



Vulkanointilämpötilan, -ajan ja lämpöhistorian vaikutus kumin ja kaapelin väliseen adheesioon

Teemu Häkli

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2021

Laboratoriotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Laboratoriotekniikka

HÄKLI, TEEMU:

Vulkanointilämpötilan, -ajan ja lämpöhistorian vaikutus kumin ja kaapelin väli-
seen adheesioon

Opinnäytetyö 75 sivua, joista liitteitä 6 sivua
Joulukuu 2021

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana oli Nokian Renkaat Oyj. Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa lisätietoa kumin vulkanointiajan, vulkanointilämpötilan ja lämpöhistorian vaikutuksista kumin ja vahvikekaapelin väliseen tartuntaan. Tarkoituksena oli mitata metallisen vahvikekaapelin irrottamiseen eri ajan ja eri lämpötilassa vulkanoidusta kumista tarvittavaa voimaa sekä tutkia lämpöhistorian vaikutusta vahvikekaapelin ja kumin väliseen tartuntaan sekä kaapelin mahdolliseen värinmuutokseen kemiallisten reaktioiden vaikutuksesta.

Opinnäytetyön kokeellisessa osassa tutkittiin vulkanointiajan ja -lämpötilan vaikutuksia kumin ja kaapelin väliseen adheesioon. Tartuntanäytteitä valmistettiin vaihtelevin vulkanointiajoin ja -lämpötiloin. Lämpöhistorian vaikutuksia tartuntaan tutkittiin valmistamalla tartuntanäytteitä, joita lämpökäsiteltiin eri lämpötiloissa ennen vulkanointia. Osa muoteista purettiin lämpökäsittelyn jälkeen ja kaapeleiden pintaa tarkasteltiin visuaalisesti.

Kokeellisen osan tulosten perusteella aika kumisekoituksen sekoitusajankohdan ja valssausajankohdan välillä vaikuttaa kumin ja kaapelin väliseen adheesioon tartuntatulosta parantavasti pienemmillä vulkanointilämpötiloilla ja huonontavasti korkeammilla vulkanointilämpötiloilla. Lisäksi kokeellisen osan tuloksissa havaittiin eroja saman valmistajan eri erän kaapeleiden adheesiotulosten välillä. Lämpökäsittelyn ei havaittu vaikuttavan merkittävästi kumin ja kaapelin väliseen adheesioon.

Opinnäytetyö sisältää salassa pidettävää tietoa, joka on ilmaistu opinnäytetyön julkisessa versiossa soveltuvin tavoin.

ABSTRACT

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

TEEMU HÄKLI:

Effect of vulcanization temperature, vulcanization time and thermal history on adhesion between rubber and bead wire

Bachelor's thesis 75 pages, appendices 6 pages
December 2021

This thesis was assigned by Nokian Tyres plc. The aim of the thesis was to provide additional information on the effects of rubber vulcanization time, vulcanization temperature and thermal history on the adhesion between rubber and tire bead wire. The purpose was to measure the force required to detach the metallic bead wire from a vulcanized rubber block. The adhesion samples were prepared with different vulcanization times and temperatures. The purpose was also to study the effects of thermal history on the adhesion between rubber and bead wire. In addition, the purpose was to study the possible discoloration of the bead wire due to chemical reactions.

In the experimental part of the thesis, the effects of vulcanization time and temperature on the adhesion between bead wire and rubber were investigated. Adhesion samples were prepared at varying vulcanization times and temperatures. The effects of thermal history on adhesion were studied by preparing adhesion samples that were heat treated at different temperatures before vulcanization. Some of the molds were disassembled after the heat treatment and the surfaces of the bead wire samples were visually inspected.

Based on the results of the experimental part of the thesis, the time between mixing and milling dates affects the adhesion between rubber and bead wire improving the adhesion results with lower vulcanizing temperatures and deteriorating them with higher vulcanizing temperatures. In addition, differences were found in the results of the experimental part between the adhesion results of different batches of bead wires from the same manufacturer. The heat treatment was not found to affect the adhesion between bead wire and rubber.

The thesis contains confidential information, which is expressed in the public version in an appropriate manner.

Key words: adhesion, bead wire, vulcanization

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TEOREETTINEN TAUSTA	7
2.1	Kumin raaka-aineet	7
2.2	Kumin ominaisuudet.....	8
2.2.1	Elastisuus	8
2.2.2	Viskoosisuus ja viskoelastisuus.....	10
2.2.3	Kovuus ja lujuus	10
2.3	Renkaan valmistus.....	11
2.3.1	Sekoittaminen.....	11
2.3.2	Komponenttivalmistus	13
2.3.3	Kokoonpano ja vulkanointi.....	13
2.3.4	Tarkastus ja laadunvalvonta	14
2.4	Renkaan rakenne.....	15
2.4.1	Pinta, sivupinnat ja jalka-alue	15
2.4.2	Nylon -kerros ja teräsvyöt.....	17
2.4.3	Kudosrunko ja sisäkerroskumi.....	17
2.5	Kaapelivahvike	18
2.5.1	Pinnoitetun teräskaapelin valmistus	19
2.5.2	Kaapelin ja kumin välinen tartunta.....	22
2.5.3	Kaapelin ja kumin välisen adheesion testaus	24
3	MITTAUS- JA MÄÄRITYSMENETELMÄT	26
3.1	Tartuntanäytteen valmistus	26
3.2	Tartuntatesti	32
3.3	Vulkanointiajan vaikutus tartuntaan.....	34
3.4	Vulkanointilämpötilan vaikutus tartuntaan	35
3.5	Lämpöhistorian vaikutus tartuntaan	36
3.6	Kaapeleiden pinnan visuaalinen tarkastelu	39
3.7	Eri kaapelivalmistajien kaapeleiden tartuntatason vertailu	40
4	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	42
4.1	Vulkanointiajan vaikutus -testin tulokset.....	42
4.2	Vulkanointilämpötilan vaikutus -testin tulokset	43
4.3	Lämpöhistorian vaikutus -testin tulokset	45
4.4	Kaapeleiden pinnan visuaalinen tarkastelu -tulokset.....	52
4.5	Kaapelivalmistajien vertailu -testin tulokset.....	54
5	POHDINTA	57
	LÄHTEET.....	67

LIITTEET	70
Liite 1. Vulkanointiajan vaikutus -testien tulokset	70
Liite 2. Vulkanointilämpötilan vaikutus -testien tulokset	71
Liite 3. Lämpöhistorian vaikutus -testien tulokset.....	72
Liite 4. Kaapeleiden pinnan visuaalinen tarkastelu -tulokset.....	73
Liite 5. Valmistajien vertailu -testin tulokset	74
Liite 6. Kumin seisonta-ajan vaikutus tartuntaan.....	75

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Nokian Renkaat Oyj. Nokian Renkaat Oyj on maailman pohjoisin rengasvalmistaja. Yhtiö on perustettu vuonna 1988, mutta sen juuret ulottuvat yli 120 vuoden päähän Suomen Gummitehdas Oy:n aikoihin. Yhtiön liikevaihto vuonna 2020 oli noin 1,3 miljardia euroa ja henkilöstömäärä noin 4600. Nokian renkaat Oyj:n tavoitteena on tuottaa koko tuotteen elinkaaren ajan turvallisia ja ympäristöystävällisiä renkaita. (Nokian Renkaat Oyj n.d.)

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa Nokian Renkaat Oyj:lle lisätietoa kumin vulkanointiajan, vulkanointilämpötilan ja lämpöhistorian vaikutuksista kumin ja vahvikekaapelin väliseen tartuntaan. Tavoitteena oli myös tuottaa tietoa eri kaapelivalmistajien kaapeleiden välisistä adheesioeroista. Mitä paremmin renkaan komponenttien toimintaan vaikuttavia tekijöitä tunnetaan sitä parempia ja ympäristöystävällisempiä renkaita pystytään valmistamaan.

Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena oli mitata metallisen vahvikekaapelin irrottamiseen eri ajan ja eri lämpötilassa vulkanoidusta kumista tarvittavaa voimaa. Tarkoituksena oli myös tutkia lämpöhistorian vaikutusta vahvikekaapelin ja kumin väliseen adheesioon sekä kaapelin mahdollisiin värinmuutoksiin kemiallisten reaktioiden vaikutuksesta. Lisäksi opinnäytetyössä oli tarkoituksena vertailla tärkeimpien vahvikekaapelivalmistajien välisiä tartuntaeroja.

Opinnäytetyöhön liittyvät mittaukset suoritettiin Nokian Renkaiden materiaalikehityslaboratoriossa Nokiolla. Materiaalikehityslaboratoriossa suoritetaan kumin, vahvikkeiden sekä raaka-aineiden laadunvalvontaa. Laboratoriolla on nimensä mukaisesti myös merkittävä rooli materiaalikehityksessä.

Opinnäytetyön kokeellisessa osassa käytettyjen kaapelivalmistajien nimet olivat salassa pidettävää tietoa, joten nimet muutettiin.

2 TEOREETTINEN TAUSTA

2.1 Kumin raaka-aineet

Kumisekoituksen pohjana toimivat elastomeerit. Elastomeerit ovat suurimolekyyllisiä, elastisia polymeerejä, jotka määräävät lopullisen kumituotteen perusominaisuudet. Perusominaisuuksia ovat esimerkiksi lujuus, kovuus ja elastisuus. Eri elastomeerejä voidaan yhdistellä toivottujen perusominaisuuksien aikaansaamiseksi. Yleisesti käytettyjä elastomeerityyppejä ovat esimerkiksi luonnonkumi, styreenibutadieenikumi, polyisopreeni sekä butadieenikumi. (Laurila 2007.) Kaikesta rengasteollisuuden käyttämästä kumista noin 40 % on luonnonkumia ja 60 % synteettistä öljypohjaisista hiilivedyistä valmistettua kumia (Michelin n.d.).

Kumin fysikaalisia ominaisuuksia voidaan muokata myös täyteaineilla. Kun täyteaine parantaa kumin fysikaalisia ominaisuuksia, puhutaan aktiivisesta tai puoliaktiivisesta täyteaineesta. Aktiivisina täyteaineina käytetään esimerkiksi nokea ja piioksidia eli silikaa. (Laurila 2007.) Noen käyttö moninkertaistaa renkaiden kulutuksenkestoa. Noki myös värjää renkaan mustaksi, mikä antaa suojaa UV-säteilyltä. Renkaan kumiseos voi sisältää 25–30 % nokea (Michelin n.d.). Täyteaineita voidaan käyttää myös puhtaasti täyteenä kustannusten vähentämiseksi. Kustannussyistä käytettäviä täyteaineita, joilla ei ole merkittäviä vaikutuksia kumin fysikaalisiin ominaisuuksiin kutsutaan täytteiksi. (Laurila 2007.) Nokian Renkaiden valmistamissa renkaissa erilaisten täyteaineiden osuus on noin kolmasosa renkaan kumisekoituksissa käytetyistä aineista (Nokian Renkaat Oyj n.d.).

Kumiseosta voidaan pehmentää eli kovuutta vähentää eri pehmittimin. Pehmittiminä käytetään yleisimmin mineraaliöljyjä. Mineraaliöljyt voidaan jakaa kumiteknisestä näkökulmasta aromaattisiin, nafteenisiin sekä parafiinisiin mineraaliöljyihin. Öljyt eivät kuitenkaan sekoitu hyvin kaikkiin elastomeereihin. Tällöin voidaan käyttää synteettisiä pehmittimiä. Synteettisinä pehmittiminä voidaan käyttää esimerkiksi esteripehmittimiä, eetteripehmittimiä, adipaatteja tai steeraatteja. (Laurila 2007.)

Ajan myötä kumisekoitusten ominaisuudet muuttuvat eli kumisekoitus vanhenee. Kumin vanhenemiseen vaikuttavat esimerkiksi kuluminen, auringonvalo ja lämpötila. Kumin vanhenemiseen liittyviä muutoksia voivat olla esimerkiksi kovettuminen, pehmeneminen, halkeilu ja elastisuuden väheneminen. Kumin vanhenemista pyritään estämään eri suoja-ainein. Hapettumista vastaan voidaan käyttää antioksidantteja. Antioksidanteilla taas pyritään suojaamaan kumia otsonin vaikutuksilta. Näiden lisäksi kumisekoitukseen voidaan lisätä suojaavaa, joka kumiin liukenemattomana kulkeutuu kumin pinnalle suojaavaksi kerrokseksi. Vaha antaa kumille suojaa auringonvaloa ja otsonia vastaan. Vaha suojaa kumia myös mekaanisesti. (Laurila 2007, Gent & Walter 2006.)

2.2 Kumin ominaisuudet

Kumi on materiaalina ainutlaatuinen. Suurimmalle osalle kumituotteiden materiaaleja ei ole muita vaihtoehtoja kuin toiset kumityypit. Kumin jäykkyys on pieni, ja kokoonpuristuvuus hyvin pieni. Kumi ei puristu kokoon sylinterissä puristettaessa ja jos sylinterin seinät poistetaan, kumi pullistuu puristettaessa sivuille. Kumin kulumisen- ja korroosionkesto ovat hyviä ja kitka suuri. Tämän vuoksi kumituotteet ovatkin joustavia, vaimentavia, suojaavia, liittäviä ja vaimentavia. (De & White 2001, Laurila 2007.)

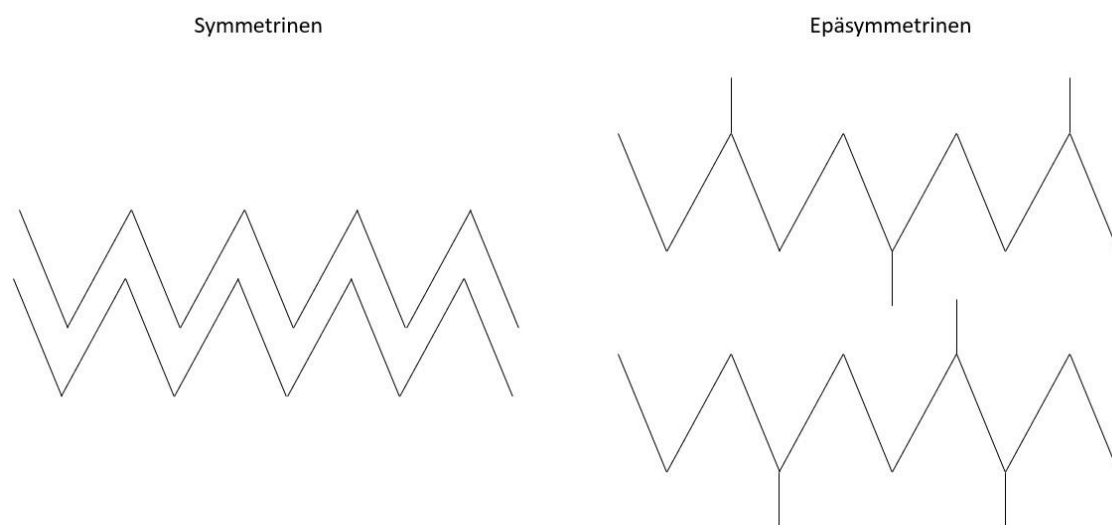
2.2.1 Elastisuus

Yksi kumin ainutlaatuisista ominaisuuksista on elastisuus. Elastisuudella tarkoitetaan kumin kykyä palautua jopa 1000 % venytyksen jälkeen takaisin venytystä edeltäneisiin mittoihinsa (Laurila 2007).

Yksi kumin elastisuuden mahdollistavista tekijöistä on erityinen molekyyli rakenne. Kumin molekyyli rakenne koostuu pitkistä ketjuista, jotka ovat vähäisissä määrin toisiinsa kemiallisesti sidottuja. Ilman näitä sidoksia molekyylit pääsisivät virtaamaan toistensa ohi nesteille tyypilliseen tapaan. Kumia lämmitettäessä

kumin molekyylit pääsevät liikkumaan paremmin, jolloin elastisuus kasvaa ja päinvastoin kumin jäähtyessä elastisuus pienenee. (Treloar 2005, Laurila 2007).

Toinen kumin elastisuuden mahdollistava tekijä on kumin molekyyliden epäsymmetrisyys. Symmetriset molekyylit voivat lomittua tiiviisti lähekkäin mahdollistaen vain vähän molekyyliden välistä liikettä. Epäsymmetriset molekyylit asettuvat väljemmin, mikä mahdollistaa suuremman molekyyliden välisen liikkeen. (Laurila 2007.) Molekyyliden symmetrian periaate esitetty kuviossa 1.



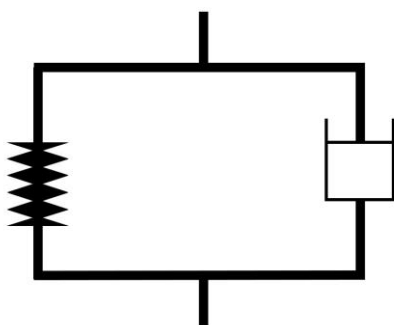
KUVIO 1. Molekyyliden symmetrian periaate (Laurila 2007, Muokattu).

Kolmas kumin elastisuuden mahdollistava tekijä on molekyyliketjujen runkojen yksinkertaisten sidosten suhteellisen vapaa kiertyminen. Kumi venyttäessä sidosten kiertymiset mahdollistavat hiiliketjujen oikenemisen. Venyttävän voiman loputtua kumi palaa takaisin alkuperäiseen, tilastollisesti todennäköisimpään tilaansa. Kumi säilyttää kumimaiset ominaisuutensa vain tietyn lämpötilan yläpuolella. Tämän lämpötilan alapuolella kumin kumimaiset ominaisuudet muuttuvatkin lasimaisiksi. Tätä ominaisuuksien muutosta kutsutaan lasisiirtymäksi ja lämpötilaa, jossa ominaisuuksien muutos tapahtuu, lasisiirtymälämpötilaksi (Treloar 2005, Laurila 2007.)

2.2.2 Viskoosisuus ja viskoelastisuus

Yksi kumin tärkeistä ominaisuuksista on viskoosisuus. Viskoosisuudella tarkoitetaan kumin kykyä vastustaa liikettä sitä voimakkaammin mitä suurempi on liikkeen nopeus. Kumin viskositeetti kertoo kumin käsiteltävyydestä. Kumin täytyy virrata muottiin mutta toisaalta myös pysyä koossa. Kumin viskositeetin tulee olla sopiva, ei liian korkea eikä liian matala. Kumin viskoosista osaa voidaan yksinkertaistetusti kuvata reiällisellä männällä, jota liikutetaan nesteellä täytetyn sylinterin sisällä. (Laurila 2007).

Viskoelastisilla materiaaleilla on sekä viskooseja että elastisia ominaisuuksia. Viskoelastisuutta voidaan mallintaa yksinkertaistetusti esimerkiksi Kelvin-Voigt:n mallilla. Kelvin-Voigt:n mallissa kumin viskoosia osaa kuvaava reiällinen mäntä nestetäytteisessä sylinterissä ja elastista osaa kuvaava jousi ovat rinnakkain. (Dunn 2019.) Kelvin-Voigt:n malli kuvattu kuviossa 2.



KUVIO 2. Kelvin-Voigt:n malli (Dunn 2019, muokattu).

Tällaisia aineita ovat esimerkiksi kaikki polymeerit. Kun kumia venytetään molekyylien välinen kitka kuluttaa energiaa, tämä voidaan havaita lämpönä. Kitka saa aikaan sen, että kumiin kohdistettu voima on verrannollinen kumin venymisnopeuteen. (Dunn 2019.)

2.2.3 Kovuus ja lujuus

Kumin kovuus voidaan määrittää painamalla kumia jäykällä mittapäällä. Kumin kovuudesta riippuu, kuinka syväle mittapää painuu kumiin tietyllä voimalla painettaessa (De & White 2001). Kovuusmittaus voidaan suorittaa esimerkiksi ISO

48 -testimenetelmän mukaisesti. ISO 48 sisältää myös testimenetelmän ohuiden testikappaleiden kovuuden mittaamiseen (De & White 2001).

Lujuusominaisuuksia ovat vetolujuus (tensile strength), murtovenymä (elongation at break) sekä moduuli tietyssä venytyksessä. Lujuusominaisuuksia mitataan laitteella, jossa on näytettä paikallaan pitävät leuat, kenno voiman mittaamiseen sekä ekstensiometri, joka mittaa näytteen venymää. (De & White 2001.)

2.3 Renkaan valmistus

Renkaan valmistus koostuu useista prosesseista. Näitä ovat kumisekoituksen sekoittaminen, testiili- ja teräskudosten kumittaminen, kumikomponenttien valmistus ekstruusiolla, renkaan aihion eli vulkanoimattoman renkaan kokoaminen komponenteista, rengasaihion vulkanointi sekä renkaan viimeistely ja lopputarkastukset (Mark ym. 2013). Rengas saattaa sisältää jopa 200 eri raaka-ainetta, joista tärkeimpiä ovat luonnonkumi ja synteettinen kumi sekä noki ja öljy. Näistä raaka-aineista muodostuu yhdessä kumin kanssa renkaan komponentteja, joita voi olla 10–30 kappaletta yhdessä renkaassa. (Nokian Renkaat Oyj n.d., Bridgestone n.d.).

2.3.1 Sekoittaminen

Henkilöauton renkaassa käytettävän kumisekoituksen koostumus vaihtelee renkaan osan, käyttötarkoituksen ja mallin mukaan. (Nokian Renkaat Oyj n.d.). Moderni henkilöautorengas voi sisältää jopa 12 eri kumisekoitusta (Continental n.d.). Kumisekoitusta varten täytyy ensiksi luoda resepti. Resepti sisältää kaikki kumiseokseen tarvittavat raaka-aineet ja niiden määrät (Laurila 2007). Yksi (1) renkaassa käytettävä kumiseos voi sisältää jopa 30 eri raaka-ainetta (Goodyear 2016).

Kumiteollisuuden resepteissä elastomeerin kokonaismääräksi merkitään 100 ja muiden aineiden määrät ilmoitetaan sataa kumiosaa kohden (phr). (Laurila 2007.) Esimerkkiresepti esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Kumisekoituksen esimerkkiresepti (Laurila 2007, muokattu).

	%	phr
Elastomeeri	42,4	100,0
Täyteaine A	25,4	60,0
Täyteaine B	19,1	45,0
Pehmitin	6,4	15,0
Suoja-aine A	1,1	2,5
Suoja-aine B	0,6	1,5
Vulkanointiaine A	2,1	5,0
Vulkanointiaine B	0,8	2,0
Vulkanointiaine C	0,6	1,5
Vulkanointiaine D	1,5	3,5

Kun resepti on valmis, voidaan raaka-aineet punnita ja sekoittaa sekoituskooneella. Sekoituskone sekoittaa aineet homogeeniseksi massaksi. Sekoitustahtumassa aineet sekoittuvat, elastomeerit pilkkoutuvat, komponenttien hiukkaskoko pienenee ja hiukkaset jakautuvat tasaisesti massaan. (Laurila 2007.)

Sekoittamisen ensimmäisessä vaiheessa polymeerit pilkotaan sisäsekoittajalla ja polymeerien molekyylipaino laskee. Pilkkomisvaiheen jälkeen sekoitukseen voidaan lisätä täyteaineita, kemikaaleja ja öljyä. Sekoittaminen tapahtuu yleensä korkeassa, jopa 180°C lämpötilassa. Seoksen hajoamisen määrään vaikuttaa muun muassa sekoituskooneen roottoreiden nopeusero eli hiertosuhde, roottoreiden etäisyys toisistaan, paine sekä roottoreiden pyörimisnopeus. Sekoitusprosessi pyritään suunnittelemaan niin, että kumisekoituksen aineet jakautuisivat mahdollisimman tasaisesti sekoituksen sisällä. Sekoitusaikaa, -lämpötilaa ja -nopeutta säädetään tarpeen mukaan. Sekoittaminen voidaan tehdä myös valsilla. Sisäsekoittajan käytöllä saavutetaan kuitenkin parempi tehokkuus, yhdenmukaisuus ja laatu, kuin valsilla. Sekoittamisen jälkeen kumilevyt jäähdytetään vedellä. (Mark ym. 2013.) Reseptejä kehitetään ja vanhoja reseptejä muokataan jatkuvasti. Resepteihin liittyvä kehittäminen onkin tärkeä osa tuotekehitystä (Nokian Renkaat Oyj n.d.).

2.3.2 Komponenttivalmistus

Sekoittamisen jälkeen kumiseokset kuljetetaan komponenttilaitteille, jossa niitä käytetään renkaan komponenttien valmistukseen (Mark ym. 2013). Suurin osa renkaan komponenteista on vahvikkeita (Nokian Renkaat Oyj n.d.).

Kalanteri on suuri ja raskas laite, jossa on vähintään kolme kromilla päällystettyä terästelaa, jotka lämpenevät vesikiertoisesti tai höyryllä. Telat pyörivät vastakkaisiin suuntiin ja niiden nopeutta voidaan vaihdella vaihteiston avulla. Tekstiiliä tai terästä kumittaessa kumitettava materiaali syötetään kalanterin telojen läpi ja kumisekoitusta lisätään samanaikaisesti kumitettavan materiaalin ylä- ja alapuolelta. Näin kumitettava materiaali saadaan kokonaan upotettua kumiin. Kumikerroksen paksuutta voidaan säätää kalanterin telojen väliä kasvattamalla tai pienentämällä. Kalanteroinnin jälkeen kumitettu materiaali leikataan oikean pituiseksi oikeassa kulmassa ja ohjataan renkaan valmistusprosessissa eteenpäin. (Mark ym. 2013.)

Useita renkaan osia valmistetaan suulakepuristamalla eli ekstruusiolla. Suulakepuristuksessa raaka-aine muunnetaan halutun poikkileikkauksen muotoiseksi jatkuvaksi tuotteeksi pakottamalla se oikean muotoisen suulakkeen läpi. Ekstruusiolla valmistetaan esimerkiksi renkaan pinta, olkapää, kolmioliuska (apex), sekä sisäkerroskumi ja sivupinnat. (Laurila 2007.) Rengasvalmistuksessa käytettävät suulakepuristimet ovat ruuvityyppisiä ja kylmä- tai kuumasyöttöisiä. Kylmäsyöttöiseen suulakepuristimeen kumisekoitus syötetään suoraan huoneenlämpöisenä, kun taas kuumasyöttöiseen suulakepuristimeen kumisekoitus syötetään nauhana lämmitysvalssien kautta. Kumisekoitus kulkee suulakepuristimen vaipan sisällä ruuvien avulla eteenpäin suulakkeelle ja suulakkeen aukon läpi. (Mark ym. 2013.)

2.3.3 Kokoonpano ja vulkanointi

Rengasaihiot kasataan komponenteista kokoonpanokoneilla. Rengas kasataan sisältä ulospäin. Ensin renkaan sisäkerroskumi pyöräytetään sylinterin muotoi-

selle kokoonpanokoneen vyörummulle. Seuraavaksi runkokudos vedetään sisäkerroskumin päälle. Kaapelipaketti asetetaan rummulle ja runkokudos käännetään kaapelin yli. Runko asetetaan venytyskoneen laipioille ja pinta-vyöpaketti eli paketti, joka sisältää renkaan pinta- ja teräsvyökerrokset, siirretään rungon päälle. Lopuksi runko paineistetaan, mikä kiinnittää rungon ja pinta-vyöpakettin toisiinsa. Lopuksi rumpu painuu kasaan ja rengasaihio (green tire) on valmis. (Mark ym. 2013, Nokian renkaat Oyj n.d.)

Kumisekoitus muutetaan plastisesta eli muovautuvasta olomuodosta elastiseksi sitomalla sekoituksen elastomeeriketjut toisiinsa kemiallisesti. Tätä kutsutaan vulkanoinniksi. Vulkanoinnissa elastomeerien välille syntyy muun muassa rikki-sidoksista muodostuva verkkomainen rakenne. Vulkanoitumisreaktiota voidaan nopeuttaa vulkanointilämpötilaa nostamalla. Vulkanoinnin apuna voidaan käyttää myös erilaisia aktivaattoreita ja kiihdyttäjiä. Yleisin vulkanointiaine on rikki, mutta myös esimerkiksi peroksiedeja tai metallioksiedeja voidaan käyttää vulkanointiin. (Laurila 2007.)

Rengasaihiot vulkanoidaan kuumien muottien avulla paistopuristimissa. Paistopuristimessa puristimen paistotyynyn paine painaa aihion muotin kuvioita vasten ja aihion kumi virtaa täyttäen rengasmuotin. Kumisekoituksen ominaisuudet täytyy olla sellaiset, että kumi täyttää muotin kokonaan ennen kuin vulkanointi alkaa. Kumin virtaukseen voidaan vaikuttaa esimerkiksi sekoitukseen lisättävillä täyteaineilla ja pehmittimillä. Paistossa renkaan osat kiinnittyvät toisiinsa ja rengas saa lopullisen muotonsa pintakuvioineen ja sivupintamerkintöineen (Mark ym. 2013, Nokian Renkaat Oyj n.d., Dunlop n.d.)

2.3.4 Tarkastus ja laadunvalvonta

Lopuksi renkaat käyvät läpi tarkastuksia. Visuaalisen tarkastuksen lisäksi renkaiden tarkastuksessa voidaan käyttää röntgenlaitetta sisäisten vikojen, kuten runkokudoksen tai vöiden vääränlaisen asettumisen havaitsemiseen. Koneellisesti voidaan mitata renkaan yhdenmukaisuutta, säteisheittoa eli renkaan epäpyöreyttä sekä sivuttaisvoimavaihtelua eli voimavaihtelua renkaan puolelta toi-

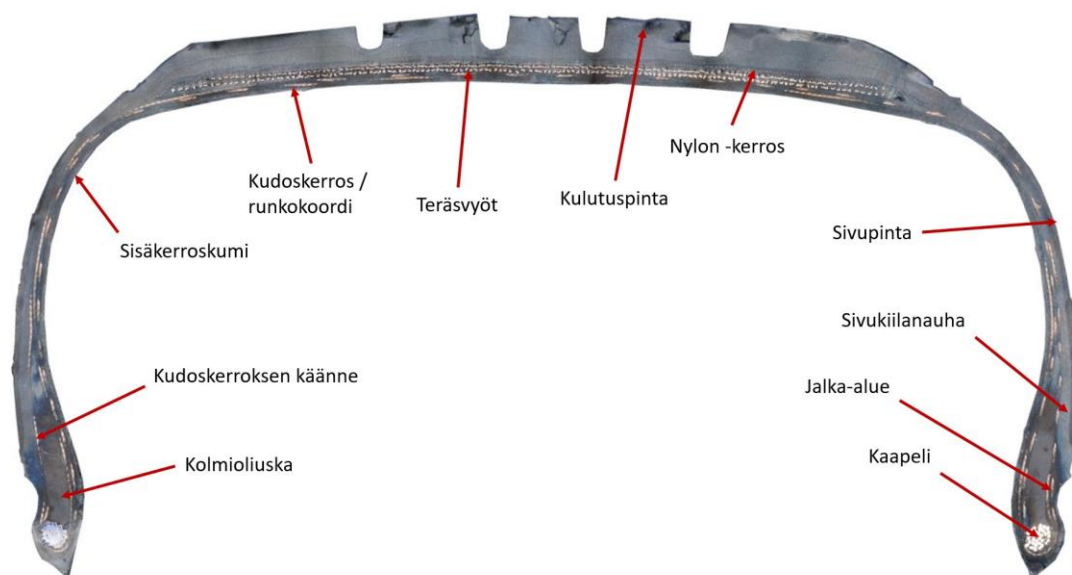
selle sen pyöriessä. Valmiita renkaita voidaan myös leikata tutkittavaksi. (Mark ym. 2013, Nokian Renkaat Oyj n.d.)

2.4 Renkaan rakenne

Rengas voidaan jakaa rakenteellisesti kahteen pääelementtiin. Nämä ovat pinta-vyöpaketti ja runko. Pääelementit sisältävät useita eri kerroksia. Renkaan runko koostuu muun muassa kaapeleista, runkokudoksesta ja sisäkerroskumista (innerliner). (Continental n.d., Bridgestone n.d.)

2.4.1 Pinta, sivupinnat ja jalka-alue

Renkaan tien kanssa kosketuksissa oleva osa on kulutuspinta (tread). Kulutuspinta sisältää pääosin suulakepuristuksella valmistettuja kumiosia. Ideaalitilanteessa renkaan kulutuspinta tarjoaa hyvän pidon kaikilla alustoilla. Todellisuudessa kuitenkin pintamateriaalit ja kuviot suunnitellaan niin, että ne korostavat tiettyjä ominaisuuksia käyttötarkoituksesta riippuen. Kulutuspinnan tehtävänä on muun muassa tarjota pitoa tiehen sekä poistaa vettä renkaan alta. Yläpinnan alla on alapinta (tread base). Alapinta kiinnittää yläpinnan vyökerrokseen ja suojaa renkaan sisempiä kerroksia vaurioilta. Renkaan olkapää yhdistää renkaan pinnan ja sivupinnan. (De & White 2001, Niknam 2019, Continental n.d.) Kuvassa 1 on nimetty renkaan osia renkaan poikkileikkauskuvaan.



KUVA 1. Renkaan osia poikkileikkauksessa.

Renkaan sivupinta (sidewall) on ekstruusiolla valmistettu osa renkaan sivulla. Sivupinta suojaa runkoa hankaukselta, vaikuttaa renkaan ajo-ominaisuuksiin sekä tukee renkaan pintaa. Renkaan sivupinnan ylemmän osan kumiseos suojaa rengasta sivusuunnassa. Ylemmän osan valmistamiseen käytetään hyvin UV-säteilyä kestävästä kumisekoituksesta. Sivupinnan alaosa valmistetaan yleensä kestävämmästä kumista. Sivupinta suojaa renkaan sisäosia sivusuunnassa. Ohjausvasteen parantamiseksi sivupinnassa voidaan käyttää terästä tai nylonia. (Mark ym. 2013, Niknam 2019.)

Renkaan jalka-alueella kulkee molemmin puolin kaapeliniput renkaan pyörimissuunnan mukaisesti. Kaapeliniput valmistetaan yhdestä yhtenäisestä kaapelista. Kaapeliniput toimivat ankkureina runkokudokselle. Kaapelinippujen päällä on kolmioliuska. Kolmioliuska täyttää kolmiomaisen alueen runkokudoksen ja sen käänteen välissä. Renkaan sivupinnan alaosassa on sivukiilanauha. Sivukiilanauha suojaa sivupinnan alaosaa hieroutumiselta vannetta vasten. Sivukiilanauhan valmistamiseen käytetäänkin hyvin kulutusta kestävästä kumisekoituksesta. Renkaan kaapelipaketin valmistamiseksi pinnoitettu kaapeli kumitetaan ekstruuderilla ja käärityään useita kertoja vannemaiseksi kiepiksi. (De & White 2001, Gent & Walter 2006.)

2.4.2 Nylon -kerros ja teräsvyöt

Lisäsuojana renkaan pinnan ja teräsvyökerroksen välissä voidaan käyttää nylon -kerrosta (Cap ply). Nylon -kerros tukee vyöpakettia ja auttaa teräsvyökerrosta säilyttämään muotonsa keskipakoisvoiman työntäessä sitä ulospäin, lisäten näin renkaan kestävyyttä korkeissa nopeuksissa. Lisäksi korkeissa nopeuksissa muodostuvaa seisovaa aaltoa saadaan vaimennettua nylon -kerroksen avulla. (De & White 2001, Niknam 2019.)

Nylon -kerroksen ja kudusrungon välissä on teräsvyökerros (Niknam 2019). Radiaalirenkaassa teräsvöiden käyttö rungossa on välttämätöntä, koska ilman vahvistusta kudusrunko olisi liian heikko (De & White 2001). Teräsvyökerros sisältää yleensä kaksi kerrosta kumitettua terästä, jotka vakauttavat renkaan pintakerrosta. Teräsvyökerroksella on suurin vaikutus renkaan ohjattavuuteen, mukavuuteen, kestävyYTEEN ja kulumiseen (Bridgestone n.d., Niknam 2019).

2.4.3 Kudusrunko ja sisäkerroskumi

Renkaan kudusrunko (carcass) valmistetaan kumitetusta tekstiilistä, kuten nylonista, polyesteristä tai rayonista (De & White 2001). Kudusrunko kietoutuu kaapelin ympäri, kulkee koko matkan toiselle puolelle rengasta, toisen kaapelin ympäri (Gent & Walter 2006). Rungossa voidaan käyttää myös kumitettua teräskudosta. Ristikudosrenkaassa runkokudos voi olla esimerkiksi 30° kulmassa renkaan kehään nähden, kun taas radiaalirenkaassa runkokudoksen kulma on noin 90°. Radiaalirunko on selvästi joustavampi kuin ristikudosrunko, minkä vuoksi radiaalirenkaiden vierintävastus, eli renkaan liikkeellä pitämiseen tarvittava voima, on yleensä pienempi kuin ristikudosrenkailla. (De & White 2001.)

Renkaan sisäkerroskumin (innerliner) päätehtävänä on pitää ilma renkaan sisällä. Jotta ilmanpaine renkaan sisällä ei pienenesi diffuusion vaikutuksesta, sisäkerroskumi valmistetaankin tyypillisesti kumista, jonka ilmanläpäisevyys on matala, esimerkiksi halobutyylimistä. Sisäkerroskumi estää myös hapen diffuusiota renkaan runkoon. Erityisen tärkeää on estää hapen diffuusiota renkaan vyö -alueelle. Sisäkerroskumi on koostumukseltaan sisärengasmaisen eikä si-

sällä kudosisvahvikkeita. Renkaan ilmanpitävyyden ja hapen diffuusion lisäksi sisäpinta vaikuttaa myös renkaan melutasoon, kestävyYTEEN sekä vierintävastukseen (De & White 2001, Niknam 2019, Bridgestone n.d.).

2.5 Kaapelivahvike

Monet kumituotteet, kuten renkaat, tarvitsevat vahvikkeita, jotta niiden ominaisuudet olisivat halutunlaiset (Laurila 2007). Ajoneuvorenkaissa vahvikkeet toimivat renkaan runkona antaen renkaalle muotoa ja jäykkyyttä (Michelin n.d.). Vahvikkeet ovat usein kuitumaisia, lujia ja joustavia. Vahvikkeina voidaan käyttää muun muassa kasvi- tai eläinkuituja (orgaaniset luonnonkuidut), mineraalikulitua (epäorgaaniset luonnonkuidut), polyesteriä tai nylonia (synteettiset orgaaniset kuidut) sekä metallia, hiilikuitua tai lasikuitua (synteettiset orgaaniset kuidut). (Laurila 2007.)

Kaapelivahvike kulkee renkaan jalka-alueella renkaan molemmin puolin. Kuvassa 2 näkyvät kaapelin päät renkaan jalka-alueen poikkileikkauskuvassa.



KUVA 2. Kaapeli renkaan jalka-alueen poikkileikkauskuvassa.

Kaapelin ympärysmitta on erittäin tarkka. Ympärysmitan ollessa liian pieni, voi renkaan saaminen vanteelle olla hankalaa. Ympärysmitan ollessa liian suuri, on vaarana renkaan irtoaminen vanteelta. Kaapelin tehtävänä on pitää rengas vanteella auttaen ajoneuvon kuorman välittämässä vanteelta renkaalle. Kaapeli lisää renkaiden turvallisuutta, vähentää tärinää ja parantaa renkaiden kestävyyttä. (Nokian Renkaat Oyj n.d., Mandloi & Gupta 2021.)

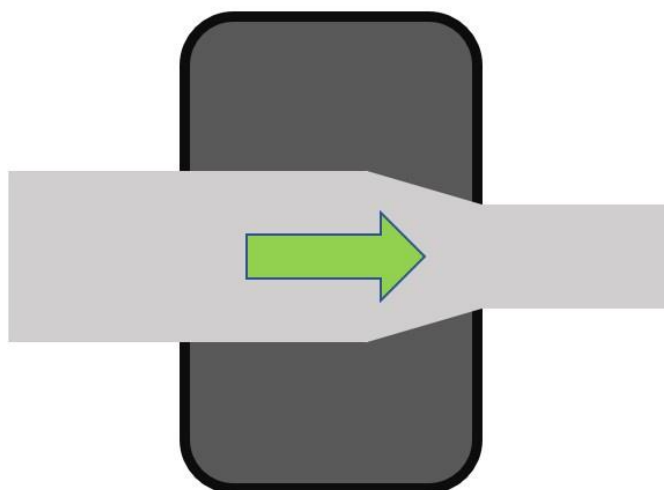
2.5.1 Pinnoitetun teräskaapelin valmistus

Kaapelin valmistus aloitetaan 5,5 mm paksuisesta kovaterästangosta, jonka hiilipitoisuus on yleensä 0,70–0,95 % (Polyakova & Stolyarov 2021). Kaapeleissa käytettävä kovateräs sisältää yleensä myös mangaania, piitä, rikkiä sekä fosforia (Bekaert n.d.). Taulukossa 2 normaalin ja korkean vetolujuuden teräksen keskimääräinen koostumus, jossa normaali vetolujuus NT ja korkea vetolujuus HT.

TAULUKKO 2. Teräksen keskimääräinen koostumus (Bekaert n.d., muokattu).

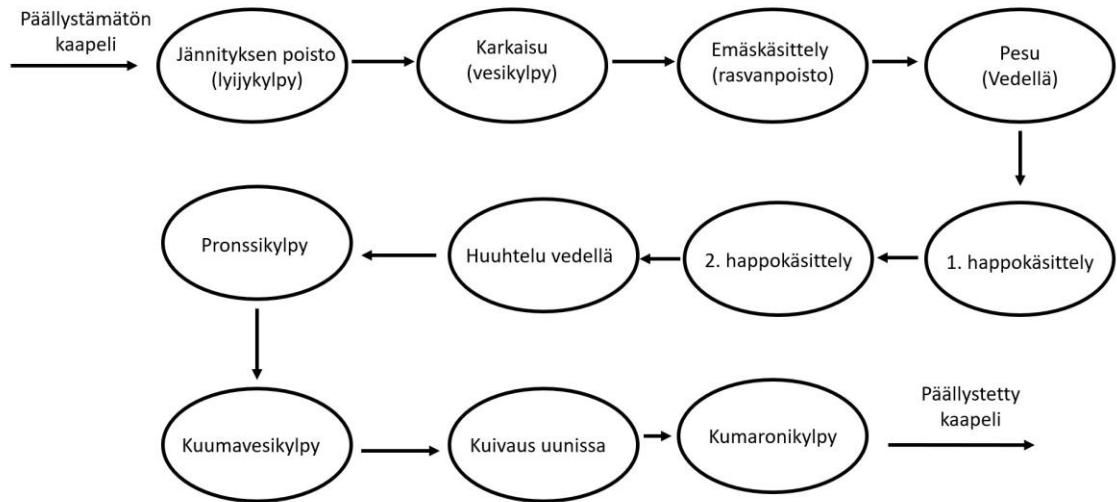
	NT	HT
C	0,725 %	0,825 %
Mn	0,550 %	0,520 %
Si	0,250 %	0,230 %
S	0,015 %	0,008 %
P	0,015 %	0,010 %

Lisäksi teräs sisältää yleensä pieniä määriä kuparia, kromia ja nikkeliä (Bekaert n.d.). Kaapelin valmistusprosessissa 5,5 mm paksuisen terästangon poikkileikkauksen halkaisijaa pienennetään asteittain langanvedolla. Terästankoa vedetään useiden kovemmasta aineesta valmistettujen vetokivien läpi, joiden reikien halkaisija pienenee mentäessä prosessissa eteenpäin (Polyakova & Stolyarov 2021). Langanvedon periaate esitetty kuviossa 3.



KUVIO 3. Langanvedon periaate.

Tässä vaiheessa kaapelia ei voidella, joten vaihetta kutsutaan kuivaksi langanvedoksi (dry drawing). Kaapelin valmistusprosessi sisältää myös lämpökäsittelyjä. Pinnoitusvaiheessa kaapeli pinnoitetaan tyypillisesti pronssilla tai messingillä (Polyakova & Stolyarov 2021, Pathak ym. 2009). Messinkipinnoitus on alkanut korvata pronssipinnoitusta renkaissa käytettävän kaapelin pinnoitusmateriaalina sen paremman kilpailukyvyn vuoksi. Kaapelin messinkipinnoitus valmistetaan kerrostamalla sinkkiä ja kuparia sähkökemiallisesti kaapelin pinnalle. Messingillä päällystämässä kaapelia on lämmitettävä, jotta kuparin ja sinkin diffuusio saadaan alkamaan. Pronssipinnoittaminen taas tapahtuu upottamalla kaapeli vesiliuoksiin, jotka sisältävät kuparisulfaattia, rikkihappoa sekä tinasulfaattia. Hapettumisen estämiseksi kaapeli päällystetään vielä orgaanisella päällysteellä, esimerkiksi kumaronihartsilla. (Polyakova & Stolyarov 2021, Pathak ym. 2009.) Esimerkki kaapelin pronssipinnoitusvaiheista esitetty kuviossa 4.



KUVIO 4. Kaapelin pronssipäällystämisen vaiheet (Gupta & Mandloi 2021, muokattu).

Pronssipinnoitusprosessi on tehokkaampi kuin messinkipinnoitusprosessi. Pronssipinnoitteen haittapuolena messinkipinnoitteeseen verrattuna on kuitenkin sen lähtökohtaisesti heikompi adheesio kumin kanssa. Pronssipinnoitteen heikompa adheesiota voidaan kuitenkin korjata kumiseoksen muokkauksin. Näin myös pronssipinnoitettua kaapelia voidaan käyttää renkaiden vahvikekomponenttina. Messinkipinnoitettua kaapelia voidaan vetää vielä pinnoittamisen jälkeen. Vedettäessä kaapelia pinnoittamisen jälkeen käytetään nestemäistä voiteluainetta, jolloin puhutaan märkävedosta (wet drawing). Kaapeli vedetään yleensä noin yhden (1) mm paksuuteen. (Polyakova & Stolyarov 2021, Pathak ym. 2009.) Myös messinkipinnoitteella on haittapuolensa. Matalassa pH:ssa messinki kiihdyttää teräksen korroosiota, korkeassa pH:ssa messingistä poistuu sinkkiä, mikä heikentää kumin ja messinkipinnoitteen välistä adheesiota merkittävästi. Lisäksi amiinien läsnä ollessa kumin ja kaapelin messinkipinnoitteen välinen adheesio rappeutuu nopeasti. (Chen ym. 2021.)

Teräskaapelin pinnan karkeus riippuu langanvetonopeudesta, joka voi olla jopa 400–500 metriä minuutissa. Mitä suurempaa langanvetonopeutta käytetään, sitä karkeampi on tuotetun kaapelin pinta. Pinnan karkeuteen vaikuttaa myös vetokivien pinta sekä käytetty voiteluaine. Kaapelin pinnan karkeus aiheuttaaakin haasteita ohuen ja yhtenäisen pinnoitteen tuottamiseen kaapelin pinnalle. Li-

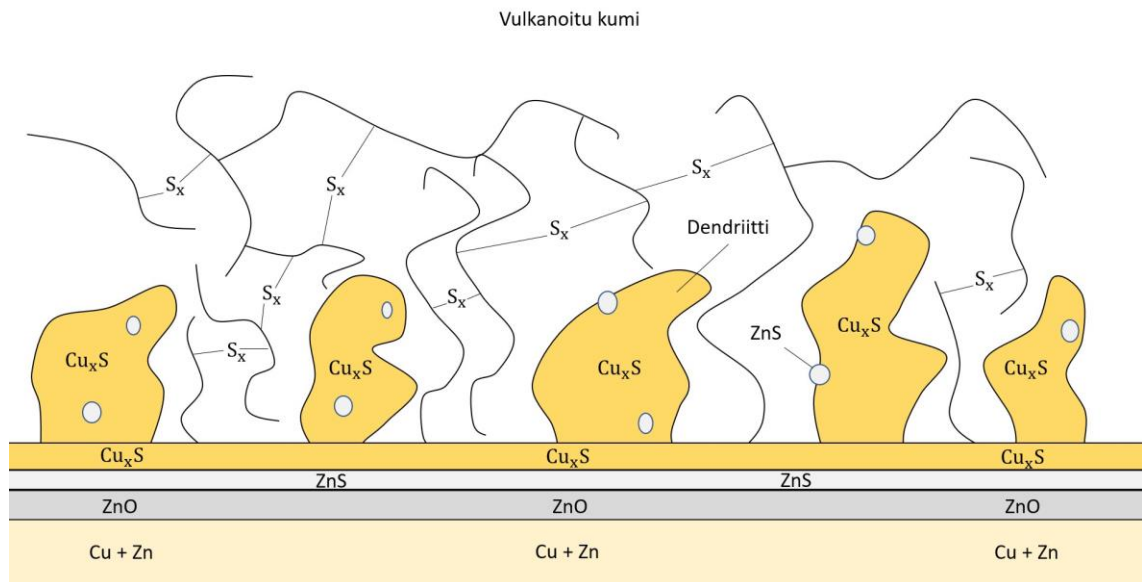
säksi pronssipinnoitettava kaapeli viettää vain noin kaksi (2) sekuntia aikaa pronssipinnoitekylvyssä. Lyhyt pinnoitusaika aikaansaa pieniä pinnoittamattomia kohtia kaapelissa. Pinnoittamattomissa kohdissa muodostuu kumin ja kaapelin välistä adheesiota heikentävää rauta(III)oksidia (Fe_2O_3) eli hematitiittiä. (Banerjee ym. 2014.)

2.5.2 Kaapelin ja kumin välinen tartunta

Kaapelin ja renkaan välinen tartunta tulee olla tarpeeksi hyvä, jotta kumi ja kaapeli eivät pääse irtomaan toisistaan. Kaapelin ja kumin välisen tartunnan tulee kestää kovaa painetta ja lämpötilaa, joita renkaaseen kohdistuu ajon aikana. Tartunnan ollessa liian heikkoa, voi seurauksena olla kaapelin irtoaminen ja hajoaminen, mikä pahimmassa tapauksessa voi puhkaista renkaan. (Gupta & Mandloi 2021.) Teräksen ja kumin välinen adheesio on hyvin heikkoa, joten kaapeli pinnoitetaan yleensä messingillä tai pronssilla (Pekachaki ym. 2019). Sekä pronssi että messinkipinnoitteen tapauksessa tartunta muodostuu vulkanoitumista kaapelin pinnoitteen ja kumin välille (Banerjee ym. 2014). Pronssipinnoitteen tapauksessa suurin tartuntaan vaikuttava tekijä on pronssipinnoitteen koostumus. Pronssipinnoite sisältää kuparia ja tinaa. Pienetkin erot pinnoitteen tinapitoisuudessa voivat vaikuttaa merkittävästi kumin ja kaapelin väliseen tartuntaan. (Gupta & Mandloi 2021.)

Kumin ja kaapelin messinkipinnoitteen välistä tartuntamekanismia ei vielä täysin tunneta. Selvää on, että tartunta kumin ja kaapelin pinnoitteen välillä on pääasiassa mekaanista. Kaapelipinnoitteen kupari muodostaa vulkanoitumisen alkuvaiheessa kuparisulfididendriittejä, jotka tunkeutuvat nestemäiseen kumiin ennen kumin vulkanoitumista. Dendriitit ankkuroivat kaapelin ja kumin toisiinsa mekaanisesti. Koska dendriittien tulee muodostua ennen kumin vulkanoitumisen alkamista, ei vulkanoituminen saa tapahtua liian nopeasti. Tämä tulee huomioida kumisekoituksen vulkanoitumisominaisuuksia säätäessä. (Crowther 2003, Mark ym. 2013.) Pienessä määrin adheesioon vaikuttaa Van der Waalsin voimat ja kovalenttiset sidokset kuparin, rikin ja hiilen välillä (Buytaert ym. 2009). Kaapelin pinnoitteen ja tartuntapinnan muodostavan kumisekoituksen tulee toimia hyvin yhteen, jotta sulfidikerros saadaan muodostumaan oikein ja hyvä ad-

heesiotaso saavutetaan. Myös vulkanointisykli tulee optimoida hyvin kaapelin pinnoitteen kanssa toimivaksi (Banerjee ym. 2014). Messinkipinnoitteen ja kumin välinen adheesiorajapinta kuvattu kuviossa 5.



KUVIO 5. Messinkipinnoitteen ja kumin välinen adheesiorajapinta (Buytaert ym. 2009, muokattu.)

Sinkki- ja rautasulfidit eivät muodosta tartuntaa kumin kanssa. Sinkin ja raudan sulfidit eivät kasva tarpeeksi nopeasti ennen vulkanoitumista, eivätkä muodosta dendriittejä. Näin ollen samanlaista mekaanista lukittumista kumin kanssa kuin kuparisulfidilla ei sinkki- tai rautasulfidilla tapahdu (Mark ym. 2013.)

Sinkkisulfidilla on kuitenkin olennainen osa tartunnan muodostumisessa. Sinkkisulfidikerroksen paksuus vaikuttaa kupari-ionien kulkeutumiseen tartuntarajapintaan, jossa tartunnan kannalta ratkaiseva kuparisulfidikerros muodostuu. Liian paksu sinkkioksidikerros ei päästä lävitseen tarpeeksi kupari-ioneja, eikä kuparisulfididendriittejä muodostu tarpeeksi. Liian ohut kuparisulfidikerros päästää kupari-ioneja lävitseen liikaa, jolloin kuparisulfidia muodostuu liikaa ja tartunta heikkenee. Optimaalisen kuparisulfidikerroksen muodostumiseksi sinkkisulfidikerroksen tuleekin olla sopiva. (Buytaert ym. 2009.)

Ajan kuluessa sinkki-ionit (Zn^{2+}) alkavat kulkeutua kuparisulfidikerroksen läpi ja alkavat muodostaa sinkkioksidia (ZnO) ja sinkkihydroksidia ($Zn(OH)_2$). (Buytaert & Luo 2014). Sinkki-ionien vapautumista lisää renkaan käytöstä aiheutuva lämmön muodostuminen sekä kontakti ilman kosteuden kanssa (Cho 2006). Tämä alkaa heikentää kumin ja kaapelin välistä adheesiota. Sinkki-ionien kulkeutuminen kuparisulfidikerroksen läpi on riippuvainen messinkipinnoitteen sähkönjohtavuudesta. Mitä sähköä johtavampi messinki kerros on, sitä enemmän sinkki-ioneja kulkeutuu tartuntarajapintaan. Sähkönjohtavuutta voidaan vähentää koboltti- tai nikkeli-ionilisäyksellä. Kobolttisuolat muodostavat koboltti-ioneja (Co^{2+}), jotka kulkeutuvat sinkkioksidikerrokseen ennen sulfidikerroksen muodostumista ja estävät sinkki-ionien kulkeutumista kuparisulfidikerrokseen. (Mark et.al 2013.) Kobolttia voidaan lisätä kumisekoitukseen. Koboltti voidaan lisätä myös kaapelipinnoitteeseen, jolloin sitä ei välttämättä tarvitse lisätä kumisekoitukseen (Buytaert & Luo 2014). Kupari-ioneja kulkeutuu tartuntarajapintaan hiljalleen ja ajan myötä kasvava kuparisulfidikerros alkaa heikentää tartuntaa (Buytaert 2009).

2.5.3 Kaapelin ja kumin välisen adheesio testaus

Kaapelin ja kumin välinen adheesio voidaan mitata ASTM-standardin D2229 mukaisesti. Standardi sisältää testimetodin voiman, joka tarvitaan teräskaapelin irti vetämiseen vulkanoidusta kumiblokista, mittaamiseen. Näytteet valmistetaan muotin avulla, jossa on 15 paikkaa kaapeleille. Tartuntanäyte kootaan kylmään muottiin. Kumista leikataan muottiin sopivat, suojamuovilla päällystetyt kumiblokit. Ensimmäinen kumiblokki asetetaan muottiin paikalleen ja suojamuovi poistetaan. Kaapelit asetetaan paikoilleen kumiblokin päälle, minkä jälkeen loput kumiblokit asetetaan kaapeleiden päälle paikalleen. Kootut tartuntanäytteet vulkanoidaan paistoprässissä. Vulkanoinnin jälkeen näytteet poistetaan tasaisesti painamalla muoteista. Näytteiden annetaan seistä vähintään 16 tuntia huoneen lämmössä ennen tartuntatestausta. Näytteistä poistetaan purseet esimerkiksi mattoveitsen avulla. (ASTM D2229.)

Tartuntatestaamiseen käytetään tarkoitukseen sopivaa vetokonetta (ASTM D2229). Vetokoneet voidaan jakaa kahteen ryhmään, hydraulisiin ja elektrome-

kaanisiin. Hydraulisissa vetokoneissa on joko yksi- tai kaksitoiminen mäntä, joka liikuttaa palkkia ylös ja alas. Elektromekaanisessa vetokoneessa on yksi, kaksi tai neljä ruuvia, joita pyöritetään sähkömoottorin avulla palkin liikuttamiseksi. Yleisesti elektromekaanisilla vetokoneilla vetonopeutta ja -matkaa voidaan vaihdella laajemmalla alueella. Lisäksi vetokone sisältää palkkiin kiinnitetyn mittakennon, mittakennossa kiinni olevan leuan sekä kiinteästi alemmassa palkista olevan leuan. (Davis 2004.) Vetokoneen toinen leuka kohdistaa kaapeliin testiblokin pinnan normaalin suuntaisen voiman ja toinen leuka on testiblokille valmistettu pidike. Tartuntanäyte asetetaan näytepidikkeeseen ja kaapelit puristetaan yksi kerrallaan leuan leukapalojen väliin ja vedetään irti kumiblokista. Irrottamiseen tarvittava voima mitataan. (ASTM D2229.)

Vetokoneen fysikaalisen voiman mittaaminen tapahtuu mittakennolla. Mittakenno sisältää mekaanisesti muotoa muuttavan rungon. Runko sisältää kuormitusmittareita, jotka ovat sähkövastuksia, joiden resistanssi riippuu fyysisestä kuormituksesta. Nämä ovat yhteydessä mittaussiltaan (measuring bridge). Mittakenno muuntaa fysikaalisen voiman sähköiseksi jännitteeksi, joka voidaan mitata. Mittakennoon kohdistuva voima on verrannollinen mitattavaan jännitteeseen ja sähköisen jännitteen polaarisuus muuttuu, kun mittakennoon kohdistuvan voiman suunta muuttuu vedosta kompressioksi eli puristukseksi. (Zwick & Roell n.d.) Voimaa voidaan mitata myös paineanturilla, joka on kuormitusmittarin muunnos. Paineanturissa kuormitusmittari aktivoidaan hydraulisen paineen avulla. (Davis 2004.)

3 MITTAUS- JA MÄÄRITYSMENETELMÄT

Opinnäytetyön kokeellinen osa koostui pienemmistä tutkimuksista. Näitä olivat paistolämpötilan ja -ajan vaikutus kaapelin ja kumin väliseen tartuntaan, kaapeli-kumi-rajapinnan lämpöhistorian vaikutus kaapelin ja kumin väliseen tartuntaan, lämpökäsittelyn jälkeinen kaapelin pinnan visuaalinen tarkastelu sekä eri kaapelivalmistajien kaapeleiden tartuntatason vertailu. Tulosten vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi kaikissa tutkimuksessa käytettiin tartuntanäytteiden valmistamiseen samaa ja samalla kertaa sekoitettua kumisekoitusta. Kumina käytettiin renkaan valmistuksessa kaapelin kanssa tartunnan muodostavaa kumiseosta. Opinnäytetyössä kaapelinäytteenä käytettiin 0,89 mm paksuista kaapelia neljältä (4) eri valmistajalta. Opinnäytetyössä käytetyt koodatut valmistajien nimet olivat Alfa, Beta, Gamma ja Delta.

3.1 Tartuntanäytteen valmistus

Tartuntanäytteet valmistettiin standardoidun testimenetelmän ASTM 2229 mukaisesti. Käytettävä kumi valssattiin kuvan (3) valssilla noin 7 mm paksuiseksi, leveydeltään tartuntanäytemuotin kumiblokin uraa vastaavaksi levyksi. Kumilevyjen annettiin seistä vähintään kolme (3) vuorokautta ennen käyttöä.



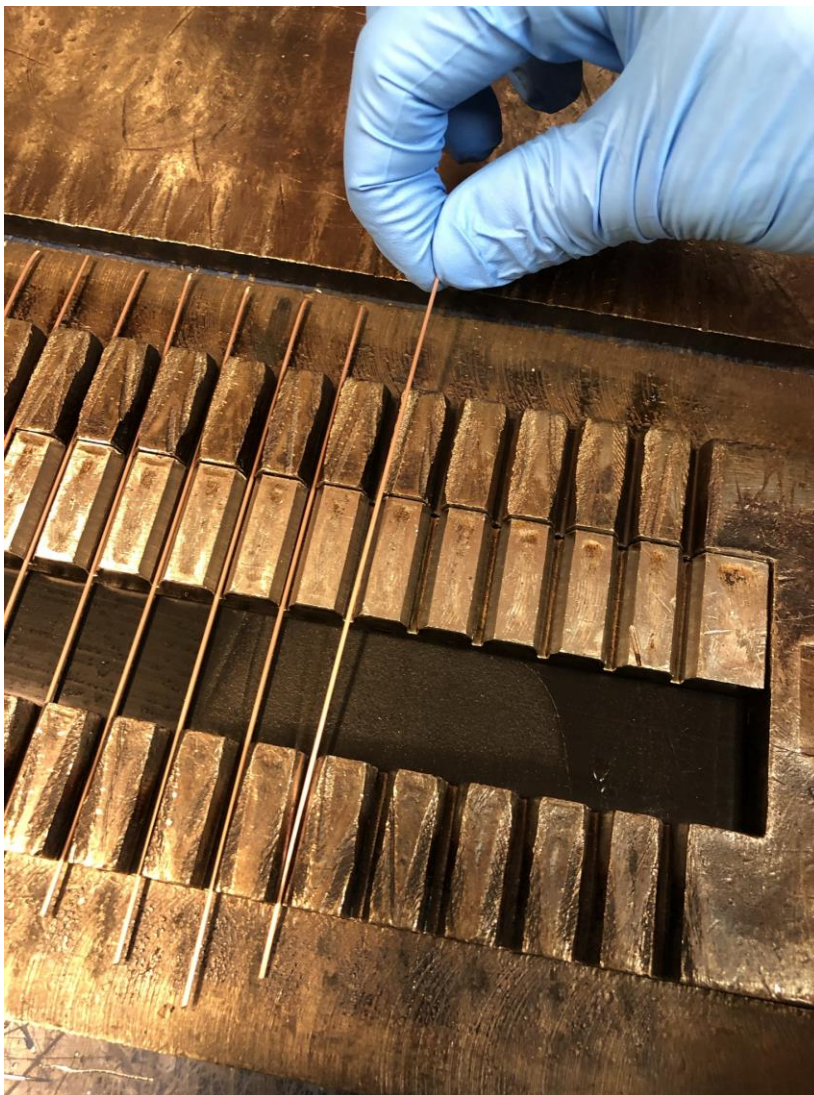
KUVA 3. Valssi.

Valssatut levyt suojattiin molemmin puolin muovilla ja säilytettiin valolta suojatuna. Valssattu kumilevy esitetty kuvassa 4 oikealla. Kumista leikattiin muottiin sopivat, 25 mm leveät palat kumileikkurilla. Kumileikkuri esitetty kuvassa 4 vasemmalla. Koska kumiblokkien leveys oli 25 mm myös kaapelin ja kumin välistä tartuntapintaa oli 25 mm pituudelta. Kumipalat (blokit) punnittiin ja tulosta verrattiin kumin kokonaismassalle asetettuun toleranssiin. Tarvittaessa kumin massaa vähennettiin leikkaamalla kumista pala pois tai kasvatettiin leikkaamalla uusi, leveämpi kumipala.



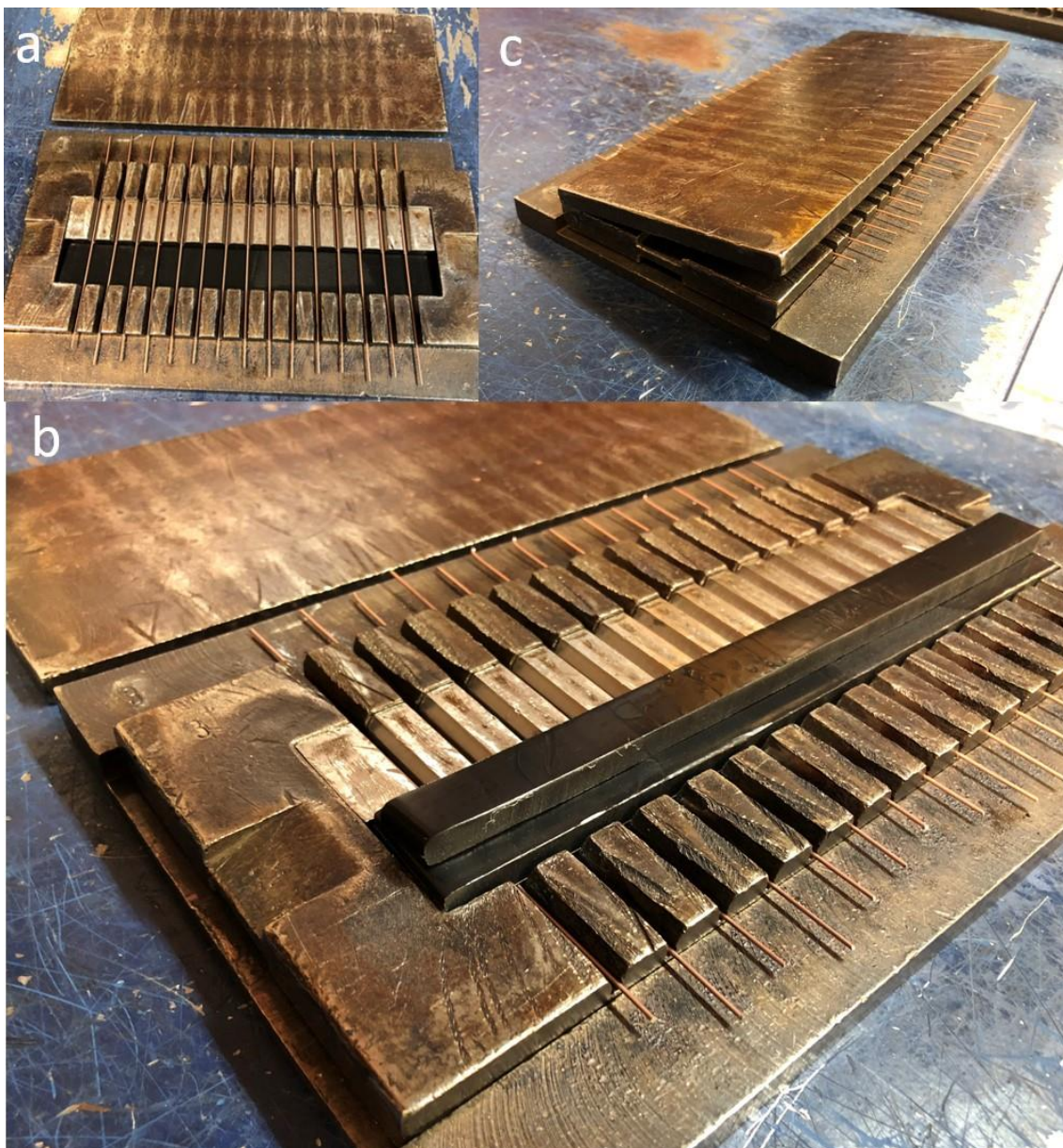
Kuva 4. Kumileikkuri ja valssattu kumilevy.

Kumia käsiteltiin puhtain nitrilihansikkain ja kumin tartuntapintaan koskemista vältettiin. Ensimmäisen kumipalan alapuolen suojamuovi poistettiin. Kumipala asetettiin muotin pohjalle ja tarvittaessa paineltiin varovasti saksien kärjillä paikalleen. Kumipalaa pyrittiin painelemaan tartuntapintojen välisistä kohdista. Kumipalan päällinen suojamuovi poistettiin. Kaapelista leikattiin sopivan pituisia paloja, jotka asetettiin muotin pohjalla olevan kumipalan päälle. Tartuntanäytteet kasattiin huoneen lämpöisiin muotteihin. Kaapeleita käsiteltiin puhtain nitrilihansikkain kuvan 5 mukaisesti vain niiden päihin koskien.



KUVA 5. Kaapeleiden asettelu muotteihin.

Kaapeleiden päät asetettiin toiselta puolelta tasaan melkein muotin reunaan asti kuvan 6 (a) mukaisesti. Kaapelin pätkien päälle asetettiin toinen kaistale kumia, jonka päälle kolmas kumikaistale kuvan 6 (b) mukaisesti. Näistä kumipaloista molemmat suojamuovit poistettiin ennen asettamista paikalleen. Muotin kansi asetettiin muotin päälle. Tartuntanäytemuotti ennen vulkanointia esitetty kuvassa 6 (c).



KUVA 6. Tartuntanäytteen kokoaminen muottiin.

Tartuntanäytteet vulkanoitiin paistoprässillä. Paistoprässiin mahtui yhteensä neljä (4) näytettä kerrallaan. Kaksi (2) ylemmälle ja kaksi (2) alemmalle paistotasolle. Paistoprässi esitetty kuvassa 7.



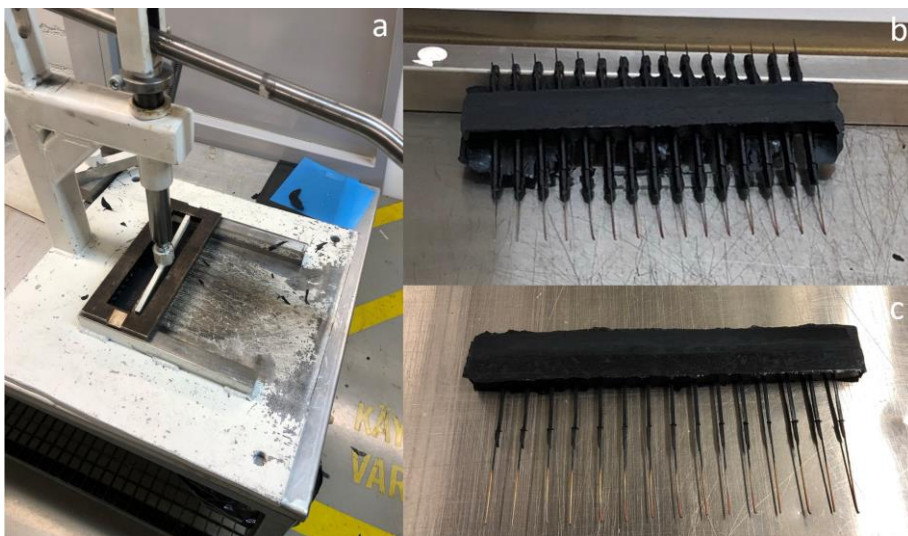
KUVA 7. Paistoprässi.

Paistoprässissä on kolme paistolevyä, joiden lämpötila voidaan erikseen säätää. Kaikissa tämän opinnäytetyön testeissä kaikkien kolmen paistolevyn lämpötila asetettiin keskenään samaksi ja tartuntanäytteet vulkanoitiin 150 barin paineessa. Vulkanoitilämpötilalla tarkoitetaan tässä tapauksessa paistoprässin paistolevyjen lämpötilaa. Vulkanoitaessa vai yhtä näytettä asetettiin vulkanoitavan näytteen viereen samalle paistotasolle tyhjä muotti, jotta paine jakautuisi tasaisesti muotin sisällä. Tartuntamuotit pyrittiin asettamaan syvyyssuunnassa mahdollisimman keskelle paistolevyjä. Tartuntanäyte paistoprässissä ennen paiston aloittamista esitetty kuvassa 8 vasemmalla puolella. Paistoprässin turvaovi suljettiin ja vulkanointi aloitettiin, jolloin tartuntanäyte puristui paistolevyjen väliin. Kuvassa 8 oikealla puolella esitetty paistoprässi suljettuna paistona aikana.



KUVA 8. Tartuntanäyte asetettuna paistoprässiin ja vulkanoitumassa paistoprässissä.

Vulkanoinnin jälkeen tartuntanäyte irrotettiin kuvan 9 (a) muotinpurkulaitteella. Tartuntanäyte asetettiin vetokaappiin jäähtymään. Seuraavana päivänä tartuntanäyte puhdistettiin ylimääräisistä kumipurseista saksien ja mattoveitsen avulla ja leikattiin ylimääräiset päät kaapeleista pois leikkureilla. Puhdistamaton tartuntanäyte esitetty kuvassa 9 (b) ja puhdistettu tartuntanäyte esitetty kuvassa 9 (c).

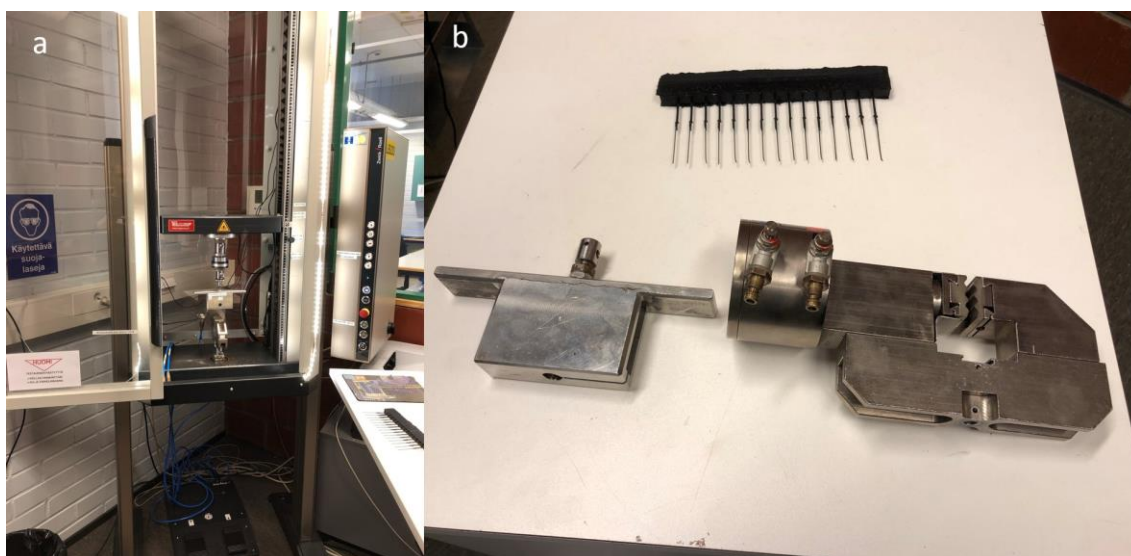


KUVA 9. Muotinpurkulaite ja tartuntanäytteet.

Tartuntanäytettä puhdistettaessa varottiin vaurioittamasta kumiblokin ja kaapeleiden pintaa. Muottien jäähtymisen nopeuttamiseksi muotit asetettiin paiston jälkeen huuvan alle.

3.2 Tartuntatesti

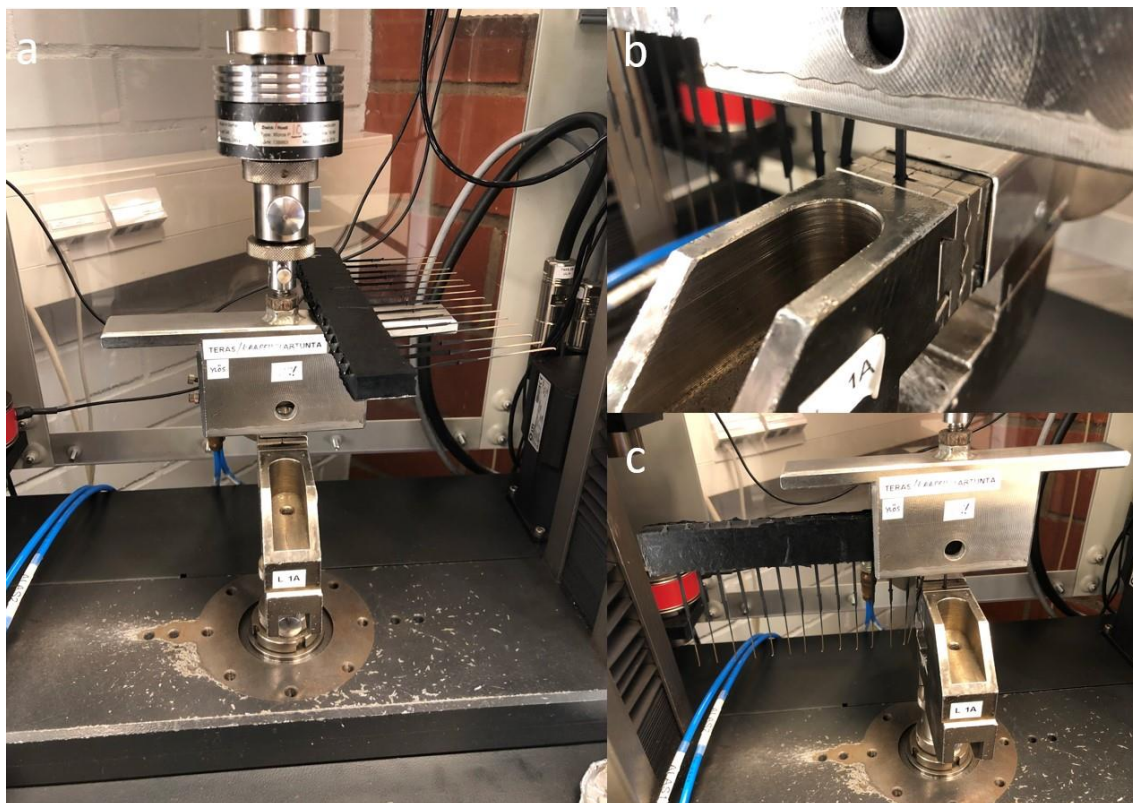
Tartuntatestaamiseen käytettiin Zwick & Roell:n Z010 -vetokonetta. Vetokone esitetty kuvassa 10 (a). Ennen tartuntatestin aloittamista vetokoneeseen asennettiin soveltuvat leuat paikalleen. Kaapeleiden tartuntatestaukseen käytettävät leuat kuvassa 10 (b), jossa yläleuka vasemmalla ja alaleuka oikealla. Tartuntanäytteen kaapelit ohjattiin yläleuan uraa pitkin leuan keskelle yksi kerrallaan. Alempana leukana käytettiin paineilmatoimista leukaa, jossa käytettiin aaltomaisia leukapaloja.



KUVA 10. Vetokone ja kaapelitartuntaleuat.

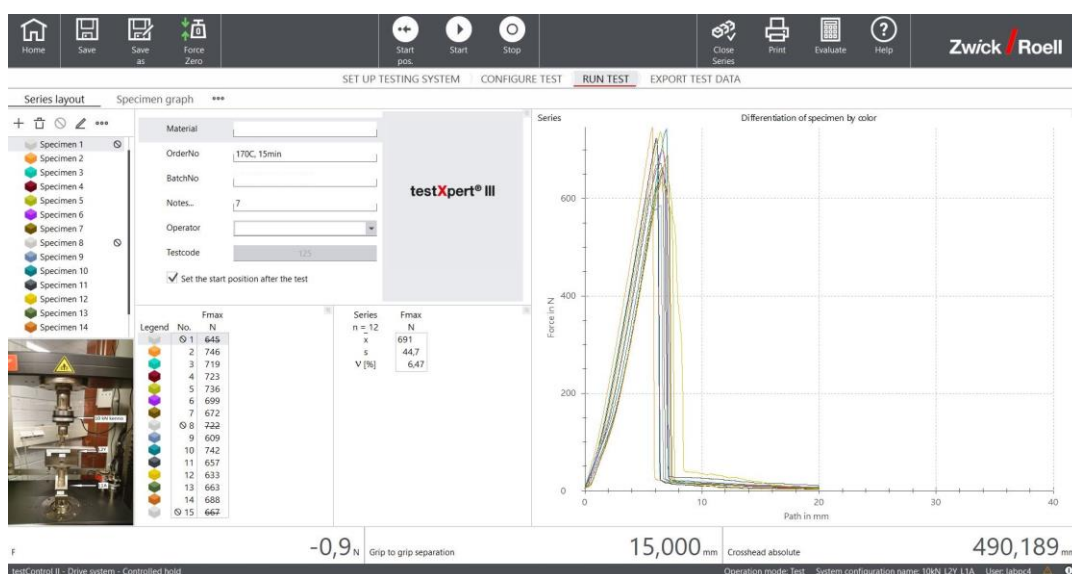
Laitteen ohjelmistosta valittiin tarkoitukseen soveltuva, ASTM D2229 -standardiin perustuva ohjelma. Tartuntanäyte asetettiin ylemmän leuan päälle kuvan 11 (a) mukaisesti ja vetokoneen mittaama voima nollattiin. Kaapelin irrottamiseen tarvittavan voiman mittaamiseen käytettiin 10 kN mittakennoa. Näyte asetettiin vetokoneen ylempään vetoleukaan niin, että ensimmäisenä vedettävä kaapeli oli leuan keskellä kuvan 11 (b) mukaisesti. Yläleuka ajettiin alkuasemaan ja tartuntanäytteen ensimmäinen kaapeli puristettiin keskelle alaleukaa.

Paineilmatoimisen alaleuan avautumista ja sulkeutumista ohjattiin poljinmoduulin avulla. Paineeksi asetettiin kuusi (6) baria. Kuvassa 11 (c) tartuntanäyte vetokoneessa puristettuna alaleukapalojen väliin.



KUVA 11. Voiman nollaus ja tartuntanäytteen asettaminen vetokoneeseen.

Kaapelit vedettiin yksi kerrallaan irti kumiblokista ja irrottamiseen tarvittava voima mitattiin. Vetokoneen ohjelman näyttö kuvassa 12.



KUVA 12. Laiteohjelmiston näyttö.

Referenssikaapeleita käytettäessä niiden tulokset asetettiin tilaan, jossa ohjelma jätti niiden tartuntatulokset tulosten laskennan ulkopuolelle. Laite laski tartuntanäytteen vetotulosten keskiarvon ja keskihajonnan.

3.3 Vulkanointiajan vaikutus tartuntaan

Paistoajan vaikutusta tartuntaan tutkittiin paistamalla kaapelitartuntanäytteitä 170 °C lämpötilassa eri ajan paistopuristimella. Paistoajat, joilla tartuntaa tutkittiin, olivat 5 min, (7,5 min), 10 min, 15 min, 30 min, ja 60 min. Tartuntanäyttekammat valmistettiin normaalisti. Tartuntanäytteitä valmistettiin neljällä (4) muotilla, joten näytteitä valmistettiin sitä mukaa, kun muotteja vapautui käyttöön paiston ja jäähtymisen jälkeen. Tarkoituksena oli valmistaa jokaista paistoaikaa kohden neljä (4) rinnakkaista näytettä. Kaikkia tutkimukseen tarvittavia tartuntanäytteitä ei olisi keritty paistamaan saman päivän aikana, joten paistot päädyttiin jakamaan niin, että paistettiin kaksi (2) näytettä jokaista paistolämpötilaa kohden yhtenä päivänä ja toiset kaksi (2) toisena (2.) päivänä. Tarkoituksena oli yhdistää kaikkien neljän (4) rinnakkaisen näytteen tulokset yhdeksi keskiarvoksi mahdollisuuksien mukaan. Mittaustulosten perusteella päädyttiin kuitenkin erottelemaan eri päivinä valmistettujen mittaussarjojen tulokset. Lisäksi mittaustulosten perusteella päädyttiin valmistamaan vielä kolmas (3.) mittaussarja, jossa 5 minuutin paistoaika korvattiin 7,5 minuutin paistoajalla. Viiden (5) minuutin paistoaika korvattiin 7,5 minuutin paistoajalla myös toisessa (2.) mittaussarjassa. Valmistetut näytteet taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Paistoajan vaikutus -näytteet.

	Paistoaika / min					
	5	7,5	10	15	30	60
Mittaussarja	Rinnakkaisten näytteiden määrä / kpl					
1.	2	-	2	2	2	2
2.	-	2	2	2	2	2
3.	-	2	2	2	2	2

Ensimmäisen (1.) mittaussarjan näytteet valmistettiin ja paistettiin 27.5.2021 ja vetotesti suoritettiin seuraavana päivänä 28.5.2021. Tartuntanäytteiden valmistamiseen käytettiin kumia, joka oli sekoitettu 30.3.2021 ja valssattu 23.4.2021. Toisen (2.) mittaussarjan näytteet valmistettiin ja paistettiin 1.6.2021 ja vetotesti suoritettiin seuraavana päivänä 2.6.2021. Näytteet valmistettiin kumista, joka oli sekoitettu 30.3.2021 ja valssattu 26.5.2021. Kolmannen (3.) mittaussarjan näytteet valmistettiin ja paistettiin 16.6.2021 ja vetotesti suoritettiin seuraavana päivänä 17.6.2021. Näytteet valmistettiin kumista, joka oli sekoitettu 30.3.2021 ja valssattu 4.6.2021. Näytekkampojen tuloksista mitätöitiin reunimmaisten ja keskimmäisen kaapelilankojen vetotulokset, jotta tulokset olisivat paremmin vertailukelpoisia niiden tartuntatestien kanssa, jossa näillä paikoilla käytetään referenssikaapelia. Näin ollen jokainen tartuntanäyte sisälsi yhteensä 12 kappaletta vedettäviä kaapeleita.

3.4 Vulkanointilämpötilan vaikutus tartuntaan

Paistolämpötilan vaikutusta tartuntaan tutkittiin paistamalla kaapelitartuntanäytteitä eri paistoprässin lämpötiloissa. Lämpötilat, joilla tartuntaa tutkittiin, olivat 140 °C, 150 °C, 160 °C, 170 °C ja 180 °C. Tartuntanäytekkamat valmistettiin normaalisti. Tartuntanäytteitä valmistettiin neljällä muotilla, joten näytteitä valmistettiin sitä mukaa, kun muotteja vapautui käyttöön paiston ja jäähtytyksen jälkeen.

Kaikkia tutkimukseen tarvittavia tartuntanäytteitä ei olisi keritty paistamaan saman päivän aikana, joten paistot jaettiin kahdelle (2) päivälle niin, että ensimmäisenä (1.) päivänä paistettiin kaksi (2) tartuntanäytettä jokaista vulkanointilämpötilaa kohden ja toisena (2.) päivänä samoin. Tartuntanäytteitä valmistettiin yhteensä neljä (4) kappaletta jokaista vulkanointilämpötilaa kohden. Tarkoituksena oli yhdistää kaikkien rinnakkaisten mittaustulokset mahdollisuuksien mukaan yhdeksi keskiarvoksi. Mittaustulosten perusteella nähtiin kuitenkin järkeväksi erottaa mittaussarjojen tulokset toisistaan. Valmistetut näytteet taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Paistolämpötilan vaikutus -näytteet.

Mittausarja	Paistolämpötila / °C				
	140	150	160	170	180
	Rinnakkaisten näytteiden määrä / kpl				
1.	2	2	2	2	2
2.	2	2	2	2	2

Ensimmäisen (1.) mittausarjan näytteet valmistettiin ja paistettiin 3.6.2021 ja vetotesti suoritettiin seuraavana päivänä 4.6.2021. Tartuntanäytteiden valmistamiseen käytettiin kumia, joka oli sekoitettu 30.3.2021 ja valssattu 26.5.2021. Toisen (2.) mittausarjan näytteet valmistettiin ja paistettiin 23.6.2021 ja vetotesti suoritettiin seuraavana päivänä 24.6.2021. Näytteet valmistettiin kumista, joka oli sekoitettu 30.3.2021 ja valssattu 4.6.2021. Näytekenttien tuloksista mitätöitiin reunimmaisten ja keskimmaisen kaapelilankojen vetotulokset, jotta tulokset olisivat paremmin vertailukelpoisia niiden tartuntatestien kanssa, jossa näillä paikoilla käytetään referenssikaapelia. Näin ollen jokainen tartuntanäyte sisälsi yhteensä 12 kappaletta vedettäviä kaapeleita.

3.5 Lämpöhistorian vaikutus tartuntaan

Tässä tutkimuksessa tarkoituksena oli valmistaa tartuntanäytteitä, jotka ensin lämpökäsitellään eri lämpötiloissa ja paistetaan seuraavana päivänä ja tartuntatuloksia verrataan referenssitarjunnanäytteen tuloksiin. Referenssinä käytetään saman valmistajan saman erän kaapelia, mutta josta valmistettua tartuntanäytettä ei ole lämpökäsitelty. Käytetyt lämpökäsittelylämpötilat olivat 60°C, 80°C ja 100°C.

Tarkoituksena oli suorittaa tutkimus kahden eri valmistajan näytteillä, Alfa ja Beta. Jokaista lämpötilaa kohden oli tarkoitus valmistaa neljä (4) rinnakkaista näytettä. Mittaustulosten, ajan säästön sekä näytteiden riittävyyden vuoksi rinnakkaisten määriä kuitenkin joissakin tapauksissa vähennettiin. Ensimmäisen valmistajan tartuntanäytteet valmistettiin käyttäen koko muotteja. Yksittäisiä vetokokeita sisältyi 12 kpl jokaista muottia kohden. Mittaustulosten perusteella ja ajan säästön vuoksi 80°C ja 100°C lämpökäsittelyiden kohdalla kolmas (3.) ja

neljäs (4.) rinnakkainen jätettiin mittaamatta. Näytteiden määrät kuvattu taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Alfa:n tartuntanäytteet.

Tartuntanäyte	Rinnakkaisten määrä
Referenssi	4
60°C	4
80°C	2
100°C	2

Betan kohdalla käytettiin neljän (4) eri erän näytteitä vähäisen näytemäärän vuoksi. Tästä syystä Betan kohdalla päädyttiin puolittamaan muottien näytemäärät niin, että yhteen muottiin tuli kaksi näytettä eri erästä. Eri erät numeroitiin numeroin 1–4. Näytteet asetettiin muotteihin niin, että toisen erän näytteet tulivat toiselle puolen muottia ja toisen erän näytteet toiselle. Kun reunoille ja keskelle asetettiin referenssikaapelit, jäi kummankin erän näytteille kuusi (6) vetotestiä muottia kohden. Vetotestejä tuli siis kahdella (2) muotilla kuusi (6) kappaletta eli yhteensä 12 kappaletta näyte-erää kohden. Referenssikaapeleina käytettiin Alfa:n kaapeleita, joita käytettiin myös Alfa:n varsinaisina näytteinä. Referenssinäytteitä valmistettiin samoilla muoteilla samat määrät samoilla muottipaikoilla, mutta referenssinäytteille ei tehty lämpökäsittelyä. Näytteiden muottipaikat taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Lämpökäsittelynäytteiden muottipaikat.

Muotti / puoli	Vasen	Oikea
Näyte-erä		
1.	1	2
2.	1	2
3.	3	4
4.	3	4
1.	1 referenssi	2 referenssi
2.	1 referenssi	2 referenssi
3.	3 referenssi	4 referenssi
4.	3 referenssi	4 referenssi

Muotit jaettiin kahtia, jotta samaa näyte-erää saataisiin kahteen eri muottiin. Näin tuloksissa tulisi ainakin jossain määrin huomioitua mahdolliset muotin vaikutukset. Näytteiden jakamisella saatiin näytteiden määrä riittämään siten, että jokaisesta näyte-erästä saatiin kaksi (2) samassa muotissa samalla paikalla paistettua kuuden (6) vetokokeen sarjaa, joita voitiin verrata saman erän samoilla muoteilla samoilla paikoilla paistettuihin referenssinäytteisiin. Betan kaikki näytteet taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Beta:n näytteet.

Lämpökäsittely	Näyte-erä	Rinnakkaisten määrä
Ei lämpökäsittelyä	1 referenssi	2
Ei lämpökäsittelyä	2 referenssi	2
Ei lämpökäsittelyä	3 referenssi	2
Ei lämpökäsittelyä	4 referenssi	2
60°C	1	2
60°C	2	2
60°C	3	2
60°C	4	2
80°C	1	2
80°C	2	2
80°C	3	0
80°C	4	0
100°C	1	0
100°C	2	0
100°C	3	2
100°C	4	2

Betan kohdalla kaikkia suunniteltuja mittauksia ei suoritettu mittaustulosten perusteella ja ajan säästön vuoksi. Mittauksia ei suoritettu 80 °C lämpökäsittelyllä näyte-erien 3 ja 4 kohdalla ja 100 °C lämpökäsittelyllä näyte-erien 1 ja 2 kohdalla. Taulukossa 7 punaisella merkitty suunnitellut, mutta pois jätetyt mittaukset.

Näytteet vulkanoitiin paistopuristimessa. Paistoaikana käytettiin 30 minuuttia ja paistolämpötilana 150 °C. Näytteiden valmistamiseen käytettiin kumia, joka oli sekoitettu 30.3.2021 ja valssattu 4.6.2021.

3.6 Kaapeleiden pinnan visuaalinen tarkastelu

Tässä tutkimuksessa tarkoituksena oli tutkia visuaalisesti kaapelin pintaa tartuntanäytteen lämpökäsittelyn jälkeen. Tarkoituksena oli koota tartuntatestimuotit, lämpökäsittellä niitä eri lämpötiloissa, purkaa paistamattomat muotit seuraavana päivänä ja tarkastella visuaalisesti kaapeleiden pintaa. Tarkoituksena oli havainnoida esimerkiksi mahdollisten kemiallisten reaktioiden aiheuttamia värinmuutoksia kaapelissa. Tutkimukseen otettiin neljän (4) eri kaapelivalmistajan kaapelinäytteitä. Kaapelivalmistajat, joiden kaapeleita testiin otettiin, olivat Alfa, Beta, Gamma ja Delta.

Koska tässä tutkimuksessa ei näytteille suoritettu vetotestiä ollenkaan, käytettiin pienempiä kaapelinäytemääriä muottia kohden. Tarkoituksena oli valmistaa kaksi tartuntanäytettä jokaista lämpökäsittelylämpötilaa kohden, joista jokaiseen tulisi 3–4 kaapelia jokaiselta kaapelivalmistajalta. Näytteiden paikat muotissa taulukossa 8. Taulukossa valmistajat Alfa, Beta, Gamma ja Delta sekä suluissa kaapelinäytteiden paikat muotissa.

TAULUKKO 8. Kaapelinäytteiden paikat muotissa.

Näyte	Vasen reuna			Oikea reuna
60°C A	Alfa (1–3)	Delta (4–7)	Beta (8–11)	Gamma (12–15)
60°C B	Delta (1–3)	Alfa (4–7)	Gamma (8–11)	Beta (12–15)
80°C A	Alfa (1–3)	Delta (4–7)	Beta (8–11)	Gamma (12–15)
80°C B	Delta (1–3)	Alfa (4–7)	Gamma (8–11)	Beta (12–15)
100°C A	Alfa (1–3)	Delta (4–7)	Beta (8–11)	Gamma (12–15)
100°C B	Delta (1–3)	Alfa (4–7)	Gamma (8–11)	Beta (12–15)

Paikat vaihdettiin jokaisen kaapelinäytteen kohdalla A ja B tartuntanäytteen välillä. Näin saatiin huomioitua kaapelinäytteen paikan muotissa vaikutusta kaapelin visuaalisiin muutoksiin.

Tartuntanäytteiden kokoamisen jälkeen suoritettiin lämpökäsittely. Lämpökäsittelyaikana oli kaikilla lämpötiloilla 30 minuuttia. Lämpökäsittely suoritettiin läm-

pökaapissa. Lämpökäsittelyn jälkeen muotit jätettiin huoneenlämpöön jäähtymään seuraavaan aamuun. Seuraavana päivänä tartuntatestimuotit purettiin ja kumiblokit ja kaapeli irrotettiin toisistaan, jotta kaapelin tartuntapinta paljastui. Tämän jälkeen kaapelin tartuntapintaa tarkasteltiin visuaalisesti.

3.7 Eri kaapelivalmistajien kaapeleiden tartuntatason vertailu

Kaapelivalmistajien väliseen tartuntatestiin valittiin neljä (4) eri valmistajaa. Valmistajat, joiden kaapeleita käytettiin, olivat Alfa, Beta, Gamma ja Delta. Alfan kaapeleista näytteitä oli saatavilla vain noin vuoden vanhoja, joten oli käytettävä niitä. Tässä työssä käytetyt Alfan kaapelit olivat eri erää kuin toisissa tämän opinnäytetyön testeissä käytetyt. Tartuntanäytteet valmistettiin niin, että jokaiseen tartuntanäytteeseen tuli viisi (5) kaapelia kolmelta (3) eri kaapelivalmistajalta. Tartuntanäytteitä valmistettiin neljää (4) erilaista, joista jokaisesta valmistettiin kaksi (2) rinnakkaista näytettä. Näytteiden valmistus taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Kaapelivalmistajien kaapeleiden paikat muoteissa.

Näyte	Paikat 1–5	Paikat 6–10	Paikat 11–15
1A	Beta	Delta	Alfa
1B	Beta	Delta	Alfa
2A	Delta	Beta	Gamma
2B	Delta	Beta	Gamma
3A	Gamma	Alfa	Beta
3B	Gamma	Alfa	Beta
4A	Alfa	Gamma	Delta
4B	Alfa	Gamma	Delta

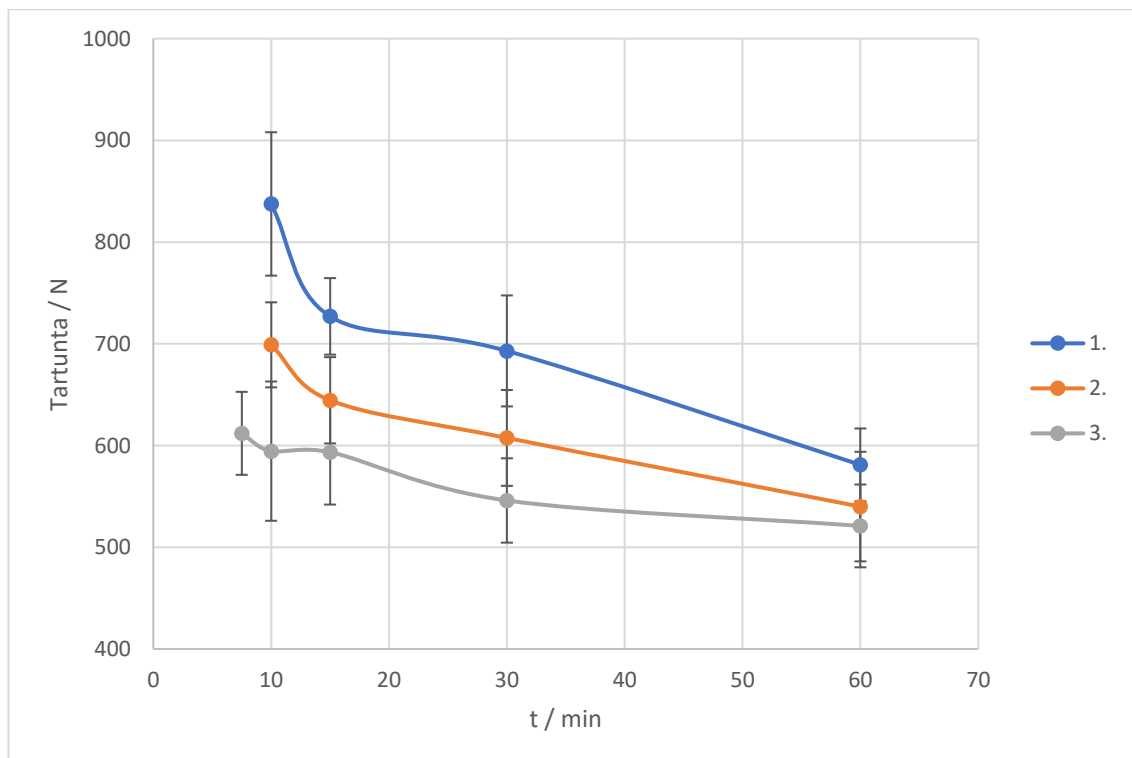
Tässä näytekonfiguraatiossa jokaisen valmistajan kaapelitartunta testattiin kaksi (2) kertaa jokaisella muotin sisäisellä paikalla. Näin saatiin mahdollisuus arvioida kaapeleiden sijainnin tartuntanäytteen sisällä vaikutuksia tartuntatuloksiin. Lisäksi kaikki kaapelivalmistajat asettuivat kahdessa erilaisessa tartuntanäytteessä toisiaan vastaan saman tartuntanäytteen sisällä eli yhteensä neljä (4) kertaa. Näin tartuntatuloksissa saatiin huomioitua tartuntanäytteiden välisiä eroja.

Tartuntanäytteet vulkanoitiin paistopuristimessa. Paistoaikana käytettiin 30 minuuttia ja paistolämpötilana 150 °C. Tässä tutkimuksessa käytettiin kumia, joka oli sekoitettu 30.3.2021 ja valssattu 26.5.21.

4 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

4.1 Vulkanointiajan vaikutus -testin tulokset

Vulkanointiajan vaikutusta kumin ja kaapelin väliseen adheesioon tutkittiin kolme (3) kertaa. Näytteet vulkanoitiin 170 °C lämpötilassa. Ensimmäisen mittausarjan näytteiden kumit valssattiin ja näytteet paistettiin ja testattiin ensimmäisenä (1.), toisen (2.) mittausarjan seuraavana ja kolmannen (3.) viimeisenä. Mittausten tulokset esitetty kuviossa 6. Jokainen mittapiste kaaviossa on kahden (2) tartuntanäytteen tuloksen keskiarvo. Jokainen tartuntanäyte sisältää 12 yksittäistä vetotestiä. Kaavion virhepalkit kertovat mittapistettä vastaavien kahden (2) tartuntanäytteen keskihajontojen keskiarvon.



KUVIO 6. Paistoajan vaikutus kumin ja kaapelin väliseen tartuntaan.

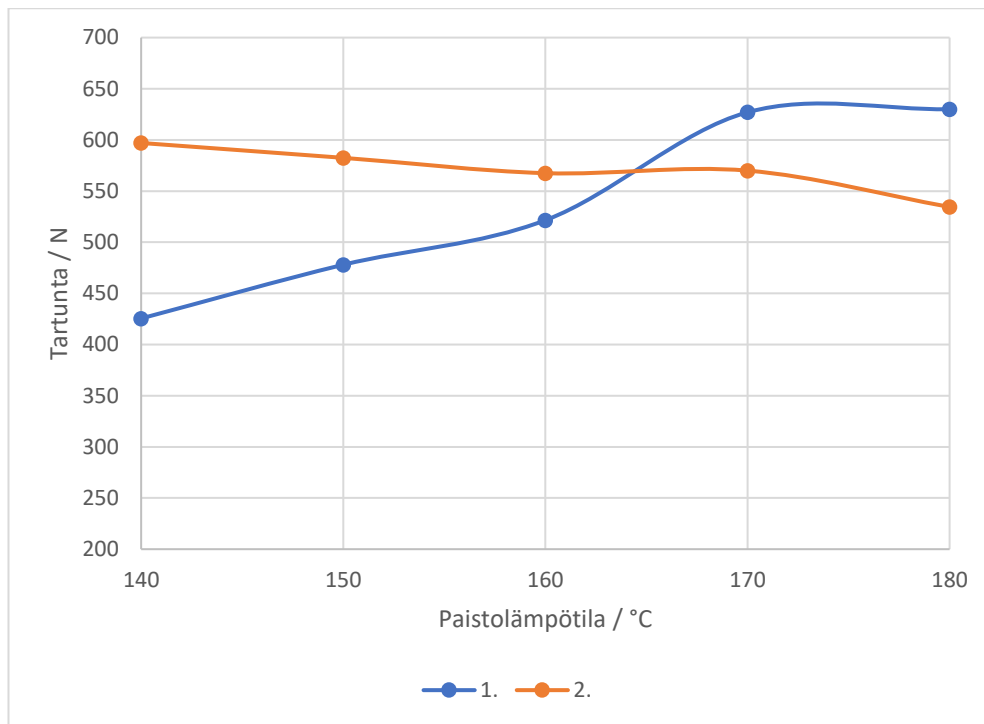
Kuviosta 6 voidaan selkeästi havaita tulostason laskeva trendi. Alun perin tarkoituksena oli valmistaa ja mitata neljä (4) rinnakkaista tartuntanäytettä jokaista tarkasteltavaa paistoaikaa kohden. Tulostason selkeän laskun vuoksi ei kuitenkaan ollut järkevää yhdistää eri päivinä valmistettujen ja mitattujen tartuntanäytteiden tuloksia yhdeksi keskiarvoksi.

Viiden (5) minuutin paistoajan jälkeen tartuntanäytteet olivat raakoja, eikä niistä saatu vetotuloksia. Tulostason laskun varmistamiseksi valmistettiin vielä kolmas (3.) mittausarja, johon lisättiin 7,5 minuutin paisto aika. Myös toisessa mittausarjassa valmistettiin näytteet 7,5 minuutin paistoajalla, mutta näytteet olivat hieman raakoja eli vulkanoituminen oli jäänyt vajaaksi, joten niistä ei saatu vetotuloksia. Siihen, että kolmannen (3.) mittausarjan näytteet paistuivat ja toisen (2.) eivät aivan on saattanut vaikuttaa esimerkiksi muotin sijainti paistoprässissä tai kumin vanheneminen. Todennäköisesti 7,5 minuuttia on lähellä paistoajan rajaa, jossa näytteet juuri ja juuri kerkeävät paistumaan. Kuviosta 6 huomataan, että 7,5 minuutin tartuntatulokset on suurempi, kuin 10 minuutin paistoajan tulos. Tuloksista voidaan päätellä, että myös ensimmäisen (1.) ja toisen (2.) mittausarjan tapauksessa tartuntamaksimi olisi todennäköisesti löytynyt jostain 7,5 minuutin ja 10 minuutin paistoajan väliltä.

Kuviosta 6 voidaan havaita, että aiemmin valssatusta kumista valmistettujen tartuntanäytteiden tartuntataso laskee jyrkemmin ja enemmän 10 minuutin ja 15 minuutin paistoajien välillä, kun toisena valssatusta kumista valmistettujen. Kolmantena (3.) valssatusta kumista valmistettujen näytteiden tartuntataso 10 minuutin ja 15 minuutin paistoajalla on lähes samalla tasolla toisiinsa nähden. Mittausten tulokset numeerisesti liitteessä (1) taulukossa 10.

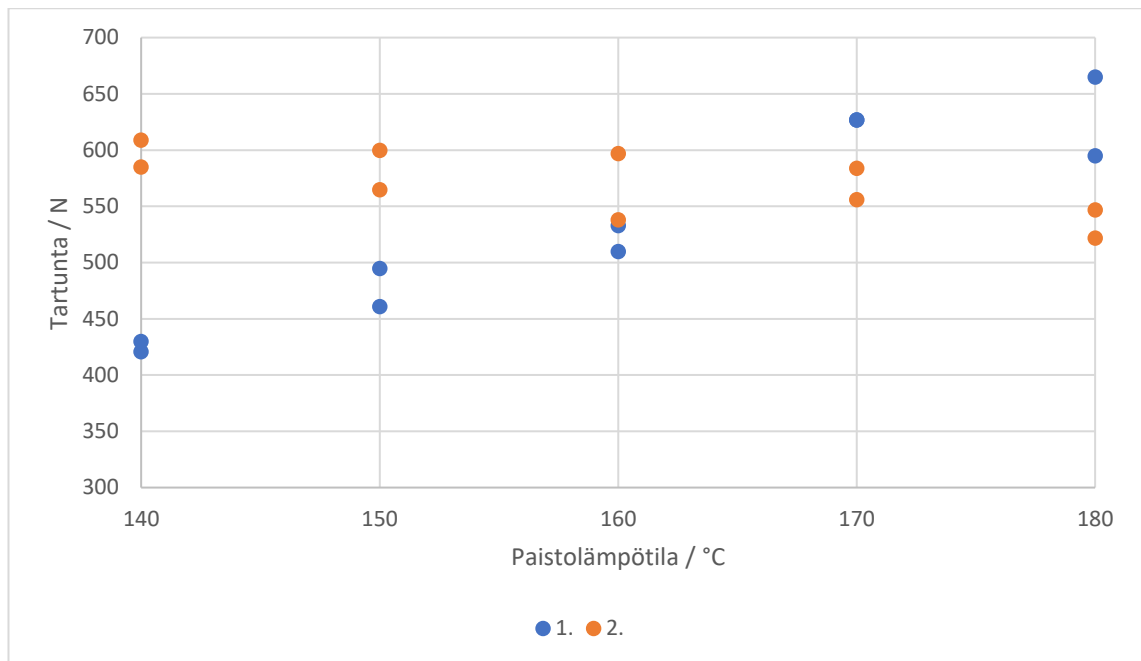
4.2 Vulkanointilämpötilan vaikutus -testin tulokset

Paistolämpötilan vaikutusta kumin ja kaapelin väliseen tartuntaan tutkittiin kahdella (2) mittausarjalla. Ensimmäisen (1.) mittausarjan kumit valssattiin ja näytteet valmistettiin ja testattiin ensimmäisenä. Mittausten tulokset esitetty kuviossa 7. Jokainen mittapiste kaaviossa on kahden (2) tartuntanäytteen tuloksen keskiarvo. Jokainen tartuntanäyte sisältää 12 yksittäistä vetotestiä.



KUVIO 7. Paistolämpötilan vaikutus kumin ja kaapelin väliseen tartuntaan.

Kuten paistoaikatestauksessa, voidaan tässäkin tapauksessa huomata eri mittausarjojen tulosten eroavaisuus, joten tälläkään kertaa ei mittausarjojen tuloksia ole järkevää yhdistää yhdeksi keskiarvoksi. Tartuntataso ei laske tasaisesti kaikilla lämpötiloilla, vaan tartuntavoima paistolämpötilan funktiona - kuvaaja muuttuukin suhteellisen jyrkästi nousevasta loivasti laskevaksi. Ensimmäisen (1.) mittausarjan tartuntataso kasvaa huomattavasti paistolämpötilan kasvaessa, kun taas toisen (2.) mittausarjan tartuntataso laskee hieman. Kuvioista havaitaan, että tartuntataso kasvaa eniten 140°C paistolämpötilalla ja taittuu laskevaksi noin 165°C kohdalla. Tartuntataso laskee eniten korkeimmalla 180°C paistolämpötilalla. Tartuntanäytteiden tulokset esitetty erikseen kuviossa 8.



KUVIO 8. Paistolämpötilan vaikutus tartuntaan, kaikki näytteet.

Kuviosta 8 nähdään kaikkien tartuntanäytteiden tartuntatulokset. Voidaan havaita, että minkään paistolämpötilan kohdalla eri mittaussarjojen tulokset eivät mene ristiin ja vaikka vertailukelpoisia rinnakkaisia mittauksia on vain kaksi (2), niin rinnakkaisten mittausten tulokset ovat suurimmaksi osaksi melko lähellä toisiinsa verrattuna mittaussarjojen väliseen eroon. Lisäksi jokainen tartuntanäyte sisältää 12 vetotulosta. Mittausten tulokset numeerisesti liitteen (2) taulukossa 11.

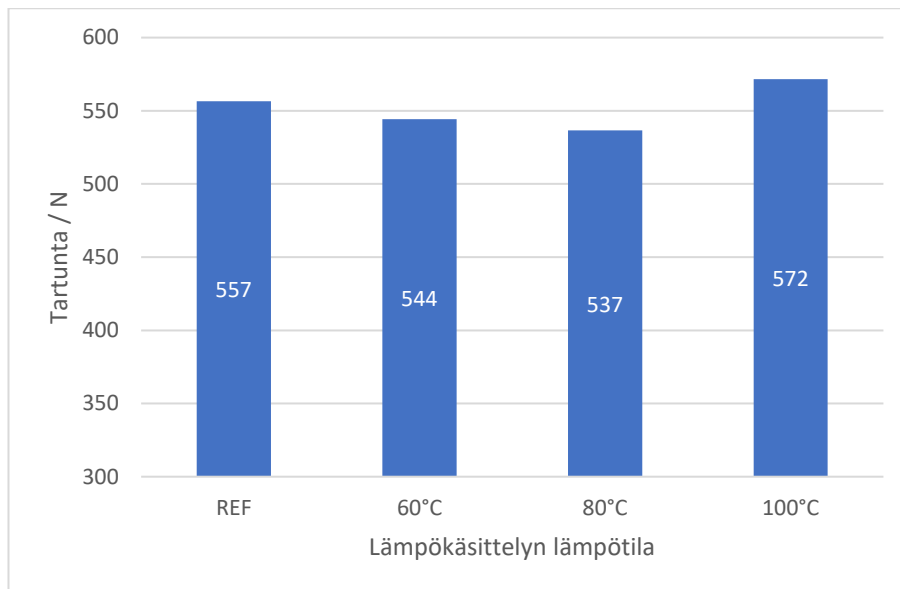
4.3 Lämpöhistorian vaikutus -testin tulokset

Tähän tutkimukseen valittiin kaapelinäytteitä kahdelta (2) eri valmistajalta. Kaapelinäytteitä testattiin valmistajilta Alfa ja Beta. Alfalta testattiin neljä (4) referenssinäytettä, joita ei lämpökäsitelty, neljä (4) 60°C lämpökäsiteltyä näytettä sekä kaksi (2) 80 °C ja 100 °C lämpökäsiteltyä näytettä. Alfana näytteiden tartuntatestitulokset taulukossa 12, jossa tartuntatulokset ja keskihajonnat s.

TAULUKKO 12. Alfa-näytteiden tartuntatitulokset.

Näyte	Tartuntatulokset / N	s / N
Referenssi A	526	57,4
Referenssi B	563	42,2
Referenssi C	572	53,8
Referenssi D	565	35,3
Referenssi ka.	557	47,2
60 °C A	537	63,9
60 °C B	541	58,5
60 °C C	551	48,1
60 °C D	548	51,5
60 °C ka.	544	55,5
80 °C A	557	75,5
80 °C B	516	40,0
80 °C ka.	537	57,8
100 °C A	587	45,0
100 °C B	556	70,7
100 °C ka.	572	57,9

Tartuntatestien välillä ei havaittu merkittävää eroa. Taulukosta 12 ja kuviosta 9 voidaan huomata pientä vaihtelua tulosten välillä. Vaihtelu on kuitenkin samalla tasolla rinnakkaisnäytteiden tulosten vaihtelun kanssa, joten vaihtelu johtunee muista tekijöistä, kuin lämpökäsittelystä. Pieni vaihtelu rinnakkaisten näytteiden välillä voi johtua esimerkiksi pienistä eroista kaapelipinnoitteen tasaisuudessa, yhtenäisyydessä tai koostumuksessa. Pieniä eroja voisi aiheutua myös kaapelin varastoinnista ja kuljetuksesta.



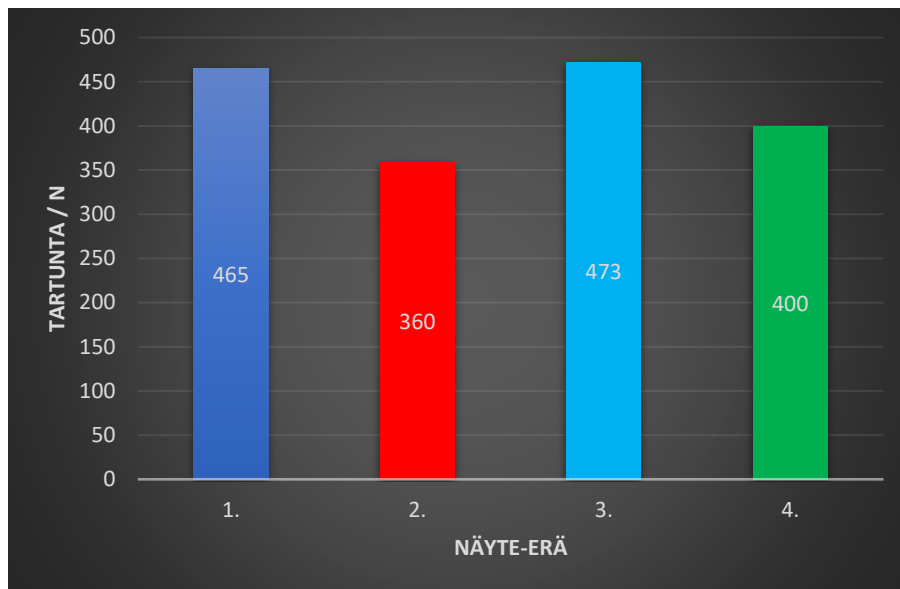
KUVIO 9. Alfa-näytteiden tartuntatulokset.

Betan kaapelinäytteiden vähäisen määrän vuoksi näytteet jaettiin kahteen (2) muottiin. Testaukseen otettiin neljää (4) tämän valmistajan eri erää kaapelinäytteitä. Jokaista kaapelinäytettä kohti tuli kahteen (2) muottiin kuusi (6) kaapelia. Lisäksi jokaista näytettä kohti valmistettiin samasta erästä samalla muotilla samalla muotin sisäisellä paikalla kaksi (2) referenssinäytettä, joita ei lämpökäsitelty. Betan tartuntatulokset taulukossa 13.

TAULUKKO 13. Betan tartuntatulokset.

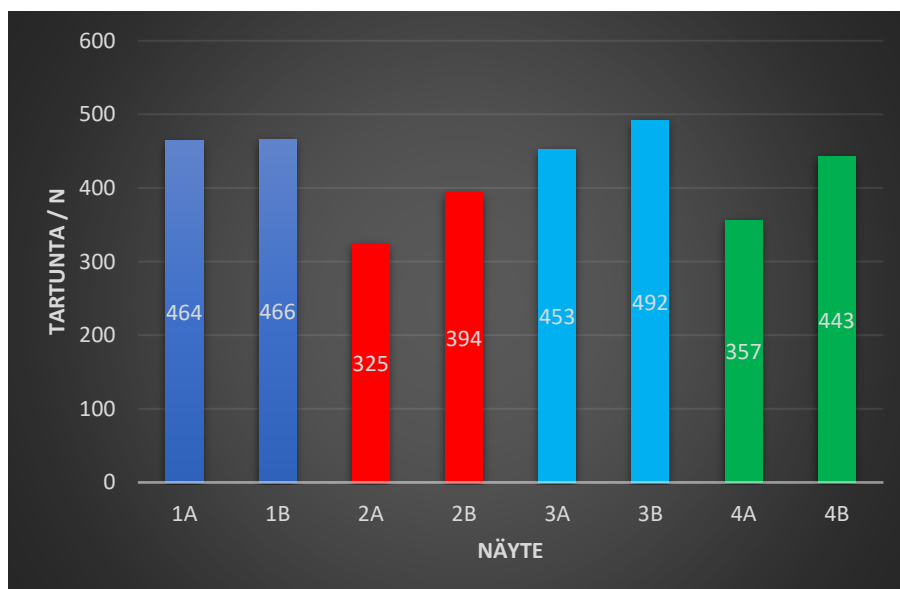
Näyte	Tartuntatulostulos / N	Referenssitaso / N	Keskiarvo / N
Referenssi 1A	464	615	465
Referenssi 1B	466	609	
Referenssi 2A	325	615	360
Referenssi 2B	394	609	
Referenssi 3A	453	595	473
Referenssi 3B	492	575	
Referenssi 4A	357	595	400
Referenssi 4B	443	575	
60°C 1A	471	587	477
60°C 1B	482	556	
60°C 2A	327	587	347
60°C 2B	366	556	
60°C 3A	500	588	499
60°C 3B	498	554	
60°C 4A	437	588	411
60°C 4B	384	554	
80°C 1A	464	515	443
80°C 1B	421	478	
80°C 2A	357	515	315
80°C 2B	272	478	
100°C 3A	450	647	478
100°C 3B	506	582	
100°C 4A	466	647	466
100°C 4B	465	582	

Taulukossa 13 referenssitaso -sarakkeessa kunkin tartuntanäytteen referenssi-kaapeleiden keskiarvo ja keskiarvo -sarakkeessa näyte-erä kohtainen tartuntatulosten keskiarvo. Kuviossa 10 huomataan, että näyte-erien välillä oli huomattavia eroja tartuntatuloksissa.



KUVIO 10. Betan referenssinäytteiden tartuntatulosten keskiarvot.

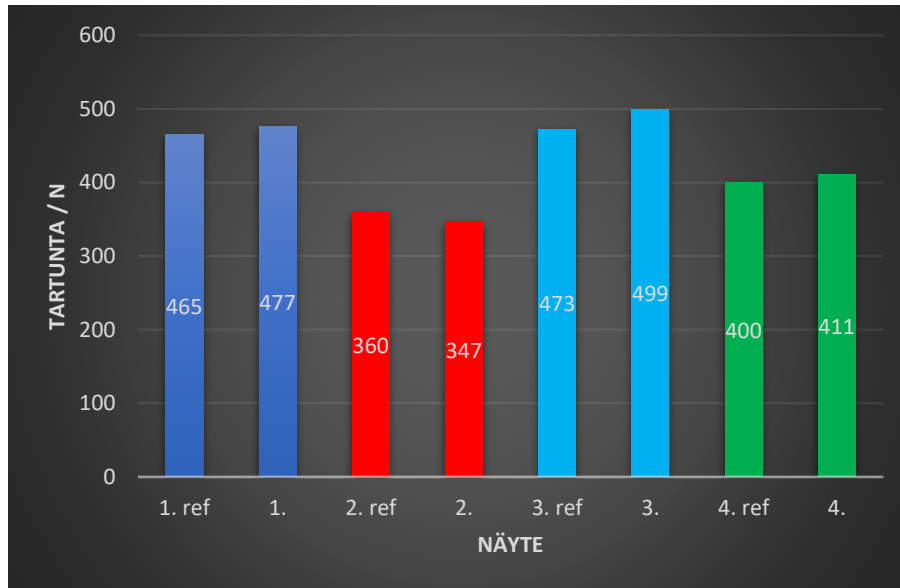
Huomataan, että alhaisimmillaan tartuntatulos oli toisella (2.) näyte-erällä 360 N, joka oli yli 100 N pienempi kuin ensimmäisen (1.) ja kolmannen (3.) erän tulos. Kuviossa 11 eritelty kunkin näyte-erän referenssinäytteiden rinnakkaiset tartuntatulokset.



KUVIO 11. Betan referenssinäytteiden tartuntatulokset.

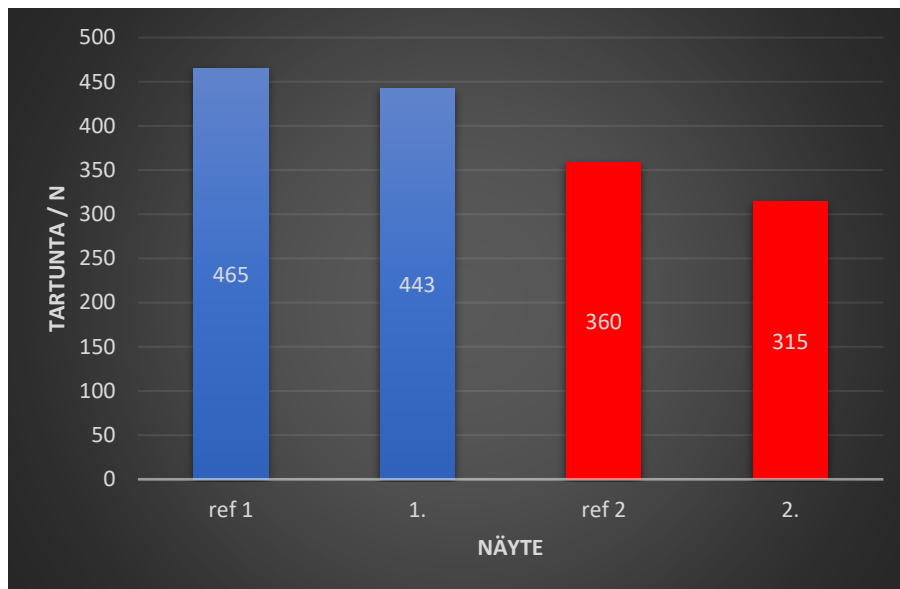
Kuviosta 11 huomataan, että jonkin verran eroja oli myös näyte-erän tulosten sisällä. Vain kuuden (6) kaapelin käyttäminen 12 kaapelin sijaan tartuntanäytettä kohti lisää todennäköisyyttä rinnakkaisten tulosten eroavaisuudelle. Kuviossa

12 vertaillaan referenssinäytteiden ja 60°C lämpökäsiteltyjen näytteiden tartuntatuloksia näyte-eräkohtaisesti.



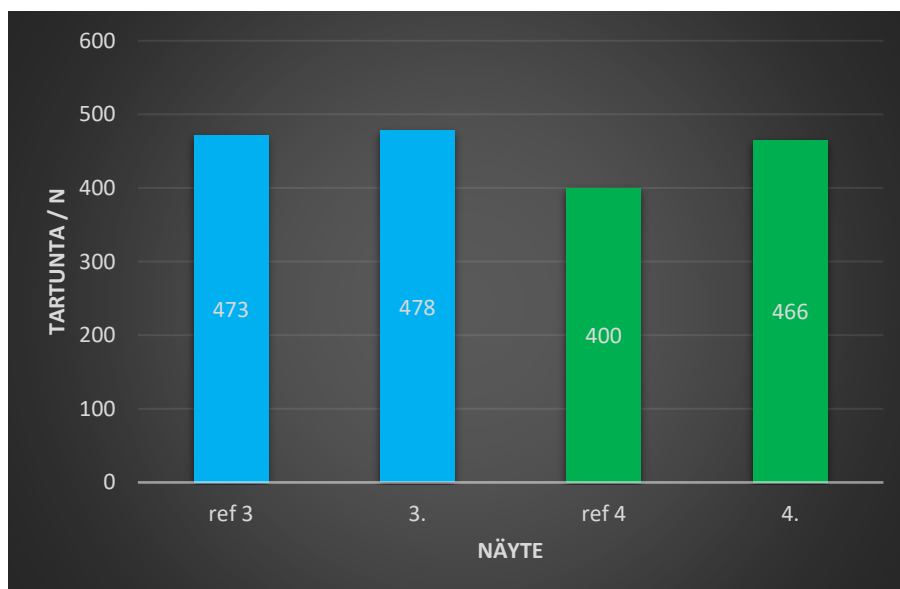
KUVIO 12. Referenssinäytteiden ja 60°C lämpökäsiteltyjen näytteiden tartuntatulosten eräkohtainen vertailu.

Kuviosta 12 havaitaan, että tartuntatulokset vaihtelevat vain vähän referenssinäytteiden ja lämpökäsiteltyjen näytteiden välillä. Kuviossa 12 jokainen palkki sisältää kahden (2) tartuntanäytteen keskiarvon. Näyte-erien välinen vaihtelu näkyy tässäkin. Myöskään 80°C lämpökäsittelyllä referenssinäytteiden ja lämpökäsiteltyjen näytteiden välillä ei näkynyt huomattavaa tartuntatasoeroa, kuten kuviosta 13 voidaan huomata. Näyte-erän 2 kohdalla tartuntatulos laski 45 N.



KUVIO 13. Referenssinäytteiden ja 80°C lämpökäsiteltyjen näytteiden tartuntatulosten eräkohtainen vertailu.

Tartuntanäytteiden, jotka lämpökäsiteltiin 100°C lämpötilassa referenssi ja lämpökäsiteltyjen näytteiden tulokset olivat myös melko lähellä toisiaan, kuten kuvio 14 voidaan huomata. Näyte-erän 4 kohdalla tartuntatulokset nousi 66 N.



KUVIO 14. Referenssinäytteiden ja 100°C lämpökäsiteltyjen näytteiden tartuntatulosten eräkohtainen vertailu.

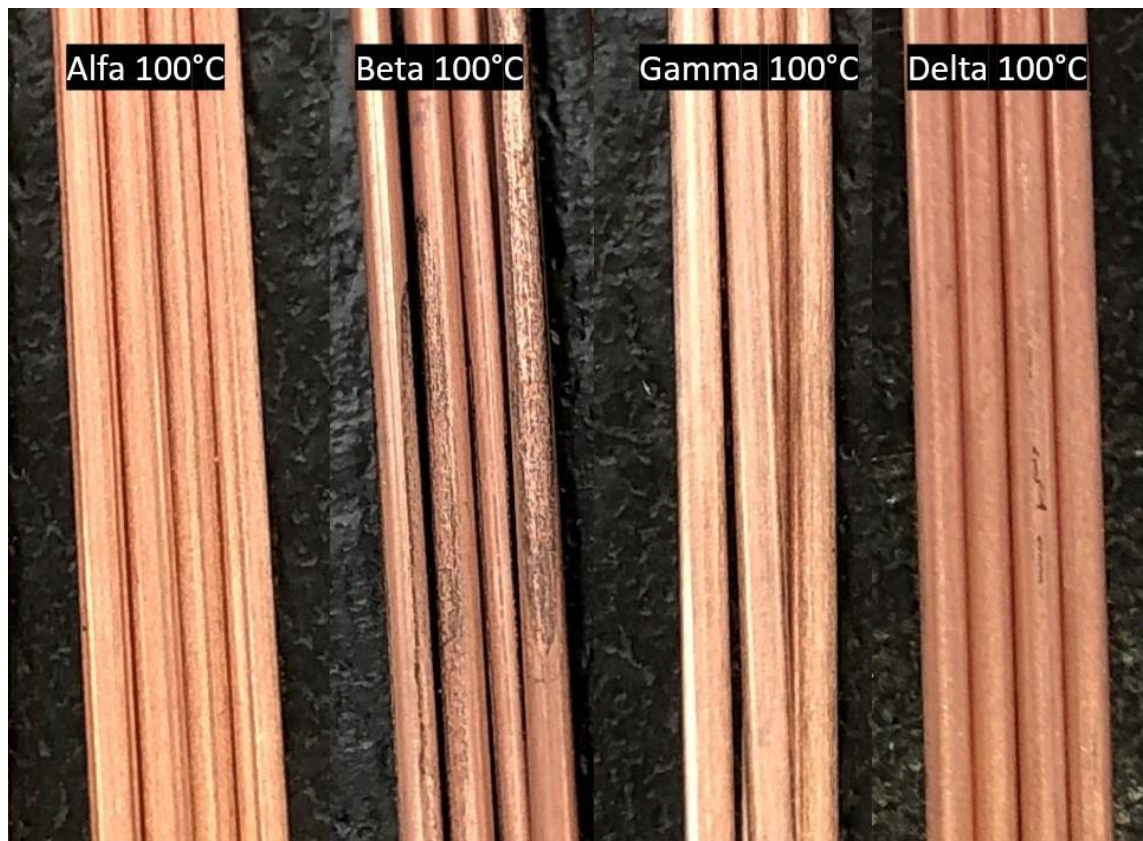
Näiden tulosten perusteella Betan näyte-erien välillä oli selkeitä eroja tartuntatasoissa. Tulosten tarkastelussa tulee kuitenkin huomioida suhteellisen vähäinen vedettyjen kaapeleiden määrä. Tartuntatasojen erot referenssinäytteiden ja

lämpökäsitteltyjen näytteiden välillä olivat suhteellisen pieniä, joten näiden tulosten perusteella vaikuttaa, että tässä tutkimuksessa käytetyn tapainen lämpökäsittely ei vaikuta merkittävästi kumin ja kaapelin väliseen tartuntaan.

Merkittävää tämän tutkimuksen tuloksissa oli saman valmistajan eri näyte-erien välinen tartuntatasojen vaihtelu. Varsinkin näyte-erän 2 kohdalla tartuntatulokset olivat hyvin alhaiset, keskimäärin 340 N. Kaikkien Betan näyte-erien tartuntatulokset olivat selkeästi alemmalla tasolla kuin Alfan näytteiden tulokset. Tartuntanäytteiden sisäisten referenssikaapeleiden tartuntatulokset olivat suurimaksi osaksi normaalilla tasolla. Referenssikaapeleiden tartuntatulokset olivat hieman alhaisemmat 80°C lämpökäsitteltyjen näytteiden tapauksessa. Kaikki lämpöhistorian vaikutus -testien tulokset löytyvät liitteen (3) taulukosta 14.

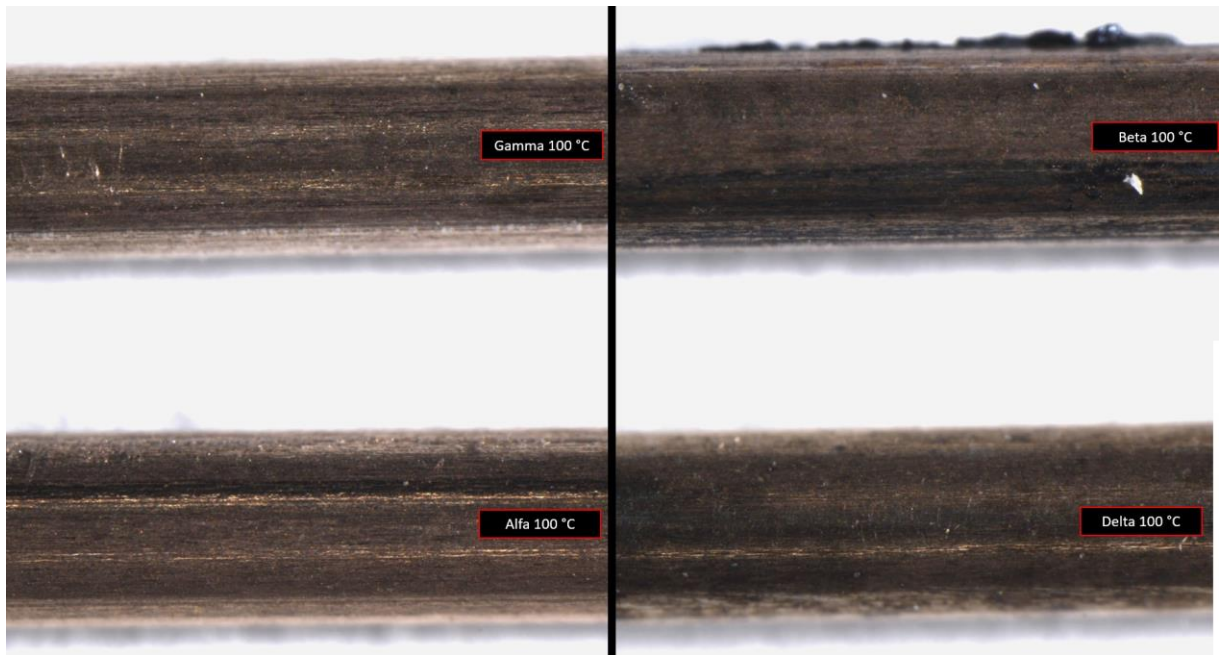
4.4 Kaapeleiden pinnan visuaalinen tarkastelu -tulokset

Tartuntanäytteet koottiin normaalisti. Kokoamisen jälkeen koottuja muotteja lämpökäsiteltiin lämpökaapissa joko 60°C, 80°C tai 100°C lämpötilassa 30 minuutin ajan. Lämpökäsittelyn jälkeen muottien annettiin jäähtyä yön yli. Seuraavana päivänä muotit purettiin ja kaapeleiden pintaa tarkasteltiin visuaalisesti. Kaapeleiden pinnan värimuutoksia sekä kumin tarttumismäärää arvioitu sanallisesti liitteen (4) taulukossa 15. Kuvaan 23 koottu eri valmistajien kaapeleita 100°C lämpökäsittelyn ja muotin purkamisen jälkeen.



KUVA 23. Lämpökaapissa 100°C lämpötilassa lämpökäsitellyjen tartuntanäytteiden kaapeleiden pinta näytteen purkamisen jälkeen.

Kuvasta 23 voidaan karkeasti havaita, että Betan kaapeliin on selkeästi jäänyt kiinni eniten kumia. Myös Gamman ja Deltan kaapeleissa näkyy vähäisiä kumi-jäämiä. Alfa kaapeissa ei juurikaan näkynyt kumi-jäämiä minkään lämpökäsittelyn jälkeen. Kuvaan (24) koottu kaikilta testin valmistajilta mikroskooppikuvat yhden (1) 100 °C:ssa lämpökäsitellyn kaapelin pinnasta.

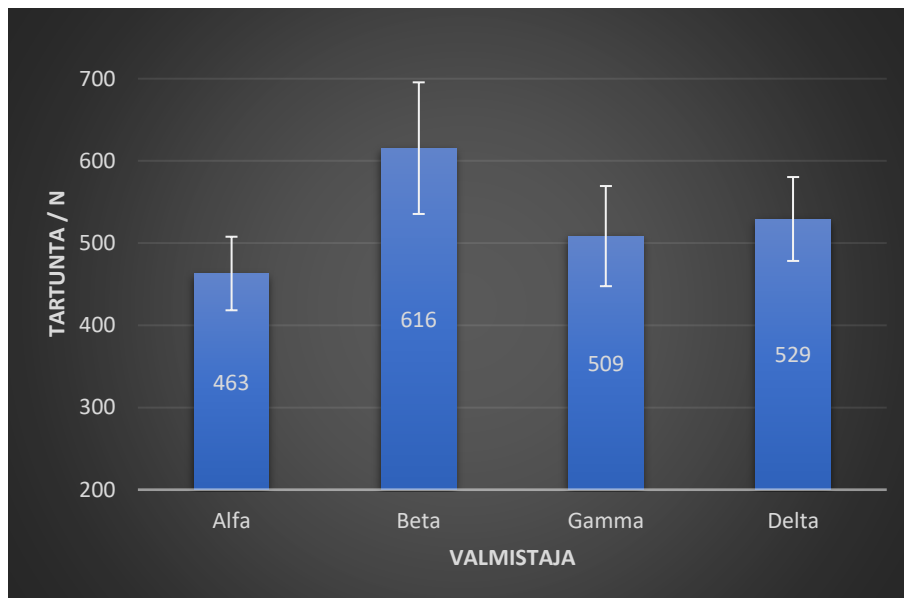


KUVA 24. Mikroskooppikuvat eri valmistajien kaapeleiden pinnasta lämpökäsittelyn ja muotin purkamisen jälkeen.

Mikroskooppikuvastakin (24) voidaan havaita suuria kumijäämiä Betan kaapelin pinnalla. Kumia näkyy jonkin verran myös Deltan kaapelin pinnalla. Gamman ja Alfa välillä eroa on hankala nähdä näistä mikroskooppikuvista.

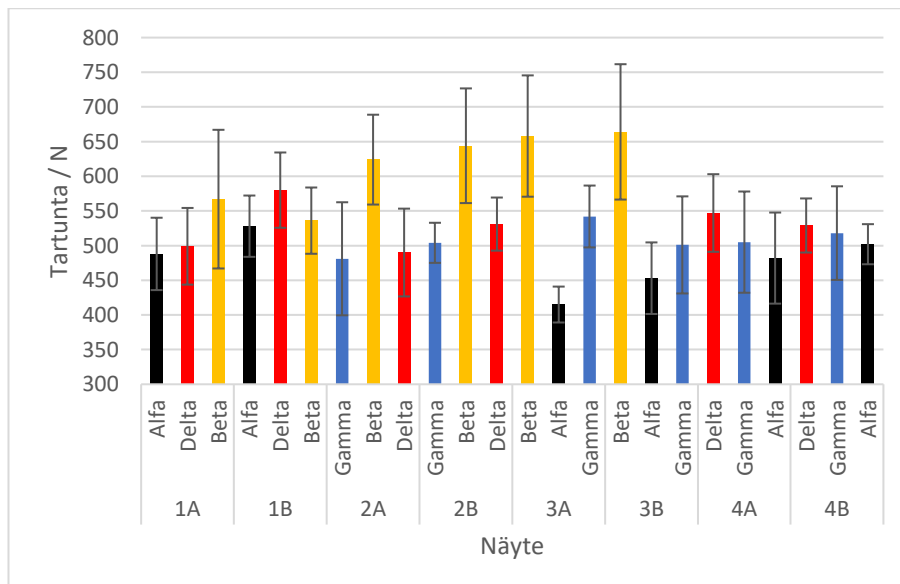
4.5 Kaapelivalmistajien vertailu -testin tulokset

Kaapeleiden tartuntatasoja vertailtiin neljän (4) valmistajan välillä. Vertailuun otettiin kaapeleita valmistajilta Alfa, Beta, Gamma ja Delta. Vertailun tulokset kuviossa 15, jossa valmistajien kuuden (6) tartuntanäytteen keskiarvot sekä virhepalkkeina kuuden (6) tartuntanäytteen keskihajontojen keskiarvot. Keskihajontojen keskiarvo huomioi vain tartuntanäytteen sisäistä hajontaa, ei näytteiden välistä.



KUVIO 15. Eri valmistajien kaapeleiden tartuntatasojen vertailu.

Selkeästi parhaan tartuntatuloksen tässä testissä sai valmistaja Beta. Noin 100 N pienemmällä tartuntatuloksella valmistajat Gamma ja Delta. Alhaisin tartuntataso tässä testissä oli Alfaan kaapelinäytteillä. Alfaan kaapeleiden tartuntatulos oli yli 150 N alaisempi kuin tämän testin parhaan, Betan tulos. Eri tartuntanäytteiden tulokset kuvaajassa 16, jossa tartuntatulokset tartuntanäytteittäin ja virhepalkkina keskihajonta.



KUVIO 16. Valmistajien vertailu tulokset, kaikki näytteet.

Kuviossa 16 kunkin valmistajan tuloksia kuvaavat palkit värjätty samalla värillä. Kuviossa 16 voidaan huomata, että rinnakkaisten tartuntanäytteiden tulokset

vastaavat hyvin läheisesti toisiaan. Ainoastaan 1A ja 1B rinnakkaisissa näytteissä tartuntatuloksen paremmuusjärjestys muuttuu, 1A näytteessä Beta on korkeammalla tasolla kuin Delta ja 1B näytteessä päinvastoin. Betan tuloksissa on suhteellisen paljon hajontaa suhteessa muiden valmistajien tuloksiin.

Kun tässä testissä saatuja tuloksia verrataan kumijäämiin kaapeleiden pinnalla lämpökäsittelyn ja muotin purkamisen jälkeen, huomataan tartuntatasojen korreloivan kumijäämien kanssa. Mitä enemmän kumia jäi tietyn valmistajan kaapeleiden pintaan, sitä parempi oli kyseisen valmistajan kaapelin tartuntataso. Tulokset viittaavat siihen, että kaapeleiden tartuntaerot saattavat ilmentyä ainakin osittain jo ennen vulkanointia. Tuloksien tarkastelussa tulee kuitenkin huomioida, että suhteellisen vähäisen näytemäärän vuoksi Betan näyte -erät eivät olleet samat näiden kahden (2) testin välillä. Kuten lämpöhistorian vaikutus - testeissä huomattiin, tämän valmistajan kaapeleiden tartuntatasot voivat vaihdella eräkohtaisesti. Tulosten tarkastelussa tulee huomioida myös Alfa näytteiden vanhuus. Näytteiden vanhuuden vuoksi tulokset eivät ole täysin vertailukelpoiset muiden valmistajien tulosten kanssa, sillä on mahdollista, että kaapelin vanheneminen vaikuttaa kaapelin adheesiokykyyn. Kaikki valmistajien vertailu -testien tulokset liitteen (5) taulukossa 16.

5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa Nokian Renkaat Oyj:lle lisätietoa kumin vulkanointiajan, vulkanointilämpötilan sekä kaapeli-kumi-rajapinnan lämpöhistorian vaikutuksista kumin ja vahvikekaapelin väliseen tartuntaan. Tavoitteena oli myös tuottaa tietoa eri kaapelivalmistajien kaapeleiden välisistä adheesioeroista. Tavoitteisiin päästiin ja lisätietoa edellä mainittuihin kumin ja kaapelin väliseen adheesioon vaikuttaviin tekijöihin liittyen saatiin tuotettua.

Opinnäytetyössä tarkoituksena oli mitata metallisen vahvikekaapelin irrottamiseen eri ajan ja eri lämpötilassa vulkanoidusta kumista tarvittavaa voimaa. Vulkanointiajan ja -lämpötilan vaikutusten osalta opinnäytetyön kokeellisen osan kautta tuotetun luotettavuustaso jäi vain kahden (2) rinnakkaismittauksen vuoksi oletettua vähäisemmäksi. Kompastuskiveksi näissä testeissä osoittautui todennäköisesti se, että kumin vanhenemisen vaikutuksia ei huomioitu testisuunnittelussa. Testeissä käytettiin saman erän kumia, mutta kumia valssattiin eri päivinä. Valssaamatonta kumia säilytettiin suojaamattomana lavalla. Lavalta käytiin hakemassa tarvittaessa kumia, josta valssattiin joitakin suunnilleen A4 - kokoisen paperiarkin kokoisia kumilevyjä. Valssatut levyt suojatiin kirkkaalla suojamuovilla heti valssaamisen jälkeen ja levyt asetettiin valolta suojaan kaappiin. Kaapissa kumilevyjen ympärille käärittiin lisäksi värikästä, paremmin valolta suojaavaa muovia. Syy tartuntatasojen muutoksille voisikin ainakin osittain selittyä juuri kumin suojaamisella. ASTM-standardin D2229 (2014) mukaan kumin suorituskykyyn vaikuttaa kumin ikä ja varastointiolosuhteet.

Vulkanointiajan vaikutuksia oli tarkoitus testata 170 °C vulkanointilämpötilalla viidellä (5) eri vulkanointiajalla ja neljällä (4) rinnakkaisella näytteellä jokaista testattavaa vulkanointilämpötilaa kohden. Aikataulusyistä näytteet testattiin kahdella (2) eri kerralla. Kummallakin kerralla valmistettiin kaksi (2) kaikki vulkanointilämpötilat kattavaa mittaussarjaa kahdella (2) rinnakkaisella näytteellä. Eri testauskerroilla käytettiin kuitenkin eri päivinä valssattua kumia. Ensimmäisellä (1.) kerralla testatut näytteet valmistettiin kumista, joka oli valssattu 23.4.2021. Toisella (2.) kerralla käytetty kumi oli valssattu 26.5.2021 eli 34 päivää myöhemmin. Tuloksista huomattiin heti, että jokin muutos käytettävissä ma-

teriaaleissa, työtavoissa tai laitteistoissa oli tapahtunut, sillä toisen (2.) mittauskerran tartuntatulokset olivat tasaisesti laskeneet alemmalle tasolle kaikilla vulkanointiajoilla.

Tartuntatulosten laskemisen syyn selvittämiseksi haluttiin lisää tietoa, joten adheesiotulokset mitattiin vielä kolmannen (3.) kerran. Kolmannella (3.) kerralla käytettiin 4.6.2021 eli 10 päivää myöhemmin valssattua kumia kuin toisella (2.) kerralla. Tartuntatason trendi jatkui laskevana ja tartuntatulokset olivat jälleen kaikilla vulkanointiajoilla edellistä mittauskertaa alhaisemmalla tasolla. Tartuntatulokset laskivat vähemmän kuin ensimmäisen (1.) ja toisen (2.) kerran välillä, mutta myös päiviä valssausajankohtien välillä oli vähemmän. Tämän testin jälkeen vaikuttikin, että kumin vanhenemisella on negatiivinen vaikutus kumin ja kaapelin väliseen adheesioon. Kumin valssaamisen jälkeisen suojaamisen mahdollista vaikuttamista tartuntatuloksiin ei otettu tässä kohtaa huomioon. Vulkanointiajan vaikutusta testatessa havaittiin tartuntatuloksen laskevan, mitä kauemmin näytettä vulkanoitiin. Tämä voisi liittyä reversioon. Reversiossa lämpötilan vaikutuksesta pilkkoutumista tapahtuu enemmän kuin uusia poikkisidoksia syntyy (Laurila 2007). Toisaalta kaapelin ja kumin tartuntaa heikentävää liikaa kuparisulfidin muodostumista voisi mahdollisesti aiheutua liian pitkstä paistoajasta. Chon (2006) mukaan lämpötilan nousu lisää sinkin vapautumista kaapelipinnoitteesta ja vapautuva sinkki muodostaa Buytaertin & Luon (2014) mukaan tartuntaa heikentävää sinkkioksidia ja -hydroksidia.

Vulkanointilämpötilan vaikutus -testien tulosten perusteella asia ei kuitenkaan ollut näin yksinkertainen. Vulkanointilämpötilan vaikutusta kumin ja kaapelin väliseen adheesioon tutkittiin kahtena (2) eri kertana ja jälleen testaamiseen käytettiin eri päivinä valssattua kumia. Kuten aiemmin mainittu kumin ikä ja varastointiolosuhteet vaikuttavat kumin suorituskykyyn (ASTM D2229). Ensimmäisellä (1.) kerralla käytettiin 26.5.2021 valssattua kumia ja toisella (2.) kerralla 10 päivää myöhemmin, 4.6. valssattua kumia. Eri päivinä valssattua kumia käytettiin myös tässä testissä, koska tämän testin ensimmäinen mittauskerta oli jo keritty suorittaman ennen vulkanointiajan vaikutus -testien tulosten valmistumista, eikä 26.5. valssattua kumia ollut enää jäljellä toisen (2.) mittauskerran mittauksiin. Tulostason oletettiin laskevan suunnilleen saman verran, kuin vulkanointiajan vaikutus -testien toisen (2.) ja kolmannen (3.) mittauskertojen välil-

lä, koska käytettiin samoina päivinä valssattua kumia. Hypoteesin mukaista tartuntatasojen tasaista laskua kaikilla vulkanointilämpötiloilla ei tapahtunutkaan. Sen sijaan tartuntatasojen muutokset vaikuttivatkin olevan merkittävästi riippuvaisia käytettävästä vulkanointilämpötilasta.

Ensimmäisellä (1.) mittauskerralla tartuntatulokset lähtivät melko alhaiselta tartuntatasolta nousemaan suhteellisen jyrkästi vulkanointilämpötilan kasvaessa, mutta toisella (2.) mittauskerralla tartuntavoima vulkanointilämpötilan funktiona -kuvaaja vaihtuikin melko jyrkästi nousevasta loivasti laskevaksi. Toisin sanoen ensimmäisen (1.) ja toisen (2.) mittauskerran välillä tartuntataso nousi pienimmillä vulkanointilämpötiloilla 140 °C, 150 °C ja 160 °C ja laski suurimmilla vulkanointilämpötiloilla 170 °C ja 180 °C. Kuvaajat leikkasivat toisensa 160 °C ja 170 °C paistolämpötilan välillä. Leikkauspisteen läheisyydessä olevalla vulkanointilämpötilalla voidaan olettaa, että tartuntatulokset olisivat pitäneet tasansa parhaiten. Mielenkiintoista olisi ollut selvittää tartuntatasot vielä kolmannella (3) mittauskerralla, jossa olisi käytetty jälleen myöhemmin valssattua kumia. Sitä miten tartuntavoima vulkanointilämpötilan funktiona -kuvaaja olisi muuttunut voisi tutkia lisää. Kiinnostavaa voisi olla tutkia jatkaisivatko tartuntatulokset nousuaan pienemmillä paistolämpötiloilla ja laskisivatko ne edelleen korkeammilla paistolämpötiloilla. Tartuntatestejä voisi suorittaa tasaisesti esimerkiksi kahden (2) viikon välein ja kolmen (3) kuukauden ajan sekoittamisesta. Näin saataisiin tietää esimerkiksi, kuinka tartuntatulokset käyttäytyvät lähempänä sekoitusajankohtaa. Ainakin paistoajan vaikutus -testeissä, jossa käytettiin 170 °C paistolämpötilaa ja alle kuukauden ajan sekoittamisen jälkeen seissyttä kumia, tartuntatulokset olivat korkeammalla tasolla. Liitteen (6) kuviossa 17 on esitetty kaikista tämän opinnäytetyön testeistä saadut vertailukelpoiset tartuntanäytteiden tartuntatulokset 170 °C ja 150 °C vulkanointilämpötiloilla ja 30 minuutin paistoajalla valssaus ja sekoitusajankohtien erotuksen funktiona. Nämä tulokset osaltaan osoittavat tulosten johdonmukaisuutta. Mielenkiintoista on myös, että tulokset muuttuvat näin merkittävästi lähes kahden (2) kuukauden jälkeen sekoittamisesta ja 10 päivän sisällä. Tällaista eroa eri mittauskertojen tuloksissa voisi odottaa, jos ensimmäinen mittaus suoritettaisiin esimerkiksi seuraavana päivänä sekoittamisesta ja toinen mittauskerta esimerkiksi viikkoja myöhemmin.

Kun vulkanointilämpötilaa muutetaan, myös vulkanointiaika muuttuu. Vulkanointilämpötilan noustessa 10 °C:lla, vulkanointiaika kasvaa karkeasti kaksinkertaiseksi. Todellisuudessa vakio, jolla vulkanointiaika kerrotaan, vaihtelee sekoituksesta riippuen välillä 1,5–2,5. Yleensä riittävä tarkkuus kuitenkin saavutetaan käyttämällä lämpötilavakiona lukemaa kaksi (2). (Laurila 2007.) Testeissä käytetystä kumista valmistetut tartuntanäytteet vulkanoidaan normaalisti 150 °C lämpötilassa 30 minuutin ajan. Lämpötilavakion kaksi (2) avulla laskettuna vulkanointiajaksi 180 °C:n paistolämpötilalla saadaan alle neljä (4) minuuttia. Vulkanointiajan vaikutus -testissä korkein tartuntatuloksista saatiin 170 °C vulkanointilämpötilalla 7,5 minuutin vulkanointiajalla. Tämä vastaa vulkanointiaikaa, joka saadaan tulokseksi lämpötilavakion (2) avulla laskemalla. Vulkanointilämpötilan vaikutuksia tutkivissa testeissä käytettiin kuitenkin 30 minuutin vulkanointiaikaa kaikilla vulkanointilämpötiloilla. Tämä tarkoittaa, että 170 °C ja 180 °C vulkanointilämpötiloilla tartuntanäytteiden kumiblokin kumi oli selvästi ylivulkanoitua. Vulkanointilämpötilan vaikutus -testin tuloksista ei näin ollen voida päätellä vaikuttaako kumin vanheneminen tartuntatuloksiin suuremmilla paistolämpötiloilla aina vai vaikuttaako se esimerkiksi ylipaistonkestokykyyn. Kuitenkin vulkanointiajan vaikutus -testin tulosten perusteella tartuntataso heikkenee kaikilla vulkanointiajoilla, vaikka 170 °C lasketusta optimivulkanointiajasta ei olekaan kuin yksi (1) tartuntatulos.

Näiden tulosten perusteella ei voida kuitenkaan olettaa, että näissä testeissä saatujen tulosten kaltaiset tartuntatason muutokset tapahtuisivat kaikilla kumisekoituksilla tai edes saman sekoituksen toisilla sekoituserillä. Tämän todistamiseksi lisää tutkimusta tarvitaan. Esimerkiksi laadunvalvonnan kannalta olisi tärkeää selvittää kumin vanhenemisen vaikutukset tartuntatuloksiin. Pelkästään tämän opinnäytetyön kokeellisen osan tulosten perusteella esimerkiksi laadunvalvonnallisissa mittauksissa voisi olla hyvä käyttää 160 °C vulkanointilämpötilaa, koska tässä lämpötilassa tartuntatulosten tason voidaan olettaa pysyvän vakaimpana. Mutta kuten sanottu, lisää tutkimusta tarvitaan. Hyvänä apuna tartuntatason seuraamiseen voidaan käyttää referenssikaapeleita, joiden normaali tartuntataso tunnetaan hyvin. Tartuntatuloksen ollessa matala, voidaan referenssikaapeleiden tuloksista mahdollisesti huomata, jos vika onkin ollut kumissa. Mittausdataa on kuitenkin tarpeeksi, jotta voidaan todeta tartuntatasojen muutosten olleen todellisia. Mittausdata viittaa johdonmukaisesti siihen, että

aika kumisekoituksen sekoituspäivän ja siitä valssattujen kumilevyjen valssauspäivän välillä on vaikuttanut tartuntatuloksiin merkittävästi. Mittausdatan johdonmukaisuudesta johtuen tartuntatulosten muutokset eivät todennäköisesti johdu esimerkiksi inhimillisestä erehdyksestä, huolimattomuudesta tai muutoksissa työtavoissa. Laitevian mahdollisuuden poissulkee se, että tartuntatulosten muutokset riippuivat nimenomaan valssausajankohdasta eivätkä esimerkiksi testaus- tai paistoajankohdasta.

Mielenkiintoista olisi selvittää ne tekijät, jotka ovat aiheuttaneet kumissa tartuntatasojen muutoksen sekoittamisen ja valssaamisen välillä. Todennäköisin syy lienee ympäristön vaikutus. Esimerkiksi auringonvalon, otsonin ja hapen tiedetään vaikuttavan kumin vanhenemiseen. Ultraviolettivalo katkoo hiilen ja vedyn välisiä sidoksia. Happi taas reagoi polymeeriketjujen ja rikin kanssa sidoksia muodostaen. (Laurila 2007.) Vanhenemisella on kuitenkin joissakin tapauksissa ollut positiivinen vaikutus tartuntatuloksiin, joten reaktioiden on oltava ollut sellaisia, jotka muokkaavat kumin tartuntaominaisuuksia niin, että ne paranevat matalammilla paistolämpötiloilla mutta jostakin syystä huonontavat niitä korkeammilla paistolämpötiloilla. Vanhenemisella oli myös näissä testeissä tartuntatasoa vakauttava vaikutus, mielenkiintoista olisikin ollut nähdä olisivatko tartuntatasojen muutokset vakautuneet vai jatkaneet muuttumista saman suuntaisesti.

Opinnäytetyössä tutkittiin myös lämpöhistorian vaikutusta vahvikekaapelin ja kumin väliseen tartuntaan sekä kaapelin mahdolliseen värinmuutokseen kemiallisten reaktioiden vaikutuksesta. Lämpöhistorian vaikutus -testeissä yllättävää oli, että lämpökäsittelyn ei havaittu vaikuttavan adheesiotasoihin millään lämpökäsittelylämpötiloilla. Myöskään värin muutoksia kaapeleiden pinnalla ei havaittu. Kumijäämissä ennen vulkanointia puretuista muoteista otettujen kaapeleiden pinnalla havaittiin kuitenkin eroja. Kumijäämät voisivat viitata kuparisulfidikerroksen muodostumiseen jo ennen vulkanointia lämpöhistoria vaikutus -testiä vastaavissa olosuhteissa.

Opinnäytetyössä vertailtiin myös tärkeimpien kaapelivalmistajien kaapeleiden välisiä tartuntaeroja. Kumijäämien määrän havaittiin jossain määrin korreloivan saman valmistajan normaalisti valmistettujen kaapeleiden adheesiotulosten kanssa. Tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että erot adheesiossa saattavat

näkyä ja joitakin adheesioon liittyviä kemiallisia reaktioita tapahtua jo ennen vulkanointia. Valmistajien vertailussa parhaan tartuntatuloksen sai Beta. Muissa testeissä havaittiin kuitenkin Betan kaapeleiden välillä suuria näyte-erä kohtaisia eroja tartuntatasoissa. Tähän testiin todennäköisesti sattui tältä kaapelivalmistajalta näyte-erää, jonka tartuntataso oli hyvä. Kaapelierien tartuntaeroja voisivat selittää esimerkiksi näyte-erä kohtaiset erot pinnoitteen paksuudessa, mahdollisessa kumaronihartsipinnoitteessa tai pinnoitteen yhtenäisyydessä. Lisäksi itse kaapelin ominaisuuksien lisäksi kumin ja kaapelipinnoitteen väliseen tartuntaan vaikuttaa lukuisat muutkin tekijät. Näiden testien tulokset kertovat suoraan vain testattujen kaapelierien ja testeissä käytetyn kumisekoituksen kyseisen erän välisistä tartuntatasoista. Kuten tämän opinnäytetyön teoria -osassa mainittiin, kumisekoituksen raaka-aineiden ja kaapelipinnoitteen on toimittava hyvin yhteen mekaanisen lukittumisen mahdollistavan oikeanlaisen kuparisulfidikerroksen muodostumiseksi. Näin ollen toisella reseptillä valmistetulla kumisekoituksella tulokset voisivat olla täysin erilaiset.

Ohuen, optimaalisen paksuisen mutta yhtenäisen pinnoitteen muodostuminen on erittäin tärkeää yhtenäisen kuparisulfidikerroksen ja tätä kautta paremman tartuntaominaisuuksien vakauden saavuttamisen kannalta. Kaapelin pinnan ominaisuudet riippuvat kaapelin monivaiheisesta valmistusprosessista. Pinnoitteen muodostumiseen vaikuttaa muun muassa kaapelin pinnan karkeus ja puhkaus. (Banerjee ym. 2014.) Seuraavaksi voisikin tutkia esimerkiksi eroja kaapelipinnoitteiden paksuuksissa ja paksuuksien korrelaatiota tartuntatulosten kanssa. Kaapelipinnoitteen paksuuden voisi mahdollisesti selvittää liuottamalla ensin kaapelipinnoite pois sopivalla liuottimella, minkä jälkeen kuparin määrän voisi mitata atomiabsorbtiometriellä.

Paljon tutkimusta on tehty kaapelipinnoitusten saralla. Pinnoitetutkimuksella on yritetty adheesio-ominaisuuksien parantamisen lisäksi löytää ratkaisuja messinkipinnoitteen korroosioalttiuteen (Buytaert ym. 2009). Messinkipinnoitteen korvaavaa kaapelipinnoitetta kehitettiin esimerkiksi vuonna 1991, jolloin Gridhar ja van Ooij kehittivät kaksikerroksisen kaapelipinnoitteen, jossa alempi kerros koostui sinkin ja kobolttin seoksesta ja ylempi kerros sinkin ja nikkelin seoksesta. Tämä pinnoite osoittautui hyväksi korroosionkesto- ja adheesio-ominaisuuksiltaan. Pinnoite ei myöskään hajoa samaan tapaan sinkin pinnoitteesta poistumisen myötä kuin

messinkipinnoite. Tämän pinnoitteen haittapuolena oli nikkelin korkea hinta, mikä on vähentänyt pinnoitteen suosiota. (Chen ym. 2021.) Monikerrospinnoitteiden ongelmana ovat myös niiden monimutkaisemmat prosessointivaiheet (Banerjee ym. 2015). Sinkkiä on yhdistetty kaapelipinnoitteessa myös koboltin kanssa ilman ylempää nikkelin ja sinkin muodostamaa kerrosta ja mangaanin kanssa hyvin tuloksin. (Chen ym. 2021.)

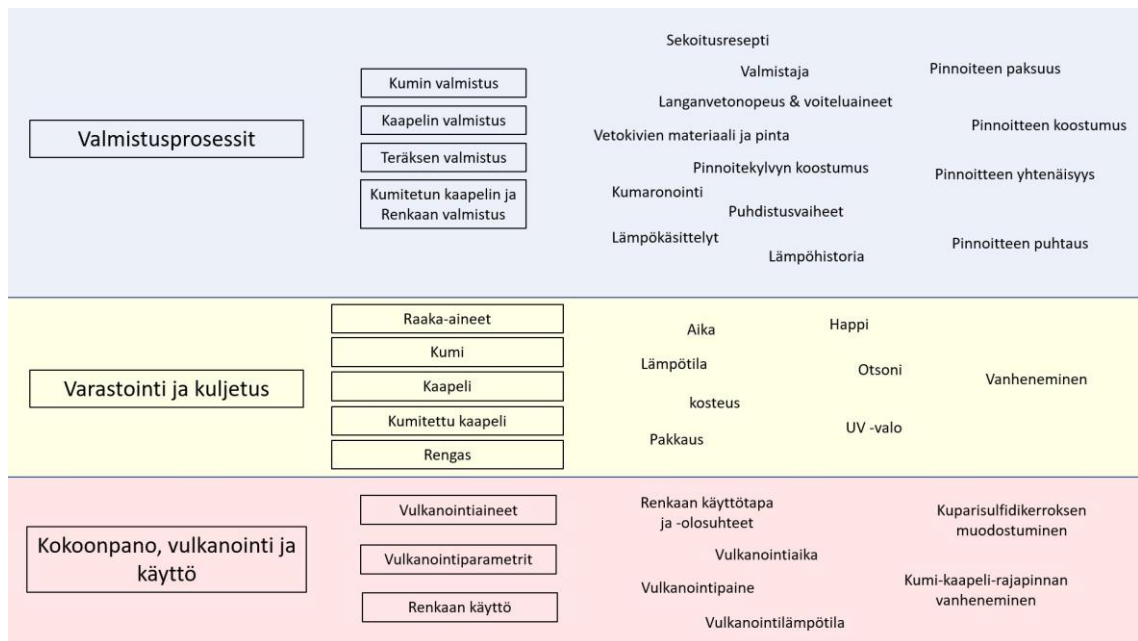
Bekaert kehitti vuonna 2014 messinkipinnoitteen, johon on lisätty kobolttia. Messinkipinnoitettua kaapelia käytettäessä kumisekoitukseen lisätään tyypillisesti kobolttia. Koboltti estää sinkki -ionien tunkeutumista sinkkioksidikerroksen läpi, mikä hidastaa adheesioon heikkenemistä ajan kuluessa. Koboltilla on myös todettu olevan haitallisia vaikutuksia renkaan kumisekoituksen ominaisuuksiin. (Buytaert & Luo 2014.) Koboltti voi nopeuttaa kumin vanhenemista ja lisätä sen halkeiluherkkyttä. Koboltti on lisäksi kallis raaka -aine, jota joudutaan sekoittamaan koko kumisekoitukseen ja vain pieni osa kaikesta kumisekoitukseen sekoitetusta koboltista osallistuu adheesioireaktioihin kaapelin ja kumin välisellä tartuntapinnalla. (Chen ym. 2021.) Tähän ratkaisuna Bekaertin kehittämä pinnoite mahdollistaa koboltin saamisen tarkemmin vain kumin ja kaapelin rajapintaan, jossa se vaikuttaa positiivisesti adheesiopinnan ikääntymiseen. Kun koboltti on kaapelipinnoitteessa, ei sitä tarvitse sekoittaa ylimäärin kumisekoitukseen ja koboltin negatiivisia vaikutuksia saadaan poistettua ja kustannuksia vähennettyä (Buytaert & Luo 2014.)

Myös pronssipinnoitteen koostumuksen vaikutusta adheesioon on tutkittu esimerkiksi Banerjeen ym. toimesta vuonna 2014. Banerjee ym. tutkivat pronssipinnoitteen tinapitoisuuden vaikutusta SBR-pohjaisen kumin ja pinnoitteen väliseen adheesioon. Pinnoitteen koostumusta vaihdeltiin muuttamalla pronssikylvyn tinasulfaattipitoisuutta. Tutkimuksen johtopäätöksissä ilmoitetaan tinapitoisuuden muutosten vaikuttaneen kumin ja pinnoitteen väliseen adheesioon ja optimaaliseksi pinnoitteen tinapitoisuudeksi ilmoitetaan 3–4 m%. Tutkimuksessa tutkittiin adheesiota ilman tinaa sekä pitoisuuksilla 3–6,5 m%. Tutkimuksessa mainitaan myös kaapelin pinnan karkeuden aiheutuvan lähes yksinomaan teräskaapelin karkeudesta. Tyypillisen langanvedosta aiheutuvan teräskaapelin pinnan karkeuden kerrotaan olevan noin 10 µm luokkaa, kun taas pinnoitepaksuus voi olla esimerkiksi 90 nm. Näin ollen kaapelipinnoitteen paksuus

ei vaikuta pinnan karkeuteen. Pinnoittamattomien kohtien kaapelissa kerrotaan aiheutuvan teräksen pinnan karheudesta. Pronssipinnoitettua kaapelia käytettäessä tärkeää on pinnoitepaksuuden ja pinnoitekoostumuksen optimaalisuus ja sitä kautta optimaalisen kuparisulfidikerroksen muodostuminen. Pronssipinnoitteen ja kumin rajapinnalla tartuntapintaan muodostuvat Cu_3Sn -kiteet ja tinaoksidi (SnO_2) vaikuttavat kuparin kulkeutumiseen tartuntarajapintaan ja tätä kautta kuparisulfidikerroksen muodostumiseen. (Banerjee ym. 2015.)

Kaapelipinnoitteen ja kumin väliseen tartuntaan vaikuttavia tekijöitä on erittäin paljon, joten tässä aihealueessa riittää tutkittavaa. Kaapelipinnoitteen ja kumin väliseen tartuntaan liittyviä tekijöitä löytyy esimerkiksi ainakin viidestä (5) eri valmistusprosessista. Näitä ovat kaapelin lähtötuotteen, eli 5,5 mm paksun terästangon valmistusprosessi, itse kaapelin valmistusprosessi pinnoitusvaiheineen, kumisekoituksen valmistusprosessi, kumitetun kaapelin valmistusprosessi sekä renkaan valmistusprosessi. Kaapelin valmistusprosessissa esimerkiksi langanvetonopeus, vetokiven pinta ja pronssipinnoitusliuoksen koostumus voisivat aiheuttaa eroja kaapelipinnoitteen paksuudessa, koostumuksessa ja yhtenäisyydessä, jotka voisivat vaikuttaa pinnoitteen ja kumin väliseen tartuntaan. Eri valmistajien kaapelin valmistusprosessit saattavat myös erota toisistaan merkittävästi. Gupta & Mandloi (2021) tutkivat monimuuttuja-analyysityökalun käyttöä kaapelin pronssipinnoitteen laatuun merkittävästi vaikuttavien tekijöiden löytämiseen. Tärkeiksi muuttujiksi ilmoitettiin esimerkiksi kaapelin valmistusvaiheiden eroja happo-, emäs- ja pronssikylpyjen konsentraatioissa ja lämpötiloissa.

Kumisekoituksen valmistusprosessissa tartuntaan voivat vaikuttaa esimerkiksi kumisekoituksen koostumus ja sekoitusprosessi. Tartuntaan vaikuttavia tekijöitä koottu kuvioon 18.



KUVIO 18. Tartuntaan vaikuttavia tekijöitä.

Myös varastointi ja kuljetus voivat vaikuttaa merkittävästi kaapelin ja kumin väliseen tartuntaan. Kumin ja kaapelipinnoiteen väliseen adheesioon voi vaikuttaa raaka-aineiden, kumin, kaapelin, kumitetun kaapelin ja lopuksi valmiin renkaan varastointi. Varastointiaika ja -olosuhteet sekä mahdollinen suojaaminen ovat tekijöitä, joiden vaikutukset tartuntaan olisi hyvä tuntea. Tutkia voisi esimerkiksi yhteyttä tartuntatulosten ja sen kuinka kauan kumitettua kaapelia säilytetään ja missä olosuhteissa ennen käyttämistä renkaan komponenttina. Myös kuljetuksen aikaiset olosuhte-erot sekä erot pakkaamisessa voivat vaikuttaa kaapelin ja kumin väliseen tartuntaan. Eroja tartuntaan voi syntyä myös rengasaihion vulkanoinnissa. Kaapelin pinnan kuparisulfidikerros muodostuu vulkanoinnin aikana, ennen vulkanoitumisen alkamista, joten vulkanointiparametreilla sekä vulkanointiaineilla on todennäköisesti merkittävä vaikutus tartuntaan.

Opinnäytetyössä saatiin tuotettua toimeksiantajalle hyödyllistä tietoa. Kumin tartuntaominaisuuksien havaittiin muuttuvan kumin vanhetessa. Tartuntatulosten havaittiin paranevan vulkanoimattoman kumin vanhetessa matalammilla 140 °C, 150 °C ja 160 °C vulkanointilämpötiloilla. Tartuntatulokset heikkenivät korkeammilla 170 °C ja 180 °C vulkanointilämpötiloilla. Kumin vanhenemisen vaikutuksia voisikin tutkia vielä lisää. Tutkimukset voisi suorittaa viidellä (5) eri vulkanointilämpötilalla. Vulkanointiaikana voisi käyttää kunkin paistoajan lasketta oikeaa vulkanointiaikaa. Mittaukset voisi suorittaa sekoituspäivää seuraava-

na päivänä ja siitä eteenpäin kahden (2) viikon välein kolmen (3) kuukauden ajan. Näin saataisiin lisää tietoa kumin vanhenemisen vaikutuksista tartuntatuloosiin ja nähtäisiin, toistuisivatko tässä opinnäytetyössä saatujen tulosten kaltaiset tartuntatasojen muutokset. Lämpöhistorian ei havaittu, ainakaan tämän opinnäytetyön menetelmillä, vaikuttavan merkittävästi kumin ja kaapelin väliin tartuntaan. Myös tämä on arvokasta tietoa. Kaapeleiden tartunnoissa havaittiin eroja eri kaapelivalmistajien kaapeleiden välillä. Tartuntaeroja havaittiin myös saman valmistajan eri erien välillä. Tämä osoittaa laadunvalvonnan tärkeyden renkaissa käytettävien kaapeleiden osalta. Myös kaapeleiden raakatar-tunnassa havaittiin eroja kaapelien pinnan kumijäämien määrän suhteen. Raakatar-tuntaa voisi testata esimerkiksi kokoamalla tartuntanäytteitä eri valmistajien kaapeleita käyttäen. Kootut tartuntanäytemuotit voisi puristaa kiinni paisto-prässillä ilman lämmitystä ja kaapelit voisi vetää irti vetokoneella mitaten irrot-tamiseen tarvittava voima. Näin voitaisiin saada selville missä määrin tartuntaa muodostuu ilman vulkanointia. Kuten tämän opinnäytetyön teoria -osassa mai-nittiin, kumin ja kaapelin välinen tartunta heikkenee ajan myötä kuparisulfidiker-roksen liikakasvun myötä. Kumi-kaapeli-rajapinnan vanhenemisen vaikutusta tartuntaan voisi tutkia esimerkiksi vanhentamalla vulkanoituja tartuntanäytteitä eri aikoja lämmön avulla.

LÄHTEET

ASTM D2229. 2014. Standard Test Method for Adhesion Between Steel Tire Cords and Rubber.

Banerjee, A., Dutta, M., Bhowmick, A. & Laha, T. 2014. Effect of Cu strike coating on adhesion between Cu-Sn coated steel and rubber. *Journal of adhesion science and technology*, 1610–28.

Banerjee, A., Dutta, M., Bhowmick, A. & Laha, T. 2014. Effect of Sn on the Adhesion between Cu–Sn Alloy Coated Steel and Styrene Butadiene Based Rubber. *ISIJ international*, 671–6.

Banerjee, A., Kumar, R., Dutta, M., Bysakh, S., Bhowmick, A. & Laha, T. Microstructural evolution in Cu–Sn coatings deposited on steel substrate and its effect on interfacial adhesion. *Surface & coatings technology*, 200–9.

Bekaert. n.d. Bead Wire General Characteristics. PDF-tiedosto.

Bekaert. n.d. TAWI Coating. Verkkosivu. Luettu 15.11.2021.
<https://www.bekaert.com/en/products/automotive/corner/tawi-coating>

Bridgestone. n.d. Tire Construction. Verkkosivu. Luettu 3.11.2021.
<https://www.bridgestoneamericas.com/en/corporate-social-responsibility/safety/tires-101/tire-construction>

Buytaert, G., Coornaert, F. & Dekeyser, W. Characterization of the Steel Tire Cord – Rubber Interface. *Rubber Chemistry and Technology*, 430–41.

Buytaert, G., Harakuni, B. & Vanooij, W. 2009. Adhesion of Steel Tire Cord to Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 315–339.

Buytaert, G. & Luo, Y. 2014. Study of Cu-Zn-Co ternary alloy-coated steel cord in cobalt-free skim compound. *Journal of adhesion science and technology*, 1545–1555.

Chen, C., Sun, M., Wang, B., Zhou, & Jiang, Z. 2021 Recent Advances on Drawing Technology of Ultra-Fine Steel Tire Cord and Steel Saw Wire. *Metals*. Metals (Basel), 1590–.

Cho, P., Seo, G., Jeon, G. & Ryu, S. Adhesion Between Rubber Compounds and Copper-film-coated Steel Plates. *The Journal of adhesion*, 43–63.

Continental. n.d. Tire Production. Verkkosivu. 3.11.2021.
<https://www.continental-tires.com/car/tire-knowledge/tire-basics/tire-production>

Crowther, B. 2003. *The Handbook of Rubber Bonding*. Rev. Rapra Technology Ltd. Shawbury.

Davis, J. *Tensile testing*. 2004. 2. painos. ASM International. Ohio.

De, S. & White, J. 2001. Rubber Technologist's Handbook. Rapra Technology Ltd. Shawbury, U.K

Dunlop. n.d. How Tyres Are Made. Verkkosivu. Luettu 3.11.2021.
https://www.dunlop.eu/en_gb/consumer/learn/how-tires-are-made.html

Dunn, L. 2019. Introduction to Viscoelasticity in Polymers and its Impact on Rolling Resistance in Pneumatic Tyres. International Journal of Squiggly and Wobly Materials, 23.

Erman, B., Mark, J. & Roland, C. 2013. The Science and Technology of Rubber. 4. painos. Elsevier Inc. Oxford.

Gent, A. & Walter, J. 2006. Pneumatic Tire. Mechanical Engineering Faculty Research, 854.

Gupta R. & Mandloi, R. 2021. Application of principle component analysis for the identification of significant parameters influencing bronze coating quality in wire coating process of tyre bead wire. Industrial Engineering Journal.

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

Michelin. n.d. Materials. Verkkosivu. Luettu 3.11.2021.
<https://thetiredigest.michelin.com/an-unknown-object-the-tire-materials>

Niknam, F. 2019. A Strange Brew: Exploring the Ingredients Used to Make Passenger Tires. TireReview. <https://www.tirereview.com/ingredients-passenger-tires/>

Nokian Renkaat Oyj. n.d. Historia. Verkkosivu. Luettu 2.11.2021.
<https://www.nokianrenkaat.fi/yrittys/perustietoa/historia/>

Nokian Renkaat Oyj. n.d. Renkaan tuotantoprosessi. Verkkosivu. Luettu 2.11.2021. <https://www.nokianrenkaat.fi/innovatiivisuus/rengastietoa/renkaan-tuotantoprosessi/#64c230c1>

Nokian Renkaat Oyj. 2015. VERT-oppimateriaali. Reinforcing Materials in Rubber Products -moduuli. <http://laroverket.com/reinforcing-materials/>

Pathak, H., Mishra, R., Mahajan, S., Sridhar, V., Bandyopadhyay, N. & Sunder, S. 2009. Adhesion of tire bead wire to rubber: some findings. Wire Journal International, 89.

Pekachaki, H., Taghvaei-Ganjali, S., Motiee, F. & Saber-Tehrani, M. Application of Calixarene Derivates as Tackifier Resin in Rubber Compounds. Rubber Chemistry and Technology, 467–80.

Polyakova, M. & Stolyarov, A. 2021. Automobile Tires' High-Carbon Steel Wire. Encyclopedia, 859–870.

The Goodyear Tyre & Rubber Company. 2016. How Tyres Are Made. Verkkosivu. Luettu 3.11.2021. <https://www.goodyear.co.in/learn/how-tyres-are-made>

Treloar, L. 2005. The Physics of Rubber Elasticity. 3. painos. Oxford University Press. Oxford.

Zwick & Roell. Z010 -vetokoneen käyttöohje.

LIITTEET

Liite 1. Vulkanointiajan vaikutus -testien tulokset.

TAULUKKO 10. Vulkanointilämpötilan vaikutus -testien tulokset.

	Näyte	Tartunta / N	s / N	Ref langat / N	Muotin numero
5 min, 170C	1A				5
	1B				6
7,5 min, 170C	2A				5
	2B				6
	3A	620	40	633, 601, 736	5
	3B	604	42	629, 595, 615	6
10 min, 170C	1A	855	70	720, 733, 827	7
	1B	820	71	721, 820, 859	8
	2A	702	46	684, 806, 838	7
	2B	696	38	631, 701, 723	8
	3A	588	77	669, 606, 563	5
	3B	601	60	672, 534, 598	6
15 min, 170C	1A	691	45	645, 722, 667	7
	1B	763	31	781, 640, 670	8
	2A	660	49	737, 687, 696	5
	2B	629	36	648, 638, 587	6
	3A	604	69	600, 646, 643	7
	3B	583	34	652, 512, 607	8
30 min, 170C	1A	693	56	816, 724, 694	7
	1B	693	54	726, 736, 687	8
	2A	595	47	610, 540, 667	7
	2B	620	47	606, 637, 608	8
	3A	553	48	691, 490, 609	7
	3B	539	35	707, 525, 594	8
60 min, 170C	1A	562	34	536, 530, 566	5
	1B	600	37	525, 634, 583	6
	2A	539	60	553, 569, 524	7
	2B	541	48	642, 578, 577	8
	3A	522	34	531, 469, 533	5
	3B	520	47	572, 497, 491	6

Liite 2. Vulkanointilämpötilan vaikutus -testien tulokset.

TAULUKKO 11. Vulkanointilämpötilan vaikutus -testien tulokset

	Näyte	Tartunta / N	s / N	Ref langat / N	Muotin numero
140 °C, 30min	A	430	42	471, 493, 575	6
	B	421	85	595, 399	8
	C	609	50	674, 682, 631	7
	D	585	49	594, 633, 637	8
150°C, 30min	A	495	43	600, 469, 506	7
	B	461	63	549, 570, 396	5
	C	600	47	645, 571, 526	5
	D	565	41	571, 469, 617	6
160°C, 30min	A	533	55	548, 592, 448	7
	B	510	55	524, 541, 481	5
	C	597	36	589, 506, 643	5
	D	538	40	631, 457, 641	6
170°C, 30min	A	627	22	617, 628, 616	6
	B	627	42	715, 710, 713	8
	C	584	53	701, 568, 472	7
	D	556	43	511, 633, 554	8
180°C, 30min	A	665	37	583, 556, 723	7
	B	595	51	621, 653, 707	5
	C	522	53	502, 487, 533	5
	D	547	47	532, 583, 568	6

Liite 3. Lämpöhistorian vaikutus -testien tulokset.

TAULUKKO 14. Lämpöhistorian vaikutus -testien tulokset.

Näyte	Rinnakkainen	Tartunta / N	s / N	Muottinumero	ref / N
Beta (ref)	1A	464	71	5	
	1B	466	19	6	618
	2A	325	37	5	585, 645
	2B	394	60	6	609, 599
	3A	453	42	7	572
	3B	492	37	8	539
	4A	357	35	7	639, 575
	4B	443	31	8	602, 585
Alfa (ref)	A	526	57	5	
	B	563	42	6	
	C	572	54	7	
	D	565	35	8	
Beta 60°C lk.	1A	471	83	6	
	1B	482	78	5	476
	2A	327	85	6	654, 519
	2B	366	84	5	593, 599
	3A	500	58	7	638
	3B	498	53	8	557
	4A	437	95	7	628, 498
	4B	384	82	8	527, 579
Beta 80°C lk.	1A	464	58	5	544
	1B	421	42	6	454
	2A	357	56	5	513, 488
	2B	272	39	6	498, 482
Beta 100°C lk.	3A	450	52	7	578
	3B	506	53	8	629
	4A	466	50	7	671, 692
	4B	465	50	8	587, 530
Alfa 60°C lk.	A	537	64	5	618, 572, 550
	B	541	59	6	538, 587, 582
	C	551	48	7	540, 621, 596
	D	548	52	8	560, 510, 511
Alfa 80°C lk.	A	557	76	5	556, 568, 526
	B	516	40	6	543, 543, 795
Alfa 100°C lk.	A	587	45	7	536, 604, 527
	B	556	71	8	674, 573, 553

Liite 4. Kaapeleiden pinnan visuaalinen tarkastelu -tulokset

TAULUKKO 15. Kaapeleiden pinnan visuaalinen tarkastelu -tulokset.

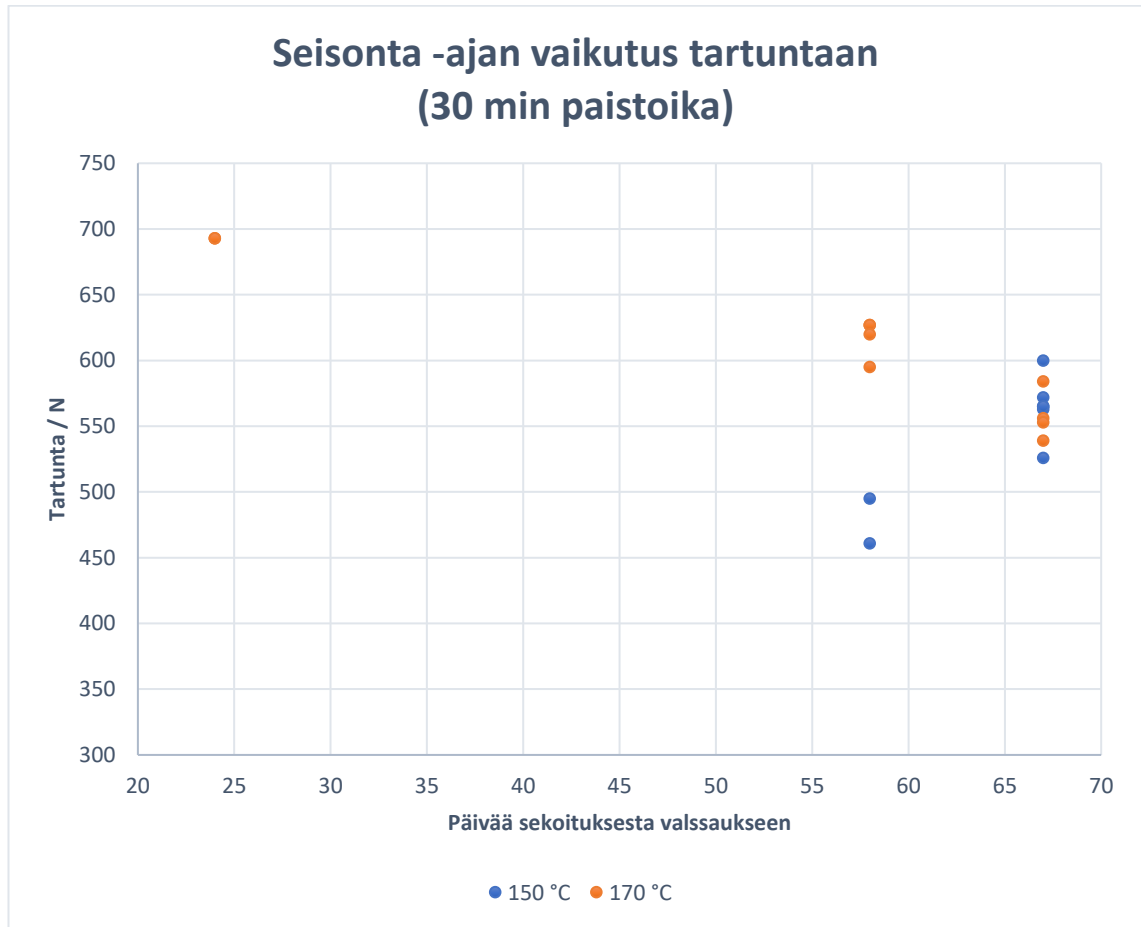
Muottien purku lämpökäsittelyn jälkeen / 30min				
	Lämpötila	Rinnakkainen	Sinertyminen	Kumin tarttuminen langan pintaan
Alfa	60°C	A	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
	80°C	A	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
	100°C	A	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
Delta	60°C	A	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
	80°C	A	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
	100°C	A	Ei sinertymistä	Vähän tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Vähän tarttunutta kumia
Gamma	60°C	A	Ei sinertymistä	Vähän tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
	80°C	A	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Ei tarttunutta kumia
	100°C	A	Ei sinertymistä	Vähän tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Vähän tarttunutta kumia
Beta	60°C	A	Ei sinertymistä	Vähän tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Vähän tarttunutta kumia
	80°C	A	Ei sinertymistä	Vähän tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Kohtalaisesti tarttunutta kumia
	100°C	A	Ei sinertymistä	Eniten tarttunutta kumia
		B	Ei sinertymistä	Eniten tarttunutta kumia

Liite 5. Valmistajien vertailu -testin tulokset

TAULUKKO 16. Valmistajien vertailu -testin tulokset.

Tartuntanäyte	Valmistaja	Tartunta / N	s / N	Muottinumero
1A	Alfa	488	52	5
	Delta	499	55	
	Beta	567	100	
1B	Alfa	528	44	5
	Delta	580	54	
	Beta	536	48	
2A	Gamma	481	82	6
	Beta	624	65	
	Delta	490	63	
2B	Gamma	504	29	6
	Beta	644	83	
	Delta	531	38	
3A	Beta	658	88	7
	Alfa	415	26	
	Gamma	542	45	
3B	Beta	664	98	7
	Alfa	453	52	
	Gamma	501	70	
4A	Delta	547	56	8
	Gamma	505	73	
	Alfa	482	66	
4B	Delta	529	39	8
	Gamma	518	68	
	Alfa	502	29	

Liite 6. Kumin seisonta-ajan vaikutus tartuntaan.



KUVIO 17. Kumin seisonta-ajan vaikutus tartuntaan.