



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Mikael Fagerström

## Valokuidun pinnoituslaitteiston mekaniikkasuunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

4.5.2020

Tekijä Otsikko	Mikael Fagerström Valokuidun pinnoituslaitteiston mekaniikkasuunnittelu
Sivumäärä Aika	37 sivua + 3 liitettä 4.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Pekka Salonen Tuotepäällikkö Kevin Boll
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli toteuttaa rakennekokonaisuus valokuidun hermeettiseen päällystämiseen. Projekti toteutettiin Rosendahl Nextromille, joka on erikoistunut valokuitukoneiden suunnitteluun.</p> <p>Työssä käsitellään pinnoituksen hyötyjä yleisesti sekä syvennyttään yksityiskohtaisemmin laitteiston mekaaniseen suunnitteluun. Valokuitua pinnoitetaan monista eri syistä, mutta tässä tapauksessa valokuitu haluttiin suojata vedeltä. Tähän tarkoitukseen suunniteltiin järjestelmä, joka pinnoittaa valokuidun hiilivedyllä. Näin valokuidusta saadaan hermeettisesti suojattu.</p> <p>Suunnittelu perustui paljolti vanhoihin patenteihin ja tutkimuksiin valokuidun hermeettisestä päällystämisestä. Työssä kuitenkin painotettiin rakenteen sopivuutta muihin olemassa oleviin tuotteisiin sekä käyttäjäystävällistä ja helposti kasattavaa rakennetta.</p> <p>Pinnoituksen ollessa hyvin tarkkuutta vaativaa, otettiin suunnittelussa vahvasti huomioon valmistusmenetelmät sekä tarvittavat toleranssit. Myös valmistuskustannuksia sekä osien vaihdettavuutta mietittiin paljon suunnitteluvaiheessa.</p> <p>Työn lopputuloksena saatiin tuotekokonaisuus, joka sopii Nextromin olemassa oleviin tuotteisiin. Kokonaisuus sisälsi kaikki valmistettavat osapiirustukset, osaluettelot, PI-kaavion sekä kaasupaneelin, joita pystytään hyödyntämään myös vastaavissa projekteissa.</p>	
Avainsanat	Valokuitu, hermeettinen, mekaniikkasuunnittelu, pinnoitus

Author Title	Mikael Fagerström Mechanical Design of Fiber Optic Coating Equipment
Number of Pages Date	37 pages + 3 appendices 4 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Program	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Pekka Salonen, Principal Lecturer Kevin Boll, Product Manager
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to implement a structural assembly for sealing optical fiber hermitically. The project was carried out for Rosendahl Nextrom, which specializes in fiber optic machine design.</p> <p>In this thesis, the benefits of coating are discussed in general, and the mechanical design of the equipment is discussed in more detail. The optical fiber is coated for many different reasons but in this case, the purpose was to protect it from water, and more specifically, from hydrogen in the water. For this purpose, a system was designed to coat the fiber with hydrocarbon. In this way, the fiber is hermitically protected.</p> <p>The design was largely based on old studies and patents on fiber optic hermetic coating. However, the thesis emphasized the compatibility of the structure with other existing products, as well as the user friendliness and ease of use in structure assembling.</p> <p>Due to the high need of accuracy in the coating progress, the manufacturing methods and the required tolerances were strongly considered in the design. The manufacturing costs as well as the interchangeability of the parts were also considered a great deal during design phase.</p> <p>The thesis resulted in the creation of a product that fits into Nextrom's existing products. The thesis contains all the parts, drawings, part lists, PI-diagrams and gas paneling that can be used in similar projects.</p>	
Keywords	Optical fiber, hermetic, mechanical design, coating

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yritykset	2
2.1	Rosendahl Nextrom Oy	2
2.2	Yhteistyökumppani	2
3	Valokuitu ja sen valmistusprosessi	3
3.1	Valokuidun toiminta ja rakenne	3
3.2	Valokuidun lasiaihio	4
3.3	Valokuidun vetoprosessi	6
4	Valokuidun suojaus ja pinnoittaminen	9
4.1	Polymeeripinnoitus	9
4.2	Merikaapelit	10
5	Veden vaikutus valokuituun	11
6	Valokuidun hermeettiset suojausmenetelmät	13
6.1	Metallipinnoitusmenetelmä	13
6.2	Kaasupinnoitusmenetelmä	13
6.3	Hiilipinnoitus	15
7	Konseptisuunnittelu	19
7.1	Yhteistyöprojektin lähtöarvot	19
7.2	Pinnoituslaitteiston määrittäminen lähtöarvoista	20
7.3	Metallisen pinnoituslaitteiston toimintaperiaate	21

8	Pinnoituslaitteiston mekaniikkasuunnittelu	22
8.1	Ylempi suojakammio	22
8.2	Reaktiokammio	25
8.3	Vastaanottokammio	26
8.4	Imukammio	27
8.5	Alempi suojakammio	28
8.6	Pinnoituslaitteiston kiinnitys, tiivistys ja eristys	29
9	Tornikiinnityksen mekaniikkasuunnittelu	30
9.1	Pinnoituslaitteiston linjaus valokuitulinjaan	30
9.2	Pinnoituslaitteiston kiinnitys vetotorniin	31
9.3	Kaasujensyöttö	33
10	Yhteenveto	34
	Lähteet	35
	Liitteet	
	Liite 1. Laskenta-välilehti	
	Liite 2. Valokuidun ominaisuustaulukot	
	Liite 3. Kammioiden välisten paineiden laskentavälilehti	

## Lyhenteet

MCVD	Modified Chemical Vapor Deposition. Muunneltu kemiallinen kaasufaasipinnoitus.
OVD	Outside Vapor Deposition. Ulkopuolinen kaasufaasipinnoitus.
PCVD	Plasma Chemical Vapor Deposition. Plasma-avusteinen kemiallinen kaasufaasipinnoitus.
SiCl <sub>4</sub>	Piitetrakloridi, kloorin ja piin muodostama epäorgaaninen molekyyliyhdiste.
SiO <sub>2</sub>	Piidioksidi, eli silika, on piin ja hapen yhdiste. Mineraalina se tunnetaan nimellä kvartsi.
PFA	Perfluorialkoksi, kuuluu fluoripolymeerien muoviryhmään. Tunnetaan paremmin kaupallisilla nimillä kuten Teflon.
TPA	Tereftaalihappo. Polymeerien valmistukseen käytetty happo.
PI-kaavio	Putkitus- ja instrumentointikaavio. Piirustustyyppi, jota käytetään kuvaamaan putkituksia ja prosessilaitteita laitteistossa tai tehtaassa.

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli kehittää valokuidun hermeettinen pinnoituslaitteisto. Työssä pääpainona oli mekaniikkasuunnittelu, mutta itse työ sisälsi runsaasti alustavaa tutkimustyötä. Tämä toimi vahvana tukena suunnittelussa, ja lisäksi sen avulla pyritään antamaan lukijalle tiivistetty kuvaus muuten laajasta aihealueesta. Opinnäytetyö toteutettiin Rosendahl Nextrom Oy:n toimeksiantona.

Rosendahl Nextrom haluaa vastata asiakkaidensa tarpeisiin jatkuvasti kehittyvällä tietoliikenteen saralla. Tämän vuoksi yritys käyttää lähes 10 % budjetistaan tuotekehitykseen. (Rosendahl Nextrom 2020.) Alalla, jossa valokuitujen valmistajat etsivät jatkuvasti uusia käyttömahdollisuuksia valokuidulle sekä haluavat löytää parempia ratkaisuja olemassa oleville ongelmille, on tuotekehitys erittäin tärkeää. Valokuitua käytetään jatkuvasti uusissa haastavissa ympäristöissä, joissa valokuitu altistuu jatkuvasti ympäristön elementeille ja ulkoisille voimille. Öljynporauslautat, merikaapelit sekä hävittäjät ovat rakenteita, joissa on erityisen tärkeää, että tiedon virtaus on katkeamatonta olosuhteista riippumatta. Valokuitua voidaan suojata useilla eri menetelmillä ja materiaaleilla, mutta oli kyseessä sitten muovi, kupari tai perinteinen teräs, ei mikään näistä suojaa valokuitua vedeltä. Tämä oli ongelma, johon Rosendahl Nextrom halusi kehittää ratkaisun yhdessä yhteistyökumppaninsa kanssa.

Hiilipinnoitusmenetelmä ei ole uusi keksintö. Aiheesta on olemassa paljon kirjallisuutta, tutkimuksia sekä patenteja. Insinööriyön tavoitteena oli tutkia menetelmää ja kehittää ratkaisu, joka sopisi sekä yhteistyökumppanin tiloihin, että Rosendahl Nextromin olemassa oleviin laitteisiin. Tämä tarkoitti, että laitteen tuli olla hyvin modulaarinen sekä pienikokoinen tilarajoitteitten takia. Aiheen laajuuden vuoksi työ oli aluksi tarkoitettu konseptisuunnitteluna, mutta työn edetessä päätettiin toteuttaa täysin valmistettava laitteistokokonaisuus. Vaikka kyseessä on täysin valmis laitteisto, ei laitteiston toimivuutta pystytty työssä todistamaan. Laitteiston testaus tuotannossa sekä pinnoitteen toimivuuden tutkiminen vaatisi kokonaan oman insinööriyönsä, joka soveltuisi paremmin kemianpuolen insinööreille. Tässä työssä esiteltävää laitteistoa voidaan tarkastella ensimmäisenä versiona, jota tullaan kehittämään jatkossa eteenpäin tuotannosta saatujen tulosten avulla.

## 2 Yritykset

### 2.1 Rosendahl Nextrom Oy

Rosendahl on maailman johtava yritys akku-, kaapeli-, lanka- sekä valokuidun valmistuksessa. Se on itävaltalaisen Knillin veljesten omistuksessa, ja konserniin kuuluu useita muita teollisuuden ja teknologiaan erikoistuneita yrityksiä. Rosendahl yhdistyi suomalaiseen Nextrom-yrityksen vuonna 2014, minkä jälkeen yritykset fuusioituivat Rosendahl Nextromiksi (Elsta Mosdorfer 2014). Insinööriyössä käytetään kuitenkin pelkkää nimitystä Nextrom selkeyden vuoksi. Yritys suunnittelee valokuidun valmistus prosessiin tarvittavia laitteita, ja valmistaa ne alihankintana ympäri maailmaa. Nextromin asiakkaita ovat valokuitua valmistavat tai myyvät yritykset, sekä yliopistot, jotka jatkokehittävät ja tutkivat valokuidun prosesseja ja ominaisuuksia. Nextromilla on Suomessa laboratoriotilat, jossa pystytään valmistamaan valokuituaihioita sekä vetämään valokuitua tuotekehitys- ja tutkimustarkoituksiin. Laboratoriotilat ovat kuitenkin pääasiassa laitteiden esittelyä ja tuotannon testausta varten, eikä Nextrom myy tai valmistaa valokuitua jälleenmyytäväksi.

### 2.2 Yhteistyökumppani

Insinööriyötä lähdettiin työstämään yhteistyössä valokuituvalmistajan kanssa. Asiakasyritys on erikoistunut erikoiskuitujen valmistukseen. Nextromin osa yhteistyöprojektissa oli suunnitella ja valmistaa hermeettiseen pinnoitukseen kykenevä laitteisto asiakkaan antamien spesifikaatioiden mukaisesti. Asiakkaan tehtävänä projektissa oli antaa tarvittavat arvot ja mitoituslaitteelle sekä laitteen toimivuuden testaus tuotannossa. Testaus tuotannossa on laitteen kannalta haastavimpia ja kalliimpia osioita. Se saattaa maksaa kymmeniä tuhansia euroja viikossa. Tämän vuoksi yhteistyö laitteen kehittämisessä oli Nextromille tärkeää. Laitteen suunnittelussa noudatettiin vahvasti asiakkaan vetotorinin rajallista tilaa, joka toi omat haasteensa suunnittelussa. Laitteesta saatiin kuitenkin hyvin kompakti asiakkaan antamia arvoja noudatettaessa.

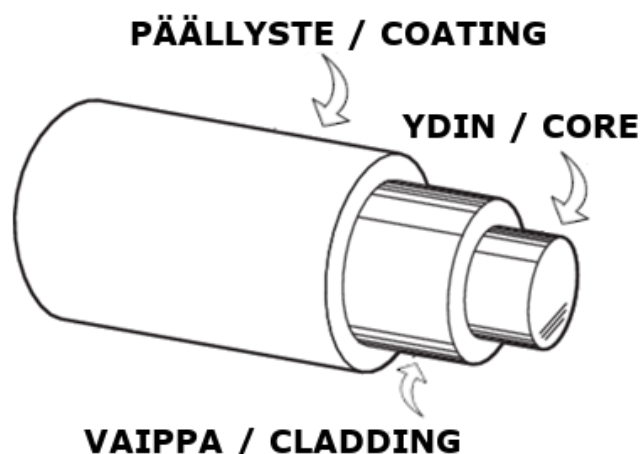


### 3 Valokuitu ja sen valmistusprosessi

Ennen syventymistä valokuidun pinnoittamiseen on tärkeää, että lukija saa käsityksen valokuidun valmistuksen perusteista. Tässä luvussa selitetään valokuidun lasiaihion valmistusta sekä valokuidun rakennetta ja vetämistä. Lasiaihion materiaalit ja rakenne ovat tärkeitä pinnoittamisen onnistumisen kannalta, mutta itse prosessit ovat erilliset toisistaan. Pinnoittaminen tapahtuu valokuidun valmistus, eli vetovaiheessa, jossa lasiaihioista muodostetaan itse valokuitu. Tämän vuoksi kappaleessa keskitytään enemmän valokuidun rakenteeseen ja vetoprosessiin kuin valokuidun toimintaperiaatteeseen.

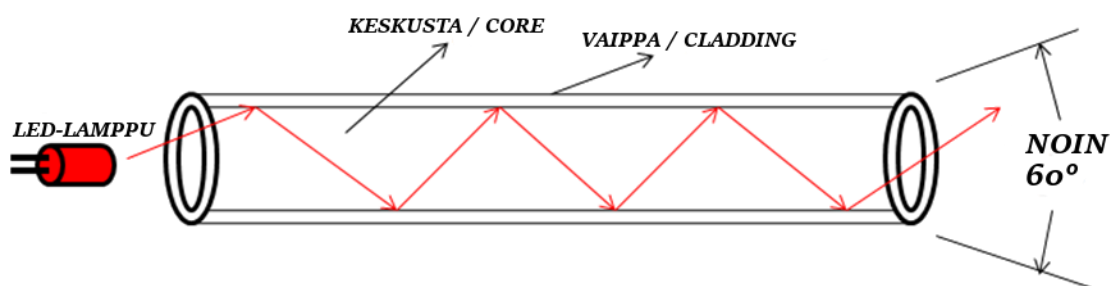
#### 3.1 Valokuidun toiminta ja rakenne

Valokuitu on maailmanlaajuisessa käytössä oleva tiedonsiirtomenetelmä kahden tai useamman pisteen välillä. Valokuitua voidaan valmistaa joko lasisista tai akryylimuovisista preformeista. Nextromilla ei ole akryylimuovisen valokuidun valmistukseen kykeneviä laitteita, eikä työssä aiheena oleva menetelmä soveltuisikaan muoviselle valokuidulle. Lasista tai akryylimuovista valmistetun valokuidun toimintaperiaate on toiminnaltaan kuitenkin sama. Valokuitu siirtää valoa, eli tietoa, pitkiä tai lyhyitä matkoja ohuen sylinterimäisen kaapelin sisällä. Valokuidun yksinkertaistettu toimintaperiaate perustuu sen monikerroksiseen rakenteeseen (kuva 1).



Kuva 1. Monimuotokuidun rakenteen halkileikkauskuva (Tutorial: Fiber Optic Basics).

Keskusta (core) ja vaippa (cladding) ovat kumpikin materiaaliltaan kvartsia. Niillä on kuitenkin eroavaisuuksina taitekerroin sekä paksuus. Taitekertoimen indeksiä voidaan joko kasvattaa tai alentaa riippuen halutusta lopputuloksesta. Perinteisesti kuorta ”doupataan” aihion valmistusvaiheessa germaniumilla, joka kasvattaa kuoren taitekerrointa. Taitekerrointa voidaan vastaavasti alentaa fluorin avulla. (Hecht 2002: 134.) Tämä eroavaisuus ytimen ja vaipan taitekertoimissa aiheuttaa tilanteen, jossa valo ei kykene läpäisemään vaippakerrosta (cladding), vaan kimpoaa siitä ja jatkaa etenemistä valokuidun keskustassa (kuva 2) (Hecht 2002: 28).



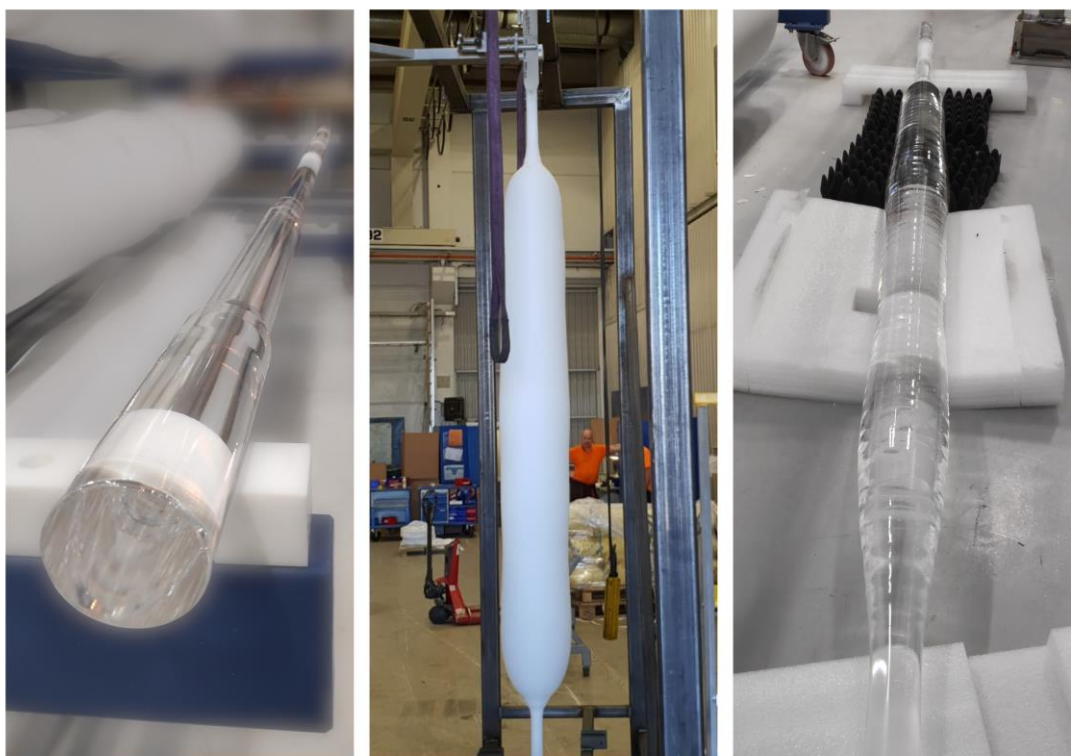
Kuva 2. Havainnekuva valon heijastumisesta monimuotokuidun pinnalla (Kumar ym. 2018: 2).

Teoriassa valo pystyy kuljettamaan tietoa ilman, että sitä häviää matkalla lähtöpaikasta aina saapumispisteeseen asti. Valitettavasti kuitenkin valokuidun valmistuksessa sekä ympäristöstä aiheutuvista rasituksista aiheutuu valokuituun mikrohalkeamia ja epäpuhtauksia. Valon osuessa näihin halkeamiin menettää se osan tehostaan ja sirpaloituu useammaksi eri säteeksi. Tätä valon sirpaloitumista kutsutaan vaimennukseksi. Pienempi vaimennus koetaan laadukkaampana valokuituna. Vaimennuksen minimoiminen on yksi keskeisiä tavoitteita hermeettisessä pinnoitteessa.

### 3.2 Valokuidun lasiaihio

Valokuidun valmistus on pitkä, pisimmillään yli viikon kestävä prosessi, joka vaatii eri valmistusvaiheisiin oman laitteensa. Valokuidun valmistuksessa puhutaan yleensä tehdaskokonaisuuksista. Aikaa vievin osuus on lasiaihion valmistus. Usein itse aihion

valmistus tehdään erillisessä tehtaassa, joka sitten myy aihion valokuidun vetämiseen erikoistuneille yrityksille. Joskus saattaa olla, että koko prosessi on viety yhden tehdaskokonaisuuden alle. Näin tuotantoa saadaan suoraviivaisemmaksi ja aihion kokoa ja laatua voidaan paremmin muunnella saman katon alla. Valokuidun aihiota kutsutaan puhekielessä nimellä preformi, joka on lähtöisin englannin kielen sanasta preform. Tämä kyseinen aihio voi vaihdella kooltaan ja ominaisuuksiltaan hyvinkin paljon. Tämänhetkiset suurimmat preformit ovat suuruusluokaltaan 4 m pitkiä ja lähes puoli 0,5 m halkaisijaltaan. Näistä suurimmista preformeista valmistetaan perinteistä telekommunikaatiokuitua, jota vedetään tuhansia kilometrejä serveriltä toiselle. Preformeja valmistetaan myös erikoiskuitupuolelle, jossa valmistetaan valokuitua mm. lääketieteeseen, avaruustieteeseen ja erilaisiin lasereihin. Näiden kyseisten valokuitujen hinta on yleensä moninkertainen verrattuna perinteiseen telekommunikaatiokuituun. Preformin valmistukseen on kehitelty useita eri tekniikoita. Yleisimpiä näistä ovat mm. MCVD-, PCVD- ja OVD-tekniikat, jotka ovat yleisesti käytössä ympäri maailman. Kuvassa 3 on kuvattu OVD-prosessia, jossa vasemmalta oikealle nähdään preformin valmistusvaiheiden etenemistä.

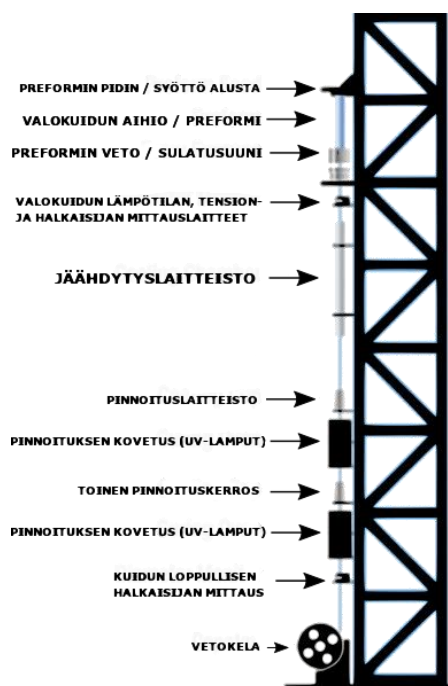


Kuva 3 Valokuidun lasiaihion OVD-valmistusvaiheita vasemmalta oikealle edeten.

Vasemmalla puolella näkyy preformin keskus eli core, jossa valo tulee liikkumaan. Tämä on hyvin puhtaasta SiO<sub>2</sub>:sesta, eli quartista valmistettu lasitanko. Tämän tangon päälle tuodaan OVD-prosessissa keskellä kuvassa näkyvää valkoista piitetrakloridia (SiCl<sub>4</sub>). Tämän jälkeen lasiaihio viedään sintraushehkutukseen, jossa valkoisesta piitetrakloridista muodostuu läpinäkyvä taitekerrosvaippa. Preformin valmistukseen liittyy myös muita vaihteita, mutta itse preformin valmistustavalla tai koolla ei ole kovin suurta vaikutusta hermeettisen hiilipinnoitteen valmistuksen onnistumiseen. Tämän vuoksi peruskäsitys preformeista ja niiden valmistuksesta riittää pinnoitteen kannalta tärkeämmän vetoprosessin ymmärtämiseen.

### 3.3 Valokuidun vetoprosessi

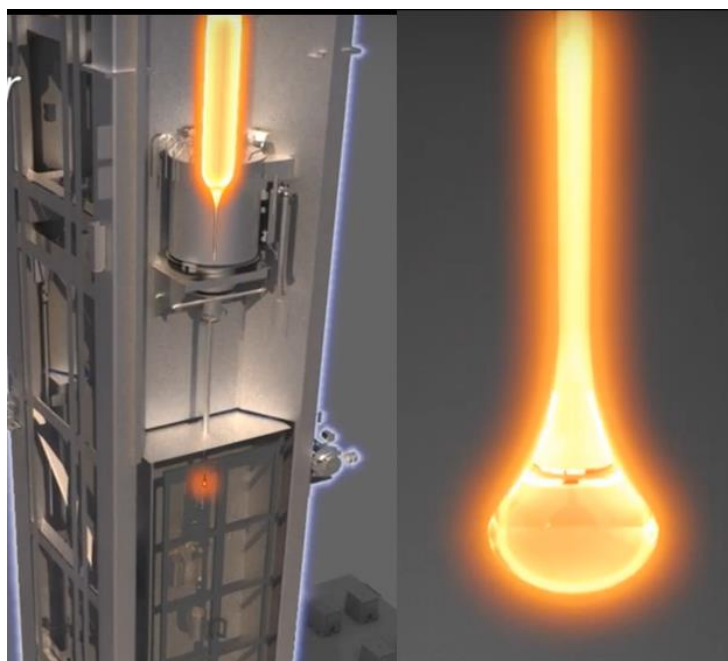
Kun valokuidun aihio (preformi) on valmistettu, voidaan se viedä sen vetämiseen tarkoitettuihin vetotorneihin (kuva 4). Nämä tornit voivat olla korkeudeltaan 8 m tai 38 m. Korkeus saattaa vaihdella paljonkin riippuen valmistajasta.



Kuva 4. Vetotorni ja siihen kytkettyjä laitteita (Key 2016).

Tornien tulee olla korkeita, jotta valokuitu pääsee jäähtymään tarvittavan määrän ennen kelalle viemistä. Matalimmat tornit ovat yleensä tarkoitettu erikoiskuidun valmistukseen, jossa vetonopeudet eivät ole kovin suuria. Telecomkuidussa vetonopeudet ovat suuruudeltaan 2500 - 3500 m/min. Tämä nopeus aiheuttaa sen, että valokuitu ei ehdi jäähtyä tarpeeksi edes korkeissa torneissa. Torneihin on korkeuden lisäksi asennettu jäähdytyslaitteistoja, joissa kiertää jatkuvasti jäähdytetty vesi. Preformi on siis hyvin kuuma, mikä johtuu sen valmistukseen vaadittavasta menetelmästä. Aihio viedään tornin ylärakenteelle, josta se roikkuu siihen tehdystä lasitangosta. Preformin alaosaa lämmitetään hitaasti siihen tarkoitukseen kehitetyllä uunilla. Uunin lämpötila vaihtelee 2200 °C:sta aina 2300 °C:seen.

Kun lasin sulaminen alkaa, syntyy sen alapäähän lasipisara, joka painovoiman vaikutuksesta lähtee valumaan alaspäin (kuva 5).



Kuva 5. Lasiaihion sulatus ja tipan syntyminen (Rosendahl Nextrom 2018).

Uuni on avoin alhaalta, jolloin tippa pääsee vapaasti putoamaan kohti tehtaan lattiaa. Tämä tippa valuu niin kauan alaspäin, kunnes se törmää siihen tarkoitettuun tippa-astiaan. Tästä tippa katkaistaan ja vapaaksi jäänyt valokuitu pujotetaan useiden laitteiden

lävitse, minkä jälkeen valokuitu asetetaan erilliseen vetolaitteistoon. Vedon nopeus määräytyy täysin laitteiston ja vedettävän preformin ominaisuuksista.

Valokuitua vedetään isolle kelalle, joka pyörii suhteessa vedettävään nopeuteen. Yhden kelan valokuitumäärä riippuu valmistettavasta lasiahiosta ja esimerkiksi telekommunikaatiovalokuidussa yhdellä kelalla voi olla satoja kilometrejä valokuitua. Tämä kela ei kuitenkaan yksinään yleensä riitä yhdelle lasiahiolle, vaan kela joudutaan vaihtamaan kesken vedon. Valokuidun valmistusprossin vuoksi valokuidun vetoa ei pysty kesken kaiken pysäyttämään, joten kelan vaihto suoritetaan suoraan kelalta toiselle. Prosessi saattaa vaihdella valmistajan mukaan, mutta Nextromin laitteistoissa tämä on lähes kokonaan automatisoitu prosessi. Se, miksi kaikkea valokuitua ei pystytä tuomaan yhdelle kelalle johtuu kelan pyörimisnopeuden ja massan suhteesta. Koska valokuidun vetonopeuksia pyritään vuodesta toiseen kasvattamaan, joutuu kela pyörimään huomattavia nopeuksia. Tyhjänä kelan nopeudenkasvattamisessa ei synny ongelmia, mutta kelan täytyessä keskipakoisvoima kasvaa liian suureksi. Myös kelan ja akselin valmistuksessa on otettava huomioon aina vain tarkempia toleransseja värinän ja huojumisen varalta.

## 4 Valokuidun suojaus ja pinnoittaminen

### 4.1 Polymeeripinnoitus

Valokuitu ilman minkäänlaista pinnoitetta on hyvin herkkä kaikenlaisille ulkoisille voimille. Siksi se lähes aina pinnoitetaan jollain muulla aineella. Yleisin pinnoitusmateriaali on akryyli, jota käytetään lähes kaikissa telekommunikaatiokuiduissa ympäri maailman. Akryylipinnoite antaa kuidulle suojan mm. naarmuja, lämpöä sekä kuitugeelejä vastaan. (Hect 2002: 124.) Akryyliin voidaan myös lisätä väriä, joka tuo muuten läpinäkyvään valokuituun erottuvuutta. Koska erot valokuitujen paksuudessa voivat olla mikron ( $\mu$ ) luokkaa, on eri valokuituja mahdoton erottaa toisistaan paljaalla silmällä. Värjäyksellä valmistaja pystyy merkitsemään valmiit valokuituketat esim. kelassa olevan kuidun pituuden tai paksuuden mukaan (kuva 6).

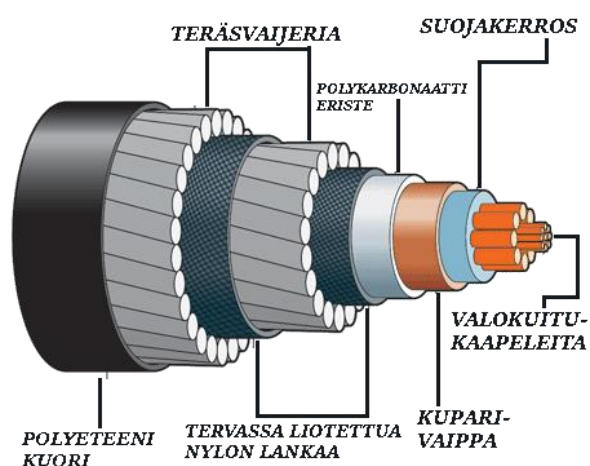


Kuva 6. Värjättyjä valokuituja kuitukelalla (Fiber Coatings: OFS Optics).

Myös muita muovi- ja polymeeriyhdisteitä käytetään tuotannossa. Näitä ovat mm. polyamidi, polybutyleeni-, polyvinyylidikloridi-, PFA- ja TPA. Jokainen pinnoite antaa kuidulle erilaisia piirteitä, ja valokuitu pinnoitetaan yleensä asiakkaan senhetkisten toiveiden mukaisesti. Näillä muovipinnoitteilla on kaikilla hyvin samankaltainen pinnoituslaitteisto, jossa muovi sulatetaan ja ”valetaan” kuidun päälle alaspäin vetotornista tultaessa. Nämä pinnoituslaitteistot eivät vaadi suuria muutoksia vetotorneihin ja asettuvat usein samoille kohdille vetotornissa kuin akryylipinnoittaja.

## 4.2 Merikaapelit

Valtaosa valokuiduista sijaitsee meren pohjalla. Tällä hetkellä maailmassa on n. 378 merikaapelia, jotka vastaavat 99 % kaikesta internetliikenteestä mantereiden välillä (Telegeography). Tämä tarkoittaa, että valmistettavasta valokuiduista suurin osa sijaitsee vesiympäristössä. Merikaapeleiden tarve myös lisääntyy vuosi vuodelta miljoonien uusien internetiin pääsevien laitteiden kytkeytyessä päivittäin verkkoon. (Starosielski 2012: 1.) Uusien laitteiden tuomien tietomäärien kasvaessa sekä teknologian kehityksen tuoman tiedostomuotojen kasvun myötä, on vanhoja kaapeleita myös korvattava suurempien datamäärien siirtämiseen kykenevillä merikaapeleilla. Merikaapeleiden poikkileikkauksesta vain häviävän pieni osa on itse tietoa siirtävää valokuitua, sillä suurin osa kaapelista keskittyy itse kuidun suojaamiseen ulkoisilta elementeiltä ja voimilta (kuva 7).



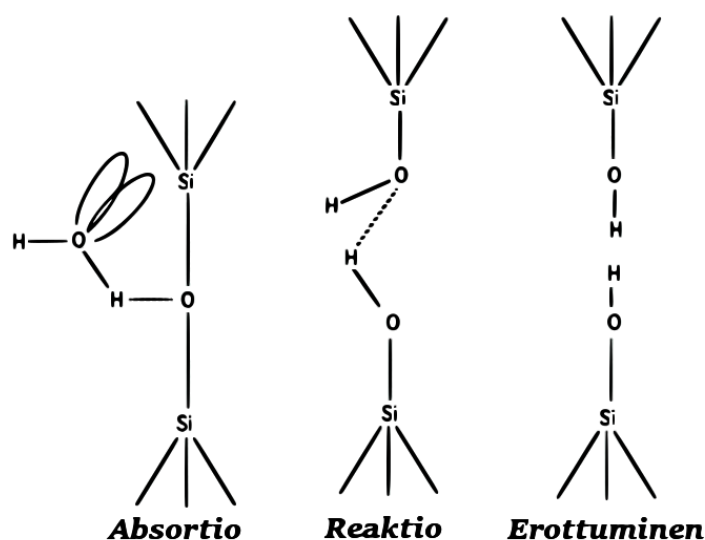
Kuva 7. Merikaapelin halkileikkaus (Palmer 2008: 4). Kuvassa näkyy selkeästi, kuinka pieni osa kaapelista on itse tietoa siirtävää valokuitua. Kaikki merikaapelit eivät ole samanlaisia, vaan rakenne vaihtelee valmistajan ja tarpeen mukaisesti.

Nämä suojaavat kerrokset saattavat kuitenkin itsessään aiheuttaa kuidulle vaurioita, vaatien valokuidulle hermeettisen pinnoitteen. Näihin syihin syvennyttään enemmän seuraavassa luvussa.



## 5 Veden vaikutus valokuituun

Vedettömässä tilassa valokuitu kestää vetoa jopa kolme kertaa enemmän verrattuna saman paksuiseen teräslankaan (Lindholm & Li 2008: 12). Tämä kuitenkin edellyttää, että tilassa, jossa testiä suoritetaan ei ole lainkaan vettä ympäristössä sekä valokuitua on käsitelty ja kuljetettu vesivapaassa ympäristössä. Perinteiset valokuidun pinnalla käytettävät muovipinnoitteet pystyvät suojaamaan valokuidun rakennetta nestemäisen veden suoralta kosketukselta. Se, miksi vesi sitten aiheuttaa valokuituun rakenteellista vauriota, johtuu veden H<sub>2</sub>O:n atomin rakenteesta. Varsinkin veden atomirakenteen vety (H<sub>2</sub>) on pienen atomirakenteensa vuoksi hyvin vaurioittava valokuidulle. (Wiederhorn 1972). Veden atomirakenne ja piiksidin yhdistettynä aiheuttaa kemiallisen hydrolyysi reaktion, jossa piiksidin hajoaa takaisin lähtöaineekseen (kuva 8).



Kuva 8. Valokuidussa oleva halkeama antaa vedelle mahdollisuuden hydrolyysireaktion syntyyn. Tämä nopeuttaa olemassa olevan halkeaman leviämistä entisestään. (Michalske & Freiman 1983.)

Piiksidin hajoamisreaktiota kuvataan kemiallisella kaavalla:



Reaktio kuvaa kuinka vesi (H<sub>2</sub>O) rikkoo piin ja hapen sidoksen (SiO<sub>2</sub>) muodostaen silanoideja. Piin erottuminen pois aiheuttaa näin halkeamia valokuidun rakenteelle ja näin

myös lujuuden heikkenemistä. Suuremmat halkeamat aiheuttavat myös vaimennusta valokuidussa, mikä voi pahimmillaan aiheuttaa koko valokuidun vaihtamisen. (Lemaire & Lindholm 2007: 464 – 465.)

Nykyisillä moderneilla muovinpäällystystekniikoilla valokuitu voidaan päällystää tavoilla, jossa hermeettiselle pinnoitteelle ei ole enää tarvetta. Tämä pätee tosin vain tilanteissa, jossa valokuitu on altistettuna lempeille ~ 20 °C:n lämpötiloille. Mitä suurempi lämpötila valokuidun ympärillä vallitsee, sitä nopeammin valokuitu heikkenee veden ja vedyn aiheuttamasta diffuusiosta. Paikoissa, joissa vallitsee erittäin haasteelliset tilanteet lämpötilan suhteen, on hermeettinen päällystysmenetelmä ainut olemassa oleva ratkaisu valokuidun suojaamiselle. Kriittisimpiä paikkoja ovat olleet öljyn etsintään käytetyt sensorit, jotka pudotetaan syvälle maahan porattuihin reikiin. Maan sisässä lämpötila saattaa nousta jopa 300 °C:seen, jolloin perinteiset ei hermeettiset kuidut hajoavat sensorin sisällä jopa viikkojen sisällä. (Mendez 1999.) Historiassa on myös tilastoitu tilanteita, joissa rikkoutuminen merikaapelin sisällä on aiheutunut veden diffuusiosta.

Lämpötilat merien pohjissa eivät ole kovinkaan suuria (4 – 20 °C), ja myös itse valokaapeli on pohjassa suojattuna useilla ulkoisilla kerroksilla (kuva 7). Valokuidun rikkoutuminen ei ole kuitenkaan yleensä johtunut meressä olevasta vedestä, vaan kuidun ympärille tuotujen materiaalien hajoamisesta. Varsinkin metallikuoret ovat ajan myötä alkaneet rappeutumaan, joka on tuottanut sivutuotteena vetyä. Tämä vety on sitten päässyt yhdistymään valokuidun piin kanssa aiheuttaen valokuituun vaimennusta ja heikkenemistä. (Lemaire & Lindholm 2007: 485.)

## 6 Valokuidun hermeettiset suojausmenetelmät

### 6.1 Metallipinnoitusmenetelmä

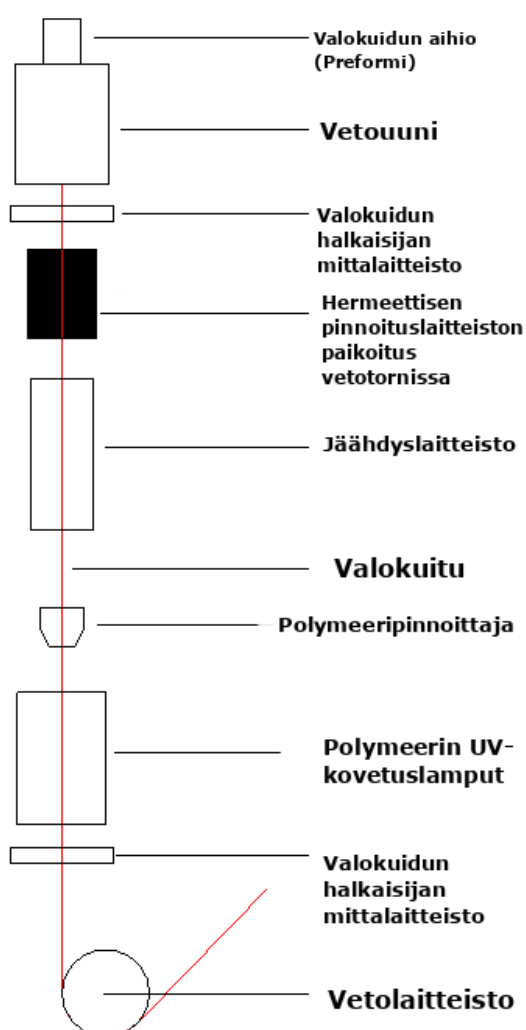
Asiakkaan kanssa keskustelu valokuidun hermeettisestä pinnoittamisesta alkoi aluksi puheella metallipinnoituksesta. Metallipinnoitusmenetelmiä on kehitelty jo 70-luvulta lähtien, mutta sitä on jatkuvasti suoraviivaistettu ja paranneltu vuosien varrella. (Lemaire & Lindholm 2007: 455 – 456.) Metallit olivat lähinnä pehmeitä metalleja kuten indiumia, kultaa ja platinaa. Menetelmänä pinnoitus on kuitenkin hankala toteuttaa ja aiheuttaa valokuituun sisäisiä jännityksiä metallin jäähmettyessä (Wysocki & Lee 1981.). Pinnoitusmenetelmä toimii hiukan samalla tavalla kuin nykyiset polymeeripinnoittelaitteistot. Valokuitu ”sukeltaa” vetovaiheessa sulan metalliverhon lävitse, joka tuo valokuidun pinnalle ohuen kerroksen metallia. Usein prosessi vaati myös vakuumiympäristön, mikä hankaloitti prosessia entisestään. Metallilla saatiin kuitenkin monissa tapauksissa toteutettua hermeettinen pinnoite valokuidun päälle. Varsinkin alumiini tuotti hyvin lupaavia tuloksia tutkimusten loppupuolella. Metallipinnoite oli kuitenkin hyvin paksu, mikä aiheutti vaimennusta valokuidulle sekä jopa puolitti valokuidun vetokestävyuden. (Wysocki & Lee 1981.) Tämän vuoksi metallin pinnoituksesta päätettiin luopua jo projektin ensimetreillä. Paljon lupaavampana vaihtoehtona nähtiin metallipinnoituksen jälkeen tulleet tutkimukset, joissa valokuitua pinnoitettiin erilaisilla kaasuilla.

### 6.2 Kaasupinnoitusmenetelmä

Kymmenen vuotta metallipinnoitustutkimusten alkamisen jälkeen Hewlett-Packardin laboratorio haki patenttia valokuidun hermeettiselle kaasupinnoittamiselle. Patentissa kuvattiin menetelmää, joka poikkesi vahvasti perinteisistä metallipinnoituksista (Hanson ym. 1982). Tässä menetelmässä valokuidun pinnalle kehitetään hermeettinen pinnoite hiilivetyjen avulla. Hiilivedyn avulla voidaan muodostaa valokuidun silikan ja hiilen välille piikarbidisidos Si-C. Käytettyjä hiilivetyjä mm. asetyleeni, metaani sekä bentseeni. Tämä haluttu Si-C sidos valokuidun ja hiilen välillä saadaan aikaiseksi kuivatislaus eli pyrolyysireaktiolla (Marsh & Rodriguez-Reinoso 2006: 497–498). Tämän pyrolyysireaktion syntymiseen tarvitaan paljon lämpöä, joka saadaan tässä tapauksessa valokuidusta

itsessään. Valokuidun jäähtyminen uunista poistuttaessa on nopeaa, joten laitteisto sijoitetaan yleensä mahdollisimman lähelle vetouunia (kuva 9).

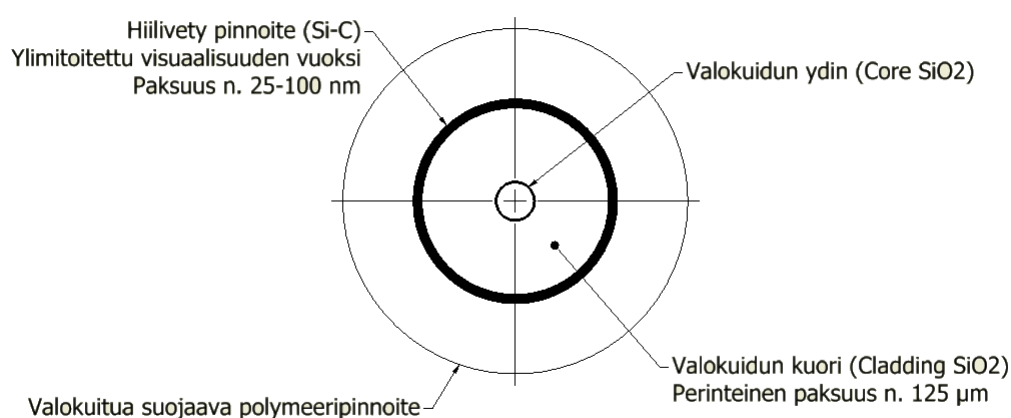
Pyrolyysireaktion aikaansaamiseksi prosessissa ei saa olla yhtään happea. Tämän vuoksi valokuidusta poistetaan happikerros halogeeneilla, mutta itse prosessitilan tulee olla myös hapettomassa tilassa reaktion syntymiseksi. Hapen poistaminen valokuidusta voidaan toteuttaa myös halogeenihiilivetysekoituksilla.



Kuva 9. Valokuidun hermeettisen pinnoituslaitteiston paikoituksen hahmotus vetotornissa.

### 6.3 Hiilipinnoitus

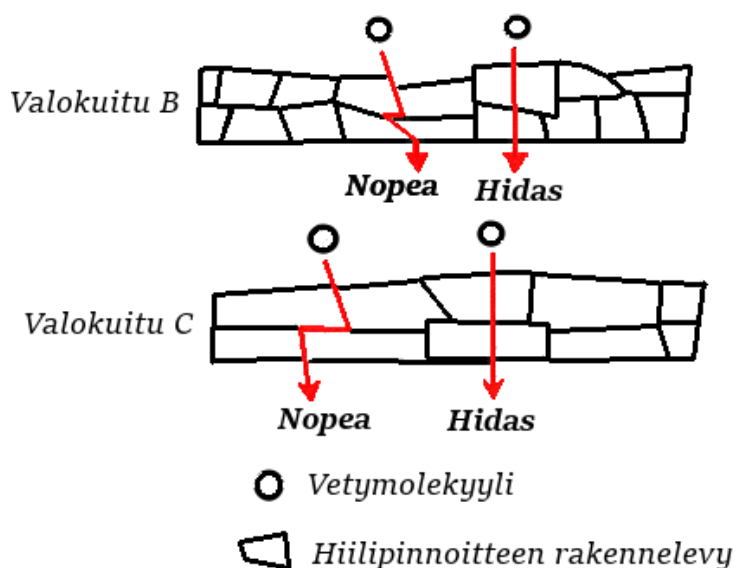
Hermeettinen hiilipinnoite on hyvin ohut laattamainen pinnoite valokuidun vaipan päällä (Kuva 10). Sen paksuus vaihtelee riippuen prosessista, mutta hermeettisesti suojaavan pinnoitteen tulee olla vähintään 20 nm paksu toimiakseen hermeettisesti suojaavasti. (Meabon 1996.) Paksumpi kerros pidentää vedyn diffuusioaikaa, mutta ei merkittävästi verrattuna sen tuomiin haittavaikutuksiin prosessissa. Parhaimpiin tuloksiin päästään n. 40 – 50 nm paksulla pinnoitteella (Lu 1988).



Kuva 10. Yksimuotokuidun halkileikkaus hiilipinnoitteella.

Hiilipinnoite valokuidun vaipan päällä muistuttaa epäjärjestyneitä laattoja tai nauhoja (kuva 11). Laatat eivät muodostu tasaisena pinnoitteena vaipan päälle, vaan jossain paikoissa pinnoite saattaa olla merkittävästi ohuempi. Paksummalla pinnoitteella vältytään ohuiden osuuksien mikroaukkojen syntymiseltä näin estäen vetymolekyylin suora pääsy vaipan kuoreen. Paksuus myös pidentää aikaa, mikä vetyatomien tulee kulkea päästäkseen reagoimaan valokuidun silikan kanssa. Tämän vuoksi laattojen koon kasvattaminen sivuttaissuunnassa hidastaa myös vetymolekyylin diffuusioaikaa. Hermeettinen pinnoite ei kuitenkaan pysty suojaamaan valokuitua vedyltä kuin tietyissä lämpötiloissa. Ympäristössä, jossa vallitsee 20 °C:n asteen lämpötila, pystyy hermeettinen pinnoite suojaamaan valokuitua pitkiäkin ajanjaksoja ilman vaurioita. Moni hermeettisistä kuiduista on tehokas suojaamaan valokuitua hermeettisesti aina 150 °C:seen asti. Tästä

lämpötilan kasvattaminen lisää vedyn diffuusiota merkittävästi. Tämä johtuu Brownin liikkeen laista, jossa suuremman energiamäärän, eli lämpötilan tuominen ympäristöön nopeuttaa hiukkasten liikettä.



Kuva 11. Hiilipinnoitteen rakennemalli (Biswas 1995).

Vaikka hiilipinnoite on erittäin ohut, se tuo valokuidulle kiiltävän mustan vivahteen. Väristä voidaan nähdä, että pyrolyysireaktio on tapahtunut onnistuneesti laitteistossa. Tästä ei voida kuitenkaan päätellä mitään pinnoitteen paksuudesta tai toimivuudesta. Vetotorneissa on halkaisijan mittauslaitteita valokuidun paksuuden mittaukseen, mutta ne eivät kykene mittamaan tarvittavia nanometrin poikkeamia. Valokuitu voidaan vedon jälkeen katkaista, jolloin sen halkileikkausta pystytään tarkastelemaan mikroskoopilla. Tämä antaa kuitenkin hyvin vaillinaisen kuvan koko valokuidun pinnoitteesta sekä on hyvin vaikea toteuttaa käytännössä pinnoitteen kestävyuden vuoksi. Hiilipinnoite saattaa vaihdella hyvinkin paljon koko valokuidun matkalla, joten pieni leikkaus kuidusta ei ole riittävän tehokas tarkastelutapa. Hiilipinnoite on rakenteensa vuoksi kuitenkin sähköisesti johtavaa. Tämä antaa mahdollisuuden mitata pinnoitteen paksuutta sähköistä vastusta hyödyntämällä. (Day & Fanzen 1992: 67–69.)

Tähän on myös kehitetty kaava:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r \delta} \quad (2)$$

jossa  $r$  on hiilipinnoitteen resistiivisyys ( $\Omega\text{-cm}$ ),  $R$  lineaarinen sähkönjohtavuus ( $\Omega/\text{cm}$ ),  $r$  valokuidun säde ja  $\delta$  hiilipinnoitteen paksuus. Eräs valmistaja on näyttänyt tutkimuksissaan, että  $R < 25 \text{ k}\Omega/\text{cm}$  on arvo, jolla voidaan taata, että hiilipinnoite on hermeettisesti suojaava kuidun mekaanisen väsytyksen näkökulmasta. (Lemaire & Lindholm 2007: 461.)

Hiilipinnoitteen paksuus ei anna kuitenkaan suoraa tietoa siitä, kuinka kauan valokuitua voidaan pitää vesiympäristöissä rikkoutumatta, eikä myöskään siitä missä lämpötiloissa valokuitua voidaan käyttää käyttöiän ollessa järkevissä luvuissa. Valokuidun valmistaja voi kuitenkin halutessaan suorittaa kokeita, joilla pystytään antamaan valokuidun ostajalle sekä valmistajalle dataa pinnoitteen suorituskyvystä. Kokeet voivat vaihdella korkean lämpötilan kestävydestä ja meriveden kestävydestä aina kuukausia kestäviin kontrollitesteihin. Kaikissa näissä kokeissa haetaan kuitenkin lopussa samaa väsymisenkestävyysarvoa. Tätä väsymisen kestävyyttä mitataan korroosionkestävyysparametrimilla  $n$ . Kokeissa olleet valokuidun testataan dynaamisella vetokokeella.

Dynaamisiin testeihin valokuitujen kestävyden arvioimiseen on kehitelty useita eri kaavoja, mutta useat niistä perustuvat Weiderhornin malliin (Weiderhorn 1972):

$$t_f = BS_{int}^{n-2} \sigma^{-n} \quad (3)$$

jossa  $t_f$  kuvaa aikaa valokuidun katkeamiseen,  $B$  halkeamien kasvuparametria,  $S_{int}$  valokuidun luontaista lujuutta, ja  $\sigma$  kuvaa dynaamisessa testissä kohdistuttua jännitystä (Lemaire & Lindholm 2007: 464). Perinteisessä pinnoittamattomassa valokuidussa  $n$ -arvo on lähemmäs 20, kun taas hermeettisesti pinnoitetussa arvo voi lähennellä 200:aa. Korkeampi  $n$ -arvo kertoo siis valmistajalle ja asiakkaalle, että valokuitu todennäköisimmin kestää pitkiäkin aikoja vesiympäristöissä ilman liiallisen vaimennuksen tuomaa vaihdon tarvetta.

Pinnoituslaitteistossa tapahtuva pyrolyysireaktio valokuidun pinnalla on kohtuullisen yksinkertainen prosessi, mutta täydellisen hermeettisen pinnoitteen syntymiseen on olemassa monenlaisia permutaatioita. Aiemmin mainittu reaktio vaatii hiilipohjaisen kaasun, kuten asetyleenin toimiakseen. Kun hiilivetyä tuodaan pinnoituslaitteistoon kuumen valokuidun kanssa, saa valokuidun lämpö hiilivetykaasussa aikaiseksi "halkeamisen". Tämä johtaa hiilen kemialliseen höyrystymiseen, minkä jälkeen hiili haluaa sitoutua valokuidun pinnalle. Tätä prosessia voidaan kutsua "laskeutumisiksi". Juuri tämä hiilen laskeutuminen valokuidun pinnalle on kriittinen osuus pinnoituksen onnistumisessa. Tähän vaikuttaa eniten valokuidun vetonopeus, mutta myös turbulenssit reaktiokammion sisällä sekä monet muut erilaiset tekijät. Suunnitteluvaiheessa on hyvin haastavaa saada aikaiseksi täydellistä laitteistoa. Pinnoitteen täydelliseen onnistumiseen tarvitaan myös paljon testausta tuotannossa, minkä avulla laitteistoa voidaan tarvittaessa muokata oikeaan suuntaan. Pinnoitteen onnistumista voidaan parantaa kasvattamalla reaktioalueen pituutta, mutta se taas aiheuttaa uusia ongelmia reaktiossa syntyvien sivutuotteiden osalta.

Koska hiilipinnoitus perustuu kemialliseen reaktioon, syntyy sen sivutuotteena myös muita materiaaleja. Pyrolyysireaktiossa syntyvä sivutuote on öljyistä suurimolekyyliainetta, jota syntyy suuria määriä, jos lämpötila ei ole riittävän korkea reaktiolle tai jos kaasua tuodaan liian suuria määriä. Jos ainetta kertyy riittävästi pinnoituslaitteiston seinämille, saattaa se osua pinnoitettavaan valokuituun. Aineen osuessa valokuituun on koko valmistettava valokuitukela suurella todennäköisyydellä pilalla. Aine kovettuu hyvin nopeasti ja on todella vaikea poistaa muuten kuin mekaanisesti valokuidun pinnalta. Vaikka alhainen lämpötila lisää sivutuotteen syntymistä, ei lämpötilan nostaminen ole ratkaisu ongelman poistamiselle. Liian korkeat lämpötilat tuovat hiilipinnoitteelle timanttimaisen rakenteen. Tämä rakenne on mekaanisesti hyvin kestävä, mutta ei ole hermeettisesti suojaava. (Dimarcello 1990.) Tämän vuoksi sivuaineen minimoiminen reaktiossa on yksi haastavimmista yksityiskohdista pinnoituslaitteen suunnittelussa.



## 7 Konseptisuunnittelu

### 7.1 Yhteistyöprojektin lähtöarvot

Ennen insinöörityön aloittamista oli asiakkaan kanssa käyty keskustelua halutuista arvoista sekä asiakkaan tiloissa olevista rajoitteista. Nextromin tehtävänä oli toteuttaa valmis pinnoituslaitteisto asiakkaan antamilla lähtöarvoilla.

Vetoprosessi, johon pinnoituslaitteistoa suunniteltiin, käytti hidasta vetonopeutta, mutta isoa valokuitukuitukokoa. Hidas vetonopeus tarkoittaa, että valokuidussa ei ole välttämättä tarvittavaa lämpökapasiteettia pyrolyysireaktion synnyttämiseen. Isompi valokuitukoko kuitenkin auttaa, sillä sen suurempi massa kantaa lämpöä pidemmän aikaa verrattuna perinteisiin valokuitukokoihin. Hitaille vetonopeuksille on kehitelty patentteja, joissa vetouunin ja pinnoituslaitteiston välille tuodaan lämpöä ohjaavat laipat. Nämä laipat ohjaavat lisälämpöä pinnoituslaitteistoon mahdollistaen reaktion ilman kalliita lisäinvestointeja toiseen uuniin.

Tarvittava etäisyys haluttiin tarkistaa ennen suunnittelun aloitusta, sillä jos uunista saatava lämpö ei riittäisi reaktion käynnistykseen, vaadittaisiin laitteistoon lisälämmitystä, joka nostaisi projektin hintaa. Tarkastelua varten tehtiin Excel-laskuri (liitteet 1 ja 2), joka käytti pohjana kirjasta Silica Optical Fiber Technology for Devices and Components saatua kaavaa (Oh ym. 2012):

$$\frac{T-T_0}{T_s-T_0} = \exp\left(-\frac{4hz}{\rho C_p d_2}\right) \quad (4)$$

jossa  $T_1$  on kuidun lämpötila heti uunista tultaessa,  $T_0$  tilassa vallitseva ulkolämpötila,  $T_s$  valokuidun matkaama aika paikan  $a$  ja  $b$  välillä,  $h$  lämmönsiirtokapasiteetti,  $\rho$  kuidun tiheys,  $C_p$  valokuidun ominaislämpökapasiteetti,  $z$  pinnoituslaitteiston etäisyys uunista, ja  $d$  valokuidun halkaisija. Haluttu tulos oli, että valokuitu olisi vähintään 1000 °C asteista pinnoituslaitteistoon tullessaan. Laskurissa saatiin selville, että parhaassakin tilanteessa pinnoituslaitteisto pitäisi sijoittaa aivan uunin alapuolelle tarpeellisen lämmön saavuttamiseksi. Tämä toi haasteita suunnitteluun, sillä uunin lämpötila heti sen alapuolella

lähentelee 600 - 800 °C:ta. Asiakkaan tila vetotornissa oli myös maksimoitu, jolloin tilaa oli hyvin rajoitetusti pituussuunnassa. Syvyys- ja leveys suunnassa oli kuitenkin tarvittavaa tilaa laitteiston poisviemiselle valokuitulinjasta.

## 7.2 Pinnoituslaitteiston määrittäminen lähtöarvoista

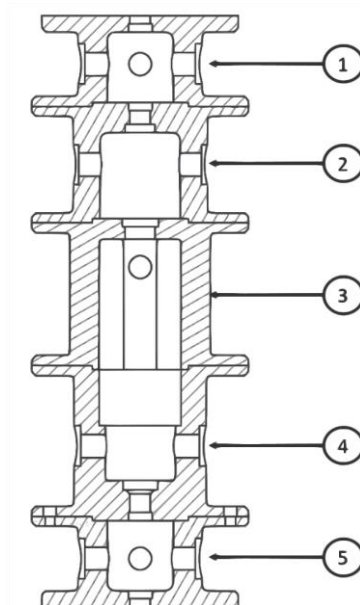
Hiilipinnoitusmenetelmää on tutkittu ja kehitelty usean eri valmistajan toimesta 80-luvulta saakka. Tutkimukset ovat tuoneet useita eri hiilipinnoitteen valmistukseen liittyviä patenteja. Kaikki patentit, joiden avulla haluttua laitteistoa lähdettiin rajaamaan, olivat jo vanhentuneet, joten riskiä patenttirikkomukselle ei ollut. Patenteista iso osa käsitteli rakenteita, jotka koostuivat kokonaan kvartsilasista. Kvartsilasinen rakenne sopii varsinkin hitaille vetonopeuksille sen eristävien ominaisuuksien vuoksi. Lasin pinnalle ei myöskään synny yhtä suurella todennäköisyydellä pyrolyysireaktiossa syntyvää sivutuotetta (kt. 6.3). Kvartsilasinen rakenne kuitenkin rajaa valtavasti valmistettavuutta, modulaarisuutta sekä turvallisuutta. Kvartsilasin työstäminen sekä hitsaus ovat isolta osin käsityötä. Koska pinnoitusmenetelmä vaatii suurta tarkkuutta pinnoituslaitteiston kannalta, on tarvittavia toleransseja erittäin vaikea saavuttaa käsityöllä. Käsityönä tehdyt osat ovat myös hitaita valmistaa sekä niitä valmistavat yritykset ovat harvassa. Prosessissa käytetyt kaasut ovat myös räjähdysherkkiä, mikä olisi synnyttänyt vaaratilanteen kvartsilasisessä pinnoituslaitteistossa. Vaikka useissa tutkimuksissa on havaittu lasisten pinnoituslaitteistojen soveltuvan juuri hitaille vetonopeuksille niiden eristävien ominaisuuksien vuoksi, todettiin, että haittapuolet kasvaisivat liian suuriksi lasisessa laitteistossa.

Patenteissa käsiteltiin myös metallisia pinnoituslaitteistoja. Nämä soveltuivat varsinkin nopeille vetonopeuksille. Metalliset pinnoituslaitteistot koostuvat useista eri kammioista, jotka kiinnitetään toistensa päälle erilaisilla menetelmällä. Koska laitteisto koostuu useista eri komponenteista, tarkoitti se, että yksittäisiä osia pystytään vaihtamaan tarvittaessa. Tämä myös tarkoitti, että rakenteen sisäpuolelle päästään käsiksi helpommin, jolloin sinne voidaan sijoittaa pinnoitusta helpottavia ratkaisuja. Osista koostuminen tuo kuitenkin rakenteen linjattavuuteen ongelmia, sillä poikkeama ylä- ja alapuolen välillä saattaa aiheuttaa epätasaista pinnoitusta. Pahimmissa tapauksissa valokuitu saattaa osua kammion sisäreunoihin, mikä tarkoittaa koko vedon pilaantumista. Metalliset pinnoituslaitteistot eivät kuitenkaan eristä tarpeeksi lämpöä, että niitä voitaisiin käyttää

hitailta vetonopeuksilla. Päätettiin kuitenkin, että valmistuksellisesti metallinen rakenne olisi huomattavasti helpompi, halvempi sekä modulaarisempi rakentaa. Tavoitteeksi asetettiin, että rakenteeseen tulisi lisätä jollain tavoin eristystä, mikä edesauttaisi lämmön pysymistä rakenteessa. Kun valmistusmateriaali oli päätetty, aloitettiin kammioiden konseptointivaihe.

### 7.3 Metallisen pinnoituslaitteiston toimintaperiaate

Metallista rakennettu pinnoituslaitteisto koostuu viidestä sylinterimäisestä kammiosta, joista jokaisella on oma tehtävänsä (kuva 12).



Kuva 12. Hermeettisen pinnoituslaitteiston havainnointikuva

Kuvassa 12 kammiot ovat numeroituna 1 – 5 alaspäin laskien. Valokuidun vetotorniin asennettuna olisi kammio yksi ensimmäisenä valokuitua vastassa. Kammion yksi tehtävänä on eristää pinnoituslaitteisto ulkopuolella vallitsevalta ilmakehältä sekä poistaa valokuidun päällä oleva kaasukerros. Toisen kammion tehtävänä on tuoda pinnoituslaitteistoon itse hiilivetykaasu, mikä toimii pyrolyysireaktion lähdeaineena. Itse pyrolyysireaktio tapahtuu kuitenkin kammioiden kolme ja neljä. Kammiota kolme kutsutaan siis reaktiokammioiksi. Tämän kammion korkeutta voidaan tarvittaessa muuttaa, jolloin

reaktioaluetta pystytään pidentämään tai lyhentämään. Kammion neljä tehtävänä on kerätä pyrolyysireaktiossa syntyvää sivutuotemateriaalia sekä imeä pinnoituslaitteistossa olevia ylimääräisiä kaasuja. Kammiolla viisi on sama tehtävä kuin kammiolla yksi. Kammiot eristää pinnoituslaitteiston alapuolelta sekä kiinnittää rakenteen vetotorniin kiinni. Kun konseptisuunnittelun ideat oli keskusteltu läpi tiimin kesken, aloitettiin itse mekaniikkasuunnittelu kammioiden ja rakenteen osalta.

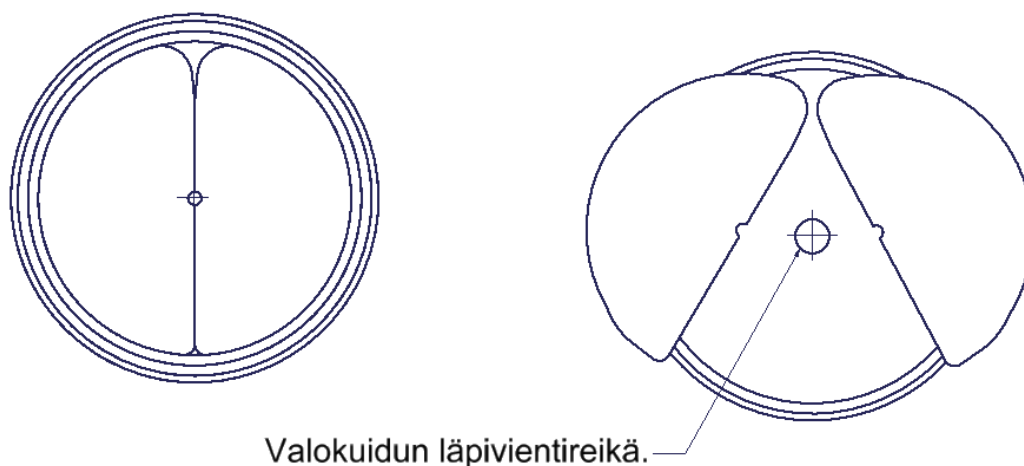
## 8 Pinnoituslaitteiston mekaniikkasuunnittelu

### 8.1 Ylempi suojakammio

Pinnoituslaitteiston yläkammion ollessa ylimpänä laitteistossa, ottaa se vastaan suurimman osan uunin synnyttämästä lämpökuormasta. Lämpökuorman vuoksi katsottiin, että materiaaliksi soveltuisi parhaiten ruostumaton teräs. Koska pinnoituslaitteiston linjauksella oli suuri merkitys, ei eri materiaalien lämpölaajenemiskertoimia haluttu sekoittaa keskenään. Yläkammion ollessa ruostumatonta terästä olisi muidenkin kammioiden oltava siis ruostumatonta terästä. Vetotornin käyttäjiltä saatujen kommenttien perusteella pystyttiin kammion materiaalia harkitsemaan uudelleen. Vetotornin uunin alapuolelta tulevan lämpö ei luultavammin ylittäisi 600 °C:ta, joten koko pinnoituslaitteiston materiaaliksi katsottiin tämän perusteella alumiini.

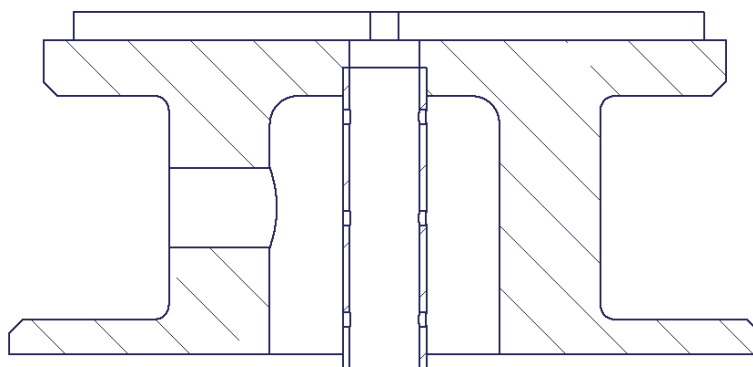
Kun valokuidun vetovaiheessa syntyvä tippa (kuva 5) aloittaa laskeutumisen on valokuidun syntymistä mahdoton pysäyttää. Tämä tarkoittaa, että jos valokuidulle halutaan tehdä jotain, on oltava erittäin nopea, sillä valokuitua syntyy jatkuvalla syötöllä. Pinnoituskammion ollessa kokonaan umpinainen pitää valokuitu pujottaa yläkammion kautta koko kammion lävitse. Tämä tuo haasteen pinnoituslaitteiston suunnittelussa, sillä laitteiston tulee olla eristettynä ilmakehästä, mutta samalla valokuidun pujottamisen tulisi olla mahdollisimman helppoa. Pinnoituslaitteiston suunnittelussa harkittiin avattavaa versiota, jossa eri puoliskot voitaisiin saranoida ja lukita toisiinsa valokuidun ollessa laitteen sisällä. Tämä ajatus kuitenkin suljettiin pois, sillä kammion linjaus olisi erittäin haastavaa sekä valmistuksen, että liikkeen tuoman efektin vuoksi. Ratkaisu löydettiin Nextromin muovipinnoituslaitteistosta, jossa esiintyi samankaltaista ongelmaa. Kammion päälle

tuodaan iirislaipat, joiden avulla kammiossa oleva sisääntuloreikää voidaan valokuidun pujotuksen jälkeen pienentää (kuva 13). Iirislaippojen avulla reikäkoko saatiin pienettyä kaasunvirtauksen ohjauksen kannalta tarvittava määrä.



Kuva 13. Yksinkertaistettu havainnointikuva iirislaippojen toiminnasta. Vasemmalla kammio suljettuna ja oikealla avattuna.

Kuten kappaleessa 7.3 mainittu, on yläkammion tehtävänä eristää pinnoituslaitteisto ulkopuolelta vallitsevalta ilmakehältä, mutta myös poistaa valokuidun päällä oleva happikerros. Tämä toteutetaan tuomalla kammioon typpeä ( $N_2$ ), joka poistaa happikerroksen reagoimatta valokuidun kanssa. Typpeä tuodaan kammion kummaltakin puolelta tasaisemman täytön mahdollistamiseksi. Vaikka typen virtausnopeus kammioon on pieni, saattaa sekin aiheuttaa valokuituun huojuntaa. Tämän vuoksi kammion sisäpuolelle asennetaan kaasuntasaja, joka tasaa typen virtausta kammiossa (kuva 14). (Meabon ym. 1996.)



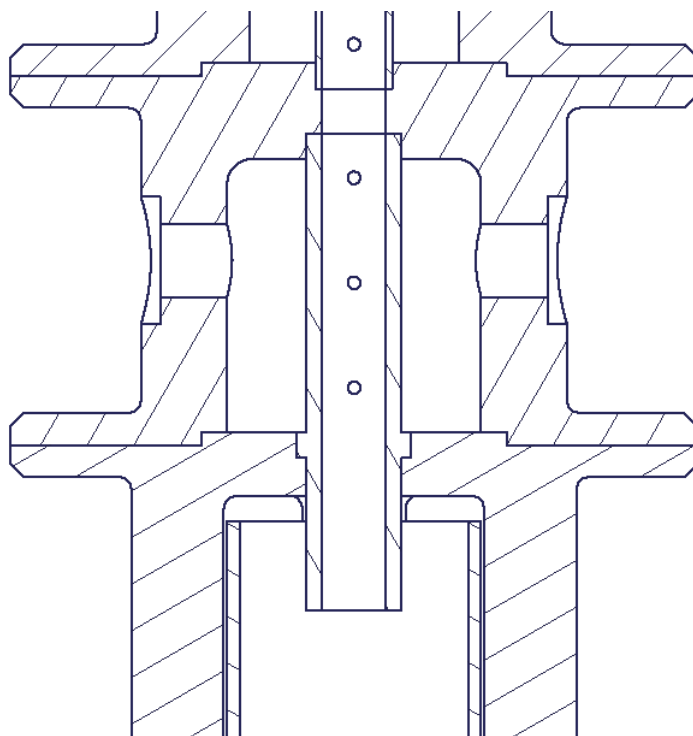
Kuva 14. Yksinkertaistettu yläkammion läpileikkaus, missä kaasuntasaja näkyvissä kammion keskellä.

Kaasuntasaja on yksinkertaisesti putki, johon on porattu reikiä, tasaisin välein. Reikien pinta-ala on mietitty siten, että typpi ei virtaisi suoraan alempaan kammioon (liite 3). Tyyppiä tuodaan putkistoista kammioon hitaalla syötöllä, minkä jälkeen se rauhallisesti siirtyy kaasuntasajan sisäpuolelle, tilaan, jossa valokuitu liikkuu. Tällä varmistetaan, että valokuituun ei synny mahdollista huojuntaa, jolloin se saattaisi osua kammion seinämiin.

Kammio valmistetaan yhdestä alumiinisylinteristä sorvaamalla. Kammion muoto on sellainen, että se pystytään sorvaamaan yhdellä kiinnityksellä, mikä helpottaa valmistuksessa haluttavien toleranssien saavuttamisessa. Tämä on tärkeää pinnoituslaitteiston linjauksen sekä kammion lopullisen valmistushinnan kannalta. Kaasuliitännät sekä iirislaippojen kiinnitykset pystytään valmistamaan joko moniakselisessa sorvissa tai sitten viemällä kappale jyrsimeen. Tämä valmistusmenetelmä pätee myös muihin pinnoituslaitteiston kammioihin.

## 8.2 Reaktiokammio

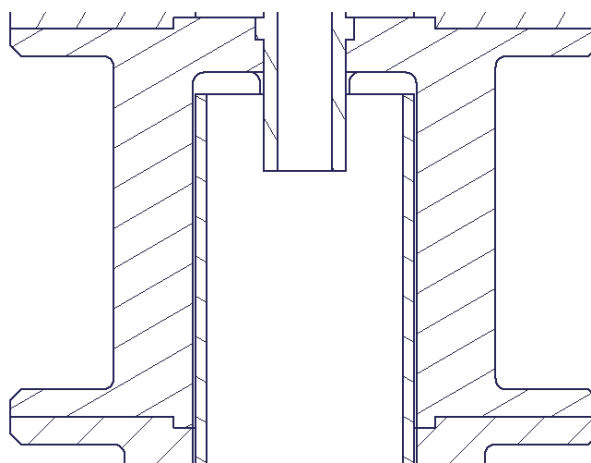
Reaktiokammiossa tapahtuu valokuidun hermeettiseen pinnoittamiseen tarvittava pyrolyysi, eli kuivatusreaktio. Kammioon tuodaan hiilivetykaasua "vastakkaisilta" seinä-miltä tasaisemman pinnoitteen aikaansaamiseksi. Samalla tavoin kuin suojakammiossa on reaktiokammioon tuotu valokuidun huojuntaa estämään kaasuntasausputki. Huojun-nan poiston lisäksi tasaisempi kaasuntuominen tuottaa tasaisempaa pinnoitetta, ainakin teoriassa. Kaasuntasajaputkella on reaktiokammiossa lisänä vielä reaktiossa syntyvän sivutuotteen kerääminen. Tämä toteutetaan putken jatkumisella aina toiseen kammioon saakka, joka toivottavasti vähentää sivutuotteen joutumista vastaanottokammioon (kuva 15). (Meabon ym. 1996.)



Kuva 15. Reaktiokammion halkileikkauskuva. Kaasuntasaja putki näkyvissä kuvan keskellä.

### 8.3 Vastaanottokammio

Valokuidun vetonopeus on hitaimmillaankin verrattain nopeaa. Tämän vuoksi osa pyrolyysireaktiosta tapahtuu vastaanottokammion puolella. Tämä tarkoittaa, että iso osa reaktiossa syntyvästä sivutuotteesta kertyy vastaanottokammion seinämille. Kovettuaan reaktion sivutuote muuttuu kovaksi ja hyvin vaikeasti irrotettavaksi. Tämän vuoksi kammion sisäpuolelle suunniteltiin lasiputki keräämään sivutuotetta, mutta myös tuomaan lämpöeristystä kammioon (kuva 16).



Kuva 16. Vastaanottokammion halkileikkauskuva. Lasiputki näkyy lähellä kammion sisäseinää.

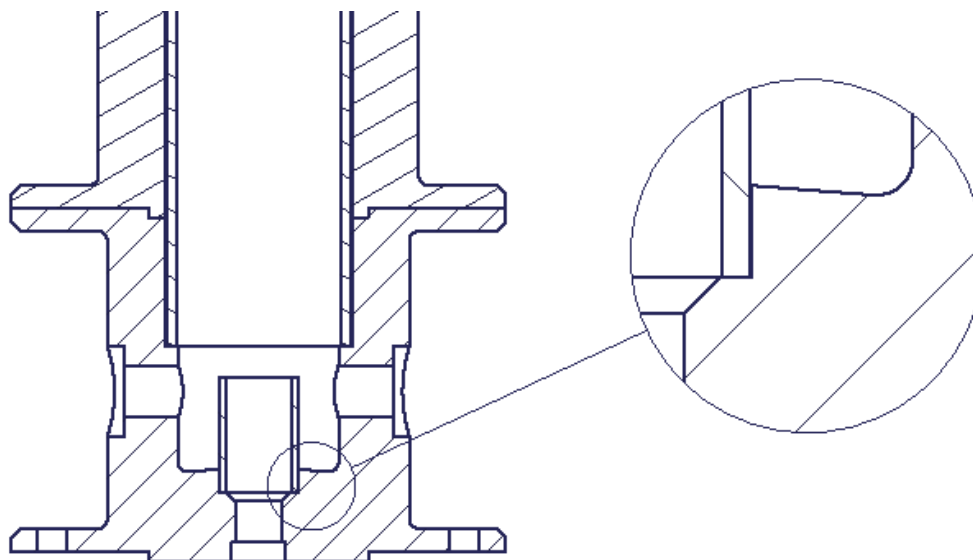
Lasin lämpölaajeneminen on pienempi kuin alumiinilla, joten rikkoutuminen lämpölaajenemisen vuoksi ei olisi mahdollista. Lasiputken koko suunniteltiin niin, että jos se sattuisi rikkoutumaan, olisi se helposti korvattavissa sahaamalla uusi pala standardikokoisesta putkesta. Putkea voitaisiin näin tilata valmiiksi tehtaalle, jolloin välttyttäisiin pitkiltä toimitusajoilta. Sivuinetta kertyy kuitenkin sen verran nopeasti, että sitä pitää poistaa aina vähintään 300 - 600 km vedon jälkeen. Puhdistus tapahtuu mekaanisesti esim. muovikuulapuhaltamalla osien sisäpinnat puhtaaksi. (Meabon ym. 1996.)

Vastaanottokammio on myös suunniteltu ns. vaihdettavaksi osaksi pinnoituslaitteistossa. Jos pinnoituslaitteiston kokonaiskorkeutta haluttaisiin joskus muuttaa, olisi vastaanottokammio muotonsa ja sijaintinsa vuoksi järkevin muutettava. Vastaanottokammiossa sijaitsee myös paineen sekä lämpötilanmittaus.



#### 8.4 Imukammio

Pinnoituslaitteeseen tuodaan jatkuvasti kaasuja, joista yksi on räjähdysherkkä. Kaasujen virtaussuuntaus on kohti imukammiota, jossa sijaitsee kaksi erillistä imukanavaa. Imu ei ole kovinkaan suurta, koska kaasujen ei haluta virtaavan suurilla nopeuksilla kammioiden sisällä. Myös reaktiokaasujen syöttö on hidasta, milloin suurta imuvirtausta ei tarvita. Imukanava on sijoitettu kammion alalaitaan, mikä tarkoittaa, että iso osa reaktion sivutuotteesta kertyy myös kammion pohjalle. Tästä voi syntyä ongelma materiaalin kertyessä suuriin kasoihin lähelle valokuidun ulosmenoaukkoa. Tämän vuoksi kammion pohja on hiukan kalteva, jotta materiaalia kertyisi mahdollisimman paljon kammion ulko-reunoille (Meabon ym. 1996). Kammion pohjalle on myös tuotu putki suojaamaan valokuitua imun suoralta vedolta heilumisen estämiseksi (kuva 17).



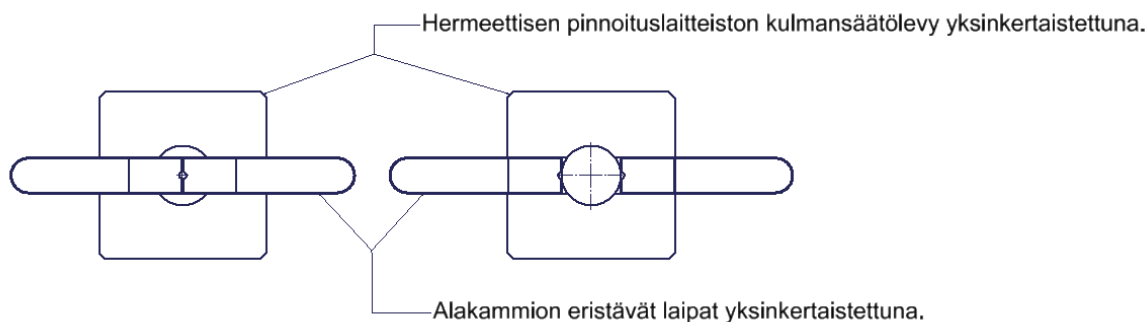
Kuva 17. Imukammion halkileikkauskuva. Imuntasausputki näkyy kuvassa keskellä alhaalla.

Kammion pohjan kaltevuus myös vähentää putken jumiutumista kammioon kiinni. Kuvassa 17 nähdään, että lasiputki jatkuu myös imukammion puolelle, maksimoiden eristystä laitteiston sisällä.

## 8.5 Alempi suojakammio

Samoin tavoin kuin ylempi suojakammio, toimii alempi suojakammio eristyksenä pinnoituslaitteistossa. Toisin kuin ylemmässä kammiossa ei alemman kammion tarvitse poistaa valokuidun päältä ulkoista kaasukerrosta. Tämän vuoksi kaasunsyötön ei välttämättä tarvitse olla aivan yhtä nopeaa. Tätä on kuitenkin vaikea tietää varmasti ilman laitteiston testausta tuotannossa. Suurin eroavaisuus on kuitenkin se, että alempi suojakammio kannattelee koko muuta pinnoituslaitteiston rakennetta. Pinnoituslaitteisto kiinnitetään vetotorniin alhaalta, sillä se on kaikista kauimpina lämmönlähteestä (vetouunista). Näin lämmöstä aiheutuva linjauksen muutos, eli kammioiden lämpölaajeneminen saadaan minimoitua.

Vaikka ylempi ja alempisuojakammio ovat rakenteeltaan lähes identtiset, ei kammioiden eristystä ilmakehästä pystytty toteuttamaan täysin samalla menetelmällä. Alemman suojakammion eristykseen kehitettiin ratkaisu, jossa pinnoituslaitteiston kulmansäätölevyyn on tehty kaksi uraa, jossa kaksi levyä pääsee liikkumaan. Levyjen päissä on pienet reiät, jotka eristävät alakammion paremmin ulkona vallitsevalta ilmakehältä (kuva 18).



Kuva 18. Yksinkertaistettu havaintokuva alakammion iirislevyjen toiminnasta. Vasemmalla kammiotila suljettuna ja oikealla avoinna.

## 8.6 Pinnoituslaitteiston kiinnitys, tiivistys ja eristys

Pinnoituslaitteiston kammiot liitetään toisiinsa kiinni 4 kuusiopultilla per kammion laippa. Kiinnitystavaksi katsottiin parhaiten sopivan kuusiopultti, sillä esimerkiksi kuusiokolopulttia ei olisi kyennyt kiristämään kuusiokoloavaimella kammioiden korkeuden vuoksi. Vaikka kammioihin syötetään pinnoituksessa jatkuvalla syötöllä kaasuja ei paine pinnoituslaitteistossa kasva kovinkaan suureksi. Kammiossa vallitseva paine on vain sen verran suuri, että ulkopuolella vallitseva paine ei pääse työntymään kammioon sisälle. Tämän vuoksi neljä pulttia riittää pitämään kammiot hyvinkin helposti tiiviinä. Kammiossa vallitseva paine on myös syy miksi kammioiden laippojen välillä ei ole minkäänlaista tiivistystä. Vaikka suunnittelun alkupuolella o-renkaita harkittiin, kaatui ajatus nopeasti kammioissa vallitseviin lämpötiloihin. Edes kovimpiin lämpötiloihin soveltuvat Viton tiivisteet eivät olisi soveltuneet lämmönkeston kannalta kammioihin. Jos kuitenkin testeissä tulee ilmi, että kammiot vuotavat laipoista, voidaan niissä käyttää grafiittitiivisteitä. Nämä ovat kuitenkin kalliita, hauraita tiivisteitä, joita ei toivottavasti tarvitse käyttää.

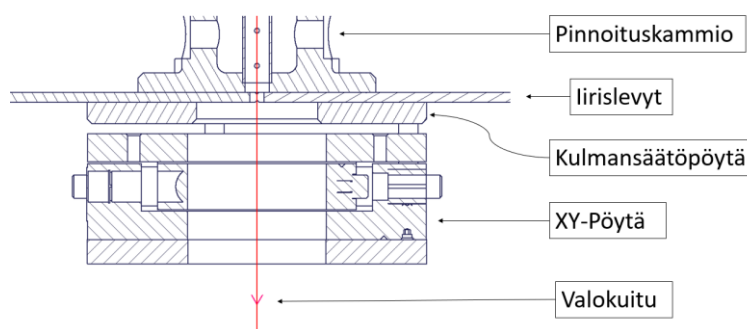
Jos laitteiston testauksessa tulee ilmi, että valokuidun tuoma lämpötila ei riitä pyrolyysi-reaktion syntyyn, voidaan kammioiden ympärille tuoda eristävää villaa tai vastaavaa eristävää materiaalia. Koska kammiot ovat pieniä, eristeinä voitaisiin käyttää myös putkille tarkoitettuja eristeitä. Näiden lämpökestävyys on jopa 1000 °C, jolloin ne kestäisivät uunista tulevan lämpökuorman (Stenca).

## 9 Tornikiinnityksen mekaniikkasuunnittelu

Pinnoituslaitteisto sellaisenaan on turha, ellei sitä saada järkevästi kiinnitettyä vetotorniin, missä itse valokuidun valmistus tapahtuu. Kiinnityksessä tulee ottaa huomioon, että valokuidun vetopaikka tornissa on hyvin määritelty. Tätä voidaan siis käyttää lähtöpisteenä kiinnityksen suunnittelussa. Toisena pisteenä voidaan pitää vetotornissa sijaitsevaa ”lohenpyrstökiskoa”, joka sijaitsee jokaisen Nextrom vetotornin rakenteessa. Tämä on Nextromin valmistama kisko, josta suurin osa tornin laitteistossa on kiinnitettyinä. Näistä saatujen mittojen sekä asiakkaan tiloissa vallitsevien tilarajoitteiden mukaan kiinnitystä lähdettiin suunnittelemaan.

### 9.1 Pinnoituslaitteiston linjaus valokuitulinjaan

Valokuitulinja on se paikka vetotornissa, jossa valokuitu tulee kulkemaan vetovaiheessa. Tämä paikka on hyvin määritelty tornissa eikä sen paikka tule juurikaan muuttumaan, vaikka vedettävä nopeus tai valmistettava valokuitu muuttuisi. Tämän vuoksi se on piste, johon pinnoituslaitteiston sisällä olevan keskilinjän tulee osua hyvän pinnoituksen sekä valokuidun ehjänä pysymisen vuoksi. Linjausta varten pinnoituslaitteisto kiinnitetään XY-pöytään. XY-suuntaisen linjauksen lisäksi tarvitaan kulmansäätöpöytä, sillä kammion yläpää saattaa olla tasopinnan kanssa hyvinkin epäsuhteessa. Nämä kaksi linjaustyökalua niputetaan päällekkäin, jolloin pinnoituskammio saadaan linjattua tarkasti kuitulinjan keskelle (kuva 19).



Kuva 19. Havaintokuva XY- sekä kulmansäätöpöydän läpileikkauksesta.

Parhaassa tapauksessa pinnoituslaitteisto linjattaisiin kerran valokuitulinjaan, jolloin säästettäisiin paljon aikaa. Tämä on kuitenkin lähes mahdoton toteuttaa, sillä pinnoituslaitteistoa joudutaan puhdistamaan (ks. 6.3) sekä siirtämään pois valokuitulinjasta. Näin ollen laitteisto pitää linjata erikseen jokaisen vedon kohdalla.

Koska valokuitu liikkuu XY-pöydän lävitse (ks. kuva 19) syntyy yhdeksi ongelmaksi sivutuotteen kertyminen pöydän rakenteisiin ja ruuveihin. Jos tämä koituu ongelmaksi, voidaan laitteiston alarakenteelle lisätä lasiputki keräämään ylimääräistä sivuainetta. Ongelmaa on kuitenkin vaikea arvioida ilman laitteiston testausta pinnoitusvaiheessa.

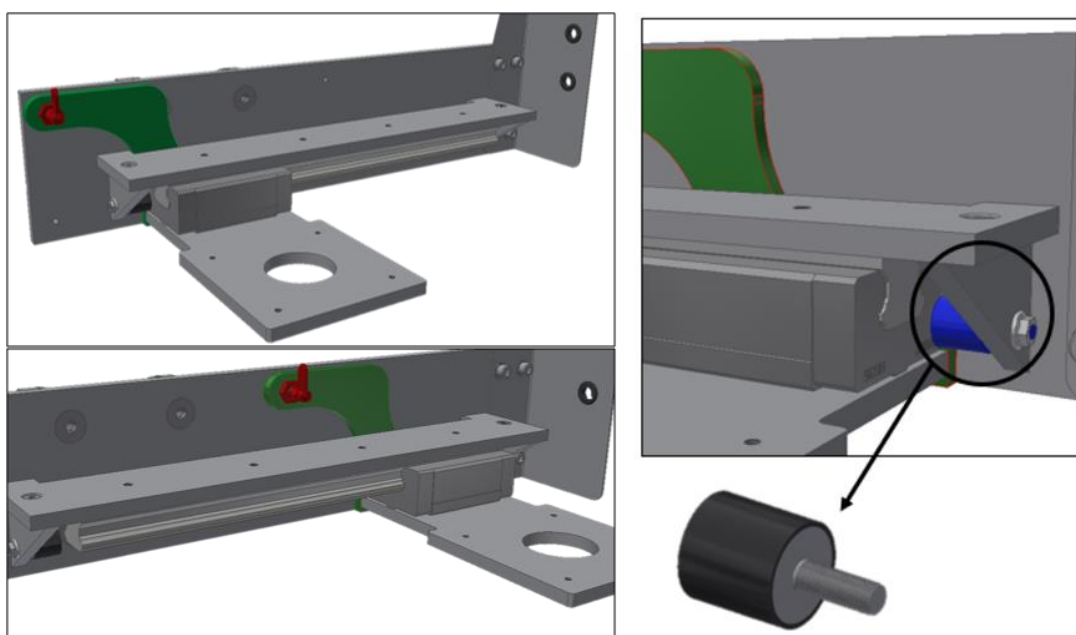
## 9.2 Pinnoituslaitteiston kiinnitys vetotorniin

Valokuidun valmistustehtaassa tuotantoerät vaihtelevat riippuen markkinoiden sekä asiakkaiden sen hetken tarpeesta. Tämä tarkoittaa, että valokuitua ei välttämättä haluta pinnoittaa hermeettisesti jokaisella tuotantoerällä. Tällöin pinnoituslaitteistoa ei voida kiinnittää vetotorniin kiinteästi vaan se pitää pystyä liikuttamaan pois vetolinjasta. Nextromin moderneissa vetotorneissa on johde, johon pystytään kiinnittämään esim. mittauslaitteita sekä muita valmistukseen tarvittavaa laitteistoa (ks. kuva 9). Johteeseen on sopiva johdekiinnite, jota pystytään helposti liikuttamaan johdetta pitkin. Tämä johdepala toimii pinnoituslaitteiston runkokiinnityksenä, josta muu runko kiinnittyy vetotorniin kiinni.

Kuten kappaleessa 7.1 mainittiin, oli tila asiakkaan vetotornissa rajoitettu. Suurin haaste tilan kannalta oli korkeudessa, minkä vuoksi kiinnityksiä jouduttiin harkitsemaan tarkkaan. Tiimissä mukana olleen vetotornin käyttäjän kanssa tultiin lopputulokseen, jossa kiinnityksestä sekä liikuttamisesta tehtäisiin mahdollisimman yksinkertainen käyttää. Tämä tarkoitti, että pneumaattisia tai sähköisiä toimilaitteita ei tuotaisi rakenteelle, vaan kaikki liike tehtäisiin käsin. Yksinkertainen rakenne auttaa myös pitämään laitteiston kokonaishinnan alhaisempana. Pinnoituslaitteiston siirtämisessä päädyttiin käyttämään yksinkertaista lineaarikiskoä sekä siihen sopivaa kelkkaa. Linearikisko kiinnitetään alaspäin rakenteeseen tilansäästöä vuoksi. Rakenne on kuitenkin suunniteltu niin, että haluttaessaan asiakas voisi syystä tai toisesta vaihtaa lineaarikiskon toiselle puolelle. Kaikki osat pultattaisiin toisiinsa, jolloin osien vaihtamisen olisi helpompaa. Koska koko rakenne on valmistettu alumiinista, haluttiin senkin vuoksi hitsausliitoksia välttää.

Hitsauksessa syntyy myös helposti sisäisiä jännityksiä, joka saattaa aiheuttaa linjauksen kannalta epätoivottuja vääntymiä rakenteeseen.

Pinnoituslaitteiston lukittuminen valokuitulinjaan ja pois toteutettiin indeksinupin avulla (kuva 20). Indeksinuppi on yksinkertainen käyttää sekä antaa kohtuullisen hyvän lukituksen kelkalle. Nupin ja lukitusreiän välille saattaa kuitenkin jäädä pieni välys, mikä pahimmillaan vaikuttaa hiilipinnoitteen lopputulokseen. Tähän ongelmaan ratkaisuksi keksittiin lisätä kumiset stopparit lineaarikelkan kummallekin puolelle. Kelkan pysäyttämisen lisäksi auttavat stopparit myös pinnoituslaitteiston linjauksessa. Kumisen rakenteensa vuoksi stopparit joustavat hiukan, jolloin säädettynä oikealle etäisyydelle, voidaan lineaarikelkka painaa kumia vasten niin, että indeksinupin ja lukitusreiän välinen välys saadaan poistettua. Vaikka lämpötilat pinnoituslaitteen lähiympäristössä ovat korkeita, on kuminen stoppari suojassa uunin suoralta lämmöltä alumiinisen levyn alla.



Kuva 20. Vasemmalla pinnoituslaitteiston kiinnityksen lukitus valokuitulinjaan ja pois linjasta. Indeksinuppi kuvattuna punaisella sekä indeksinupinkiinnityslevy vihreällä. Oikealla kuvattuna kelkan pysäytykseen käytettävä kumistoppari.

### 9.3 Kaasujensyöttö

Pinnoituslaitteiston kiinnitys vetotorneihin on suunniteltu siten, että tarvittaessa se voidaan kiinnittää erilaisiin vetotornirakenteisiin. Tämän vuoksi pinnoituslaitteisto voidaan myydä asiakkaalle omana tuotteenaan tai sitten vetolaitteistoprojektin mukana. Tämä aiheuttaa tilanteen, jossa kaasupaneelia ei kiinnitettäisikään perinteiseen kaasukaappiin sisälle. Kaasupaneelit suunniteltiin niin, että tarvittaessa paneeli voitaisiin kiinnittää suoraan tornirakenteisiin tai tornin lähetyvillä oleviin rakenteisiin.

Pinnoituslaitteistoon syötettävien kaasujen virtausta halutaan mitata ja säätää hyvin tarkkaan pinnoituksen onnistumisen vuoksi. Virtausta säätelevässä kaasupaneelissa käytettiin tämän vuoksi tarkkoja virtausmittareita. Kaasujen syöttömäärää ei voitu kuitenkaan tarkasti määrittää ennen testejä. Siksi paneelissa käytettiin virtauksen säätölaitteita, joissa säätöalue on hyvin laaja.

Kaasupaneelilta lähtevä putkisto oli suunnittelun kannalta yksinkertainen toteutus. Putkistoa ei kuitenkaan voitu toteuttaa täysin muoviputkesta pinnoituslaitteiston lähiympäristössä vallitsevien lämpötilojen vuoksi. Tämän vuoksi pinnoituslaitteistoon kiinnittyvien putkistojen täytyi olla teräksisiä. Vaikka pinnoituslaitteiston lähiympäristön tila oli rajoitettu, päätettiin putkisto tehdä taivutetusta putkesta hitsatun sijaan. Orbitaalihitsatulla putkistolla olisi saatu tarvittua tilaa laitteiston käyttäjälle, mutta hinta olisi kasvanut hyötyihin nähden turhan suureksi. Pinnoituslaitteiston käytön perusteella saadun palautteen avulla voidaan orbitaalihitsattua rakennetta kuitenkin harkita uudestaan.

## 10 Yhteenveto

Insinööriyössä suunniteltiin valokuidun hermeettiseen hiilipinnoitukseen kykenevä laitteisto. Jotta laitteiston suunnittelu pystyttiin toteuttamaan, vaati työ myös paljon perehtymistä valokuidun pinnoittamiseen sekä itse valokuidun ominaisuuksiin. Vaikka insinööriyön pääpaino olikin suunnittelussa, käytettiin melkein puolet käytetystä ajasta tieteellisten tutkimusten ja kirjallisuuden lukemiseen. Työ soveltui kuitenkin erinomaisesti tulevalle koneensuunnittelijalle.

Pinnoituslaitteistoa suunniteltiin yhdessä valokuitua valmistavan yhteistyökumppanin kanssa. Laitteiston mitoitus sekä kiinnitykset perustuvat paljolti heidän tiloissaan vallitseviin mittarajoituksiin. Projektin loppuvaiheilla kuitenkin todettiin, että heidän vetotornisansa käytetyn uunin rakenne oli sellainen, että lämpötila ei olisi tarpeeksi korkea onnistuneen hiilipinnoitteen valmistukseen. Vaikka pinnoituslaitteiston toimivuutta ei päästy testaamaan tuotannossa oli projekti suunnittelun kannalta onnistunut. Insinööriyön aloituspalaverissa oli kuitenkin määritetty työn olevan konseptointi pinnoituslaitteistolle, joten siinä ainakin voidaan sanoa työn onnistuneen.

Laitteiston testaus ja jatkokehittäminen on hyvin kallista vetotornissa käytettävien valmistusmenetelmien vuoksi. Kuitenkin jos laitteistoa haluttaisiin myydä suoraan asiakkaalle, jouduttaisiin sitä jatkokehittämään tuotannosta saatujen tulosten avulla. Laitteistosta saatavan pinnoitteen tutkiminen vaatisi haasteellisuutensa vuoksi oman opinnäytetyönsä. Tämä soveltuisikin esimerkiksi bio- ja kemiantekniikan opiskelijalle hyväksi insinööriyön aiheeksi.

Koska laitteistoa ei päästy testaamaan tuotannossa voidaan sanoa, että opinnäytetyössä esitetty laitteisto on ensimmäinen versio monien joukossa. Vaikka laitteiston toimivuudesta ole täyttä varmuutta, voin kohtuullisen varmuudella sanoa, että kyseisellä laitteistolla saadaan aikaiseksi vaadittu pyrolyysireaktio. Hiilipinnoitteen paksuus ja laatu olisivat kuitenkin varmuudella sellaisia, että niitä ei voitaisi käyttää suoraan ilman muutoksia oikeissa sovellutuksissa. Aiheeseen perehtyneenä sekä Nextromilla prosessia nähneen työntekijän kommenttien perusteella pinnoituslaitteisto kuitenkin tuottaisi pinnoitetta. Toivottavasti se siis nähdään asiakkaiden vetotorneissa tulevaisuudessa.



## Lähteet

About Rosendahl Nextrom. 2020. Verkkodokumentti.

<<http://www.rosendahlnextrom.com/about-rosendahl-nextrom/#inbrief>>. Luettu 16.1.2020.

Biswas, et.al. 1995. Hermetic coatings for optical fibers. IWCS.

Day, Gordon W.; Franzen, Douglas. 1992. Technical Digest. Symposium on Optical Fiber Measurements. U.S Washington: U.S Government Printing Office. Saatavilla myös sähköisesti osoitteessa: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication839.pdf>>. Luettu 15.11.2019.

Dimarcello. 1990. High speed manufacturing process for hermetic carbon coated optical fibers. Verkkodokumentti. <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-1990-THH5>>. Luettu 5.3.2020.

Fiber Coatings, Buffering and Cabling Materials. OFS Optics. Verkkodokumentti. <<https://www.ofsoptics.com/optical-fiber-coatings/>>. Luettu 9.10.2020.

Hanson, Eric; Hiskes, Ronald & Schantz, Christopher 1982. Optical fiber with hermetic seal and method for making same. United States Patent 4512629. Saatavilla myös sähköisesti osoitteessa <<http://www.freepatentsonline.com/4512629.html>>. Luettu 31.1.2020.

Hecht, Jeff. 2002. Understanding Fiber Optics – International Edition. 4 painos.

Key, Mike. 2016. Using UV LEDs to Cure Fiber Optic Cables. Tech Briefs. Verkkodokumentti. <<https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/supplements/pit/features/applications/24688>>. Luettu 10.1.2020.

Kumar, Pradeep; Srivastava, Richa & Chaurasiya, Navin. 2018. Optical Fiber Sensor: Review and Applications. Verkkodokumentti. <[https://www.researchgate.net/publication/325386764\\_Optical\\_Fiber\\_Sensor\\_Review\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/325386764_Optical_Fiber_Sensor_Review_and_Applications)>. Luettu 10.1.2020.

Lemaire, J. & Lindholm, A. 2007. Specialty Optical Fibers Handbook. Chapter 14 Hermetic Optical Fibers: Carbon-Coated Fibers. London: Elsevier Inc. Saatavilla myös sähköisesti osoitteessa: <<https://ebookcentral.proquest.com/lib/metropolia-ebooks/reader.action?docID=291713>>. Luettu 3.7.2019.

Lindholm, Erik. & Li, Jie. 2008. Hermetic carbon-coated optical fibers: methods and applications. Nextrom Oy sisäinen dokumentti.

Lu, K. 1988. Recent development in hermetically coated optical fiber. J. Lightwave Technol. Verkkodokumentti. <<https://dokumen.tips/documents/recent-developments-in-hermetically-coated-optical-fiber.html>>

Marsh, Harry. & Rodriguez-Reinoso, F. 2006. Activated Carbon. Elsevier Science & Technology Books.

Meabon, Joseph; Tuzzolo, Michelle & Urruti, Erik. 1996. Method for applying a carbon coating to optical fibers. United States Patent US005792234A. Verkkodokumentti. <<http://patft.uspto.gov/netacgi/npPar?d=PALL&p=1&u=%2Fnethtml%2FPTO%2Fsrcnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=5792234.PN.&OS=PN/5792234&RS=PN/5792234>>. Luettu 10.5.2019.

Mendez, A. et al. 1999. Applications of optical fiber sensors in subsea and downhole oil well environments. Verkkodokumentti. <[https://www.researchgate.net/publication/252614310\\_Applications\\_of\\_optical\\_fiber\\_sensors\\_in\\_subsea\\_and\\_downhole\\_oil\\_well\\_environments](https://www.researchgate.net/publication/252614310_Applications_of_optical_fiber_sensors_in_subsea_and_downhole_oil_well_environments)>. Luettu 23.1.2020.

Nextrom Fiber Draw Factory. 2018. Verkkodokumentti. <<https://www.youtube.com/watch?v=eADnKQEtUn0>>. Katsottu 3.10.2019.

Normann, R.; Weiss, J. & Krumhans, J. 2001. Development of Fibers Optic Cables for Permanent Geothermal Wellbore Deployment. Stanford University, Stanford, California.

Oh, Kyunghwan; Paek, Un; Chul & John Wiley. 2012. Silica Optical Fiber Technology for Devices and Components: Design, Fabrication, and International Standards. Saatavilla myös sähköisesti osoitteessa <<https://learning.oreilly.com/library/view/silica-optical-fiber/9780471455585/Chapter01.html>>. Luettu 1.7.2019.

Palmer, R. 2008. A technical cross-section through a submarine cable. Verkkodokumentti. <<http://www.richardpalmergraphics.com/technical-infographics/info-graphics4.html>>. Luettu 18.1.2020.

Rosendahl & Nextrom become ONE. 2014. Elsta Mosdorfer. Verkkodokumentti. <<http://www.at.elsta.com/int/?menueid=1610&lng=en&contentid=3087&back=1>>. Luettu 16.1.2020.

Michalske, A. Terry & Freiman W. Stephen. 1983. A Molecular Mechanism for Stress Corrosion in Vitreous Silica. Verkkodokumentti <<https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1983.tb15715.x>>. Luettu 2.7.2019.

Starosielski, Nicole. 2015. The undersea network. Durham and London: Duke University Press. Saatavilla myös sähköisesti osoitteessa: <[https://blogs.commons.georgetown.edu/engl-711-fall2017/files/2017/08/The-Undersea-Network\\_Starosielski.pdf](https://blogs.commons.georgetown.edu/engl-711-fall2017/files/2017/08/The-Undersea-Network_Starosielski.pdf)>. Luettu 9.10.2019.

Stenca. Thermal insulation for high temperature pipes. Verkkodokumentti <[http://stenca.com/Stenca\\_HT\\_Pipe](http://stenca.com/Stenca_HT_Pipe)>. Luettu 14.6.2019.

Telegeography. Submarine Cable Frequently Asked Questions. Verkkodokumentti. <<https://www2.telegeography.com/submarine-cable-faqs-frequently-asked-questions>>. Luettu 9.10.2020.

Tutorial: Fiber Optic Basics. MKS Newport. Verkkodokumentti. <<https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>>. Luettu 8.1.2020.

Wiederhorn, S. 1972. A chemical interpretation of static fatigue. Verkkodokumentti. <<https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1151-2916.1972.tb11215.x>>. Luettu 16.2.2020.

Wysocki, J. & Lee, A. 1981. Mechanical properties of high-strength metal-coated fibers. Digest of IOOC, Paper MG4. Verkkodokumentti. <<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-1981-MG4>>. Luettu 26.1.2020



Valokuidun ominaisuustaulukot

FIBER TEMPERATURE BELOW NECKDOWN AT VARIED DRAW SPEEDS	
Outside temperature	$T_0$ 292.2 kelvin
Fiber temperature immediately after wire drawing	$T_1$ 2072.2 kelvin
Heat transfer coefficient	$h$ 1.37 W/(m <sup>2</sup> *K)
Fiber density	$\rho$ 2200 kg/m <sup>3</sup>
Specific heat of fiber ( $c_p$ )	$C$ 740 J/kg*K
Heat flux	$q$ 5576 W/m <sup>2</sup>
Thermal conductivity (K)	$k$ 2.68 W/(m*K)
NEEDED DISTANCE FROM MELT BOTTOM TO REACTOR	
Min Drawing speed	0.035 m/min
Max drawing speed	0.075 m/min
Average target ( $R \cdot v / L$ )	0.055 m/min
UNIT CONVERSIONS	
$\mu\text{m} \rightarrow \text{m}$	0.0001250 m
$\text{mm} \rightarrow \text{m}$	3.50 mm
$\text{mm} \rightarrow \text{m}$	0.568181818 m
$\text{m/min} \rightarrow \text{m/s}$	41.66666667 m/s
$^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{K}$	272.15 K
FORMULAS / CALCULATIONS	
Exponent Calculator (with given z value)	9.98E-01
Exponent Calculator (with calculated t value)	9.98E-01
Exponent Calculator (with calculated z value)	1.00E+00
Reactor distance calculator (L)	#LUKU1 mm
Fiber heat transfer coefficient (h)	#LUKU1 W/(m <sup>2</sup> *K)
Fiber travel time A to B (t)	0.0840 s
Newton's Law of Cooling	1713.338317 K
RESULTS	
Temperature of fiber at the measurement point	2067.47 K
Temperature of fiber at the measurement point	2067.47 K
Temperature of fiber at the measurement point	1795.3 °C
Fiber temperature (T)	1795.24 °C
Newton's Law of Cooling	1441.19 °C

$q = h(T_1 - T_0)$

Value check 1  
3.13258427

Value check 2  
4770.4

"The defining equation for thermal conductivity is  $q = -k \nabla T$  where  $q$  is the heat flux,  $k$  is the thermal conductivity, and  $\nabla T$  is the temperature gradient."

Thermal conductivity, $K$ , (cal/(s cm °C))	0.0064
Density, $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.2
Specific heat, $C_p$ (cal/(g °C))	0.25
Elastic modulus, $E$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$8.23 \times 10^6$
Linear expansion coefficient, $\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	$5.5 \times 10^{-6}$
Surface tension, $\sigma$ (dyn/cm) at 2000°C	350

### Kammioiden välisten paineiden laskentaväillehti

CALCULATOR FOR PRESSURE DIFFERENCES INSIDE CHAMBERS									
<p><b>Instructions:</b> Enter input data for your calculation into the green boxes. The spreadsheet will carry out the calculations in the yellow boxes.</p>									
PRESSURE DIFFRANCE INSIDE UPPER CHAMBER (N2)									
<u>Variables in Calculation</u>					<u>Calculated Pressure in Constriction</u>				
Flow Rate (f) =	<input type="text"/>	mm <sup>3</sup> /s			Pressure (P <sub>2</sub> ) =	<input type="text"/>	kPa		
Fluid Density (ρ) =	<input type="text"/>	g/m <sup>3</sup>			Pressure (P2) =	<input type="text"/>	Pa		
Inlet Tube Area (A <sub>1</sub> ) =	<input type="text"/>	mm <sup>2</sup>			Pressure (P2) =	<input type="text"/>	atmos		
Radius (r) =	<input type="text"/>	mm							
Effective Fluid Velocity (v <sub>1</sub> ) =	<input type="text"/>	mm/s							
Inlet Tube Area (A <sub>2</sub> ) =	<input type="text"/>	mm							
Radius (r) =	<input type="text"/>	mm							
PRESSURE DIFFRANCE INSIDE REACTION CHAMBER (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )									
<u>Variables in Calculation</u>					<u>Calculated Pressure in Constriction</u>				
Flow Rate (f) =	<input type="text"/>	mm <sup>3</sup> /s			Pressure (P <sub>2</sub> ) =	<input type="text"/>	kPa		
Fluid Density (ρ) =	<input type="text"/>	g/m <sup>3</sup>			Pressure (P2) =	<input type="text"/>	Pa		
Inlet Tube Area (A <sub>1</sub> ) =	<input type="text"/>	mm <sup>2</sup>			Pressure (P2) =	<input type="text"/>	atmos		
Radius (r) =	<input type="text"/>	mm							
Effective Fluid Velocity (v <sub>1</sub> ) =	<input type="text"/>	mm/s							
Inlet Tube Area (A <sub>2</sub> ) =	<input type="text"/>	mm							
Radius (r) =	<input type="text"/>	mm							