



**LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
*Lahti University of Applied Sciences*

# KÖLIRULLA RAKENTEEEN SUUNNITTELU MUOVIPUTKI RAKENTEISEEN VENETELAKKAAN

Case: Venos Oy

LAHDEN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Muovitekniikan koulutusohjelma  
Opinnäytetyö  
Kevät 2014  
Niko Nummela  
[niko.nummela@gmail.com](mailto:niko.nummela@gmail.com)  
Ohjaava opettaja: Reijo Heikkinen

Lahden ammattikorkeakoulu  
Muovitekniikka

NUMMELA, NIKO:

Kölrulla rakenteen suunnittelu  
muoviputkirakenteiseen venetelakkaan  
Case: Venos Oy

Muovitekniikan opinnäytetyö, 45 sivua, 6 liitesivua

Kevät 2014

TIIVISTELMÄ

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella Venos Oy:n valmistamaan muoviputkirakenteiseen venetelakkaan kölrullan tukirakenne. Tukirakenne tulisi suunnitella korkeatiheyspolyeteeniputken sisään.

Työn teoriaosassa käsitellään muoveja yleisesti sekä tarkemmin työssäni käytettyjä materiaaleja: polyeteeniä ja polyuretaania. Teoriaosuudessa käsitellään myös työhön liittyviä muovinvalmistusmenetelmiä ekstruusiota sekä reaktiovalua ja muovin jälkityöstömenetelmiä.

Opinnäytetyön käytännön osassa esitellään tuotesuunnittelua ja selvitetään kölrullatukirakenteen lähtökohdat sekä vaatimukset. Tuotesuunnittelussa on käytetty apuna Solidworks-ohjelmaa, jolla on mallinnettu tukirakenteen vaatimat osat. Mallinnetut osat on koottu kokoonpanokuviksi. Opinnäytetyössä on mallinnettu erilaisia vaihtoehtoja tukirakenteelle.

Opinnäytetyön testausosiossa on testattu muoviputkien sekä kölrullan kantavuutta. Kantavuustestit on tehty vetokoneella Lahden ammattikorkeakoulun muovilaboratoriossa. Lopuksi opinnäytetyöstä on tehty yhteenveto sekä esitellään mahdollisia kehitysideoita kölrulla rakenteelle.

Asiasanat: polyeteeniputki, kantavuus, ekstruusio, reaktiovalu, tuotesuunnittelu, 3D-mallintaminen



## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	MATERIAALIT	3
2.1	Polyeteeni (PE)	4
2.2	Polyeteeniputket	7
2.3	Polyuretaani (PUR)	8
3	VALMISTUSMENETELMÄT	12
3.1	Ekstruusio	12
3.1.1	Ekstruuderin rakenne ja toiminta	13
3.1.2	Ektruuderin ruuvi	15
3.2	Reaktiovalu	17
4	MUOVIN JÄLKITYÖSTÖMENETELMÄT	19
5	TUOTESUUNNITTELU	21
5.1	Lähtökohta	21
5.2	Vaatimukset	22
5.3	Venetelakka	22
5.4	Kölrulla	22
5.5	Kölrullan tukirakenne	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.5.1	Muovinen tukirakenne	24
5.5.2	Alumiininen tukirakenne	24
5.6	Prototyyppe	24
6	TESTAUS	25
6.1	PE-putkien kantavuus	25
6.2	Tulokset	25
6.3	Kölrulla rakenteen testaus	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
7	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	27
	LIITTEET	30

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella kölirullalle tukirakenne Venos Oy:n muoviputkirakenteiseen venetelakkaan. Tavoitteena oli lisäksi valmistaa prototyyppi tuotteesta Venos Oy:lle. Työssäni jätetään suunnittelusta pois kustannusten laskeminen. Tuotesuunnittelussa olen käyttänyt apuna Solidworks 2013 -ohjelmaa, jolla olen piirtänyt erilaisia kölirullatukirakenne kokoonpanoja.

Työhöni kuului myös muoviputkien kantavuuden testaus, testi tehtiin taivutuskoneella Lahden ammattikorkeakoulussa. Testit rajattiin seuraaviin neljään erilaiseen putki-yhdistelmään:

- halkasijaltaan 90 mm:n korkeatiheyspolyeteeninen (PE-HD) putki
- halkasijaltaan 110 mm:n PE-HD putki
- halkasijaltaan 90 mm:n PE-HD putki, jonka sisällä halkasijaltaan 75 mm:n PE-HD putki
- halkasijaltaan 90 mm:n PE-HD putki, jonka sisällä halkasijaltaan 75 mm:n alumiininen putki.

Venos Oy on vuonna 2009 perustettu venetelakoita ja niiden oheistuotteita valmistava pienyritys. Alkuaikoinaan yritys toimi venehissien ja erilaisten venenostimien maahantuoja ja myyjänä. Vuoden 2011 aikana Venos Oy alkoi suunnitella omaa venetelakkaa, jonka asiakasryhmänä ovat soutuveneiden ja pienten perämoottoriveneiden omistajat. Venos Oy:n ensimmäinen telakka tuli markkinoille kesällä 2013, kahden vuoden kehittelyn jälkeen. Tarkoituksena oli tarjota asiakkaalle venetelakka, joka vastaisi seuraavia kriteerejä:

- ei ruostuvia metalliosia
- ei lahoavia ja vettyviä puuosia
- toimintavarmuus
- kevyt käsitellä ja liikutella
- kestävä materiaali
- asennuksen helppous
- edullinen ratkaisu. (Kaasinen 2014.)

Tämän hetken markkinat kohdistuvat vain Suomen markkinoille, tulevaisuudessa olisi kuitenkin tarkoituksena laajentaa markkinoita muihinkin pohjoismaihin. (Kaasinen 2014.)



KUVIO 1. Venos Oy:n M-telakka (Venos Oy 2014)

Kuviossa 1. on esitetty Venos Oy:n valmistama M-telakka, joka on tarkoitettu maksimissaan 500 kg:n massalle. Telakka koostuu pitkittäisistä muoviputkista, jotka on yhdistetty poikittaisilla muoviputkilla, nämä putket ovat valmistettu korkeatiheyspolyeteenistä (PE-HD). Vene nostetaan telakalle sen päässä olevalla vinssillä.

## 2 MATERIAALIT

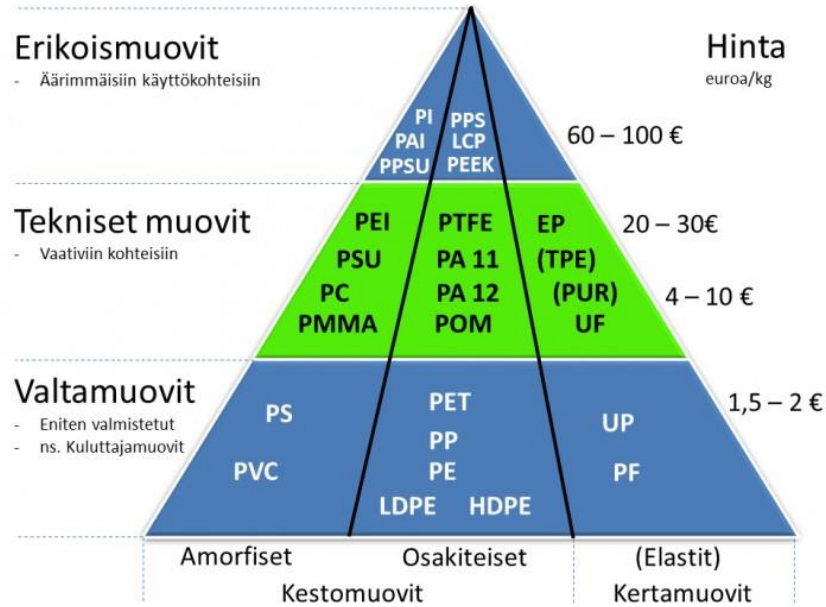
Muovien keksimistä johti 1800-luvulla alkanut kemian tutkiminen, jonka ansiosta ensimmäiset muovimateriaalit saatiin tehtyä kautsusta. Thomas Hancock ja Charles Goodyear patentoivat 1840-luvulla vulkanointimenetelmän, jolla kautsua saatiin työstettyä käytettävään muotoon vulkanoinnilla siitä saatiin kimmoisa ja miellyttävä tuote. Seuraava muovituote sai alkunsa 1860-luvulla, jolloin Aleksander Parkens valmisti selluloidia selluloosanitraatista ja kamferista. Selluloidista tehtiin erilaisia tuotteita, kuten nappeja, kampoja ja letkuja. Vuonna 1872 J.W. ja I.S. Hyat perustivat tehtaan, jossa valmistettiin selluloidista biljardipalloja. (Seppälä 2008, 19.)

Seuraava suurempi muoviteknologian läpimurto tapahtui 1920-luvulla, kun polyestereiden ja polyamidien läpimurto tapahtui, koska polykondensaatio teoria keksittiin. Polyeteeni keksittiin sattuman kautta vasta 1933 ICI:n laboratoriossa. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 2008, 14.)

Muovien jaottelutapoja on useita (kuvio 2.): niitä voidaan jaotella alkuperän, rakenteen, ominaisuuksien ja käyttötarkoituksen perusteella.

Muovausominaisuuksien mukaan muovit jaetaan kahteen pääryhmään: kestromuovit ja kertamuovit. Kestomuoveissa polymeeriketjut ovat pitkiä, ja niiden välillä ei ole kemiallisia sidoksia. Kestomuoveja voidaan lämmittää, jolloin molekyyliä yhdessä pitävät voimat heikkenevät, jolloin niitä voidaan muokata. Jäähtyessä voimat palautuvat, jolloin muovi vahvistuu. Kestomuovit ovat siis termoplastisia, koska niitä voidaan muovata uudelleen lämmön ja paineen avulla. (Seppälä 2008, 21–27.)

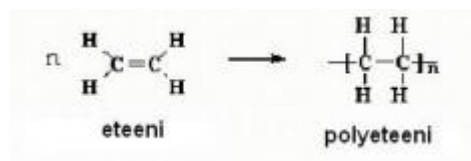
Kertamuovit muodostuvat perusraaka-aineen ja hartsin kovettumisreaktiossa, jolloin hartsin polymeeriketjut kytkeytyvät toisiinsa kemiallisin sidoksin, ja muodostavat verkkomaisen rakenteen. Muodostunutta verkottunutta rakennetta ei voida enään uudelleen muovata lämmön ja paineen avulla. (Seppälä 2008, 27.)



KUVIO 2. Muovien jakoa kuvaava pyramidimalli (Muoviteollisuus RY 2012)

## 2.1 Polyeteeni (PE)

Polyeteenit ovat yksi yleisimmistä, ellei jopa yleisin kestumuviryhmä (Seppälä 2008, 165). Polyeteeni on valittu materiaaliksi työssäni, koska sillä on hyvä iskulujuus, pieni veden absorptio, ja se on suhteellisen halpa raaka-aine. Polyeteeni syntyy polymeroitumisreaktiossa, jossa eteenimolekyylit liittyvät toisiinsa kaksoissidoksen kohdalta (kuvio 3.) (Seppälä 2008, 165).



KUVIO 3. Eteenin polymeraatio polyeteeniksi (Valuatlas 2012)

Polyeteenit on monipuolinen materiaalityyppi, jonka eri lajikkeiden ominaisuuksien kirjo on todella laaja. Eri lajikkeiden ominaisuudet riippuvat niiden molekyyliarakenteesta ja moolimassasta, ja niitä voidaan modifioida



monipuolisesti. Seuraavaan on koottu yhteenveto yleisimmistä polyeteeneistä ja niiden käyttökohteista:

- PE-LD, matalatiheuspolyeteeni, joustavat ruiskuvaluosat ja kalvomateriaali
- PE-LLD, lineaarinen matalatiheuspolyeteeni, samat käyttökohteet kuin edellä mainitulla, lisäksi käyttökohteita ovat ruiskuvaletut pakkaukset
- PE-HD, korkeatiheuspolyeteeni, erilaiset pakkaukset, muoviset astiat ja – laatikot
- PE-HMWHD, korkean moolimassan polyeteeni, tarkoitettu teknisiinkäyttökohteisiin, joissa vaaditaan korkeaa kulumiskestävyyttä ja alhaista kitkaa
- PEX, siloitettu polyeteeni, käytetään korotetun lämpötilan sovelluksiin, kuten putket ja solumuovit
- PE-UHMWHD, ultrakorkean moolimassan polyeteeni, kuten edellä mainittu, mutta käytetään vieläkin vaativampiin kohteisiin, jota käytetään myös kuituraaka-aineena. (Järvelä, Syrjälä & Vastela 2000, 17.)

Polyeteenillä on erittäin hyvä kemiallinen kestävyys. Hyvästä kemiallisesta kestävyydestä voi olla myös haittaa, koska polyeteeniä ei voida hyvin liimata, pinnoittaa tai maalata (Järvinen 2008, 37). Polyeteenillä on kuitenkin suhteellisen alhainen käyttölämpötila, mikä ei kuitenkaan muodostu ongelmaksi työssäni, koska suunniteltavan kappaleen käyttölämpötilat eivät ole korkeat. Polyeteenin mekaanisia ominaisuuksia on esitelty taulukossa 1.

Polyeteenillä, kuten muillakin kestopuoveilla, tapahtuu muodonmuutoksia jo huoneenlämmössä kuormituksen alaisena. Polyeteenin viruminen on alussa suurta, minkä jälkeen se tasaantuu, kuten taulukon 1 virumiskertoimista nähdään. Viruminen kasvaa, kunnes lopulta kappale murtuu. Muovien kyky palauttaa alkuperäinen muoto muodonmuutoksen jälkeen perustuu virumiseen. Kertamuoveilla muodonmuutokset ovat pieniä ennen murtumaa, yleensä 1 % luokkaa, mutta kestopuoveilla palautuminen voi tapahtua suurenkin muodonmuutoksen jälkeen. (Seppälä 2008, 74-75.)

TAULUKKO 1. PE-HD eli korkeatiheuspolyeteenin mekaanisia ominaisuuksia.  
(Valuatlas 2012)

Ominaisuus	Polyeteeni
Kovuus, Rockwell R	60 - 65
Kovuus, Shore D	55 – 69
Vetomurtolujuus (MPa)	10 – 50
Taivutuslujuus (MPa)	14 – 25
Puristuslujuus (MPa)	4 – 25
Lyhytaikainen virumiskerroin (1h) (MPa)	400-570
Pitkäaikainen virumiskerroin (1000h) (MPa)	270 - 400

Molekyylin pituus ja polyeteenin kiteisyys vaikuttavat sen kemiallisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Polyeteenin kiteisyyttä voidaan muuttaa lisäämällä siihen komonomeeria, joka estää säännöllisen kiderakenteen muodostumisen. (Seppälä 2008, 170.)

Polyeteenin käyttökohteita ovat esimerkiksi:

- putket ja profiilit
- ruiskuvalettavat tuotteet
- puhallusmuovaus tuotteet
- kalvot

Polyeteenin käyttökohteiden kirjo on siis todella laaja, koska sillä on monipuoliset työstömahdollisuudet ja polyeteenin ominaisuudet ovat monipuolisuudesta. (Järvinen 2008, 31 – 37.)

## 2.2 Polyeteeniputket

Polyeteeniputket ovat käytännöllisiä käyttökohteissa, joissa vaaditaan hyvää kemiallista kestoja ja korroosion kestoja. Polyeteeni kestää myös hyvin pituussuuntaista voimaa, ja se on joustava materiaali. (Muoviteollisuus Ry 2012, 4.)

PE-putkien ominaisuudet määräytyvät täysin siitä, mitä polyeteeni-raaka-ainetta on käytetty ja mitä lisä-aineita siihen on mahdollisesti lisätty. Polyeteeni raaka-aineita on eri laatuja, ja sitä on saatavilla myös eri tiheyksillä. Työssäni käytetty polyeteeni on PE-100; nimessä oleva liite 100 kertoo, että polyeteeni kestää vähintään 50 vuotta jatkuvaa 10 Mpa:n suuruista sisäisenpaineen kuormitusta +20 °C:n lämpötilassa. Polyeteeniputkien yleisimpiä käyttökohteita ovat erilaiset vesi- ja kaasuputket. (Muoviteollisuus Ry 2012, 5.)

Polyeteeniputkiin voi myös kohdistua hetkellisesti suurempi kuormitus lyhentämättä niiden elinikää. Työssäni käytetty PE-100:n hetkellinen kestävyys +20 °C lämpötilassa on noin 24 MPa. Putket voivat siis kestää jopa kaksinkertaisen kuormituksen hetkellisesti. Polyeteeniputkien kestävyys on riippuvainen lämpötilasta; pieni lämpötila parantaa kestävyyttä ja suuri lämpötila heikentää. Pienen lämpötilan parempaa kestävyyttä ei oteta huomioon suunnittelussa, vaan sen annetaan myötoivaikuttaa käyttövarmuuteen ja – ikään. (Muoviteollisuus Ry 2012, 5.)

Kaikki polyeteeniputket ovat, joko standardien SFS-EN 12201-2 tai SFS-EN 1555-2 mukaan valmistettu. Standardilla SFS-EN 12201-2 määritellään vesiputkia, ja SFS-EN 1555-2 standardilla kaasuputkia. Standardeissa määritellään seuraavat putken ominaisuudet:

- materiaalin tyyppi, esim PE-80 ja PE-100
- putken ulkohalkasija

- SDR-luokan (Standard diameter ratio), eli putken ulkohalkasijan ja seinämän paksuuden suhde. (Muoviteollisuus Ry 2012, 6.)

Liittessä 5 on esitelty standardin SFS-EN 12201-2 mukaisia vesiputkia. Ylärivistä näkee SDR-luokan ja oikealta pystyivistä ulkohalkasijan, nämä kaksi arvoa määräävät putken seinämän vähimmäispaksuuden. Nämä putket ovat valittavissa, joko PE-80 tai PE-100 -materiaalista. PE-100 -putki kestää hiukan enemmän painetta kuin PE-80 -putki.

Taulukossa 2 esitellään työssäni käytetyn PE-100 putken ominaisuuksia.

Materiaalin kimmokerroin eli kimmomoduuli kuvaa sen jäykkyyttä, jota voidaan laskea jännitys-venymä -käyrästä. Jännitys-venymä – käyrä saadaan vetokoneella, jonka vetonopeus on oltava suhteellisen pieni (noin 1mm/min).

Lämpölaajeneminen kuvaa kappaleen mittojen muutosta lämpötilan muuttuessa yhden asteen joko Celsius- tai Kelvin-asteikolla. Vetolujuus kertoo kappaleen kestäjän suurimman vetojännityksen.

TAULUKKO 2. PE-100 ja PE-80 putkien ominaisuuksia (Uponor Oy 2009)

Ominaisuudet	PE100	PE-80	Yksikkö
Tiheys	961	945	kg/m <sup>3</sup>
Kimmomoduuli	1100	750	MPa
Lämpölaajenemiskerroin	0.17	0.17	mm/m*°C
Vetolujuus	30	18	MPa

### 2.3 Polyuretaani (PUR)

Polyuretaanit muodostavat todella monikäyttöisen ryhmän, koska ne voivat olla kiinteitä, vaahdotettuja, joustavia tai jykkiä kappaleita. Polyuretaaneista voi valmistaa valettavia kappaleita, kalvoja, kuituja tai putkia. Yleisesti ottaen

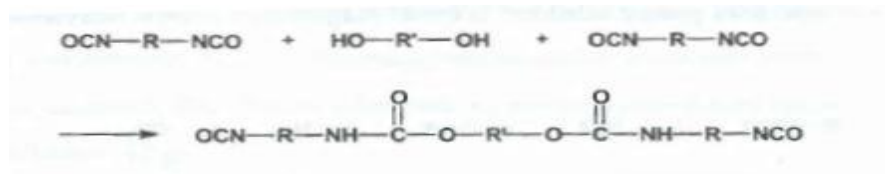
polyuretaani on kertamuovi, mutta ne voivat olla myös kestumuoveja, joita voidaan lämmön avulla muotoilla uudestaan (TPU, thermoplastic polyurethane). Polyuretaanit tulivat tunnetuksi kunnolla vasta 1937, kun Otto Bayer kehitti polyuretaaniset pelastusliivit. Bayer:n käyttämä valmistusmenetelmä on ollut pohjana nykyiselle polyuretaanivalmistukselle. (Kurri, ym. 2008, 166.)

Termoplastinen polyuretaani valmistetaan polymeroitumisreaktiolla, jossa isosyaniittiryhmä (-NCO) reagoi hydroksyyliyhdyksen kanssa (-OH) kanssa. Polymeroitumisreaktio on esitetty kuviossa 4. Käytetyt lähtöaineet sekä erilaiset lisäaineet määrittävät saadaanko polymeroinnilla elastomeerejä, kerta- tai kestumuoveja. Polyuretaani elastomeerien ja kertamuovien polymeroituminen tapahtuu jo huoneenlämmössä, ja lämpötilan nostaminen lyhentää polymeroitumisaikaa, jolloin maksimi lämpötila 70 °C. Lopputuotteeseen vaikutetaan lisäaineilla ja sillä mitä hydroksyyliyhdyksiä on käytetty. Hydroksyyliyhdykset voidaan jakaa seuraavasti:

- kaksi- tai useampiarvoiset alkoholit
- polyesterit, joiden ketjujen päissä on hydroksyyliyhdykset
- polyeetterit (esim. polypropeeniglykoli)
- rasvahappojen glyserolierit (esim. risiiniöljy). (Seppälä 2008, 155–157.)

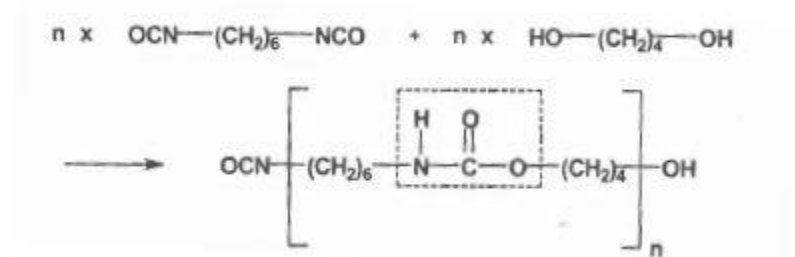
Näistä saatavat yhdisteet solvetuvat:

- solumuoveiksi
- liimoiksi
- puristemassaksi
- polyuretaanikumiksi. (Seppälä 2008, 155–157.)



KUVIO 4. Isosyaniittiyhdyksen ja hydroksyyliyhdyksiä sisältävän yhdyksen reaktio (Seppälä 2008, 157).

Valmistettaessa lineaarista polymeeriä eli kestumuovia käytetään di-isosyaniittia ja diolia eli kaksiarvoista alkoholia. Käytettäessä heksametyyleeni-di-isosyanaattia ja 1,4-butaanidiolia polymeeri syntyy seuraavalla tavalla (kuvio 5.):



KUVIO 5. Isosyaniitin ja diolin reaktio valmistettaessa lineaarista polyuretaania. (Seppälä 2008, 216.)

Polyuretaanin ominaisuudet määräytyvät käytetyn polyuretaani tyypin mukaan, joita on esitelty taulukossa 4. Yleisesti ottaen polyuretaanilla on hyvä kulutuskestävyys, repäisyjuuus, taivutuskestävyys ja vetolujuus, ja ennen kaikkea polyuretaaneilla on laaja kovuusvalikoima (kuvio 6.). Kovuudet vaihtelevat paljon käytettävän polyuretaanityypin mukaan. Sen kemiallinen kestävyys on hyvä, ja veden absorbtio on todella alhainen, vain 0.3 % - 1.0 % (Sunray Inc 2014). Polyuretaanin käyttölämpötila vaihtelee – 30 °C - +90 °C, tällä alueella polyuretaania voidaan käyttää pitkäaikaisesti, ja lämpötilat eivät vaikuta sen ominaisuuksiin (PU Nordic 2014).

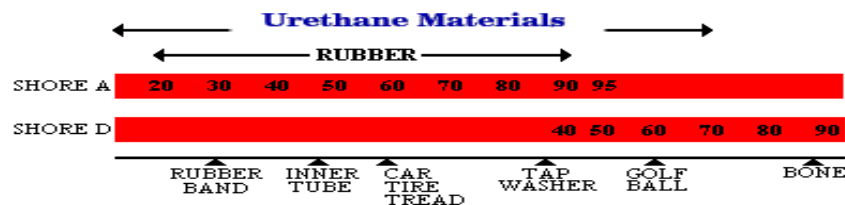
TAULUKKO 3. Polyuretaani tyyppien ominaisuuksia (Kurri, ym. 2008, 167)

Ominaisuus	PUR1	PUR2	PUR3	PUR4	PUR5	PUR6
Tiheys, g/cm <sup>3</sup>	0.05	0.12	0.45	0.95	1.12	1.70
Vetolujuus, MPa	0.27	0.42	3.9	14	21	240
Murtovenymä, %	5.2	170	290	300	70	<2

Taulukossa 3 olevat PUR-nimitykset tulevat eri polyuretaani tyypeistä:

- PUR1, kiinteä kevyt solupolyuretaani
- PUR2, integraalimuovin ydin
- PUR3, joustavan solu-RIM:n ydin
- PUR4, raskas integraalimuovi
- PUR5, lujitettu RIM eli RRIM (15-p % lasikuitua)
- PUR6, rakeenteellinen RIM eli SRIM (57-p % lasikuitua).

(Kurri, ym. 2008, 167).



KUVIO 6. Polyuretaanin kovuus skaala, verrattuna kumiin (Sunray, Inc 2014)

Työssäni on käytetty PUR6- tyyppiä, eli rakeentellisesti vahvistettua polyuretaania, joka on valmistettu SRIM-menetelmällä, josta kerron lisää luvussa 3.2.

### 3 VALMISTUSMENETELMÄT

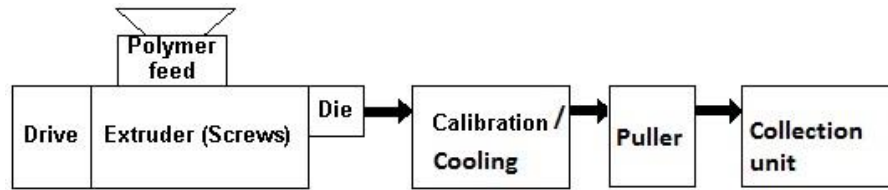
#### 3.1 Ekstruusio

Muoviputkien yleisin valmistusmenetelmä on ekstruusio eli suulakepuristus, jota myös käytetään työssäni olevien PE-100 -putkien valmistukseen. Ekstruusiossa termoplastinen muoviraaka-aine kuumennetaan pehmeäksi, homogenisoidaan ja puristetaan plastisointi yksikössä, joka koostuu sylinteristä ja sen sisällä olevasta ruuvista. Ruuvi puristaa sulan muoviraaka-aineen suuttimen läpi, mikä antaa sille halutun muodon. Ekstruusio on yksi yleisimmistä muovin työstömenetelmistä ja sillä valmistetaan noin 60 % kestopuoveista. Suulakepuristusta voidaan myös käyttää muiden jatkuvien tuotteiden valmistuksessa, kuten letkut, kuidut ja kalvot, ja sitä käytetään myös granulaattien valmistuksessa (Seppälä 2008, 261.)

Ekstruusioilla ei ole mahdollista työstää kaikkia muovimateriaaleja, koska valmistettavalla muovilla tulee olla riittävän suuri sulaluku, jotta se pystyy säilyttämään muotonsa jäähdyttämiseen saakka. Yleisimpiä ekstruusioilla työstettäviä muoveja ovat valtamuovit, kuten polyeteeni (PE), polypropeeni (PP), PET (polyeteenitereftalaatti) ja myös teknisiä- sekä erikoismuoveja. (Seppälä 2008, 262.)

Ekstruusio on osa suurempaa kokonaisuutta (kuvio 7.). Muoviputkea valmistettaessa ekstruderin jälkeen tulee kalibrointiyksikkö, jossa ekstruderista tullut putki kulkee kalibrointi työkalujen läpi, mitkä varmistavat putken ulkohalkaisijan ja sisähalkaisijan mittaarkkuuden. Samalla putkea jäähdytetään esimerkiksi vesialtaassa, jotta sen mittatarkkuus säilyisi. Linjastoon kuuluu myös vetolaitteisto, joka kerää putken esimerkiksi rullalle. (Kurri, ym. 2008, 115 – 117.)



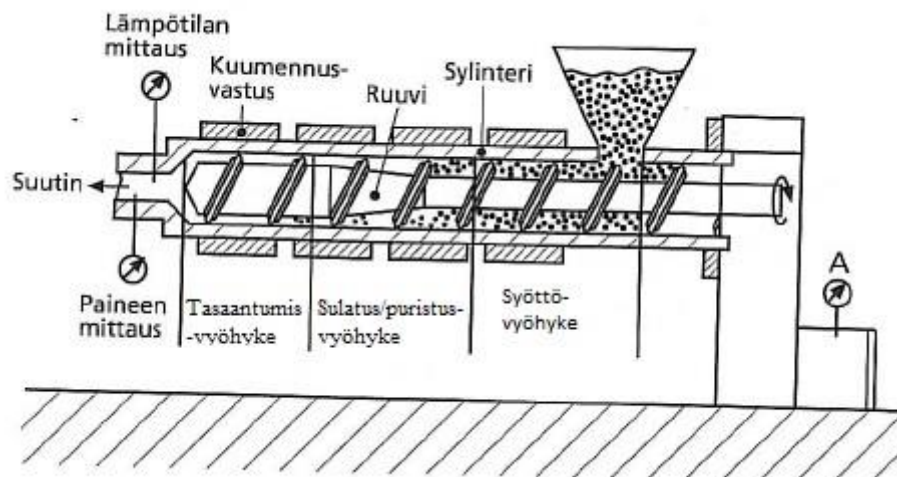


KUVIO 7. Ekstruusio linjasto putkenvalmistuksessa (Tangram Technology Ltd. 1998)

### 3.1.1 Ekstruuderin rakenne ja toiminta

Ekstruuderin koostuu seuraavasti osista (kuvio 8.):

- moottori
- voimansiirto eli vaihteisto
- syöttösuppilo
- sylinteri
- lämmittimet ja jäähdyttimet
- ruuvi
- suutin. (Seppälä 2008, 263.)

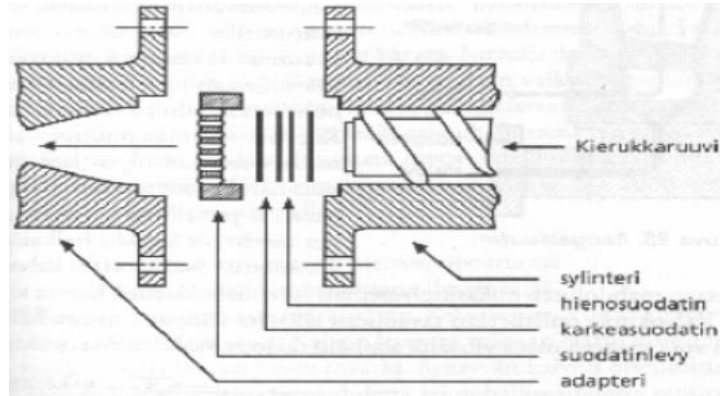


KUVIO 8. Ekstruuderin pääosat (Kurri, ym. 2008, 101)

Ekstruuderissa moottori tuottaa voimaa, jonka voimansiirto eli vaihteisto siirtää ruuvin pyörimisliikkeen tuottamiseksi. Ruuvin alkupäässä, lähimpänä moottoria, on syöttösuppilo, josta granulaatit syötetään sylinteriin, jossa ruuvi pyörii ja kuljettaa raaka-ainetta eteenpäin. Muovi materiaalia kuljettaa eteenpäin ruuvin pyörimisliike ja kitkavoimat, jotka muodostuvat materiaalin kosketuksesta ruuvin- sekä sylinterinpintaan. Raaka-aineen liikkua eteenpäin sylinterissä se sulaa sylinterissä olevien lämmitysvastusten ja kitkan ansiosta. (Rauwendaal 2001, 12-13.)

Kun lämpötila ylittää materiaalin sulamislämmön muovisulaa alkaa muodostua ruuvin ja sylinterin pinnalle. Sulan muovin tiheys on suurempi kuin granulaattien, minkä johdosta se pyrkii seinämiä vasten. Muovin sulaminen jatkuu raaka-aineen liikkua eteenpäin niin kauan, kun kaikki muovi on sulanut. Tämän jälkeen ekstruuderin viimeinen vaihe alkaa, eli sula muovi pumpataan sylinterin päässä olevaan suuttimeen. (Rauwendaal 2001, 13.)

Suuttimen alkupäässä on sihtipakka, jonka tarkoitus on seuloa muovimassasta pois mahdolliset roskat, jotka voisivat aiheuttaa ongelmia suuttimessa. (Kurri, ym. 2008, 102). Sihtipakka on valmistettu teräslankakankaista, jotka tuetaan tiukasti reikälevyä vasten, koska siihen kohdistuu erittäin suuri paine (Seppälä 2008, 266). Sihtipakan rakenne on esitetty kuviossa 9. Suuttimessa sulamuovi kulkee virtauskanavassa, jossa muovi saa halutun muodon. Materiaalinen poistuessa suuttimesta muodon tulee vastata suuttimen loppuosan poikkileikkausta. (Rauwendaal 2001, 13.) Suuttimen jälkeen vetokone vetää muoviprofiilia jäähditys- ja kalibrointiyksikköön, jossa jäähdytetään muovia ja ohjataan se erilaisten kalibrointityökalujen läpi. Muoviprofiilien jäähditys ja kalibrointi tapahtuu yleensä vesitankeissa. Muoviputkille tarvitsee lisäksi yli- tai alipainesäiliön, joka sijoittuu ensimmäisen kalibrointiyksikön yhteyteen. Sillä varmistetaan putken sisähalkasijan mittatarkkuus.

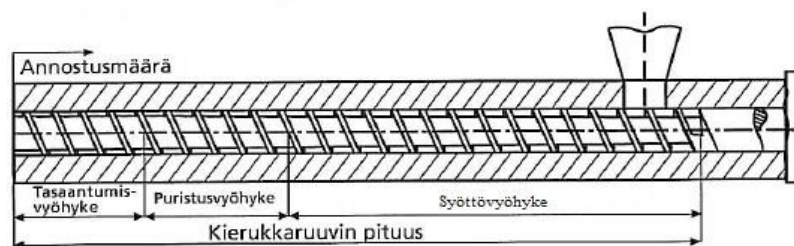


KUVIO 9. Sihtipakan osat (Kurri 2002, 101)

### 3.1.2 Ekstruuderin ruuvi

Ruuvi on tärkein ja kallein osa ekstruuderia, ja siinä on kolme eri vyöhykettä, jotka ovat syöttö-, sulatus/puristus- ja sekoitusvyöhyke (Seppälä 2008, 263). Ruuvin erivyöhykkeet on esitelty kuviossa 10. Ruuvin rakenne suunnitellaan näiden vyöhykkeiden mukaan, ja sen geometria voi vaihdella vyöhykkeiden välillä. Ruuvin tärkeimmät suureet ovat:

- pituus ja halkasija
- ruuvin kierresyvyys alussa ja lopussa
- eri vyöhykkeiden kierresyvyyksien pituudet
- kierreleveys, kierrenousu ja nousukulma. (Seppälä 2008, 263 – 264.)



KUVIO 10. Ruuvin eri toimintavyöhykkeet (Kurri, Malén, Sandell, Virtanen 2008, 77)



KUVIO 11. Erilaisia ekstruuderin ruuveja (Kurri, ym. 2008, 102)

Ruuvien tehtävät ovat muovin kuljetus, sulatus ja muovin materiaalin homogenointi ennen suutinta. Ruuvien L/D-suhde (pituuden suhde halkasijaan) kertoo ruuvien suorituskyvyn. Ruuvien geometrialla vaikutetaan:

- paineenkorotukseen
- viskoosivoimien aiheuttamiin ongelmiin
- materiaalin tarttuvuuteen sylinterin seinämiin
- kaasun poistoon. (Kurri, ym. 2008, 101.)

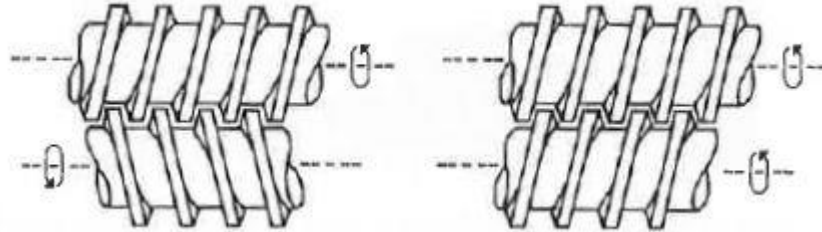
Ekstruuderit jaetaan ruuvien toimintaperiaatteen mukaan kolmeen eri tyyppiin: adiaapaattiset ekstruuderit, kartioekstruuderit ja pitkäruuviekstruuderit.

Pitkäruuviekstruuderit ovat näistä yleisin, siinä granulaatit sulatetaan kitkan ja lämmitysvastusten avulla, kitkan osuus lämmityksestä on noin 70%.

Pitkäruuviekstruuderin L/D-suhde on noin 20:1 – 35:1 ja ruuvien kierrosnopeudet vaihtelevat 20 – 250 r/min (kierrosta/minuutissa). Adiaapaattisessa ekstruuderissa granulaattien sulatus tapahtuu pelkästään kitkan avulla, joten lämmitysvastuksia ei tarvita. Lämpö tuotetaan siis kokonaan kitkan avulla, joka vaatii ruuville suuremmat kierrosnopeudet, jotka tässä vaihtelevatkin 100 – 1000 r/min.

Adiaapaattinen ruuvi on yleensä lyhyempi kuin muut ruuvit, ja sen L/D-suhde on 10:1 – 15:1. Kartioekstruuderit koostuvat kartiovaipparuuveista, granulaatit syötetään ruuvien molemmille pinnoille. Tätä menetelmää vielä kehitetään, mutta sitä hyödynnetään jo nyt monikerrosekstruusiossa. (Kurri 2008, 100.)

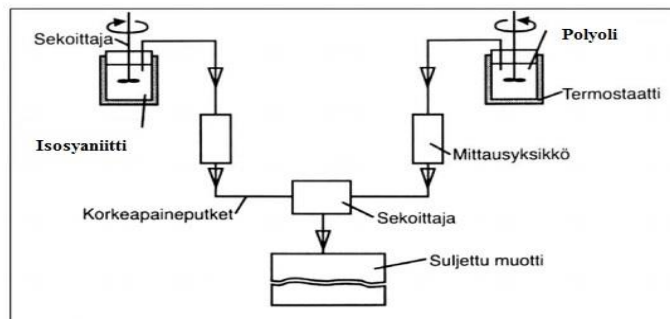
Ekstruudereita voi olla myös kaksi- tai useampiruuvisia. Kaksiruuviekstruuderin ruuvit voivat pyöriä joko samaan tai eri suuntaan; eri suuntaan pyörivät ovat huomattavasti yleisempi vaihtoehto. (Seppälä 2008, 265.) Kuviossa 12 on esitelty lomittain olevat ruuvit, jotka ovat kahdeksikon muotoisessa sylinterissä.



KUVIO 12. Lomittaiset syöttöruuvit ja niiden pyörimistavat (Seppälä 2008, 265)

### 3.2 Reaktiovalu

Reaktiovalu on alun perin kehitetty juuri polyuretaanisolumuovoin valmistukseen (Kurri, ym. 2008, 167). Reaktiovalussa (Reaction Injection Molding) eli RIM-menetelmässä kaksi komponenttia (isosyaniitti ja polyoli) lämmitetään erikseen, omissa säiliöissään. Tämän jälkeen kummatkin komponentit johdetaan korkeapaineputkilla yhteiseen sekottajaan, jossa materiaalit sekoittuvat keskenään. Sekoittumisen jälkeen valmistunut seos ruiskutetaan muottiin. (Saarela, Airasmaa, Kokko 2007, 175.)



KUVIO 13. RIM- menetelmän periaate (Saarela, ym. 2007, 175)

RIM-menetelmässä ruiskutusaika riippuu kappaleen koosta, joka on yleensä muutamia sekunteja. Raaka-aineen hyytyminen on nopeaa ja muottipaine on pieni, minkä vuoksi muottikustannukset ovat pienet ja menetelmää voidaan käyttää myös pienemmille sarjoille. (Premold Corp 2014.)

RIM- menetelmällä tehtyjen kappaleiden ominaisuuksia ovat:

- hyvät jousto-ominaisuudet
- hyvä iskulujuus
- mittatarkkuus. (Kurri, ym. 2008, 168.)

Reaktiovalettujen kappaleiden alhaista lujuutta on mahdollista parantaa erikois-RIM-menetelmillä RRIM (reinforced reaction injection molding) ja SRIM (structural reaction injection molding). RRIM- menetelmässä käytetään lujiteaineena yleensä lasia, jota on usein noin 15 – 20 p- %.(Kurri, Malén, Sandell, Virtanen 2008, 168.)

SRIM-menetelmässä on vieläkin suuremmat lujuusominaisuudet kuin RRIM-menetelmässä, ja siinä valmiiksi muovatut lujiteaihiot sijoitetaan muottiin, johon valu tehdään (Kurri, ym. 2008, 168). Esimerkiksi omassa työssäni käytettävässä kölirullassa on käytetty alumiiniaihiota lujittamaan polyuretaaniseos, josta lisää luvussa 4.3.

#### 4 MUOVIN JÄLKITYÖSTÖMENETELMÄT

Muoveille käy monet eri jälkityöstömenetelmät, kuten muillekin materiaaleille esim.metalleille. Mekaaninen jälkityöstö tarkoittaa muovikappaleen työstämistä ainetta poistaen, yleisimpiä jälkityöstömenetelmiä ovat seuraavat:

- sahaus
- taivutus
- poraus
- sorvaus
- jyrsintä
- leikkaus. (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifvars, Komppa 2003, 214 – 219.)

Edellä mainitut mekaaniset jälkityöstömenetelmät ovat ns. lastuavaa työstöä, jossa kappaleesta poistetaan ainetta lastuina. Nykypäivänä on kehitetty erilaisia lastuamattomia työstömenetelmiä, joista yleisimpiä ovat:

- ultraäänileikkaus
- vesisuihkuleikkaus
- laserleikkaus. (Saarela, ym. 2003, 216 – 217.)

Työssäni on käytetty lastuavaa työstöä, hinnan ja saatavuuden takia. Uudet lastuamattomat työstömenetelmät ovat nopeita ja huomattavasti parempia suurille sarjoille. Käyttämäni työstömenetelmät ovat poraus ja jyrsintä.

Muovien pienen lujuuden takia mekaanisessa jälkityöstössä käytetään teräviä, mahdollisimman pientä plastista muodonmuutosta aikaansaavia teriä. Muovin vääränlainen työstö voi aiheuttaa liian korkean lämmön nousun, jonka johdosta muovi sulaa. Muovien mekaaniseen työstöön vaikuttaa suurelta osin myös muovimateriaali. Koville aineille kuten metalleille tarvitaan mahdollisimman tukevia teriä, jotka eivät ole teräviä. (The Plastics Distributor & Fabricator 2014.)

Muovien poraamisessa käytetään nopeita ja teräviä teriä, jotka on valmistettu kovasta työkaluteräksestä. Lastuavassa työstössä tulee huomioida hyvä lastun poisto, jotta kappale ei pääse lämpenemään. Porauskulman tulisi olla kohtisuora

kappaleen kanssa, varsinkin jos porataan syviä reikiä. Väärä kulma voi johtaa terän kiinni jäämiseen kappaleen sisään. Muovin poraamisen käytetty terä on esitetty kuviossa 14. Terässä on parannettu lastunpoistoa, ja siinä on kaksi leikkaavaa harjaa, jossa kummassakin on kaksi leikkaavaa pintaa. (The Plastics Distributor & Fabricator 2014.)



KUVIO 14. Muovin poraamiseen käytetty terä (LMT Tools 2010).

Muovin jyrsinnässä käytetään korkeita leikkausnopeuksia ja keskialueen syöttönopeuksia. Muovia jyrsimällä saadaan aikaan hyvä pinnan laatu ja tarkka mittatarkkuus, jos käytetään oikeita menetelmiä. (The Plastics Distributor & Fabricator 2014.)

Työssäni käytetyn korkeatiheuspolyeteenin jälkityöstössä tulee käyttää kovista työkaluteräksistä valmistettuja teriä niiden korkean lämmönjohtavuuden takia. Hyvä lämmönjohtavuus terässä pienentää lämmön muodostumista kappaletta jälkityöstäessä. Korkeatiheuspolyeteenin jälkityöstössä tulee myös huomioida hyvä lastunpoisto, jotta lämpöä ei pääse muodostumaan, johtuen polyeteenin suhteellisen alhaisista käyttölämpötiloista. (Plastics Machining & Fabricating 2001.)



## 5 TUOTESUUNNITTELU

Tuotekehitys on tuotantotoimintaa harjoittavan yrityksen avainasioita. Menestys riippuu siitä pystyykö yritys vastaamaan asiakkaiden muuttuviin tarpeisiin riittävän nopeasti. Tuotteella tarkoitetaan konkreettista kosketeltavaa objektia, kuten nykyään myös palvelua tai osaamista. (Hietikko 2012, 11.)

Tuotesuunnittelu on yksi näkyvimmistä tuotekehityksen osista. Nämä kaksi yleensä sekoitetaan toisiinsa, mutta tuotekehitys on kuitenkin isompi kokonaisuus, joka sisältää kaiken toiminnan asiakkaan tarpeesta aina valmiiseen tuotteeseen saakka. Tuotesuunnittelun tavoitteena on luoda valmistukselle tarvittavat dokumentit, joilla se pystyy yksiselitteisesti valmistamaan oikean tuotteen. (Hietikko 2012, 13.)

Harvoin suunnitellaan täysin uutta tuotetta, jossa ei olisi mitään samaa kuin jossakin olemassa olevassa tuotteessa. Useimmiten suunnitellaan olemassa olevaan tuotteeseen muutoksia tai lisäyksiä. (Hietikko 2012, 13.)

Suunniteltava tuote on usein kokoonpano, joka koostuu osista. Osat suunnitellaan erikseen, ja yleensä prosessi on rekursiivinen eli edetään alimmista tasoista ylöspäin. Kokoonpano tehdään viimeiseksi, ja siinä osat kootaan yhteen, mikä muodostaa tuotteen. Huono suunnittelu vaikuttaa suoraan lopullisen tuotteen laatuun. (Hietikko 2012, 13.)

### 5.1 Lähtökohta

Lähtökohtani oli suunnitella venetelakkaan kölirullalle tukirakenne. Kölirulla on tarkoitettu tekeillä olevaan L-telakkaan, jonka kantavuus tulisi ainakin olemaan 1000 kg. Venos Oy:n nykyiset telakka ratkaisut (soutuvene-, S- ja M-telakka) ovat tarkoitettu pienemmille veneille, joiden kokonaismassa on alle 500 kg.

Pienempien telakoiden toimintaperiaate perustuu polyeteeniputken alhaiseen kitkaan, jonka takia vene liukuu putken päällä vaivattomasti. Kölirullilla tultaisiin varmistamaan veneen vaivaton liikkuminen telakan päällä massan noustessa 1000 kg:aan.

## 5.2 Vaatimukset

Suunnitelmassani lähdin ensimmäiseksi kartoittamaan Venos Oy:n yhteyshenkilöni Karri Kaasisen kanssa, millaisia vaatimuksia kölirullalle ja sen tukirakenteelle tulisi laatia. Laadimme listan, johon laitoimme vaatimukset tärkeysjärjestykseen:

- Kölirulla tai sen tukirakenne ei saa vahingoittaa venettä kosmeettisesti tai millään muullakaan tavalla.
- Kölirullan ja sen tukirakenteen tulee olla korroosiovapaa.
- Rakenteen yksinkertaisuus ja kustannustehokkuus.
- Rakenne helppo asennettavuus ja jälkiasennettavuus.
- Helppo huollettavuus (kölirullan vaihto, roskien poisto ym.).
- Ratkaisu tulee olla pitkäikäinen.
- Kölirullan ja sen tukirakenteen tulisi kestää noin 1000 kg massa.

Lisäksi toiveena oli koko rakenteen ja sen eri modifikaatioiden valmistus muovista, sillä telakan markkinointi on tällä hetkellä perustunut muovisuudelle.

## 5.3 Venetelakka

Venos Oy valmistaa tällä hetkellä 3 erilaista venetelakkaa, soutuvene-, S- ja M-telakka. Telakka, johon työssäni suunniteltu kölirullarakenne tulee, on siis neljäs telakka, joka tulee olemaan L-telakka. Lähtökohdissa kerroin L-telakan tulevan noin 1000 kg:n veneille, jossa kölirullat varmistaisivat veneen vaivattoman liukumisen telakalle ja siitä pois.

## 5.4 Kölirulla

Päätimme yhdessä Venos Oy:n kanssa, että valitsimme kölirullaksi ostorullan, emmekä rupea itse sitä suunnittelemaan tai valmistamaan. Löysimme tarkoituksiimme sopivan kölirullan Stoltz Industries -nimiseltä yritykseltä, joka on erikoistunut polyuretaanisten kölirullien valmistukseen. Stoltz Industries kölirullat valmistetaan Yhdysvalloissa, ja niiden Suomen maahantuoja on Teohydrauli Oy.

Polyuretaanisen kölirullan ominaisuuksia:

- Kulutuskestävyys huomattavasti parempi kuin kumi- tai PVC-rullilla.
- UV-säteilyn kesto hyvä, rulla ei tummu heti UV-säteilyn vaikutuksesta.
- Vierintä vastus on pieni.
- Rulla ei jätä mustia merkkejä veneenpohjaan, kuten mustat kumirullat.  
(Stoltz Industries 2012.)

Polyuretaaniset kölirullat ovat kalliimpia kuin niiden kanssa kilpailevat kumi- ja PVC-rullat, mutta niiden käyttöikä on huomattavasti pidempi. Pidempi käyttöikä on kustannustehokkaampaa pitkän aikavälin vertailussa verrattaessa halvempaan ja lyhytikäisempään vaihtoehtoon. (Stoltz 2012.) Kuviossa 18 on Stoltz RP-310 -rullan kuva.



KUVIO 18. Stoltz RP-310 -rulla (Stoltz Industries 2012)

Valitsemassamme Stoltz RP-310 kölirullassa on alumiinen vahvike rakenteen sisällä, joka jäykistää ja vahvistaa rullaa. Rulla on myös pinnaltaan tasainen, mikä oli yksi tärkeimmistä tekijöistä kölirulla valinnassamme. Rullan kiinnitys tapahtuu halkasijaltaan 16mm:llä akselilla. (Teohydrauli Oy 2014.) Rulla on valmistettu SRIM- menetelmällä, jossa alumiininen vahvike on asetettu muottiin ennen polyuretaanin ruiskutusta. Rullan valmistus menetelmästä on puhuttu enemmän luvussa 3.2.

## 5.5 Kõlirullan tukirakenne

### 5.5.1 Muovinen tukirakenne

### 5.5.2 Alumiininen tukirakenne

## 5.6 Prototyyppi

## 6 TESTAUS

### 6.1 PE-putkien kantavuus

### 6.2 Tulokset

## 7 YHTEENVETO

## LÄHTEET

### *Painetut lähteet*

Hietikko, E. 2012. SolidWorks tietokoneavusteinen suunnittelu 2012. 5. uudistettu painos. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. Porvoo: WS Bookwell Oy.

Järvelä, P., Syrjälä, K. & Vastela, M. 2000. Ruiskuvalu. Tampere: TTKK-Paino.

Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 2008. Muovitekniikan perusteet. Helsinki: Edita Prima Oy.

Rauwendaal, C. 2001. Polymer Extrusion. 4. uudistettu painos. Munich: Carl Hanser Verlag.

Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. 2007. Komposiittirakenteet. Lahti: Muoviyhdistys.

Seppälä, J. 2008. Polymeeritekniikan perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy.

### *Elektroniset lähteet*

Muoviteollisuus Ry 2014. Muovien luokitus [viitattu 15.1.2014]. Saatavissa: [http://www.muoviteollisuus.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien\\_luokitus/](http://www.muoviteollisuus.fi/fin/muovitieto/muovit/muovien_luokitus/).

LMT Onsrud 2010. Plastic: Most Popular Plastic Drilling Tools [viitattu 2.3.2014]. Saatavissa: <http://www.onsrud.com/plusdocs/Doc/index.html?model.code=Plastic-Drilling-Tools>.

Plastics Distributor® & Fabricator Magazine 2014. Machining of Engineering Plastics [viitattu 27.2.2014]. Saatavissa: <http://www.plasticmag.com/features.asp?fIssue=May/Jun-01&aid=3226>.

PM & F, Plastics Molding & Fabricating 2014. Machining HDPE: Tips & Techniques for Fabricators [viitattu 27.2.2014]. Saatavissa: <http://www.plasticsmachining.com/magazine/2001-09/PP-HDPE.html>.

Premold Corp. 2014. RIM process [viitattu 10.3.2014]. Saatavissa: <http://www.premoldcorp.com/the-rim-process/>.

PU Nordic 2014. Polyuretaani: Mekaaniset ominaisuudet [viitattu 27.1.2014]. Saatavissa: <http://www.pu-nordic.fi/tietopankki/mekaaniset-ominaisuudet>.

Stoltz Industries, Inc. 2012a. Stoltz super rollers [viitattu 15.2.2014]. Saatavissa: <http://www.stoltzind.com/>.

Stoltz Industries, Inc. 2012b. RP-310 [viitattu 15.2.2014]. Saatavissa: <http://stoltzind.com/photos/images/page44.html>.

Sunray Inc. 2014. Polyurethane: Technical data [viitattu 24.1.2014]. Saatavissa: <http://www.sunray-inc.com/index.php?page=technical-data>.

Tangram Technology Ltd. 2010. Extrusion definitions [viitattu 2.2.2014]. Saatavissa: [http://www.tangram.co.uk/TI-Polymer-Extrusion\\_Definitions.html](http://www.tangram.co.uk/TI-Polymer-Extrusion_Definitions.html).

Teohydrauli Oy 2014. Kõlirulla Stoltz RP-310 Flat [viitattu 15.2.2014]. Saatavissa: <http://www.teohydrauli.fi/PublishedService?file=page&pageID=9&itemcode=21011>.

Tampereen teknillinen yliopisto 2010. Ruiskuvalettavan muovituotteen mekaniikkasuunnittelu [viitattu 24.3.2014]. Saatavissa: [https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/PKAMK/PPDF/Polyko\\_PKAMK\\_Final.pdf](https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/materiaalit/PKAMK/PPDF/Polyko_PKAMK_Final.pdf).

Valuatlas 2012. Polyeteeni (PE) [viitattu 12.2.2014]. Saatavissa: [http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics\\_PE\\_FI.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PE_FI.pdf).

Venetieto.fi 2014. Veneen runko [viitattu 19.3.2014]. Saatavissa: <http://venetieto.fi/veeneen-runko>.



Venos Oy 2014. Venos venetelakka [viitattu 10.3.2014]. Saatavissa:  
<http://www.venos.fi/doku.php>.

Uponor Oy 2009. Uponor-paineputkijärjestelmä PE100 turvallinen valinta juoma- ja jätevesien johtamiseen [viitattu 5.2.2014]. Saatavissa:  
<http://www.uponor.fi/~media/Files/Uponor/Finland/Technical%20Handbook%20INF/065PE100paineputket042009.pdf>.

### ***Suulliset lähteet***

Kaasinen, K. 2014. Yrittäjä. Venos Oy. Haastattelu 28.2.2014.

### ***Muut lähteet***

Muoviteollisuus Ry. 2012. Paineputkijärjestelmät polyeteenistä (PE). Putkijaoston julkaisu.

## LIITTEET

## LIITE 5. PE-100 ja PE-80 putkien SDR-taulukko (Muoviteollisuus Ry 2012, 7)

SDR-luokka	SDR 6	SDR 7,4	SDR 9	SDR 11	SDR 13,6	SDR 17	SDR 21	SDR 26	SDR 33	SDR 41
PE 80	PN 25	PN 20	PN 16	PN 12,5	PN 10	PN 8	PN 6*	PN 5	PN 4	PN 3,2
PE 100	-	PN 25	PN 25	PN 16	PN 12,5	PN 10	PN 8	PN 6**	PN 5	PN 4
Jäykkyyksiluokka				SN 64	SN 32	SN 16	SN 8	SN 4	SN 2	SN 1
Ulkohalkaisija	Seinämän vähimmäispaksuus e (mm)									
16	3,0	2,3	2,0							
20	3,4	3,0	2,3	2,0						
25	4,2	3,5	3,0	2,3	2,0					
32	5,4	4,4	3,6	3,0	2,4	2,0				
40	6,7	5,5	4,5	3,7	3,0	2,4	2,0			
50	8,3	6,9	5,6	4,6	3,7	3,0	2,4	2,0		
36	10,5	8,6	7,1	5,8	4,7	3,8	3,0	2,5		
75	12,5	10,3	8,4	6,8	5,6	4,5	3,6	2,9		
90	15,0	12,3	10,1	8,2	6,7	5,4	4,3	3,5		
110	18,3	15,1	12,3	10,0	8,1	6,6	5,3	4,2		
125	20,8	17,1	14,0	11,4	9,2	7,4	6,0	4,8		
140	23,8	19,2	15,7	12,7	10,3	8,3	6,7	5,4		
160	26,6	21,9	17,9	14,6	11,8	9,5	7,7	6,2		
180	29,9	24,6	20,1	16,4	13,3	10,7	8,6	6,9		
200	33,2	27,4	22,4	18,2	14,7	11,9	9,6	7,7		
225	37,4	30,8	25,2	20,5	16,6	13,4	10,8	8,6		
250	41,5	34,2	27,9	22,7	18,4	14,8	11,9	9,6		
280	46,5	38,3	31,3	25,4	20,6	16,6	13,4	10,7		
315	52,3	43,1	35,2	28,6	23,2	18,7	15,0	12,1	9,7	7,7
355	59,0	48,5	39,7	32,2	26,1	21,1	16,9	13,6	10,9	8,7
400		54,7	44,7	36,3	29,4	23,7	19,1	15,3	12,3	9,8
450		61,5	50,3	40,9	33,1	26,7	21,5	17,2	13,8	11,0
500			55,8	45,5	36,8	29,7	23,9	19,1	15,3	12,3
560			62,5	50,8	41,2	33,2	26,7	21,4	17,2	13,7
630			70,3	57,2	46,3	37,4	30,0	24,1	19,3	15,4
710			79,3	64,5	52,2	42,1	33,9	27,2	21,8	17,4
800			89,3	72,6	58,8	47,4	38,1	30,6	24,5	19,6
900				81,7	66,1	53,3	42,9	34,4	27,6	22,0
1000				90,8	73,4	59,3	47,7	38,2	30,6	24,5
1200					88,2	71,1	57,2	45,9	36,7	29,4
1400					102,9	83,0	66,7	53,5	42,9	34,3
1600					117,5	94,8	76,2	61,2	49,0	39,2
1800						106,6	85,8	68,8	55,1	44,0
2000						118,4	95,3	76,4	61,2	48,9
2250							107,2	86,0	68,9	55,0
2500							119,1	95,5	76,5	61,2

\*Todellinen paineluokka on PN 6,3      \*\*Todellinen paineluokka on PN 6,4