöltä ne suojaavat. Antioksidantit estävät tai hidastavat hapen vaikutusta renkaassa. Antiotsonantit puolestaan hi-

dastavat otsonin vaikutusta. Suojavahaa käytetään suojaamaan kumia mekaanisesti sekä otsonilta että valolta. Kun vahaa sekoitetaan kumiin, se kulkeutuu kumin pinnalle muodostaen siihen suojakalvon, joka puolestaan estää hapen vaikutuksen. Suoja-aineita käyttämällä voidaan vaikuttaa kumituotteen vanhenemisilmiöihin ja käyttöikään. Vanhenemisilmiöitä ovat esimerkiksi kovettuminen, elastisuuden tai lujuuden menetys, halkeilu sekä pinnan harmaantuminen. (Laurila 2007.)

Vulkanointiaineista tunnetuin on rikki. Rikin reaktio on kuitenkin hyvin hidas, joten reaktiota nopeuttamaan käytetään myös kiihdyttäjiä. Kiihdyttäjät puolestaan tarvitsevat toimiakseen aktivaattoreita. Yhdessä nämä aineet muodostavat vulkanointisysteemin. Joskus vulkanoinnissa tarvitaan myös hidastajia, eli aineita, joilla vulkanoinnin alkua voidaan viivyttää vaikuttamatta vulkanointinopeuteen. Vulkanoinnissa plastinen muovailtava kumisekoitus muuttuu elastiseksi, kimmoiseksi ja muotonsa säilyttäväksi tuotteeksi. (Laurila 2007.)

Muita kumisekoituksessa käytettäviä raaka-aineita ovat esimerkiksi pilkkoutumista edistävät peptisaattorit ja sekoittumista parantavat dispergointiaineet. Kumisekoituksissa voidaan käyttää myös hartseja, paisutusaineita, värejä, palones-toaineita ja tartunta-aineita. (Laurila 2007.)

## **2.2 Resepti**

Kumisekoitukset suunnitellaan käyttökohteen mukaan. Valmistusreseptissä raaka-aineet ja niiden määrät määritellään siten, että valmiilla kumisekoituksella on juuri halutut ominaisuudet. Kumiteollisuudessa resepti kirjoitetaan phr-yksiköinä. Phr on lyhenne sanoista parts / hundred rubber. Se tarkoittaa, että reseptissä elastomeerin tai useamman elastomeerin kokonaisuus on aina 100 osaa. Muut aineet merkitään sataa elastomeeriosaa kohden, kuten taulukon 2 esimerkkireseptissä esitetään. Aineiden prosenttiosuudet on merkitty viereen havainnollistamaan eroa. Phr-esitystapa on selkeä ja kertoo myös kansainvälisesti, millainen resepti todellisuudessa on. Tämä on tärkeää esimerkiksi silloin, kun tutkimustuloksia jaetaan eri maissa. (Laurila 2007.)

TAULUKKO 2. Esimerkkiresepti, jossa raaka-aineet phr:nä ja prosentteina (Laurila 2007, muokattu).

<b>Raaka-aine</b>	<b>phr</b>	<b>%</b>
<b>Elastomeeri 1</b>	75	31,8
<b>Elastomeeri 2</b>	25	10,6
<b>Täyteaine 1</b>	60	25,4
<b>Täyteaine 2</b>	45	19,1
<b>Pehmitin</b>	15	6,4
<b>Suoja-aine 1</b>	1,5	0,6
<b>Suoja-aine 2</b>	2,5	1,1
<b>Vulkanointiaine 1</b>	5,0	2,1
<b>Vulkanointiaine 2</b>	2,0	0,8
<b>Vulkanointiaine 3</b>	1,5	0,6
<b>Vulkanointiaine 4</b>	3,5	1,5
<b>Yhteensä</b>	<b>236</b>	<b>100</b>

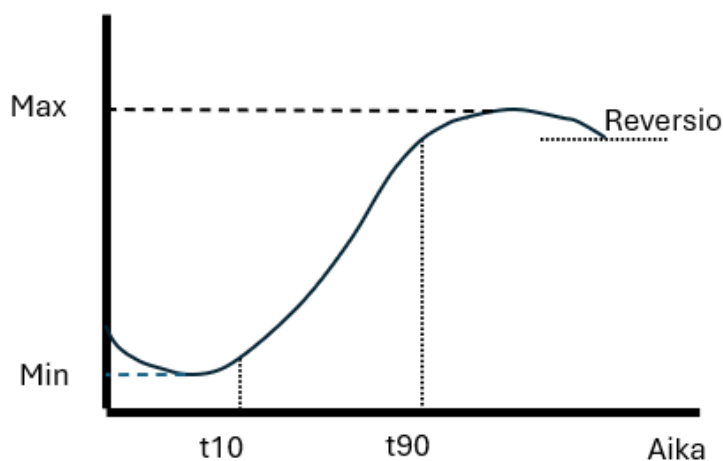
### 2.3 Vulkanoituminen

Vulkanoinnissa kumisekoitus muutetaan plastisesta ja muokattavasta massasta elastiseksi materiaaliksi muodostamalla siihen kolmiulotteinen verkko, jossa elastomeeriketjut kemiallisesti sidotaan toisiinsa. Rikkivulkanoinnissa rikkirengas siis aukeaa, ja elastomeeriketjujen väliin syntyy erimittaisia rikkisilloja. (Laurila 2007.)

Kumituotteen mekaaninen lujuus ja sen dynaamiset ominaisuudet johtuvat elastomeerien ominaisuuksien lisäksi myös verkkorakenteen laadusta. Esimerkiksi vulkanoidun kumin kovuus ja moduuli kasvavat verkkoutumistiheyden kasvaessa. Repimislujuus, väsymisenkesto, sitkeys ja vetolujuus ensin kasvavat verkkoutumistiheyden kasvaessa, mutta alkavat jälleen laskea saavutettuaan maksimiarvonsa, vaikka verkkoutumistiheys edelleen kasvaakin. (Laurila 2007.)

Vulkanoitumisprosessissa kumituote saa lopullisen muotonsa. On tärkeää, että tuote on vulkanoitunut juuri oikein ja oikea-aikaisesti. Esimerkiksi renkaan sisäl-

tämällä useilla eri kumisekoituksilla voi olla erilaiset vulkanoitumisajat ja -nopeudet. Reologia tutkii aineen muodonmuutosta ja virtaamista. Vulkanoitumisreaktiota mitataan reometrillä, jossa vulkanoimaton näyte laitetaan kuumaan kammioon, joka suljetaan. Kammion alapuoli tekee pientä edestakaista rotaatioliikettä, jota näyte vastustaa. Reometri mittaa tätä vastustavaa voimaa, ja tuloksena saadaan reometrin vulkanoitumiskäyrä (kuvio 1). Reometrin kammiossa näyte alkaa lämmön vaikutuksesta reagoida. Kuvaajassa tämä näkyy ensin vastustavan voiman vähenemisenä. Tässä kohtaa viskositeetti laskee lämmön vaikutuksesta. Hetken kuluttua vastustava voima alkaa kasvaa, koska ristisilloittumisreaktiot ovat käynnissä. Voima jatkaa kasvuaan, kunnes vulkanoituminen on päättynyt. (Laurila 2007.)



KUVIO 1. Reometrikäyrä (Laurila 2007, muokattu).

Reometrikäyrältä saadaan paljon tietoa kumisekoituksesta ja sen käyttäytymisestä. Minimiviskositeetin (min) perusteella voidaan päätellä sekoituksen käsiteltävyydestä virtauksessa. Käyrän nousun jyrkkyys kertoo vulkanointinopeuden. t90-arvo on aika, jolloin näytteen vulkanoitumisaste on 90 %. Tätä kutsutaan optimivulkanoinniksi. Maksimi-arvo (max) on suurin voima, jolla vulkanoitu kumi vastustaa reometrin liikettä. Se kuvaa jollain tasolla näytteen mekaanisia ominaisuuksia. (Laurila 2007.)

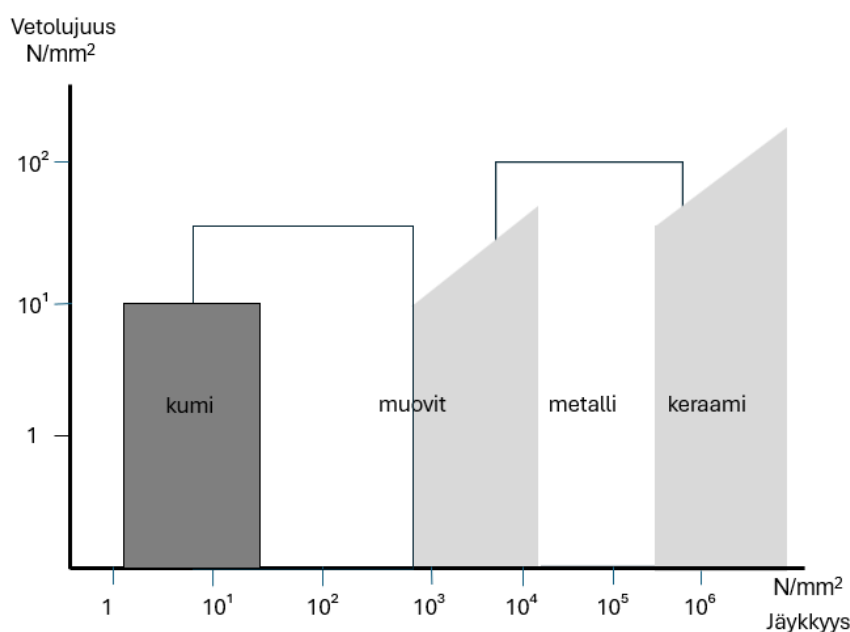
Edellä kuvatun reometrimittauksen tapaan vulkanoinnin vaiheet tapahtuvat myös rengasaihion ja esimerkiksi laboratorionäytteen vulkanoinnissa. Ennen vulkanoi-

tumisen alkamista kumin on virrattava muotissa, jotta koko muotti täyttyy. Muotissa on myös oltava riittävästi kumia, noin 5–10 %:n ylitäyttö. Muoteissa on urat ylimääräisen kumin poisvirtaamista varten. Vulkanointi on kemiallinen reaktio, jona lämpötila vaikuttaa sen nopeuteen. Lämpötilaa nostamalla saadaan vulkanointiaikaa lyhennettyä. (Laurila 2007.)

## 2.4 Kumin ominaisuudet

Kumi on materiaalina hyvin ainutlaatuinen. Sen ominaisuuksia ovat matala jäykkyys, hyvä kulumisen ja korroosion kesto, suuri kitka, eikä se puristu kokoon juuri lainkaan. Näiden ominaisuuksien ansiosta kumituotteisiin saadaan joustoa, vaimentavuutta ja suojaa. (Laurila 2007.)

Kumin ainutlaatuisuus tulee selvästi ilmi, kun sijoitetaan eri materiaaleja koordinaatistoon, jossa x-akseli kuvaa jäykkyyttä ja y-akseli kuvaa vetolujuutta (kuvio 2). Tässä vertailussa kumi erottuu selvästi, sillä sen jäykkyys on vain noin 10 N/mm<sup>2</sup> kun teräksen jäykkyys on huomattavasti suurempi, noin 200 000 N/mm<sup>2</sup>. Erilaisten muovien jäykkyydet ovat 100–50 000 N/mm<sup>2</sup>. Kumin vetolujuus on puolestaan noin 20 N/mm<sup>2</sup>, kun taas teräksillä vetolujuus on yli 400 N/mm<sup>2</sup>. Voidaan siis sanoa, että kumi on luja materiaali, mutta samalla elastisempi kuin mikään muu materiaali. (Laurila 2007.)



KUVIO 2. Kumi on luja ja elastinen materiaali (Laurila 2007, muokattu).

### 2.4.1 Elastisuus

Elastisuudella tarkoitetaan vulkanoidun kumin ominaisuutta palautua takaisin alkuperäisiin mittoihin jännityksen aiheuttavan voiman vaikutuksen jälkeen. Kumia voidaan venyttää nopeasti satoja prosentteja, ja se palautuu silti takaisin alkuperäiseen muotoonsa. Elastisuuden katsotaan johtuvan tietyistä elastomeerien piirteistä. (Laurila 2007.)

Kumimaisuudelle on ominaista, että molekyyliketjut ovat hyvin pitkiä, useita kymmeniä tuhansia yksiköitä. Ne on paikoitellen sidottu toisiinsa, mutta sidoskohtien välillä ne voivat liikkua toisiinsa nähden. Molekyylien liike on riippuvaista lämpötilasta. Lämpötilan laskiessa molekyylien liike hidastuu, ja täten elastisuus pienee. (Laurila 2007.)

Lisäksi kumimaisia ominaisuuksia lisää molekyylien epäsymmetrisyys. Polymeerien ollessa säännöllisiä suorja ja symmetrisiä pitkiä hiiliketjuja ketjut voivat pakkautua tiiviisti yhteen ja ikään kuin lukkiutua toisiinsa. Tällöin polymeeri kiteytyy. Epäsymmetrisellä polymeerillä on pääketjussa sivuryhmiä. Sivuryhmit vaativat ympärilleen paljon tilaa eivätkä ketjut voi pakkautua tiiviisti yhteen. Myös ketjujen väliin jää paljon tilaa, jolloin ne pääsevät liikkumaan toistensa ohitse. (Laurila 2007.)

Kumimolekyylit ovat rungoltaan pitkiä hiiliketjuja. Hiiliatomista lähtee neljä sidosta  $120^\circ$ :een kulmassa. Tällainen yksinkertainen hiili-hiilisidos voi kiertyä vapaasti, eli se sallii ketjun vääntyilyn jokaisen yksinkertaisen sidoksen kohdalta. Kun kumia venytetään, sidosten kiertymiset sallivat hiiliketjun tilan muutoksen. Tällöin entropia eli polymeeriketjun epäjärjestys vähenee, ja tila järjestyy. Entropian väheneminen aiheuttaa voimia, jotka pyrkivät palauttamaan ketjun alkuperäisen olotilan. Tämän vuoksi kumi hakeutuu tilaan, jossa se tilastollisesti todennäköisimmin on. Materiaalin polymeeriketjujen poikkisidosten määrä vaikuttavat venymän suuruuteen. Mitä enemmän poikkisidoksia on, sitä vähemmän on vapaita ketjuja, jotka voivat järjestäytyä, ja sitä pienempi kumin venymä on. (Laurila 2007.)

## 2.4.2 Viskoosisuus

Vulkanoimattoman kumin tärkeä ominaisuus on viskoosisuus. Kumi on tavallaan neste, joka vastustaa liikettä sitä enemmän, mitä suurempi on liikkeen nopeus. Tämän vastustavan voiman kumoamiseksi tehtävä syklinen työ (esimerkiksi tärinä) muuttuu lämmöksi ja voi äärimillään johtaa kumin hajoamiseen. Viskooisista kumin osaa voidaan verrata reiälliseen mäntään, joka on nesteellä täytetyssä sylinterissä. Kun mäntää vedetään, se liikkuu, ja neste vastustaa liikettä. Kun veto lopetetaan, mäntä jää paikalleen. On tapahtunut muodonmuutos. Elastomeerien viskoosisessa muodonmuutoksessa molekyylit liukuvat toistensa ohi kuten nesteen molekyylit ja järjestäytyvät uudelleen. (Laurila 2007.)

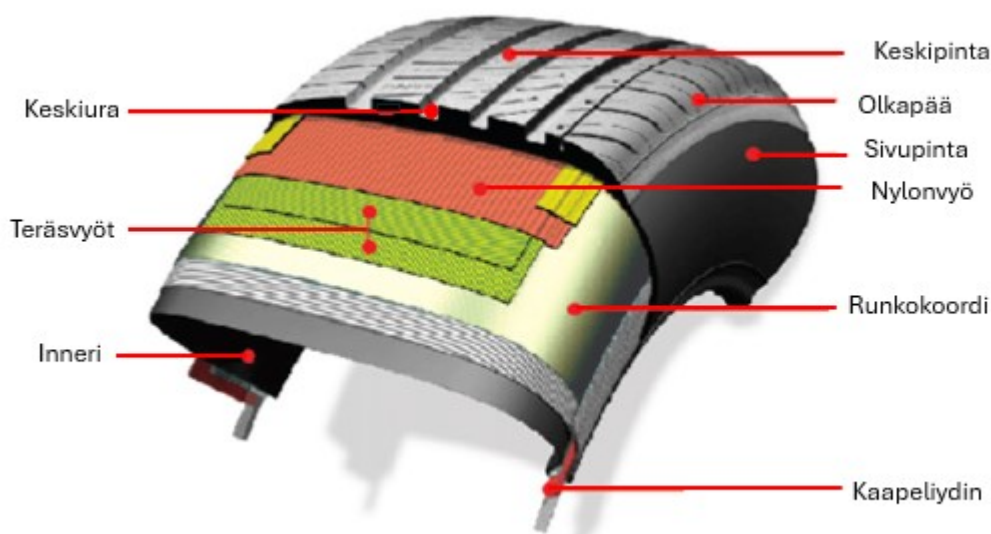
Viskositeetti kuvaa sitä, kuinka hyvin kumisekoitusta voidaan käsitellä erilaisissa valmistusprosesseissa. Jos kumisekoituksen viskositeetti on liian alhainen, se aiheuttaa ongelmia esimerkiksi aihoiden muodon pysyvyydessä. Liian korkean viskositeetin omaava kumisekoitus puolestaan ei virtaa muoteissa, tai tule hyvin ulos esimerkiksi ekstruudereiden suulakkeista. Se on myös jäykkyytensä vuoksi hankalampi käsitellä. (Laurila 2007.)

### 3 RENKAAN RAKENNE

#### 3.1 Runko

Rengas koostuu useista eri komponenteista (kuva 1). Renkaan rungon muodostavat inneri, runkokoordi ja sivupinta. Sisin kerros renkaassa on ilmatiivis inneri, joka pitää renkaan ilmanpaineen halutulla tasolla. Se korvaa aiemmin renkaissa käytetyt sisärenkaat. Inneri valmistetaan butyylikumista sen kaasutiiviytensä vuoksi. (Continental-tires n.d.) Seuraavana kerroksena on runkokoordi. Se koostuu tekstiilikoordista, joka päällystetään kalanteroidulla kumikerroksella. Tekstiilin materiaali on nylonia, polyesteriä tai rayonia. Runkokoordi kietoutuu kaapelin ympärille renkaan molemmilla puolilla ja antaa renkaalle lujuutta sekä kyvyn taipua menettämättä muotoaan. (Goodyear n.d.) Nykyään autonrenkaat ovat rakenteeltaan vyörenkaita (radial) joissa runkokoordin langat kulkevat säteittäin, vanteeeseen nähden kohtisuorassa. Aiemmin enemmän käytetyssä ristikudosrenkaassa langat kulkevat vinottain renkaan yli. Vyörakenteen ansiosta rengas myötäilee paremmin tien epätasaisuuksia, ja tuottaa vähemmän kitkaa. Tämän vuoksi rengas kestää selvästi pidempään. (Renkaat vaihtoon 2002.)

Sivupinta (sidewall) on renkaan sivuilla oleva kalanteroitu kumikerros, joka yhtyy kulutuspinnaan renkaan olkapääalueella. Sivupinta suojaa runkoa ulkopuoliselta mekaaniselta vahingolta ja ympäristön olosuhteilta. (Goodyear n.d.)



KUVA 1. Renkaan rakenne (Lee, Jeong, Kim & Kim 2018, muokattu).

### 3.2 Teräsvyöpaketti ja jalka-alue

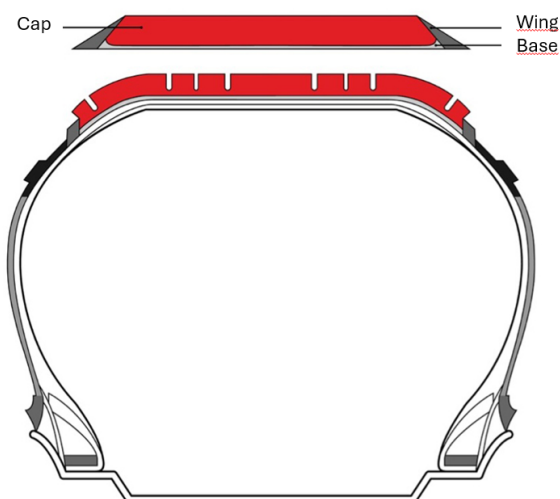
Renkaan teräsvyöpakettiin kuuluvat nimensä mukaisesti teräsvyöt ja kulutuspinta (kuva 1). Teräsvyöt ovat kumitettua teräslankaa, ja niitä voi olla yhdessä tai useammassa kerroksessa. Vyökerrokset asetetaan päällekkäin rengastyypin mukaan määräytyvässä kulmassa. Teräsvöiden tehtävä on antaa renkaalle jäykkyyttä, joka auttaa muodon säilymisessä, vähentää vierinvastusta ja suojaa alempia kerroksia esimerkiksi terävän kiven tai naulan aiheuttamilta pistovaurioilta. (Continental-tires n.d., Renkaat vaihtoon 2002.)

Keskipinnan ja teräsvöiden välissä on kerros kumitettua nylonia, joka auttaa ylläpitämään renkaan muotoa suurilla ajonopeuksilla. Renkaan uloimpana kerroksena keskipinta on koko ajoneuvon ainoa tienpintaan kosketuksessa oleva osa. Pintakerros antaa renkaalle sen pidon kiihdytyksissä, jarrutuksissa ja kaarteissa. Se vaikuttaa myös käsiteltävyyteen, vierinvastukseen ja renkaan kulumiskestävyyteen. Kulutuspinnassa kiertävä urakuviointi on suunniteltu aina renkaan käyttötarkoituksen mukaisesti (kuva 2). Urien tehtävä on ylläpitää renkaiden pitoa tiellä, esimerkiksi estämällä vesiliirtoa siirtämällä vettä pois renkaan ja tien välistä. (Continental-tires n.d.)



KUVA 2. Renkaan pinnan kuviointi kesärenkaassa (vas.) ja talvirenkaassa (oik.) (Goodyear n.d., muokattu).

Renkaan keskipinta koostuu eri osista. Kuvan 3 mukaisesti keskipinnan alimpana kerroksena on ohut kerros pohjasekoitusta (base), joka kiinnittyy kumitettuun nylonkerrokseen. Seuraavana kerroksena on varsinainen keskipinta (cap), joka koostuu yhdestä tai kahdesta eri pintasekoituksesta (cap 1 ja cap 2). Keskipinnan ulkoreunoilla on siivet (wings) jotka yhdistävät keskipinnan renkaan sivupintaan. (CE Wheels n.d.)



KUVA 3. Keskipinnan osat (CE Wheels n.d., muokattu).

Rengas kiinnittyy vanteeseen kaapeliytimen avulla. Kaapeliydin koostuu useista kumitetuista kaapelilankakerroksista. Kolmiokiila kiinnittyy kaapeliyttimeen, ja sen tehtävä on tuoda vakautta ja tasapainoa ajoon. (Continental-tires n.d.)

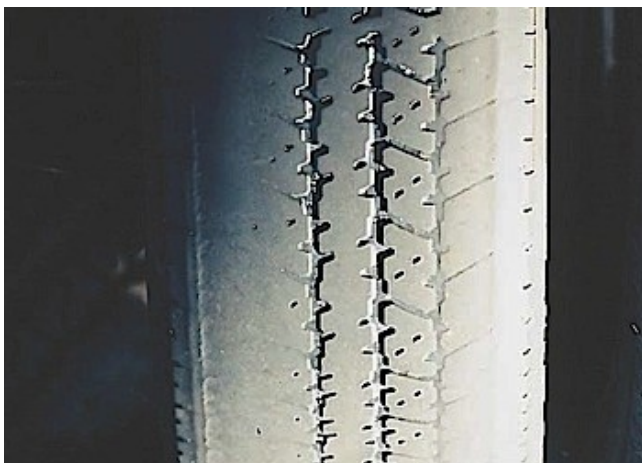
## 4 RENKAAN PINNAN KULUMINEN

### 4.1 Kulumisprosessi ja siihen vaikuttavat tekijät

Normaalissa käytössä renkaan kulutuspinna näkyy ajan mittaan väistämättä kulumisjälkiä. Kun kumi liukuu kovalla alustalla, kumipartikkeleita irtoaa. Taustalla oleva prosessi on kaksivaiheinen: halkeamamaisten vikojen ydinmuodostus ja halkeamien leviäminen. Tämä johtaa partikkeleiden irtoamiseen kumista. Tilanne, jossa renkaan pintaan vaikuttavat voimat ovat maltilliset, eikä kitkavoimien vaihtelu ole suurta, esimerkiksi ajettaessa betoni- tai asfaltteilla matalissa liukutiloissa, irronneiden partikkeleiden koko on mikrometrien alueella (n. 1–100 µm). Suuremmilla voimilla ja kitkavoimien vaihteluilla irronneiden partikkeleiden keskimääräinen koko on huomattavasti suurempi. (Stocek ym. 2021.)

Renkaan kulumiseen on useita vaikuttavia tekijöitä. Tällaisia ovat esimerkiksi kuljettajan ajotapa, ilmasto, tienpinnan tasaisuus sekä itse ajoneuvon kunto ja tyyppi. Sähkö- ja bensiiniautot kuormittavat renkaita eri tavalla. Oikealla käytöllä sekä valitsemalla sopivat renkaat ajoneuvon ja käyttötarkoituksen mukaan voidaan vaikuttaa renkaan kestävyys- ja turvallisuuteen. Rengaspaineista sekä renkaan oikeanlaisesta tasapainotuksesta ja suuntauksesta huolehtimalla voidaan estää renkaan epätasainen kulumisen. (Michelin n.d.)

Renkaan alhainen ilmanpaine aiheuttaa kulutuspinnan liiallista kulumista pinnan reunoilla (kuva 4). Tienpintaan koskevan alueen kuormitus ei ole tasainen. Kulutuspinnan keskiosalla ei ole tällöin tarpeeksi tukea, ja kuorma siirtyy enemmän pinnan reunaan, renkaan olka-alueelle. Kulutuspinna saattaa näyttää siksi pyörityneeltä litteän sijaan. Liian korkea rengaspaine puolestaan aiheuttaa kulutuspinnan keskiosan kulumisen reunoja nopeammin (kuva 5). (Tomorrows Tech 2015.)



KUVA 4. Liian matalan rengaspaineen aiheuttama reunaosien kuluminen (Tomorrows Tech 2015).



KUVA 5. Liian korkean rengaspaineen aiheuttama pinnan keskiosan kuluminen (Tomorrows Tech 2015).

Muu renkaan epätasainen kuluminen esimerkiksi vain yhdeltä puolelta saattaa olla merkki renkaiden virheellisestä suuntauksesta tai tasapainotuksesta. Väärä suuntaus johtuu ajoneuvon jousituksen ongelmista. Jousituksen suuntaus voi olla virheellinen. Myös sen osista esimerkiksi laakerit tai iskunvaimentimet voivat olla viallisia. Virheellinen suuntaus voi ilmetä renkaiden asennossa ajoneuvoon nähden aurasikulmana tai camber-kulmana. Aurasikulma viittaa aina saman akselin renkaisiin. Kun eturenkaat kääntyvät sisäänpäin, niissä on aurasivirhe. Ulospäin kääntyvien renkaiden kohdalla puhutaan haritusvirheestä. Camber-kulmalla tarkoitetaan renkaan pystykallistumaa ajoneuvoa edestäpäin katsottuna. Renkaiden tasapainotuksessa tarkastellaan rengasta ja vannetta kokonaisuutena. Epätasapainoisen tilanteen aiheuttaa renkaassa tai vanteessa oleva poikkeavuus

massassa ja sen jakautuvuudessa. Virheellinen tasapainotus aiheuttaa tärinää jousituksessa ja sitä kautta nopeuttaa renkaan kulutuspinnan kulumista. Renkaiden suuntauksen ja tasapainotuksen tekee aina rengasammattilainen. (Michelin n.d.)

Renkaiden kulumista seurataan urasyvyysmittaamalla (kuva 6). Urasyvyys mitataan renkaan leveistä urista kulutuspinnan keskialueella. Lakisääteinen pienin sallittu urasyvyys kesärenkaiden pääurille on 1,6 mm ja talvirenkaiden 3 mm niiden pakollisena käyttöaikana. Näitä urasyvyysarvoja pienemmillä arvoilla ei ole enää turvallista ajaa. Riittävä kulutuspinta tekee ajamisesta vakaampaa ja pitää ajoneuvon varmemmin hallittavissa. (Nokian Renkaat Oyj n.d.b.)



KUVA 6. Urasyvyyden mittaus digitaalisella mittarilla (Diagno n.d.).

## 4.2 Cut & Chip -kuluminen

Renkaat joutuvat kosketuksiin monenlaisten pintojen ja tekstuuriensa kanssa, ja kulutuspinta altistuu terävälle pinnan epätasaisuuksille samalla, kun rengas toimii moninaisten voimien välittäjänä kosketuspinnan ja ajoneuvon välissä. CC-ilmiöllä tarkoitetaan renkaan pinnan kulumista, joka tapahtuu kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa renkaaseen kohdistuva isku aiheuttaa siihen viilto- tai leikkausmaisen jäljen (cut). Iskun voima on niin suuri, että kumin pinta rikkoutuu, mikä synnyttää uutta pinnan pintaa. Tällainen isku voi aiheutua renkaan osu-

essa esimerkiksi kiveen, puun juureen tai muuhun ajopinnalla olevaan kohteeseen. (Stocek ym. 2021.) Yksityiskohtaisemmassa tarkastelussa rengas pyörii tai liukuu karheuden yli, mikä aiheuttaa paikallisia voimia kulutuspinna. Tämä johtuu siitä, että tien karheuden pinta-ala on hyvin pieni samalla, kun koko renkaaseen kohdistuu hyvin suuria voimia. Näin ollen korkea vääntö ei pysty tarttumaan pieneen pinta-alaan, ja sen kohdalla tapahtuu kulutuspinnan liukuminen. Jos näin syntynyt voima on suurempi kuin kynnyvoima, syntyy halkeama. (Ryzi, Stocek & Maloch, 2024.)

Toisessa vaiheessa pintaan, jossa halkeiluprosessi on jo käynnissä, kohdistuva rasitus tai isku aiheuttaa lastumaisen palan irtoamisen renkaan pinnasta (chip). Kulumisasteen suuruus on verrannollinen niiden vetojännitysten suuruuteen, jotka aiheutuvat kumin ja kovan tienpinnan välisistä kitkaprosesseista ja edistävät halkeamien etenemistä (Stocek ym. 2021). Kuvassa 7 on esimerkki CC-tyylisesti kuluneesta renkaasta. Renkaan pinnan kuluminen vaikuttaa renkaan suorituskykyyn. Matala urasyvyys heikentää renkaan vesiliirto-ominaisuuksia ja kasvattaa riskiä pistovaurioihin. Liukkaalla säällä auton jarrutusmatka pitenee ja käsittely vaikeutuu. (Nokian Renkaat Oyj n.d.b.)



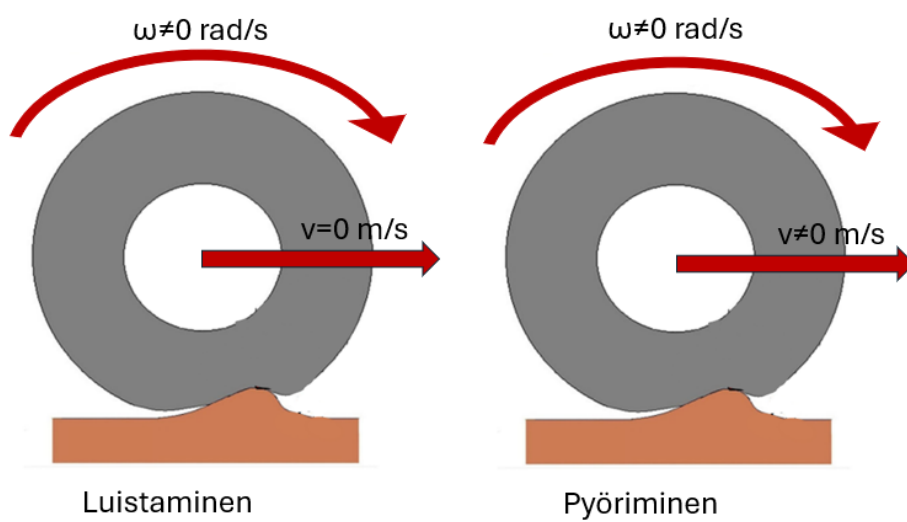
KUVA 7. CC-ilmion kuluttama rengas (Stocek ym. 2021, muokattu).

Ryzi ym. (2024) tuovat artikkelissaan esiin lämmönkehityksen vaikutusta styreenibutadieenikummin (SBR) CC-kulumiseen. Artikkelin tutkimuksessa testaus suo-

ritetaan ICCA-laitteella ja kuvataan nopean suoritusluokan lämpökameralla. Tutkimuksen mukaan renkaan rullatessa tiellä, tapahtuu lämmönkehitystä, joka johdetaan viskoelastisen kumimateriaalin kitkasta epätasaisella tiellä. Tämä tapahtuu kahdella tasolla: koko renkaan ja tien välisellä kosketusalueella (footprint) ja paikallisemmin alustan karheuden kärjissä, mikä lämmittää kulutus pintaa ja siirtää lämpöä ympäröivään materiaaliin. Tasaisilla ajoalustoilla jännitysvoimat ja siten lämpö jakautuvat tasaisesti koko renkaan kumimateriaaliin. Sen sijaan renkaan rullatessa ja liukuessa karheuksien yli vaikeassa maastossa jakautuvat jännitysvoimat ja sen myötä lämpö epätasaisesti renkaan kulutus pinnassa. Tämä johtaa voimakkaaseen epätasaisesti jakautuneeseen CC-kulumiseen. (Ryzi ym. 2024.)

Koska CC-kulumista tapahtuu epätasaisilla pinnoilla ajettaessa, koskee kulumismalli pääosin renkaita, jotka on suunniteltu tällaisiin käyttökohteisiin. Näitä ovat mm. maa- ja metsätalousajoneuvojen renkaat, OTR-renkaat (off the road) maasto-, paketti- ja lava-autojen renkaat, sekä kaivos- ja satamatyökoneiden renkaat. CC-efekti voi tapahtua myös muilla kumisilla tuotteilla, kuten maansiirtoissa käytettävillä hihnakuljettimilla. (Stocek ym. 2021.)

Renkaan ja epätasaisen alustan vuorovaikutusta voidaan kuvata tarkastelemalla renkaan normaalia pyörimistä ja luistamista/liukumista. Renkaan luistamisessa aiheutuu suuremmat leikkausvoimat kuin pyörimisessä, ja luistamisessa leikkausvoiman suunta edistää enemmän halkeamien avautumista ja kasvua. Näin ollen renkaiden CC-käyttäytymisen analysointiin tarvittavan testauslaitteen on kyettävä vaihtelemaan ja mittaamaan sekä normaalivoimaa että leikkausvoimaa. (Stocek, Mars, Kipscholl & Robertson 2018a.) Kuviossa 3 on havainnollistettu renkaan luistamisen ja pyörimisen tiloja sen osuessa tienpinnan epätasaisuuteen. Nuolilla on osoitettu renkaan pyörimissuunta ja nopeuden suunta.



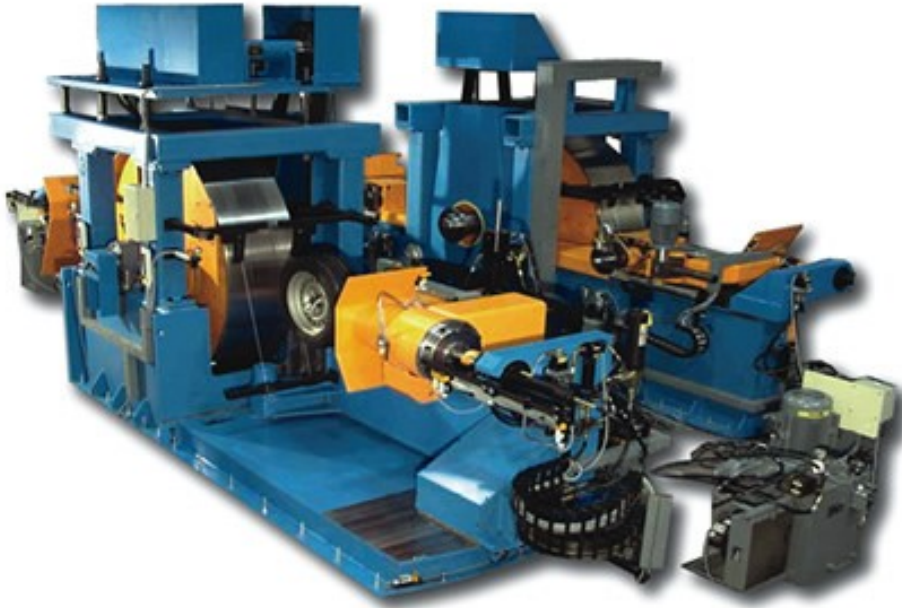
KUVIO 3. Renkaan luistaminen ja pyöriminen (Stocek ym. 2018a, muokattu).

## 5 KULUMISKESTÄVYYDEN TUTKIMINEN

### 5.1 Rengastestaus

Renkaan kulumiskestävyttä mitataan ns. convoy-testillä. Siinä kolme samantyyppistä autoa ajaa peräkkäin määrättyä reittiä. Autoilla ajetaan kahden viikon aikana noin 15 000 kilometriä. Yhteensä autoon on asennettu referenssirenkaat ja kahteen testirenkaat, joiden mittaustuloksia verrataan referenssirenkaan tuloksiin. Testin tuloksista selviää, miten nopeasti renkaat kuluvat ja säilyttävätkö ne kuluessaankin tasaisen virheettömän muotonsa. (Nokian Renkaat Oyj n.d.b.)

Renkaita testataan myös sisätiloissa. Kuvassa 8 on esimerkki renkaan testauskoneesta (Laboratory Tire Endurance Tester), jolla voidaan mitata renkaan kulumiskestoa, korkeita nopeuksia sekä camber- ja liukukulmia. Indoor-testeistä saadaan tärkeää tietoa renkaiden kumisekoitusten, pintamallien ja rakenteiden ominaisuuksista ja toimivuudesta. Testeillä varmistetaan, että renkaat ovat normien ja vaatimusten mukaisia kaikkialla maailmassa. Renkaiden virheettömyyttä valvotaan jatkuvasti toistuvien kokeiden avulla. Erilaisten testien suorittamista edellytetään viranomais- ja EU-merkintöjen saamiseksi. Todistukset takaavat tuotteiden täyttävän niille asetetut vaatimukset. (Nokian Renkaat Oyj n.d.b.) EU-renkasmääräyksellä tarkoitetaan EU:n alueella myytävissä renkaissa pakollisena olevaa tarraa, josta selviää renkaan luokitus turvallisuuden ja polttoainetaloudellisuuden suhteen. Määräyksessä kuvataan renkaan märkäpito, vierintämelu ja polttoainetaloudellisuus. Talvirenkaasta ilmoitetaan jää- ja lumipito. (Nokian Renkaat Oyj n.d.c.)



KUVA 8. Esimerkki renkaan testauskoneesta (The Poling Group n.d.).

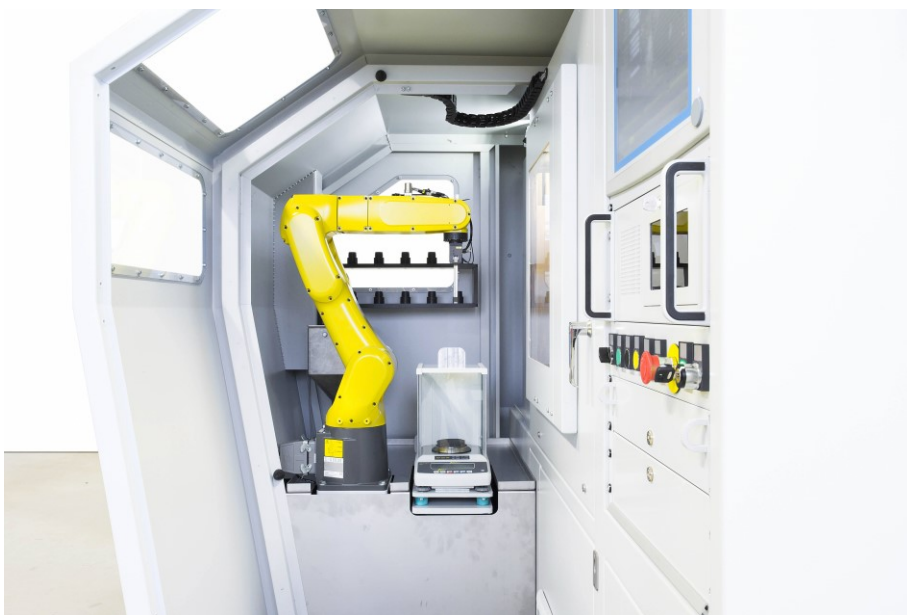
## 5.2 Laboratoriotestaus

Laboratoriolaitteilla voidaan testata vulkanoidun kumisekoituksen kulumiskestävyyttä. DIN 53516 -standardin (1987) mukaisessa testissä testausvälineenä on pyörivä rumpu, joka on päällystetty tietynlaisella hiomapaperilla (kuva 9). Testinäyte painuu rumpua vasten tietyllä vakiovoimalla. Rummun pyöriessä näyte liikkuu koko rummun pituuden aksiaalisuunnassa. Näin ollen kulumista tapahtuu puhtaalla hiontapinnalla yhteensä 40 m. Näyte punnitaan ennen ja jälkeen kulutuksen ja tulokseksi saadaan pois kulunut kumimäärä. Mittauksessa voidaan käyttää standardinäytettä, johon testinäytteen kulumismäärää verrataan. (Laurila 2007.)



KUVA 9. Esimerkki testilaitteesta DIN 53516 -kulumistestaukseen (Bareiss North America n.d., muokattu).

Toinen standardoitu laboratoriotesti kumisekoituksen kulumiskestävyyden määrittämiseen on ISO 23233 -standardi (2016). Siinä kulutetaan vulkanoitua kumiäytettä pystysuorassa olevaa pyörivää kulutuskiekkoa vasten. Näytettä voidaan ajaa eri liukukulmissa, ja sen kulutuskiekkoon kohdistama voima voidaan asettaa halutusti. Myös kulutuskiekon pyörimisnopeutta voidaan säätää. Tarkoilla parametreilla kulutettu näyte punnitaan ennen ja jälkeen kulutuksen. Tulos voidaan raportoida massahäviönä sekä kulutuskestävyyden indeksilukuna referenssinäytteeseen verrattuna. (ISO 23233 2016.) Kuvassa 10 on tämän menetelmän mukainen testauslaite Laboratory Abrasion Tester LAT 100.



KUVA 10. Esimerkki testilaitteesta ISO 23233 -kulumistestaukseen (VMI-group n.d.).

Laboratorion menetelmille tehdään validointi, jolla tarkastetaan menetelmän kyky tuottaa oikeita tuloksia. Validoinnilla voidaan todeta menetelmän soveltuvuus käyttötarkoitukseensa (Jaarinen & Niiranen 2005). Toistettavuutta voidaan arvioida tekemällä toistomittauksia ja laskemalla tuloksista keskihajonta (kaava 1) ja suhteellinen keskihajonta (kaava 2).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

jossa  $s$  on keskihajonta,  $x_i$  on yksittäinen mittatulos,  $\bar{x}$  on keskiarvo ja  $n$  on mitausten lukumäärä. Keskihajonnan avulla lasketaan suhteellinen keskihajonta prosentteina (RSD) kaavalla 2.

$$RSD = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (2)$$

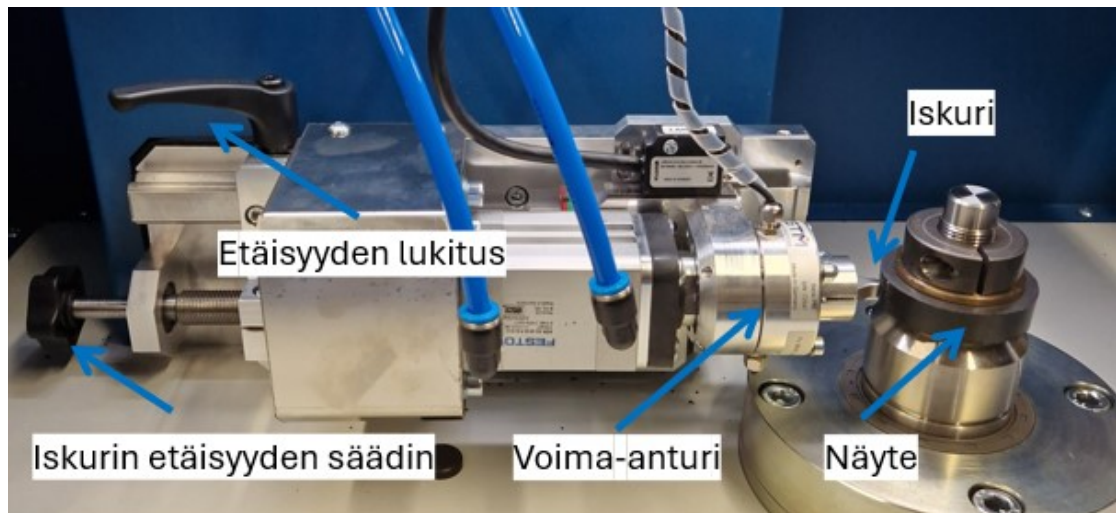
### 5.3 ICCA-laite

CC-tyyppistä kulumista analysoidaan ICCA-laitteella, jonka nimi tulee englanninkielisistä sanoista Instrumented Cut and Chip Analyzer (kuva 11). ICCA-laite tarvitsee 3-vaiheisen 400 V ja 15 A virtalähteen sekä 6–8 bar paineilmalähteen.



KUVA 11. Instrumented Cut and Chip Analyzer (Kuva: Johanna Niemi).

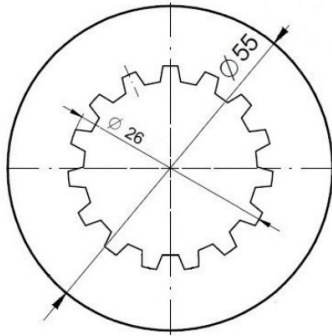
ICCA-laitteessa on servomootorilla toimiva pyörivä näytepidike, johon rengasmainen näyte kiinnitetään (kuvat 12 ja 13). Kuvassa 14 esitetään näytteen dimensiot. Näytteen sisäpinnassa on hammastus, joka auttaa näytettä pysymään paikoillaan.



KUVA 12. ICCA:n osat (Kuva: Johanna Niemi).

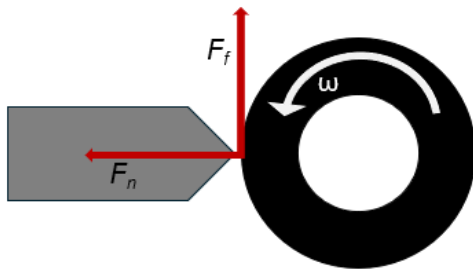


KUVA 13. Vulkanoitu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

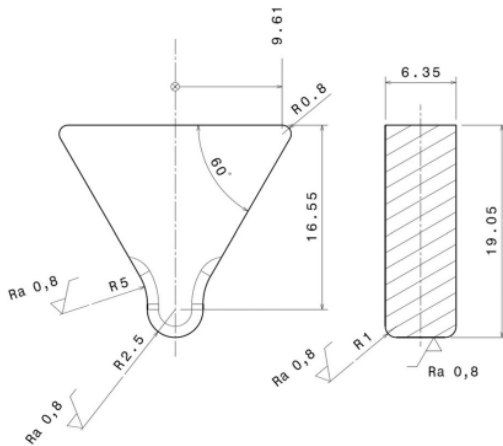


KUVA 14. Näytteen mitat (Stocek ym. 2018a).

Pneumaattinen typpöpäinen iskuri iskee tietyllä taajuudella ja voimalla näytteen pintaan. Iskurin mitat on esitetty kuvassa 15. Iskurin yhteydessä on kaksiakselinen voima-anturi, joka mittaa iskurin ja näytteen välistä normaalivoimaa  $F_n$ , sekä kitkavoimaa  $F_f$ , kuten kuviossa 4 esitetään. (Stocek, Mars, Kipscholl & Robertson 2018b.)



KUVIO 4. Iskurin yhteydessä oleva voima-anturi mittaa testiin asetettua normaalivoimaa  $F_n$  sekä kontaktiaikana näytteen liikkeestä aiheutuvaa kitkavoimaa  $F_f$  (Stocek ym. 2018b, muokattu).



KUVA 15. Typpöpäisen iskurin mitat (Stocek ym. 2018a, muokattu)

ICCA:n parametreista iskutaajuus ja -voima, pyörimisnopeus sekä kontaktiaika voidaan asettaa haluttuun arvoon (Stocek ym. 2018b). Taulukossa 3 on esitetty näiden parametrien alueet sekä parametrit, jotka saadaan määritettyä laskemalla mitatuista arvoista.

TAULUKKO 3. ICCA:n parametrit yksikköineen (Stocek ym. 2018b, muokattu).

Parametri	Vaihteluväli	Yksikkö	Asetetaan	Mitataan	Lasketaan
Pyörimisnopeus	100–1500	min <sup>-1</sup>	X	X	
Iskutaajuus	0–10	Hz	X	X	
Syklien määrä	0 ->	-	X	X	
Kontaktiaika	20 ->	ms	X	X	
Normaalivoima $F_n$	0–500	N	X	X	
Kitkavoima $F_f$	0–900	N		X	
Iskun syvyys	0–20	mm		X	
Kitkaetäisyys		mm		X	
Kitkakerroin		-			X
Normaalienergia		J			X
Kitkaenergia		J			X
P-arvo (Propensity) $P$		N/sykli			X

ICCA-laitteen ohjelma näyttää ajantasaista dataa mittauksen ollessa käynnissä. Kuvassa 16 olevista kuvaajista nähdään yhden syklin aikainen normaalivoima (normal force), kitkavoima (friction force) sekä normaalisiirtymä (normal displacement). (Ryzi ym. 2024.)



KUVA 16. Esimerkki ohjelman näytöstä (Kuva: Johanna Niemi).

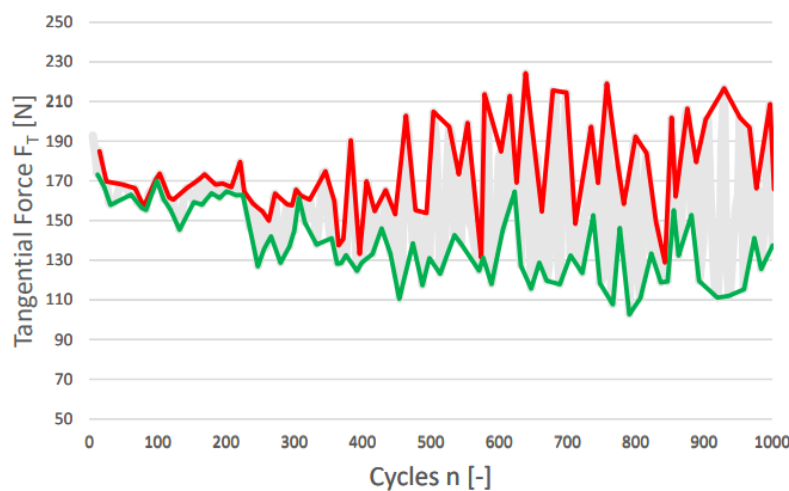
## 6 CUT & CHIP -TEORIA

### 6.1 P-parametri

ICCA-testissä saadun mittausdatan pohjalta voidaan määrittää parametri  $P$ , joka tulee sanasta propensity. Sillä tarkoitetaan tässä analyysissä alttiutta CC-ilmiölle.  $P$ -parametriarvon ( $P$ -arvo) ollessa pieni, myös alttius CC-vaikutukselle on pieni.  $P$ -arvo lasketaan integroimalla kitkavoimien vaihtelu tietyn syklimäärän aikana kaavalla 3 (Stocek ym. 2018a).

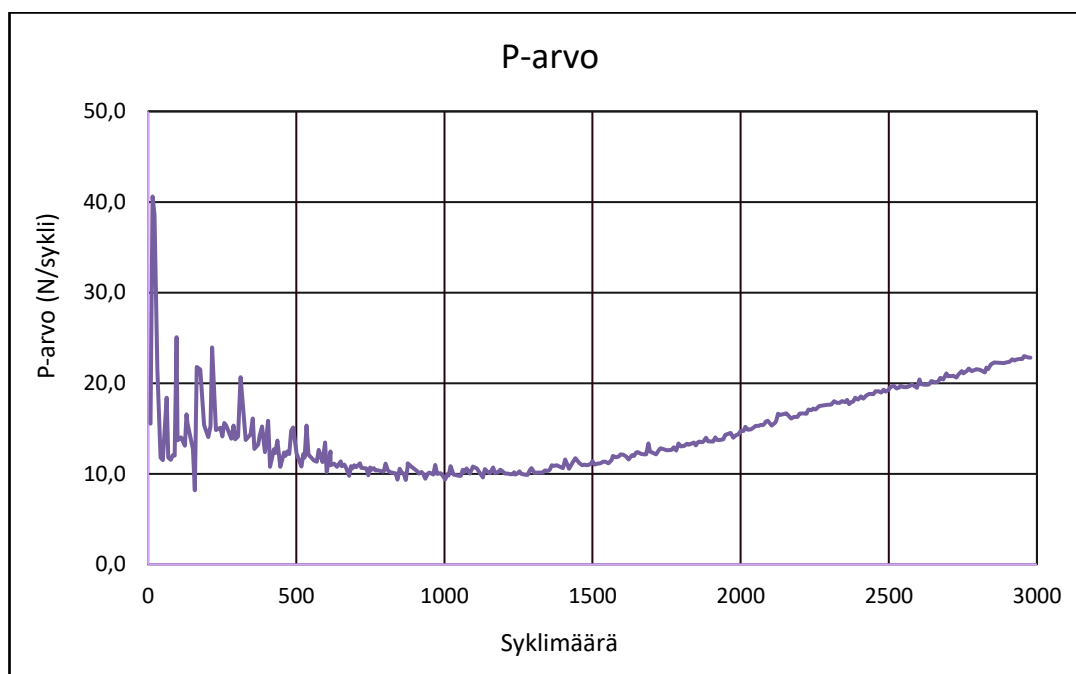
$$P = \frac{\int_0^n f(max)dn - \int_0^n f(min)dn}{n}, \quad (3)$$

jossa  $f(max)$  on suurin mitattu kitkavoiman arvo,  $f(min)$  on pienin mitattu kitkavoiman arvo ja  $n$  on syklimäärä.  $P$ -arvon yksikkö on N/sykli. Kuviossa 5 kuvataan punaisella värillä kitkavoimien maksimiarvoja ja vihreällä värillä minimiarvoja syklimäärän funktiona. (Stocek ym. 2018a.) Näiden väliin jäävän alueen pinta-ala kuvaa  $P$ -arvoa tietyn syklimäärän aikana. Kuviossa 5 on käytetty voimasta nimitystä tangentialivoima. Eri julkaisuissa kyseisestä voimasta käytetään myös nimitystä leikkausvoima. (Stocek ym. 2018a; Stocek ym. 2021.)



KUVIO 5. Kitkavoimien maksimi- ja minimiarvojen vaihtelut 1 000 syklin aikana (Stocek ym. 2018a, muokattu).

ICCA:n ohjelmisto laskee P-arvon automaattisesti ja esittää siitä kuvaajan syk-  
leittäin (kuvio 6). Tutkimuksissa ICCA:lla ajetaan näytettä 3 000 sykliä (Stocek  
ym. 2018a; Stocek ym. 2021; Ryzi ym. 2024). Ensimmäisten 500–1 000 syklin  
aikana kitkavoimassa, ja siten myös P-arvoissa, on runsaasti vaihtelua pienenkin  
syklimäärän aikana. Tulostarkasteluun on tärkeää ottaa mukaan myös näytteen  
visuaalinen tarkastelu. Näytteen pinnan karheustaso heijastaa CC-vastustusky-  
kyä kyseisissä kuormitusolosuhteissa. Alhainen CC-vastustuskyky tarkoittaa  
suurempaa pinnankarheutta. (Stocek ym. 2018a.)



KUVIO 6. Esimerkkikuvaaja P-arvosta 3 000 syklin aikana (Nokian Renkaat Oyj).

## 6.2 Polymeerin ja täyteainemäärän vaikutus Cut & Chip -alittiuteen

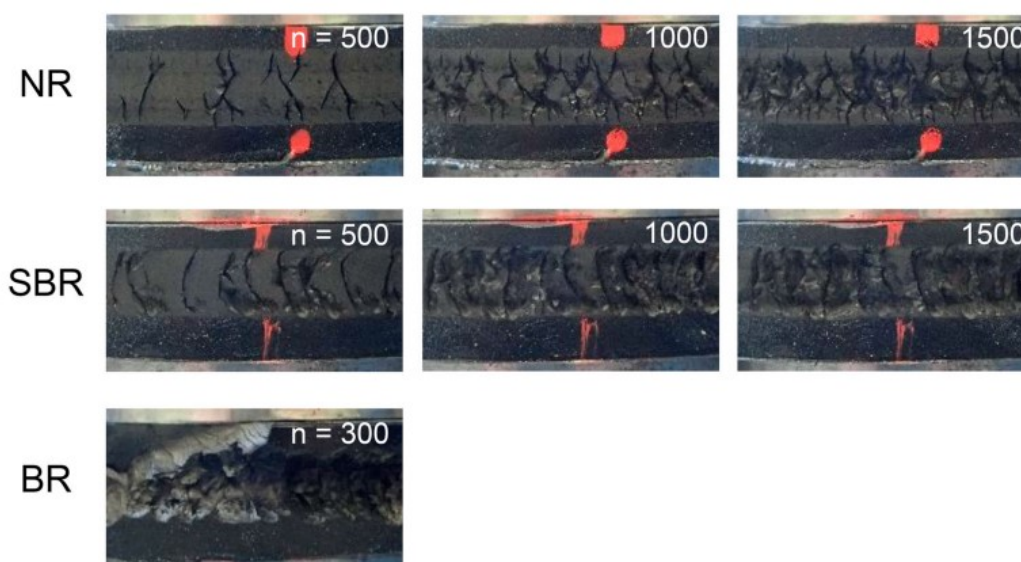
Useissa eri artikkeleissa on tuotu esiin ICCA-laitteen tuottaman monipuolisen da-  
tan vertailukelpoisuutta kenttätestien tuottamaan kokemukseen CC-käyttäytymi-  
sestä. Tutkimuksissa on käytetty kolmea tai useampaa eri polymeeri- ja/tai täy-  
teainepohjan omaavaa sekoitusta ja tarkasteltu niiden CC-ominaisuuksia. Eri po-  
lymeerivalinnoilla on ollut selkeä vaikutus sekoitusten CC-kulumiskeestoon.  
Stocek ym. (2018a) käyttivät tutkimuksessaan kolmea eri sekoitusta, joissa oli eri  
polymeerit: NR (natural rubber, luonnonkumi), SBR (styreenibutadieenikumi) ja

BR (butadieenikumi). Täyteaineena käytettiin 50 phr:ää N330-tyypin nokea (CB, carbon black). Näytteitä ajettiin ICCA:lla 3 000 sykliä. (Stocek ym. 2018a.) Testiparametrit ovat taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Polymeerivertailun testiparametrit (Stocek ym. 2018a).

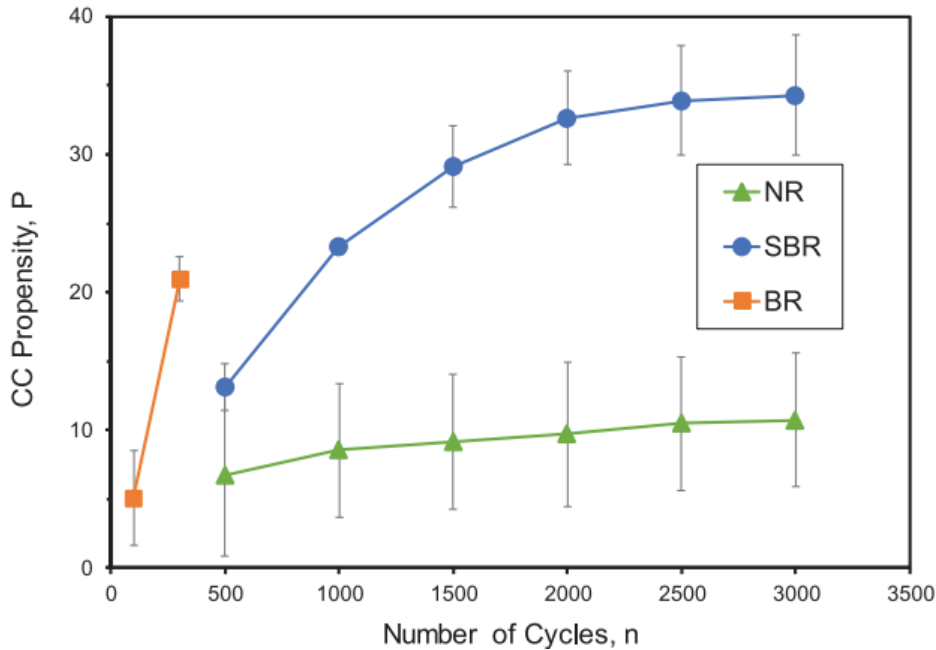
Pyörimisnopeus ( $\text{min}^{-1}$ )	Normaalivoima (N)	Iskutaajuus (Hz)	Kontaktiaika (ms)
150	80	5	30

Näytteiden visuaalinen tarkastelu osoitti, että testimenettely aiheutti näytteille vaurioita, jotka muistuttavat CC-ilmiötä renkaan pinnassa. Kolmen polymeerityypin välillä nähtiin selkeitä eroja vaurioiden laajuudessa ja ominaisuuksissa (kuva 17). (Stocek ym. 2018a.)



KUVA 17. Lähikuvia polymeerivertailun näytteistä eri syklimäärien kohdalla (Stocek ym. 2018a).

Visuaalisen tarkastelun mukaan BR-sekoitus vaurioitui voimakkaasti jo 300 syklin jälkeen. NR- ja SBR-sekoitukset vaurioituivat hitaammin, ja NR-sekoitus oli vaurioitunut 1 500 syklin jälkeen vähiten. Näytteiden P-arvon kuvaajat näyttävät saman tuloksen kuviossa 7.



KUVIO 7. Polymeerivertailun P-arvon kuvaajat (Stocek ym. 2018a).

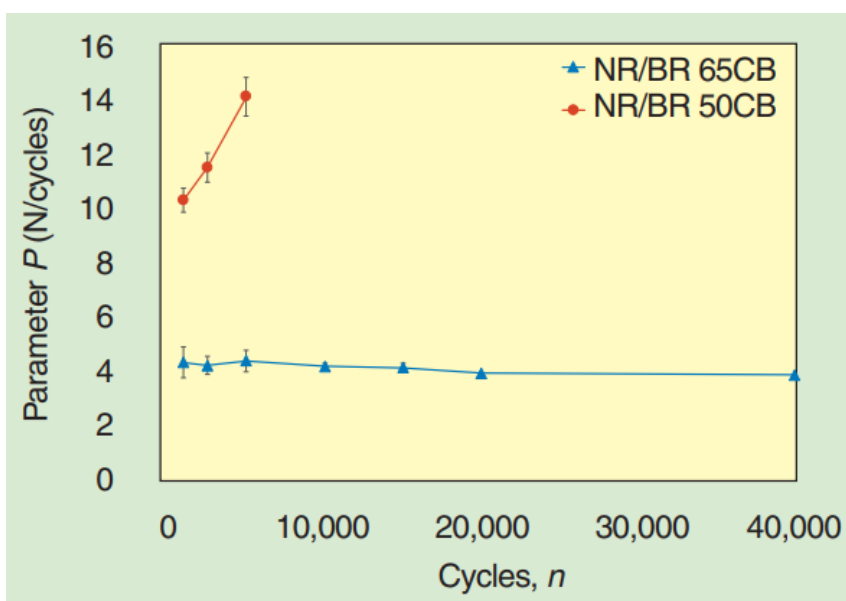
Tutkimus osoitti, että nämä kolme sekoitusta saadaan CC-kestävyydeltään järjestykseen NR > SBR > BR, mikä Stocekin ym. (2018a) mukaan vastasi hyvin näitä polymeerejä sisältävien sekoitusten CC-kulumisen trendejä kenttäsuorituskyvyssä. Samassa tutkimuksessa testattiin kyseiset sekoitukset myös kappalessa 5.2 esitellyllä DIN 53516 -kulumistestillä. Siinä kulumiskestävyyssjärjestys oli täysin päinvastainen. Tämä on Stocekin ym. (2018a) mukaan todiste siitä, että CC-vaurio, jossa pintavauriot johtuvat millimetritason kokoisten kumipalojen irtoamisesta, ja tasainen hankauskuluminen, jossa vauriot ovat mikrometritasoisia, omaavat erilaiset ominaisuutensa kulumisprosessissa. (Stocek ym. 2018a.)

Stocekin ym. toisessa tutkimuksessa (2018b) tuotiin esiin täyteainemäärän vaikutusta CC-käyttäytymiseen. Polymeereinä tässä vertailevassa tutkimuksessa olivat 75 % NR ja 25 % BR. Nokea (CB) N339 käytettiin sekoituksissa 65 phr:ää ja 50 phr:ää. Muilta osin sekoitukset olivat identtiset. (Stocek ym. 2018b.) Tutkimuksessa käytetyt testiparametrit ovat taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Täyteainevettilun testiparametrit (Stocek ym. 2018b).

Pyörimisnopeus ( $\text{min}^{-1}$ )	Normaalivoima (N)	Iskutaajuus (Hz)	Kontaktiaika (ms)
150	125	5	30

Tulokset osoittivat suuremman nokimäärän sekoituksen (NR/BR 65CB) vastustavan hyvin CC-vaikutusta. Kuviosta 8 nähdään, että P-arvon kuvaaja pysyy lähes vakiona jopa 40 000 syklin ajan. Vähemmän nokea sisältäneen sekoituksen (NR/BR 50CB) P-arvon kuvaaja oli selkeästi nouseva, mikä tarkoittaa suurempaa alttiutta CC-vaurioille. Myös visuaalisen tarkastelun mukaan (kuva 17) NR/BR 65CB -sekoituksen näytteissä on näkyvissä vain pientä pinnan halkeilua, ja NR/BR 50CB -sekoituksessa halkeilu on edennyt pidemmälle. (Stocek ym. 2018b.)



KUVIO 8. Täyteainevertailun P-arvon kuvaajat (Stocek ym. 2018b).



KUVA 17. Täyteainevertailun visuaalinen vertailu sykleittäin (Stocek ym. 2018b).

Näiden tutkimusten tarkoituksena on ollut osoittaa ICCA:n soveltuvuus jäljittelemään renkaiden erilaisille kulutuspinnoille aiheutuvaa CC-vaikutusta karhealla alustalla. Laboratorionäytteen P-arvon avulla voidaan arvioida kulutuspinnan CC-käyttäytyminen renkaan oikeissa käyttöolosuhteissa. (Stocek ym. 2018b.)

## 7 OPINNÄYTETYÖN TOTEUTUS

### 7.1 Tavoite ja tarkoitus

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda Nokian Renkaat Oyj:n tuotekehitykseen hankitulle ICCA-laitteelle menetelmä. ICCA-laitteen menetelmällä tarkoitetaan sekoituskohtaisia testiparametreja, joita käytetään kyseisillä sekoituksilla standardiparametreina. Standardiparametreilla testaamalla on tarkoitus saada sekoituksen kehitystyössä vertailusekoitus ja sen kehitysversiot CC-kulumiskestävyydeltään paremmuusjärjestykseen. Tarkoituksena on tehdä standardiparametrimääritys kahdelle pintasekoitukselle testaamalla näytteitä useilla eri parametrijhdistelmillä ja niiden tulosten perusteella valita parametrit, joiden tulostasoa on sopivin tuotekehitystöiden tulosten analysointiin.

Menetelmää voidaan käyttää myös CC-kulumistason tarkistamiseen, jos sekoituksen muita ominaisuuksia parannetaan ja halutaan poissulkea muutosten mahdollisesti aiheuttama vaikutus CC-kulumiseen. Vastaavanlaista CC-kulumista analysoivaa ICCA-laitetta, joka pystyy mittaamaan kahdensuuntaisia voimia, ei ole aiemmin ollut tuotekehityksen käytössä. Aiemman laitteen CC-kulumisen arviointi perustui näytteiden massan muutokseen ennen ja jälkeen kulutuksen, joten kyseessä on täysin erilainen testauslaite, jonka menetelmäkehitys aloitettiin alusta.

### 7.2 Toteutussuunnitelman kuvaus

Parametrien määrittämistä varten oli tarkoitus valmistaa kahdesta pintasekoituksesta (sekoitus 1 ja sekoitus 2) kolme rinnakkaista näytettä jokaista parametrijhdistelmää kohti. Testausparametrien valinnassa hyödynnettiin Stocekin ym. (2018a; 2021) tutkimusten esimerkkejä. Tässä työssä testausparametreina suunniteltiin käytettävän ensin neljän eri normaalivoiman ja kahden kontaktiajan yhdistelmiä taulukon 6 mukaisesti. Normaalivoimiksi valittiin 80 N, 120 N, 160 N ja 200 N. Näihin voimiin päädyttiin, koska ensimmäisessä testisarjassa oli tavoit-

teena saavuttaa kulumisen tasot vähäisestä kulumisesta voimakkaaseen kulumiseen. Kontaktiajoiksi valittiin kaksi selkeällä erolla olevaa aikaa 40 ms ja 70 ms. Muut testiparametrit oli tarkoitus pitää vakioina. Iskutaajuutena oli 5 Hz, näytteen kierrosnopeutena 200 rpm ja syklimääränä 3 000 sykliä.

TAULUKKO 6. Suunnitellut voimien ja kontaktiaikojen yhdistelmät ensimmäiseen testisarjaan.

normaali- voima	kontaktiaika 40 ms	kontaktiaika 70 ms
80 N	X	
120 N	X	X
160 N	X	X
200 N	X	

Ensimmäisen testisarjan jälkeen tarkasteltiin ICCA:n tuloksia ja näytteiden kulumista. Tämän tarkastelun pohjalta oli tarkoitus määrittää lisää parametriyhdistelmiä, jos tarkentava tieto koetaan ensimmäisen testisarjan jälkeen tarpeelliseksi standardiparametrien määrittämistä varten. Suunnitteluvaiheessa mahdollisten lisätestien tarpeeksi arvioitiin 2–4 uutta parametriyhdistelmää.

Standardiparametrien valinnassa haettiin parametriyhdistelmiä, jotka tuottavat tuotekehitystyön analysoinnin kannalta sopivimmat tulokset. Kriteereinä standardiparametreille oli saada näytteeseen aikaiseksi selkeä kuluminen, jotta sekoitusta kehitettäessä kulumistasossa voidaan visuaalisesti havaita mahdollinen muutos sekä voimakkaampaan että lievempään kulumistasoon. Myös P-arvon tulostason tuli olla standardiparametreilla testattuna sellainen, että muutokset parempaan ja heikompaan CC-kestävyyteen ovat havaittavissa. Kuvaajien vaihtelun tuli olla mahdollisimman pieni. Standardiparametrien valinnan jälkeen oli tarkoitus tarkastella menetelmän toistettavuutta määrittämällä useista toistomittauksista keskihajonta ja suhteellinen keskihajonta.

### 7.3 Toteutus

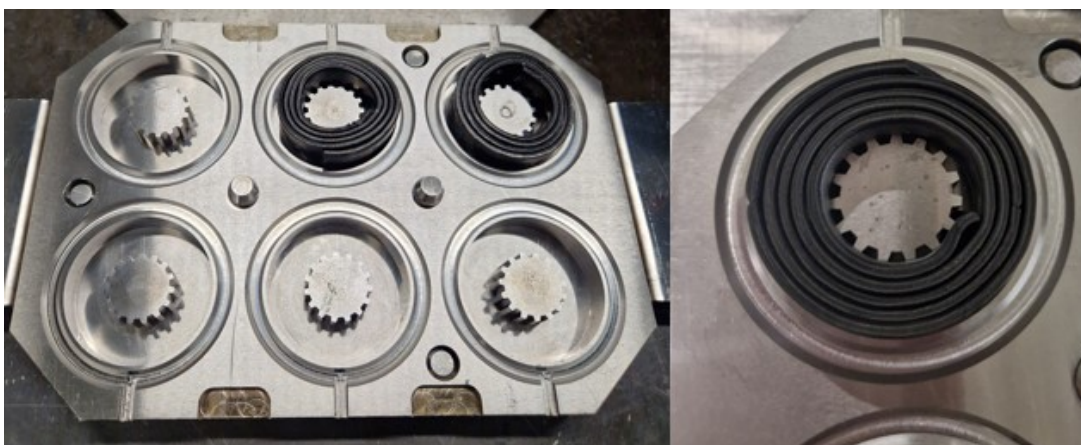
Toiminnallinen osuus aloitettiin valmistamalla näytteet. Aluksi kumisekoitukset valssattiin 2,4 mm:n paksuiseksi levyksi. Kumilevystä leikattiin 60 mm x 20 mm

suikale, joka rullattiin renkaan malliseksi näytteeksi (kuva 18). Näytteet punnittiin, jotta voitiin varmistaa paistomuotin sopiva täyttö ja näytteiden tasalaatuisuus. Tarvittaessa suikaletta lyhennettiin oikean painon (30,0–32,5 g) saavuttamiseksi.



KUVA 18. Näytteen valmistus (Kuva: Johanna Niemi).

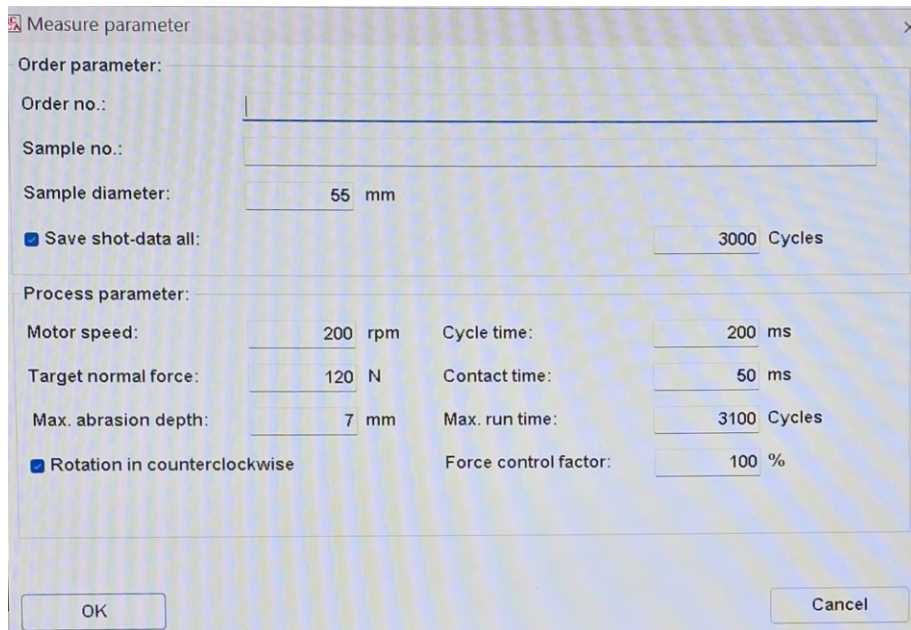
Näytteet asetettiin esilämmitettyyn paistomuottiin (kuva 19) ja vulkanoitiin paistoprässässä 150°C:ssa. Vulkanoitumisaika määritettiin luvussa 2.3 esitellyn reometrimittauksen avulla. Vulkanoinnin jälkeen näytteet poistettiin muotista ja jäähtymisen jälkeen ylimääräiset purseet leikattiin pois saksilla. Näytteitä valmistettiin yhteensä 30 kappaletta kummastakin sekoituksesta.



KUVA 19. Kumisuikaleesta rullatut näytteet asetettiin 6-paikkaisen muotin pesiin (Kuva: Johanna Niemi).

ICCA:lla testaus aloitettiin kirjaamalla testausohjelmaan näytetiedot ja asettamalla suunnitellut parametrit (kuva 20). Näyte asetettiin laitteen pidikkeeseen kahden messinkisen rengaslevyn väliin. Kiristysrengas asetettiin ylemmän levyn

päälle ja kiristettiin pitämään näyte paikoillaan (kuva 21). Iskuri siirrettiin mahdollisimman lähelle näytettä avaamalla iskurin etäisyyden säädön lukitusvipu ja liikkuttamalla näytettä etäisyyden säätimestä sopivaan kohtaan (kuvat 12 ja 21). Iskuri ei saa aloitusasemassaan kuitenkaan koskettaa näytteen pintaa. Iskurin etäisyyden lukitusvipu lukittiin, laitteen suojakansi suljettiin ja ohjelma käynnistettiin.



KUVA 20. Ohjelmaan kirjattiin näytetiedot ja asetettiin halutut parametrit (Kuva: Johanna Niemi).



KUVA 21. Näyte asetettuna messinkilevyjen väliin (Kuva: Johanna Niemi).

Jokaisen parametriyhdistelmän näytteet mitattiin peräkkäin. Ensimmäisten testisarjojen (sekoitus 1 ja sekoitus 2) testaamisen jälkeen tuloksista piirrettiin P-arvon kuvaajat syklimäärän funktiona syklivälillä 1 000–3 000 sykliä, laskettiin rinnakkaisten näytteiden keskiarvot 3 000 syklin kohdalla ja kuvattiin näytteet. Eri

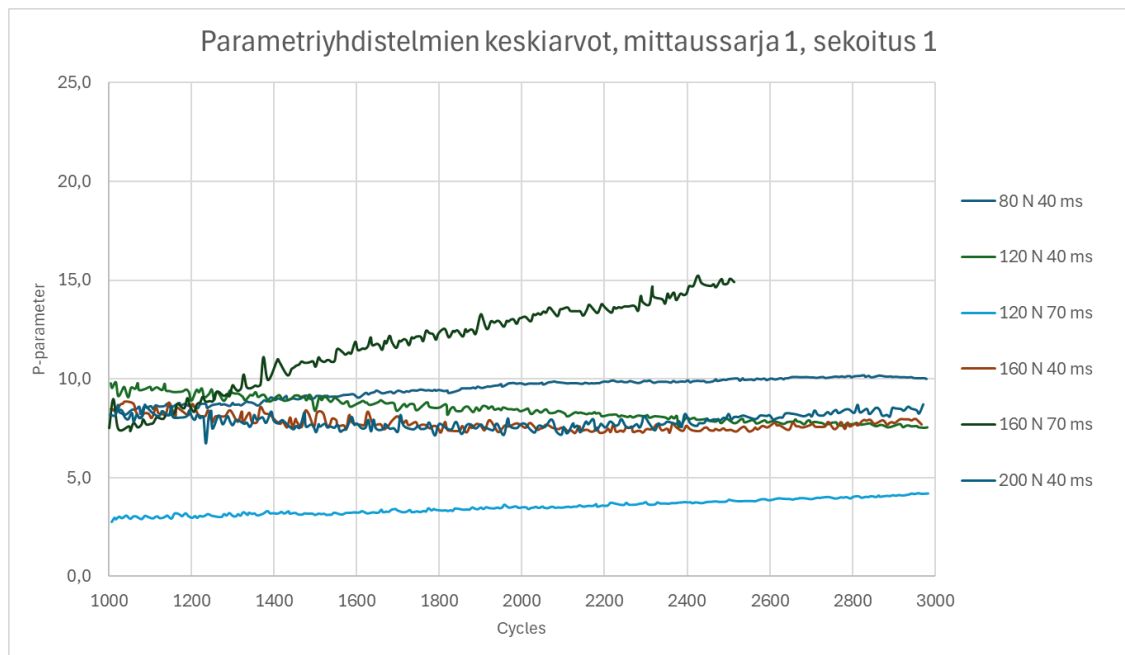
parametrijhdistelmien tuloksia verrattiin toisiinsa sekoituksittain. Ensimmäisissä testisarjoissa käytettiin normaalivoimia suurella skaalalla, joten molempien sekoitusten toiseen testisarjaan koettiin tarpeelliseksi lisätä parametrijhdistelmiä tarkentavan tiedon saamiseksi mm. voimien 120 N ja 160 N väliltä eri kontaktiajoilla.

Toisen testisarjan jälkeen kaikki tulokset koottiin yhteen sekoituksittain. Standardiparametrien määrittäminen suoritettiin siten, että ensin poissuljettiin selkeästi epäsoyvät parametrijhdistelmät ja lopuista valittiin parametrijhdistelmä, jolla mittaamalla saatiin näytteeseen näkyviin paloja irrottavaa CC-kulumista ja P-arvon tasoksi sellainen, että tuotekehitystyössä on mahdollista saada näkyviin sekä suuremman että pienemmän tulostason tuloksia.

## 8 ICCA-TESTITULOKSET

### 8.1 Sekoitus 1

Kuviossa 9 esitetään ensimmäisen testikierroksen testiparametreilla tehdyt mitaukset sekoituksesta 1. P-arvon kuvaajat ovat kolmen rinnakkaisen näytteen keskiarvoja lukuun ottamatta liian voimakkaan kulumisen vuoksi keskeytettyä testiä (160 N 70 ms).








KUVIO 9. Sekoituksen 1 P-arvojen keskiarvokuvaajat eri testiparametriyhdistelmillä.

Kuviosta 9 erottuu yksi selvästi alhaisen P-arvon kuvaajaa, jonka testiparametrit ovat 120 N ja 70 ms. P-arvoltaan välille 7,5 N/sykli – 10 N/sykli asettuu neljän eri parametriyhdistelmän tulos. Niissä on havaittavissa pieniä eroja kuvaajien tasaisuuksissa.

Taulukossa 7 on esitetty ensimmäisen testisarjan P-arvojen keskiarvolukemat 3 000 syklin kohdalla ja näytteiden kuvat. Taulukon ylimpänä on korkeimman P-arvon tuottava näyte jne. Näytteiden kulumistasoissa on näkyvissä selkeitä eroja. Taulukosta voidaan huomata, että P-arvon suuruus ja kulumisen määrä visuaalisesti tarkasteltuna eivät ole tässä otoksessa suoraan verrannollisia. Toisaalta

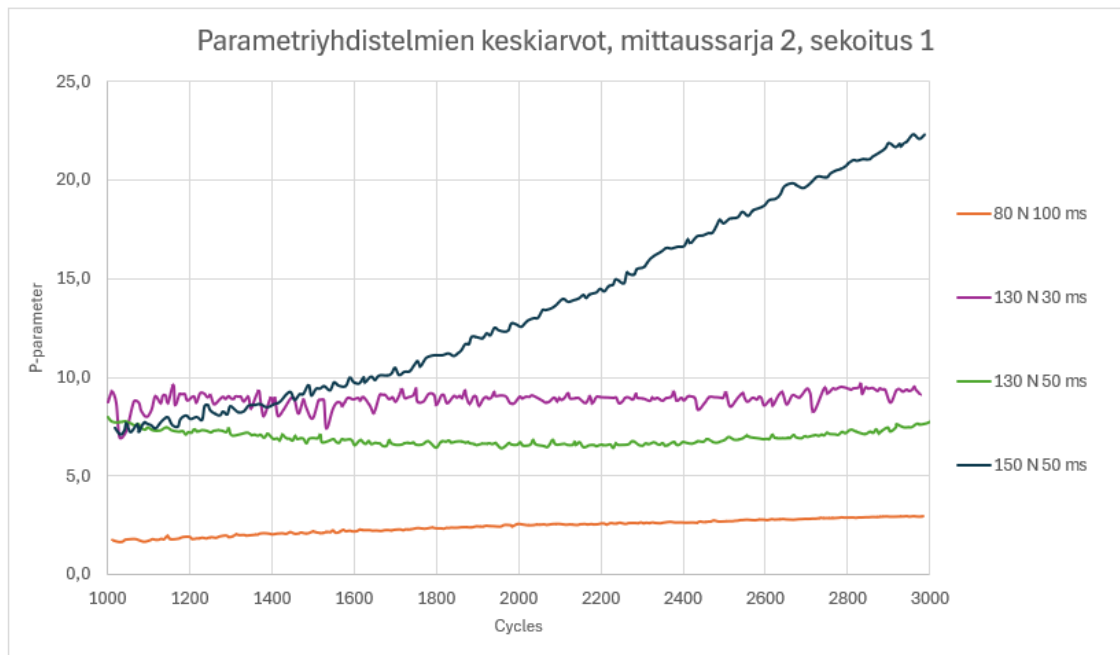
erot P-arvoissa ovat pieniä. Parametriarvoilla 80 N ja 40 ms ei saavutettu näytteeseen varsinaista kulumista ja P-arvojen keskiarvo oli 9,99 N/sykli, mikä on suurempi kuin paljon suuremmalla voimalla testattu näyte 200 N ja 40 ms, jonka P-arvojen keskiarvo oli 8,71 N/sykli.

TAULUKKO 7. Sekoituksen 1 P-arvojen keskiarvolukemat parametriyhdistelmittäin 3 000 syklin kohdalla ensimmäisessä testisarjassa (Kuvat: Johanna Niemi).

Parametrimuuttujat	P-arvojen keskiarvo	Näyte
160 N 70 ms	14,90 N/sykli (testin keskeytys)	
80 N 40 ms	9,99 N/sykli	
200 N 40 ms	8,71 N/sykli	
160 N 40 ms	7,70 N/sykli	
120 N 40 ms	7,57 N/sykli	
120 N 70 ms	4,20 N/sykli	

Näiden tulosten jälkeen haluttiin tehdä lisäselvitystä esimerkiksi siitä, kuinka paljon kontaktiajan selkeä pidentäminen vaikuttaa 80 N:n mittauksessa. Lisäksi haluttiin lisätietoa voimien 120 N ja 160 N väliltä. Toiseen testisarjaan määritettiin testiparametrit 80 N ja 100 ms, 130 N ja 30 ms, 130 N ja 50 ms sekä 150 N ja 50 ms. Niiden tulokset esitetään kuviossa 10. Siitä voidaan havaita, että kontaktiajan lisääminen 80 N:lla suoritettuun testiin antaa huomattavasti matalamman P-arvon, mikä tarkoittaa pienempää alttiutta CC-kulumiselle. Kyseisen näytteen pinnan kulumisessa ei ole havaittavissa juurikaan eroa. 150 N:n ja 50 ms:n parametrit tuottivat selkeästi nousevan kuvaajan, mikä tarkoittaa, että alttius CC-kulumiselle voimistuu syklien myötä. 130 N:n ja 30 ms:n sekä 130 N:n ja 50 ms:n








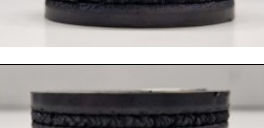
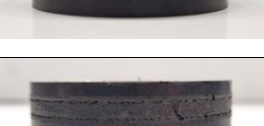

kuvaajat asettuvat testisarjassa 1 mitattujen näytteiden keskitason tulosten joukkoon.



KUVIO 10. Sekoituksen 1 P-arvojen toisen testisarjan keskiarvokuvaajat parametrijhdistelmittäin.

Taulukossa 8 esitetään kaikki sekoituksesta 1 tehtyjen mittausten keskiarvotulokset ja näytteiden kuvat parametrikohteisesti järjestettynä siten että ylimpänä on suurimman P-arvon saavuttanut näyte.

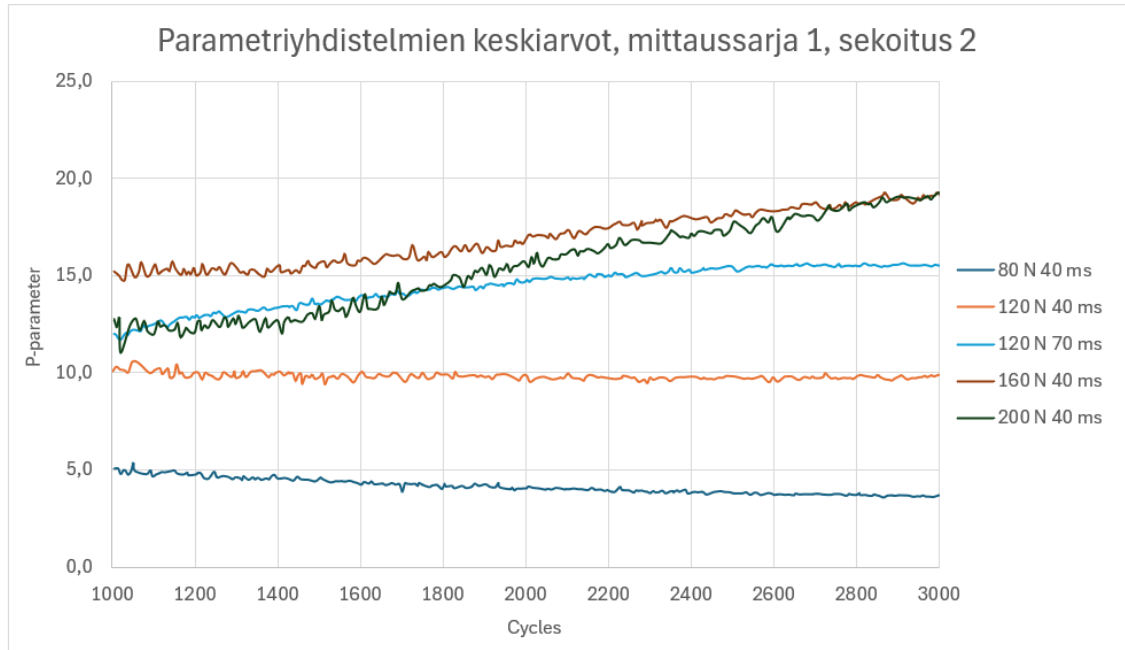
TAULUKKO 8. Kaikki sekoituksen 1 P-arvojen keskiarvolukemat parametrijhdistelmittäin 3 000 syklin kohdalla sekä kuvat näytteistä (Kuvat: Johanna Niemi).

Parametrimuuttujat	P-arvojen keskiarvo	Näyte
150 N 50 ms	22,3 N/sykli	
160 N 70 ms	14,90 N/sykli (testin keskeytys)	
80 N 40 ms	9,99 N/sykli	
130 N 30 ms	9,14 N/sykli	
200 N 40 ms	8,71 N/sykli	
160 N 40 ms	7,70 N/sykli	
120 N 40 ms	7,57 N/sykli	
130 N 50 ms	7,8 N/sykli	
120 N 70 ms	4,20 N/sykli	
80 N 100 ms	2,93 N/sykli	

## 8.2 Sekoitus 2

Sekoituksen 2 ensimmäisen testisarjan tulokset P-arvon kuvaajina esitetään kuviossa 11. Kuvaajat ovat kolmen rinnakkaisen näytteen keskiarvoja. Kuviosta havaitaan kaksi nousevaa kuvaajaa parametreilla 160 N ja 40 ms sekä 200 N ja 40 ms. Molemmilla parametrijhdistelmillä saavutettiin sama alttius CC-kulumiselle 3 000 syklin kohdalla, vaikka testausvoimissa on huomattava ero. Muilla para-

metriyhdistelmillä saavutettiin tasaisemmat kuvaajat. 80 N:n ja 40 ms:n parametreilla P-arvotulos on hyvin alhainen, ja näytteen pinnassa on näkyvissä vain viiltoja jälkiä (taulukko 9). 200 N:n ja 40 ms:n parametreilla näyte kului voimakkaasti, ja iskurin syvyys kontaktin aikana oli jo lähellä laitteen maksimiarvoa.

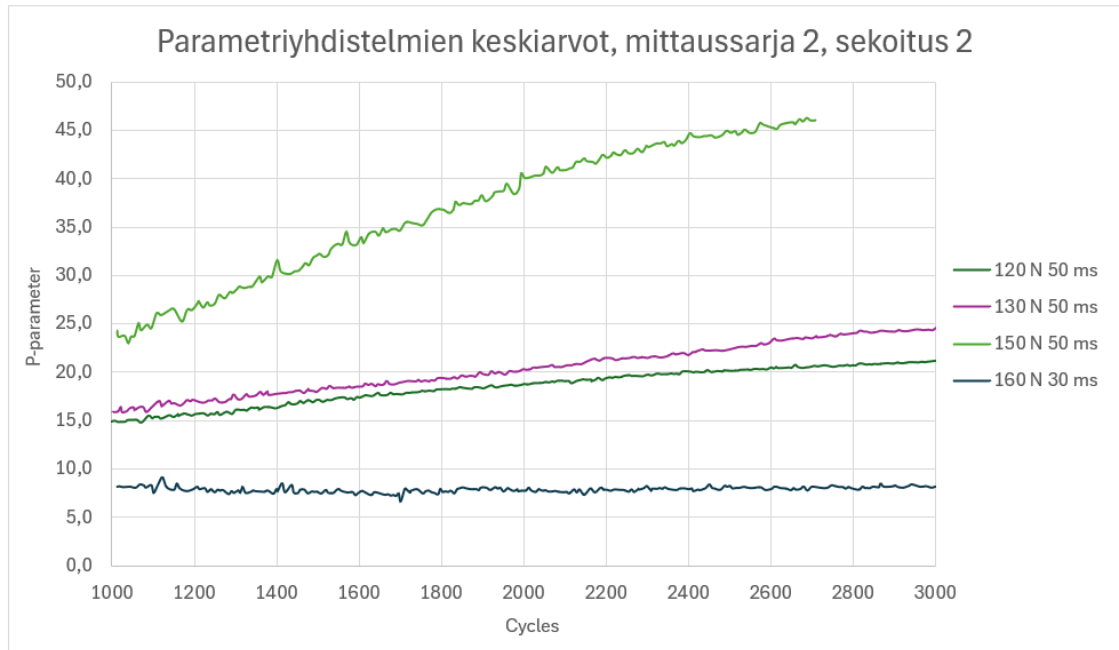


KUVIO 11. Sekoituksen 2 ensimmäisen testisarjan P-arvojen keskiarvokuvaajat.

TAULUKKO 9. Sekoituksen 2 P-arvojen keskiarvolukemat parametriyhdistelmittäin 3 000 syklin kohdalla ensimmäisessä testisarjassa (Kuvat: Johanna Niemi).

Parametrimuuttujat	P-arvojen keskiarvo	Näyte
160 N 40 ms	19,40 N/sykli	
200 N 40 ms	19,28 N/sykli	
120 N 70 ms	15,51 N/sykli	
120 N 40 ms	9,96 N/sykli	
80 N 40 ms	3,62 N/sykli	




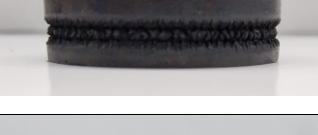
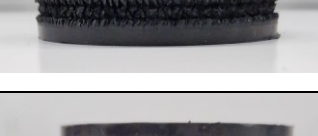
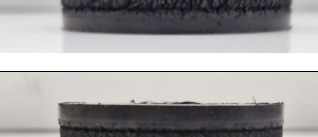
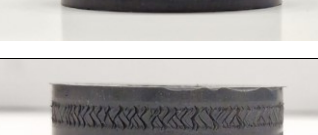
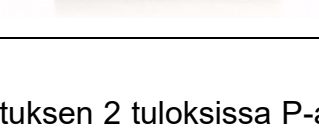
Sekoituksen 2 kohdalla päädyttiin myös testaamaan lisää näytteitä. Haluttiin saada lisää dataa voimien 120 N ja 160 N väliltä pienillä kontaktiajan muutoksilla. Toiseen testisarjaan valittiin parametriyhdistelmiksi 120 N ja 50 ms, 130 N ja 50 ms, 150 N ja 50 ms sekä 160 N ja 30 ms. Niiden keskiarvokuvaajat on esitetty kuviossa 12.



KUVIO 12. Sekoituksen 2 P-arvojen keskiarvokuvaajat toisella testikierroksella.

Toisen testisarjan 150 N:n ja 50 ms:n arvoilla ajettu testi jouduttiin keskeyttämään voimakkaan kulumisen vuoksi. Parametriyhdistelmä 160 N ja 30 ms antoi alhaisen P-arvotason, ja yksittäisissä testeissä ilmeni paljon hajontaa (liite 2). 120 N:n ja 50 ms:n sekä 130 N:n ja 50 ms:n parametriyhdistelmillä kuluminen oli tasaisesti voimistuvaa. Jälkimmäisen kuluminen on näytteessä hieman voimakkaampaa (taulukko 10).

TAULUKKO 10. Sekoituksen 2 kaikki P-arvojen keskiarvolukemat parametrijhdistelmittäin 3 000 syklin kohdalla sekä kuvat näytteistä (Kuvat: Johanna Niemi).

Parametrimuuttujat	P-arvojen keskiarvo	Näyte
150 N 50 ms	46,02 N/sykli (testin keskeytys)	
130 N 50 ms	24,48 N/sykli	
120 N 50 ms	21,24 N/sykli	
160 N 40 ms	19,40 N/sykli	
200 N 40 ms	19,28 N/sykli	
120 N 70 ms	15,51 N/sykli	
120 N 40 ms	9,96 N/sykli	
160 N 30 ms	8,32 N/sykli	
80 N 40 ms	3,62 N/sykli	

Taulukon 10 mukaan voidaan havaita, että sekoituksen 2 tuloksissa P-arvon tason muutos ja näytteen kulumisen muutos visuaalisesti tarkasteltuna ovat hyvin verrannollisia toisiinsa nähden. Ainoastaan 200 N:n ja 40 ms:n parametreilla testattu näyte vaikuttaa voimakkaammin kuluneelta kuin mitä lähes saman P-arvon tuottava parametrijhdistelmän 160 N ja 40 ms näyte.

### 8.3 Standardiparametrien valinta

Kaikkien parametriyhdistelmien testauksien jälkeen arvioitiin tulokset ja tehtiin standardiparametrivalinnat. Parametrivaihtoehdoista hylättiin ensin parametrit, joilla näytteen kuluminen oli liian voimakasta, kuten sekoituksen 1 160 N ja 70 ms sekä sekoituksen 2 150 N ja 50 ms. Parametriyhdistelmien, joilla näytteeseen ei aiheutunut selkeää kulumista, ei myöskään katsottu soveltuvan parhaiten standardiparametriksi. Muita poissulkevia seikkoja olivat runsas vaihtelu yksittäisen näytteen testissä ja suuri hajonta kolmen rinnakkaisen näytteen tuloksissa.

Standardiparametrien valinta on luottamuksellista tietoa, jota ei tässä opinnäytetyössä julkaista. Sekoitusten 1 ja 2 kaikkien parametriyhdistelmien yksittäisten näytteiden kuvaajat ja näytteistä otetut kuvat esitetään liitteissä 1 ja 2.

### 8.4 Menetelmän toistettavuus

Toistettavuustarkastelua varten valmistettiin 18 näytettä samasta sekoituserästä. Kaikki näytteet testattiin samalla parametriyhdistelmällä ICCA-laitteella yhden päivän aikana. Tuloksista laskettiin keskihajonta 1 500:n, 2 500:n ja 3 000:n syklin kohdalla kaavalla 1 ja suhteellinen keskihajonta kaavalla 2. Tulokset (taulukko 11) osoittavat, että menetelmän tuloksissa on paljon hajontaa.

TAULUKKO 11. Toistettavuusmittausten tulokset.

Näyte	P-arvo (N/sykli) 1 500 syklissä	P-arvo (N/sykli) 2 500 syklissä	P-arvo (N/sykli) 3 000 syklissä
1	9,16	17,48	21,04
2	9,58	13,99	16,87
3	11,25	17,13	20,01
4	10,49	18,41	20,74
5	7,58	13,94	17,52
6	11,38	19,52	23,17
7	9,46	14,42	17,38
8	10,64	17,99	21,71
9	10,75	20,73	23,10
10	10,96	18,53	21,03
11	9,16	18,23	22,37
12	11,43	18,95	21,86
13	10,57	15,66	18,27
14	10,45	20,61	20,42
15	10,58	17,97	22,32
16	11,73	19,86	20,87
17	11,48	18,46	19,83
18	11,38	17,91	18,97
Keskihajonta	1,08	2,07	1,95
Suhteellinen keski- hajonta (%)	10,3 %	11,6 %	9,53 %

## 9 NOKIAN RENKAIDEN CC-TESTAUSMENETELMÄ

ICCA-laitteelle luotu menetelmä pitää sisällään CC-kulumiskestävyyden määrittämisen ICCA:lla tässä opinnäytetyössä määritetyillä sekoituskohtaisilla normaalivoiman ja kontaktiajan arvoilla sekä muiden parametrien osalta taulukon 12 mukaisilla vakioparametreilla. Näytteet valmistetaan ja vulkanoidaan Nokian Renkaiden tuotekehityslaboratorioon laaditun työohjeen mukaisesti. Lopulliset sekoituskohtaiset standardiparametrivalinnat sekä työohje ovat salassa pidettävää tietoa, jota ei tässä opinnäytetyössä esitetä.

TAULUKKO 12. Standardiparametrit

Pyörimisnopeus (min <sup>-1</sup> )	Normaalivoima (N)	Iskutaajuus (Hz)	Kontaktiaika (ms)	Syklimäärä
200	sekoituskohtainen	5	sekoituskohtainen	3 000

Menetelmän tuloksena tuotekehitystyössä tullaan raportoimaan sekä yksittäisten näytteiden P-arvon kuvaajat että kolmen rinnakkaisen näytteen P-arvon keskiarvokuvaajat syklimäärän funktiona sekä näytteiden pinnan kulumisesta otettu kuva. Jos tulokseksi halutaan numeraalinen tulos, voidaan laskea esimerkiksi rinnakkaisten näytteiden keskiarvotulos halutussa syklipisteessä.

Kun ICCA-laitteella käytetään CC-kulumiskestävyyden määrittämisessä standardiparametreja, ovat kyseisten sekoitusten eri kehitystöiden tulokset keskenään vertailukelpoisia, huomioiden kuitenkin, että kyseessä on saman sekoituksen eri sekoituserät.

## 10 POHDINTA

Työssä määritettiin standardiparametrit kahdelle pintasekoitukselle tuotekehitystyötä varten. Näitä parametreja käyttämällä sekoituksen eri kehitysversiot saadaan CC-kulumisen suhteen paremmuusjärjestykseen, joten tässä opinnäytetyössä tavoitteena ollut menetelmän luominen ICCA-laitteelle saavutettiin. Menetelmästä kirjoitettiin työohje ja pidettiin käyttökoulutus laitetta käyttäville tekniikoille. ICCA-laite otettiin heti käyttöön niiden kahden sekoituksen osalta, joille parametrimääritys tehtiin. Puolen vuoden kuluttua ICCA-laitteen käyttöönotosta arvioidaan menetelmän mahdollinen jatkokehitystarve siihen mennessä saadun datan ja käyttökokemusten pohjalta.

Parametrien määrittämistä varten mittauksia tehtiin kaksi testikierrosta, mikä osoittautui hyväksi menetelmäksi saada ymmärrystä ICCA-laitteen tuottamasta datasta sekä normaalivoiman ja kontaktiajan vaikutuksista näytteen kulumiseen. Molempien sekoitusten kohdalla ensimmäisen kierroksen testisarja oli hyvää kartoitusta CC-kulumisen koko skaalasta. Niissä saavutettiinkin sekä liiallista että liian pientä kulumista. Niiltä osin testiparametrien valinta onnistui hyvin.

Toiselle testikierrokselle valittiin parametriyhdistelmiä, joilla saatiin tarkentavia tuloksia aiempien rinnalle. Varsinkin toisen testikierroksen tuloksien arvioinnin jälkeen voitiin tehdä joitakin johtopäätöksiä. Esimerkiksi sekoituksesta 1 saadut pienimmän voiman (80 N) testien (40 ms ja 100 ms) tulokset osoittavat, että 80 N on sekoitukselle liian alhainen, koska kontaktiajan muutoksellakaan ei saatu näytteisiin kunnollista kulumisjälkeä, joten varsinainen CC-ilmiö ei 80 N:n voimalla käynnistynyt. Sekoituksen 1 suuremmilla voimilla (120 N, 130 N ja 160 N) tehdyt testit osoittavat, että voiman pysyessä samana ja vain kontaktiaikaa pidentämällä saadaan kyseisen sekoituksen näytteessä aikaan suurempaa kulumista.

Monilla hyvinkin erilaisilla parametriyhdistelmillä päästiin lähes samaan P-arvon keskiarvotulokseen 3 000 syklin kohdalla. Esimerkiksi sekoituksen 1 parametreilla 120 N ja 40 ms, 130 N ja 50 ms, 160 N ja 40 ms sekä 200 N ja 40 ms saatiin kaikilla samanmuotoinen kuvaaja ja P-keskiarvotulokset osuvat välille 7,57

N/sykli - 8,71 N/sykli. Tulokset olivat yllättäviä, koska voimien erot olivat suuret. Tämä hankaloitti myös standardiparametrien valintaa. Eroja löytyi hieman kyseisten näytteiden kulumistasoista ja kuvaajan tasaisuudesta.

Tavoitteen saavuttamisen kannalta ei näiden testien perusteella ole suurta merkitystä, mikä neljästä samaan tulokseen pienillä eroilla johtavista parametriyhdistelmistä valitaan standardiparametreiksi sekoitukselle 1. Sen sijaan jatkokehityksen kannalta on ensiarvoisen tärkeää selvittää, että laboratoriotestauksessa käytetään parametriyhdistelmiä, joiden tulokset korreloivat kenttätestien tuloksien kanssa.

ICCA-laitteen tulosten korrelaatio kentällä tapahtuvaan renkaan kulumiseen on tämän menetelmän jatkokehitystä. Stocekin ym. (2021) julkaisussa korrelaation sanotaan olevan hyvä ICCA:n P-arvon ja kenttätestien välillä, mutta yksityiskohtia ei julkaisuissa voi avata luottamuksellisuuskäytöksi. Niinpä jatkossa korrelaation määrittämiseksi on tärkeää kerätä kenttätesteistä dataa ja esimerkiksi tehdä samoista sekoitusversiosta ICCA-testausta. ICCA:n tuloksia, näytteiden kulumista ja renkaan kulumista vertailemalla voidaan tarkastella ovatko ICCA:lle valitut standardiparametrit myös kenttätestien korreloinnin kannalta sopivimmat.

Liitteistä 1 ja 2 sekä toistettavuusmittauksista huomataan, että rinnakkaisten näytteiden tuloksissa on hajontaa. Toistettavuusmittausten tuloksissa (taulukko 11) keskihajonta kasvaa syklimäärän kasvaessa. Pienimmillään poikkeama keskiarvosta on 1 500 syklin kohdalla, jossa keskihajonta on 1,08 ja suurimmillaan 2 500 syklin kohdalla 2,06. CC-kuluminen on tyypiltään epätasaista kulumista ja irtoavat partikkelit ovat kooltaan suurempia kuin esimerkiksi hankaavissa kulumistesteissä, mikä saattaa osin selittää P-arvon hajontaa. Asia on tärkeä tiedostaa tulosten analysoinnissa. Yhtenä ratkaisuna voisi olla rinnakkaisten näytteiden määrän lisääminen, jolloin keskiarvotulos olisi luotettavampi. Siinä tapauksessa olisi pohdittava, kuinka monta näytettä on testattava luotettavuuden nostamiseksi, ja paljonko enemmän työtä ja aikaa sen saavuttamiseksi on kannattavaa käyttää.

Kenttätestien korrelaation selvittämisen lisäksi toinen jatkokehitys ICCA:lla voisi olla IR-mittarin käyttö CC-mittauksessa. IR-mittari mittaa näytteen pinnan lämpötilaa kulutuksen aikana. Tämä voisi tuoda uudenlaista tietoa eri pintasekoitusten lämmönkehityksestä kovissa olosuhteissa ja lämmönkehityksen vaikutuksesta CC-ilmiöön. ICCA-laitteessa näytteen kuluttaminen tapahtuu suljetun kannen alla melko pienessä tilassa, jossa ei ole varsinaista ilmanvaihtoa. Tämä voi aiheuttaa joillekin sekoituksille voimakkaampaa lämpenemistä, jota todellisudessa renkaalle ei pääse tapahtumaan. IR-mittarin käyttö voi paljastaa tällaiset tilanteet ja ne voidaan huomioida tuloksia analysoidessa.

## LÄHTEET

Bareis North America. n.d. Abrasion tester. Verkkosivu. Viitattu 8.10.2024.  
<https://www.bareiss-testing.com/product/abrasion-tester/>

CEW. n.d. The science behind tread compounds on passenger tires. Verkkosivu. Viitattu 30.9.2024.  
<https://www.cewheelsinc.com/industry-news-blog/the-science-behind-tread-compounds-on-passenger-tires/>

Coesfeld Materialtest. n.d. User Manual. ICCA Instrumented Chip and Cut Analyzer.

Coesfeld Materialtest. 2020. Operating Manual. Instrumented Chip & Chunk Analyzer.

Continental-tires. n.d. Tire components. Verkkosivu. Viitattu 29.9.2024.  
<https://www.continental-tires.com/products/b2c/tire-knowledge/tire-components>

Diagno. n.d. Digitaalinen renkaan urasyvyysmittari. Verkkosivu. Viitattu 27.10.2024. <https://www.diagno.fi/tyokalut/erikoistyokalut/mittavalineet/12206/digitaalinen-renkaan-urasyvyysmittari>

DIN 53516. 1987. Determination of abrasion resistance. Standardi. Deutsches Institut für Normung. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www.scribd.com/document/491624773/DIN-53516-1987>

Goodyear. n.d. How are tires made? Verkkosivu. Viitattu 28.9.2024.  
[https://www.goodyear.com/en\\_US/learn/tire-basics/how-are-tires-made.html](https://www.goodyear.com/en_US/learn/tire-basics/how-are-tires-made.html)

ISO 23233. 2016. Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of abrasion resistance using driven vertical abrasive disc. Standardi. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:23233:ed-2:v1:en>

Jaarinen, S. & Niiranen, J. 2005 Laboratorion analyysitekniikka. 5. painos. Helsinki: Edita

Laurila, T. 2007. Kumitekniikka. Lyhyt johdatus kumitekniikan perusteisiin. Opetushallitus. Helsinki.

Lee, S.W., Jeong, K.M., Kim, K-W., Kim, J.H. 2018. Numerical Estimation of the Uneven Wear of Passenger Car Tire 06(04):780-793 [https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-a-passenger-car-tire\\_fig2\\_328739421](https://www.researchgate.net/figure/The-structure-of-a-passenger-car-tire_fig2_328739421)

Michelin. n.d. Pyörien tasapainotus. Verkkosivu. Viitattu 26.9.2024.  
<https://www.michelin.fi/auto/ohjeita/renkaiden-hoito/pyorien-suuntaus-renkaiden-tasapainotus>

Nokian Renkaat Oyj. n.d.a. Testaus. Verkkosivu. Viitattu 26.10.2024.  
<https://yritys.nokianrenkaat.fi/tietoa-meista/innovaatiot/testaus/>

Nokian Renkaat Oyj. n.d.b. Mikä tehtävä on renkaiden kulutuspinnan urilla? Verkkosivu. Viitattu 2.12.2024.

<https://www.nokianrenkaat.fi/innovatiivisuus/rengastietoa/kayttovinkkeja/mika-tehtava-on-renkaiden-kulutuspinnan-urilla/>

Nokian Renkaat Oyj. n.d.c. EU uudet rengasmerkinnät. Viitattu 9.3.2025.

<https://www.nokianrenkaat.fi/innovatiivisuus/rengastietoa/eu-uudet-rengasmerkinnat/mika-eu-talvirengasmerkinta-on/>

Renkaat vaihtoon. 2002. Rengaskoulu. Verkkosivu. Viitattu 26.9.2024

<https://www.renkaatvaihtoon.fi/tyreschool#renkaan-rakenne>

Ryzí, N., Stoček, R., Maloch, J. How does heat generation affect the cut and chip wear of rubber? Polymer Bulletin. (2024).

<https://doi.org/10.1007/s00289-024-05498-1>

Stoček, R., Mars, W., Kipscholl, R. & Robertson, C. 2018a. Characterisation of cut and chip behavior for NR, SBR and BR compounds with an instrumented laboratory device. *Plastics, Rubber and Composites: Macromolecular Engineering*. ISSN:1465-8011. Online:1743-2898.

Stoček, R., Mars, W., Kipscholl, R. & Robertson, C. 2018b. Characterizing rubber's resistance against chip and cut behavior. *Rubber World*. The technical service magazine for the rubber industry 257 (4), 38-40.

Stoček, R., Heinrich, G., Kipscholl, R. & Kratina, O. 2021. Cut & Chip wear of rubbers in a range from low up to high severity conditions. Verkkosivu. Viitattu 3.8.2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666523921000982>

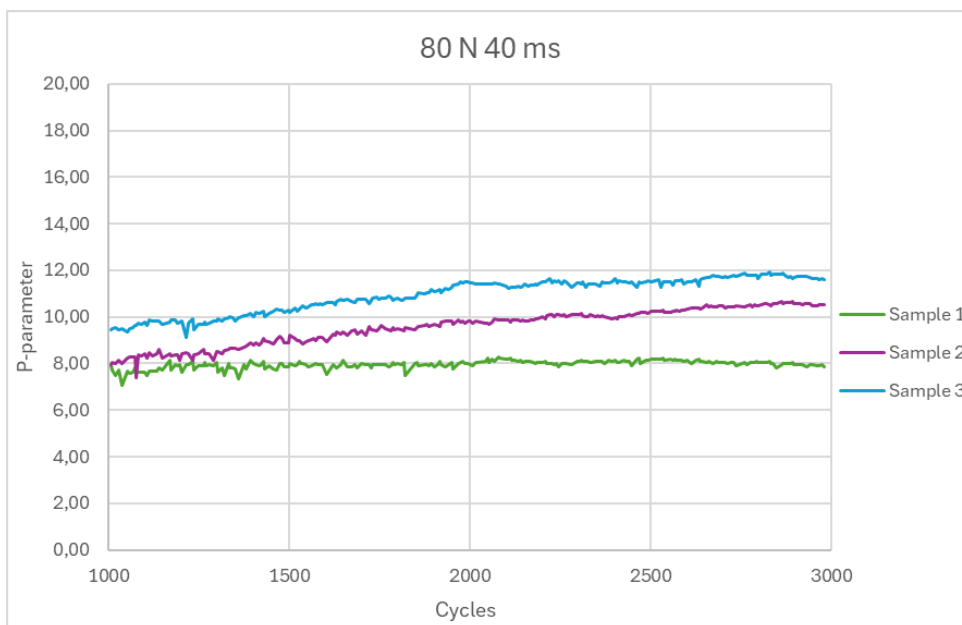
The Poling Group. n.d. Laboratory endurance tester. Verkkosivu. Viitattu 27.10.2024. [https://www.polinggroup.com/testing\\_end\\_pclt](https://www.polinggroup.com/testing_end_pclt)

Tomorrows Tech. 2015. Tire Tread Wear: Causes And Symptoms. Verkkosivu. Viitattu 27.10.2024. <https://www.tomorrowstechnician.com/tire-tread-wear-causes-and-symptoms/>

VMI-Group. n.d. VMI retrofits. Verkkosivu. Viitattu 8.10.2024. <https://vmi-group.com/specifications/vmi-retrofits/>

## LIITTEET

### Liite 1. Tulokset sekoituksesta 1

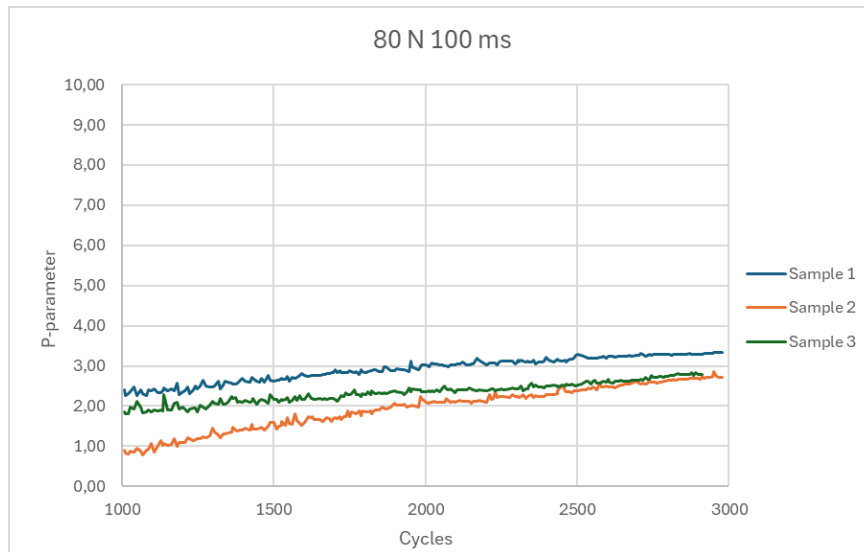


KUVIO 13. Kuvaajat parametreilla 80 N ja 40 ms.



KUVA 22. Parametreilla 80 N ja 40 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

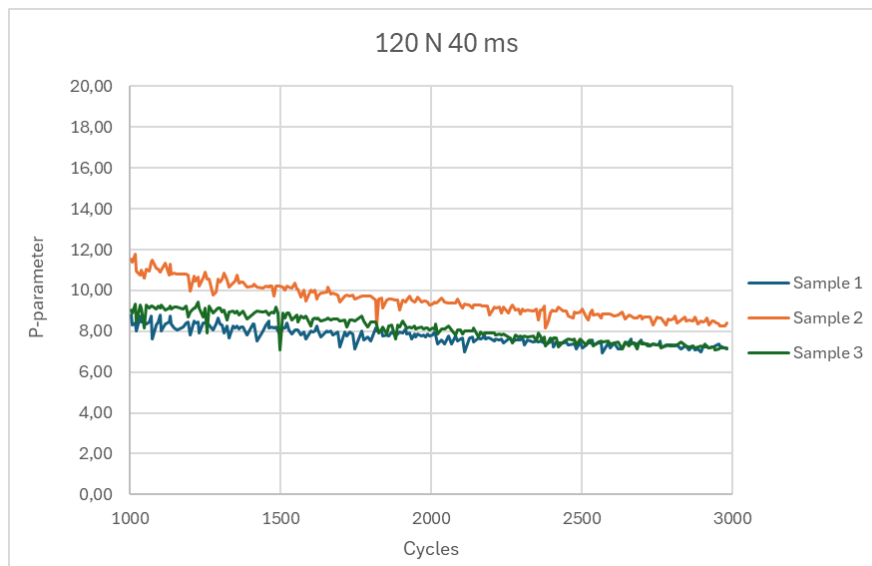
2(6)



KUVIO 14. Kuvaajat parametreilla 80 N ja 100 ms.



KUVA 23. Parametreilla 80 N ja 100 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

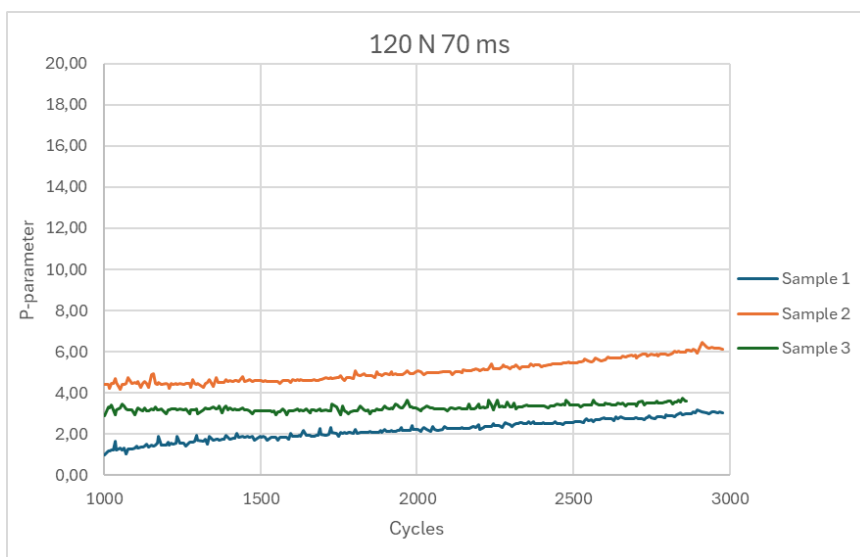


KUVIO 15. Kuvaajat parametreilla 120 N ja 40 ms.



KUVA 24. Parametreilla 120 N ja 40 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

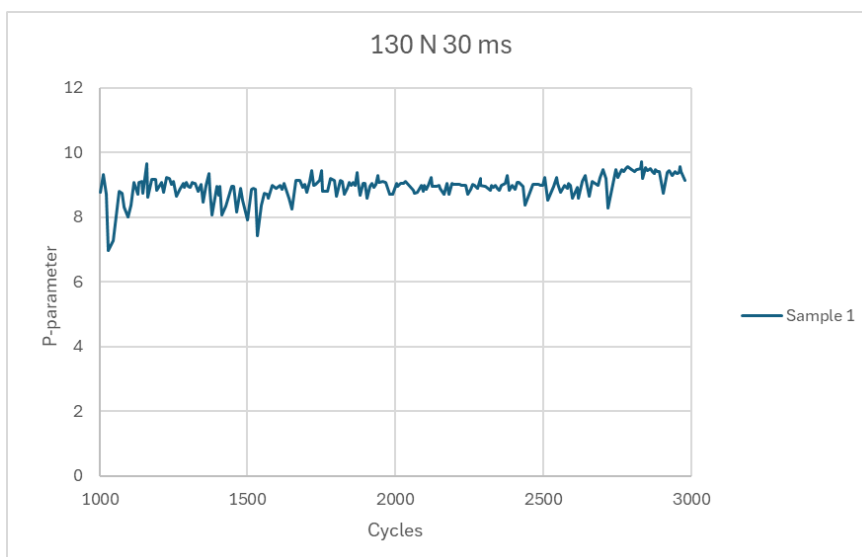
3(6)



KUVIO 16. Kuvaajat parametreilla 120 N ja 70 ms.



KUVA 25. Parametreilla 120 N ja 70 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

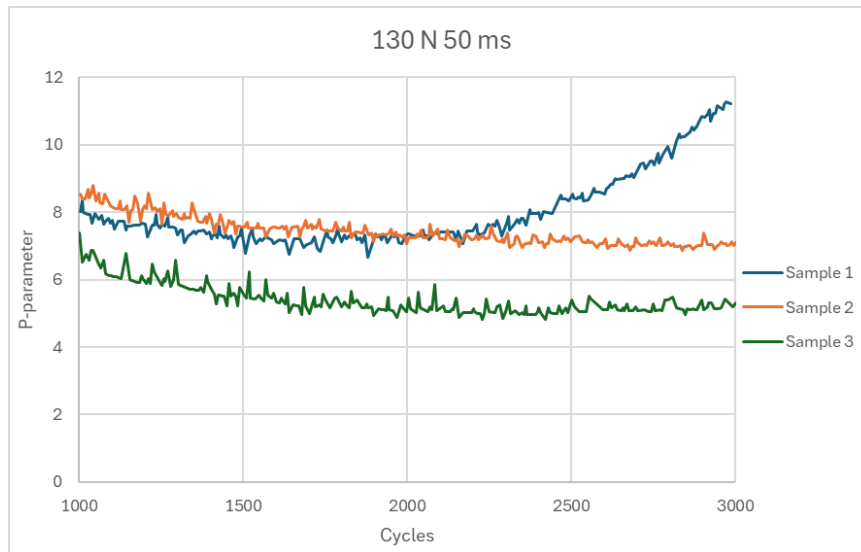


KUVIO 17. Kuvaaja parametreilla 130 N ja 30 ms.



KUVA 26. Parametreilla 130 N ja 30 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

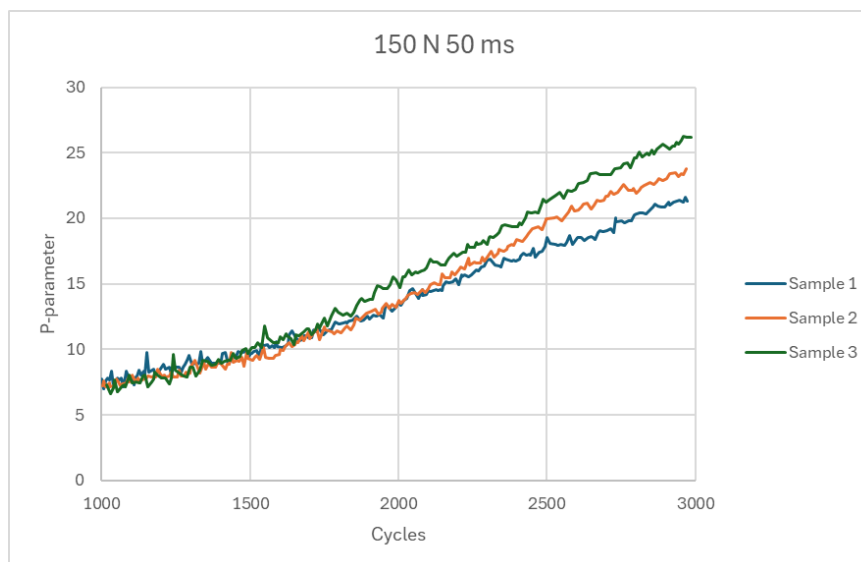
4(6)



KUVIO 18. Kuvaajat parametreilla 130 N ja 50 ms.



KUVA 27. Parametreilla 130 N ja 50 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

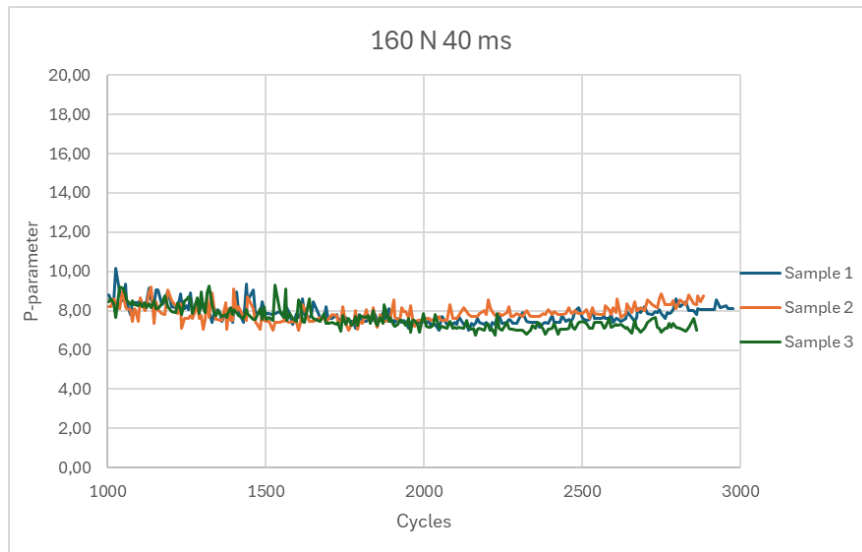


KUVIO 19. Kuvaajat parametreilla 150 N ja 50 ms.



KUVA 28. Parametreilla 150 N ja 50 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

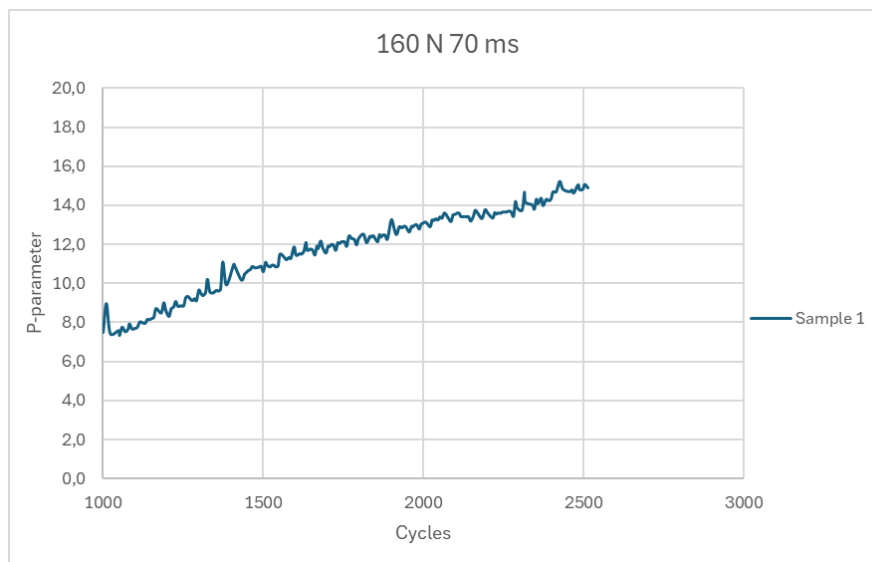
5(6)



KUVIO 20. Kuvaajat parametreilla 160 N ja 40 ms.



KUVA 29. Parametreilla 160 N ja 40 ms testattu näyte (Kuva: Johann Niemi).

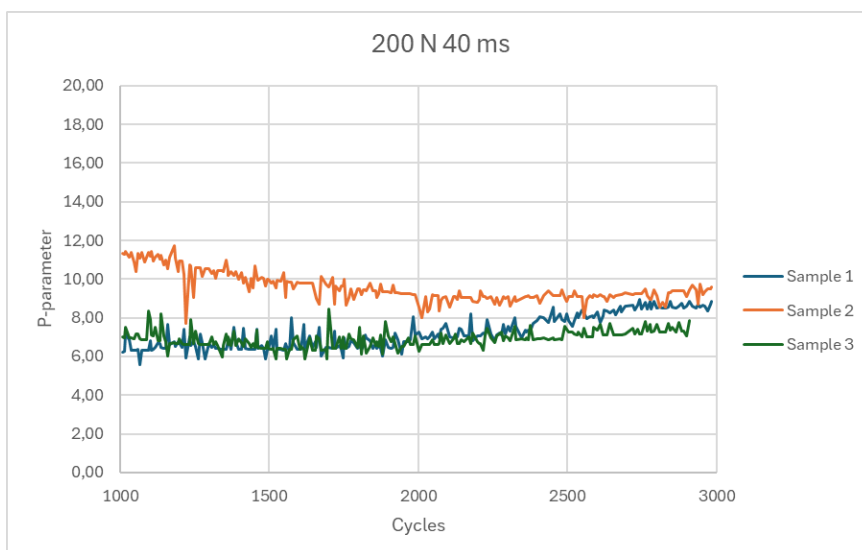


KUVIO 21. Kuvaaja parametreilla 160 N ja 70 ms, testi keskeytetty.



KUVA 30. Parametreilla 160 N ja 70 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

6(6)

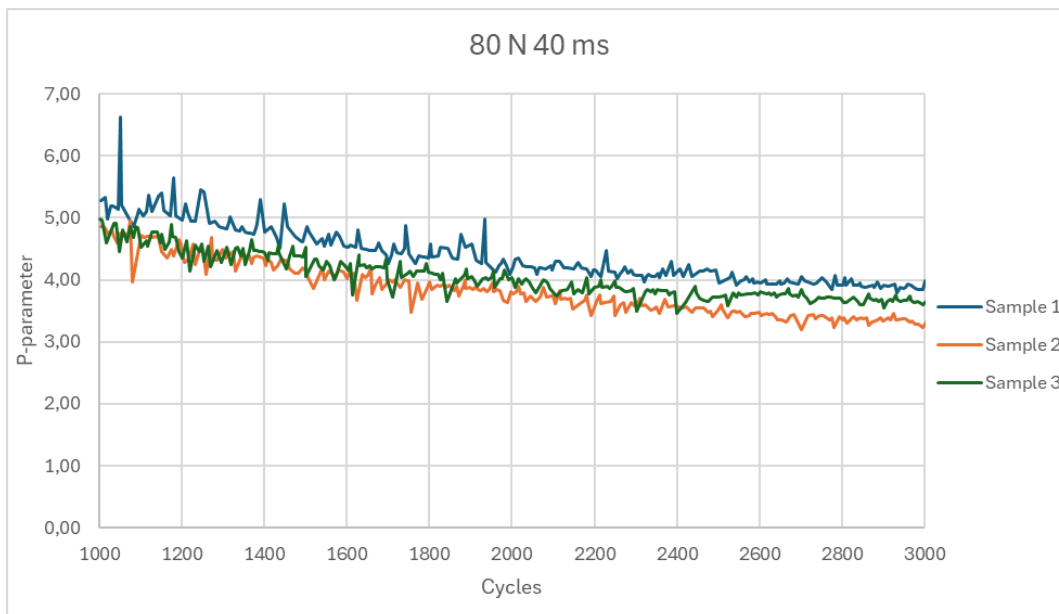


KUVIO 22. Kuvaajat parametreilla 200 N ja 40 ms.



KUVA 31. Parametreilla 200 N ja 40 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

## Liite 2. Tulokset sekoituksesta 2

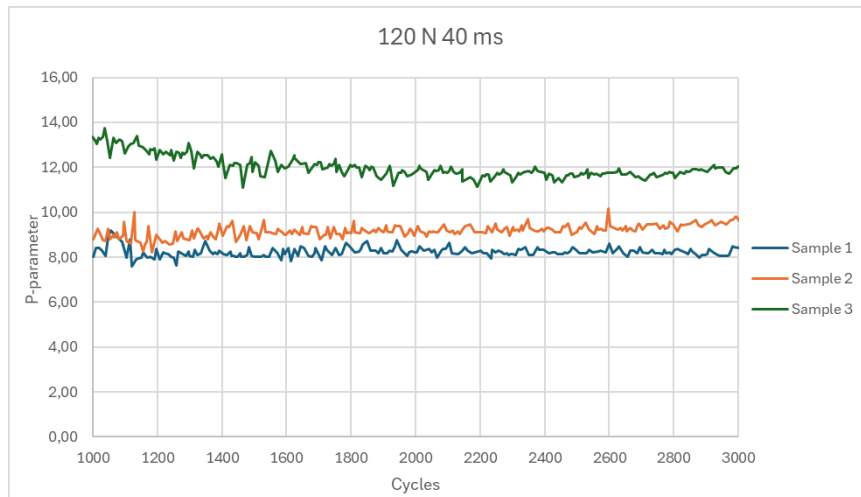


KUVIO 23. Kuvaajat parametreilla 80 N ja 40 ms.



KUVA 32. Parametreilla 80 N ja 40 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

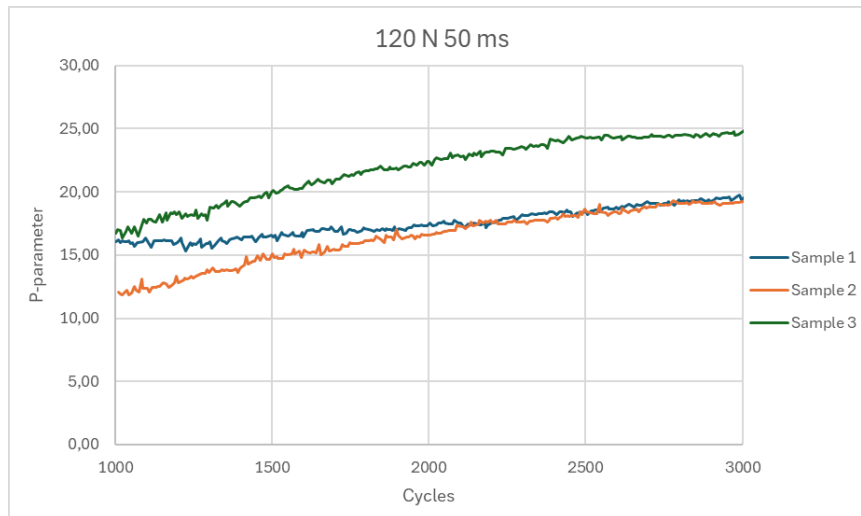
2(5)



KUVIO 24. Kuvaajat parametreilla 120 N ja 40 ms.



KUVA 33. Parametreilla 120 N ja 40 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

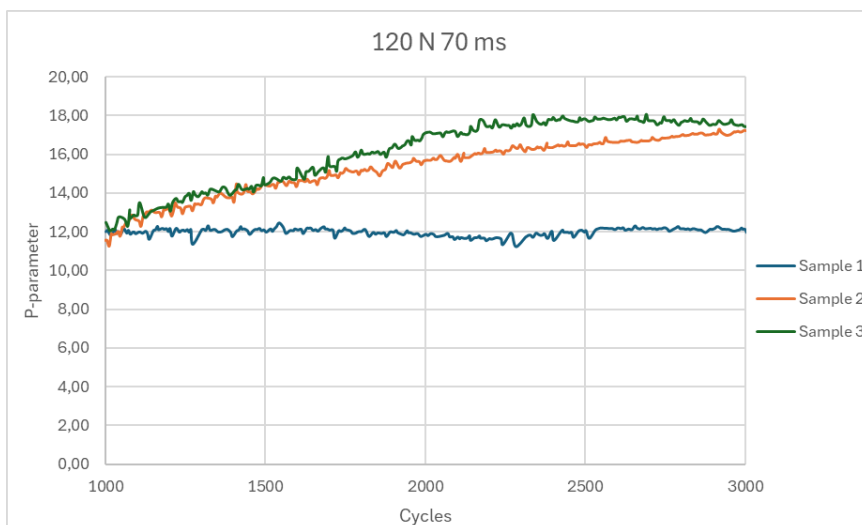


KUVIO 25. Kuvaajat parametreilla 120 N ja 50 ms.



KUVA 34. Parametreilla 120 N ja 50 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

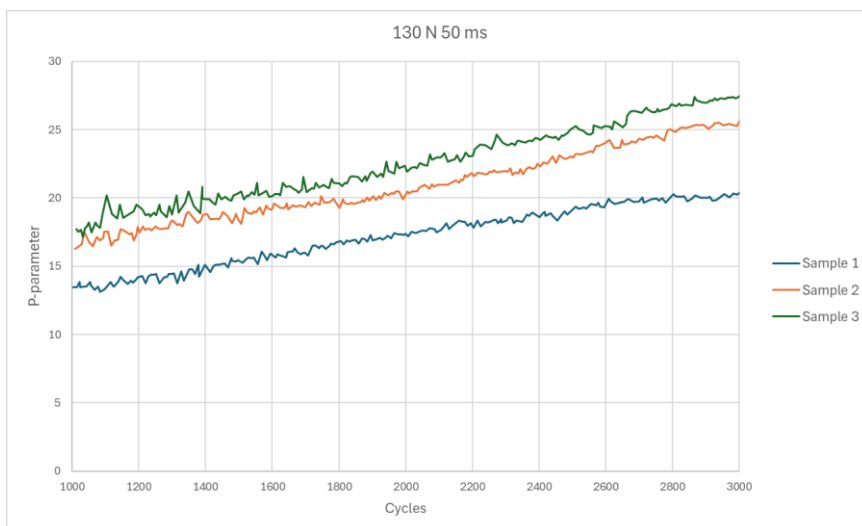
3(5)



KUVIO 26. Kuvaajat parametreilla 120 N ja 70 ms.



KUVA 35. Parametreilla 120 N ja 70 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

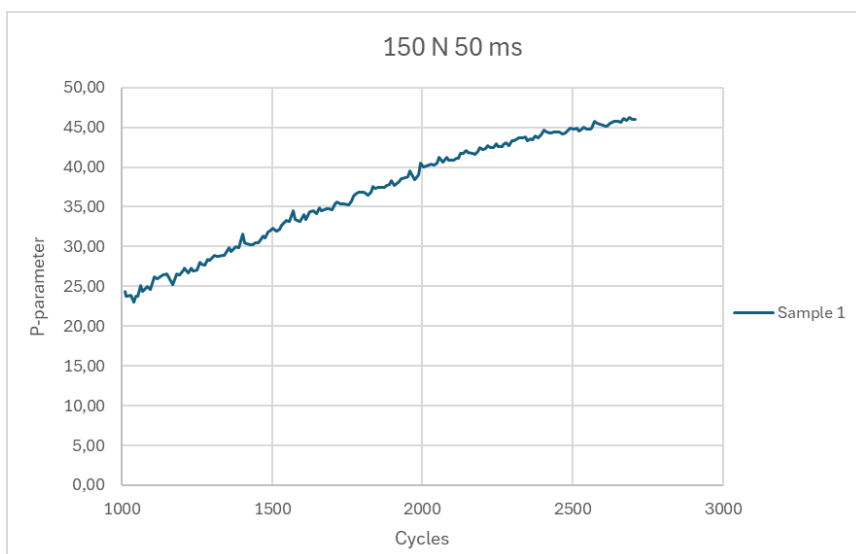


KUVIO 27. Kuvaajat parametreilla 130 N ja 50 ms.



KUVA 36. Parametreilla 130 N ja 50 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

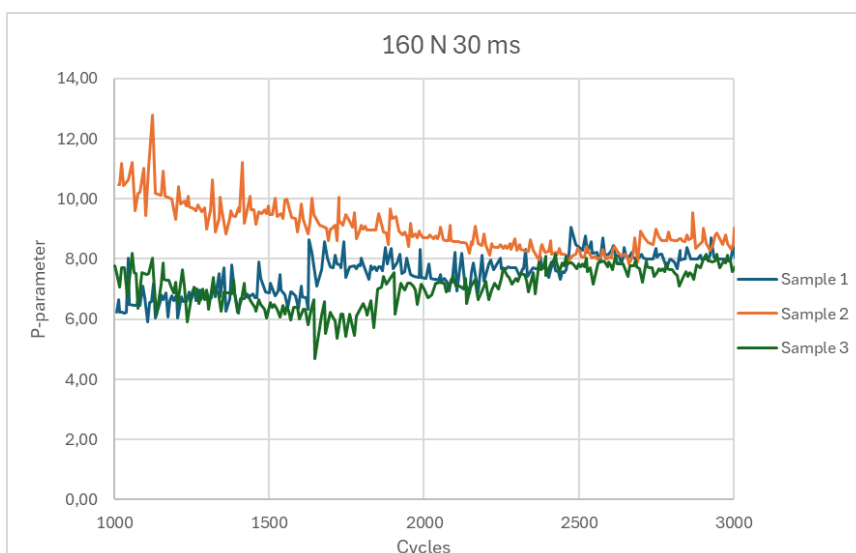
4(5)



KUVIO 28. Kuvaajat parametreilla 150 N ja 50 ms.



KUVA 37. Parametreilla 150 N ja 50 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

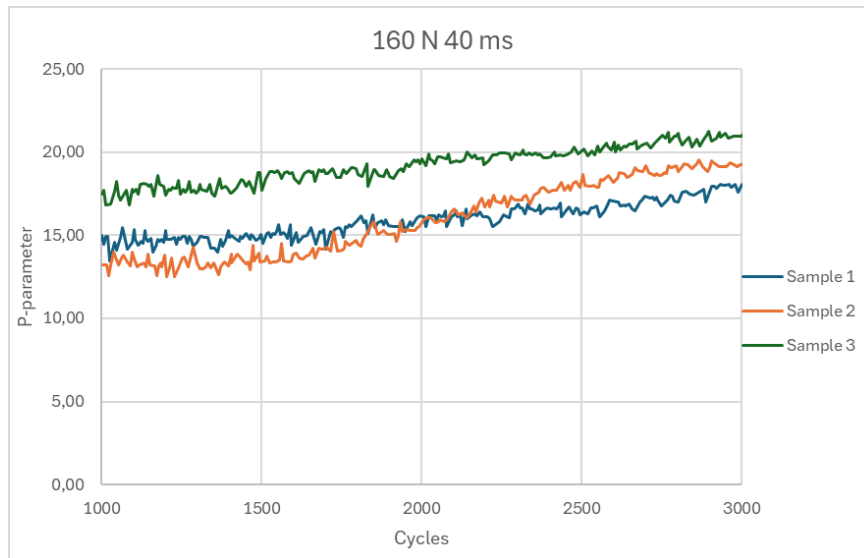


KUVIO 29. Kuvaajat parametreilla 160 N ja 30 ms.



KUVA 38. Parametreilla 160 N ja 30 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

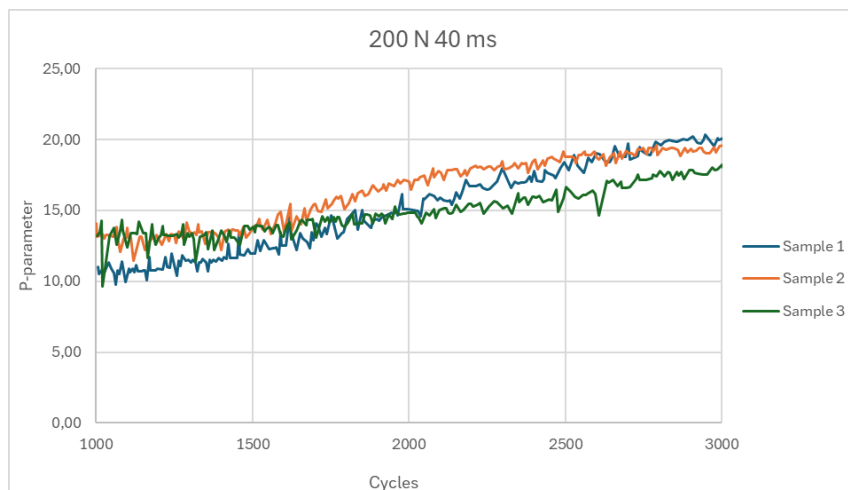
5(5)



KUVIO 30. Kuvaajat parametreilla 160 N ja 40 ms.



KUVA 39. Parametreilla 160 N ja 40 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).



KUVIO 31. Kuvaajat parametreilla 200 N ja 40 ms.



KUVA 40. Parametreilla 200 N ja 40 ms testattu näyte (Kuva: Johanna Niemi).

