



# Alumiinin pursotuksen taloudellinen eräkoko

Wilhelmi Kaasalainen

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2021

Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Tuotantotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Tuotantotekniikka

KAASALAINEN, WILHELMİ:  
Alumiinin pursotuksen taloudellinen eräkoko

Opinnäytetyö 99 sivua, joista liitteitä 4 sivua  
Huhtikuu 2021

---

Alumiinin pursottamisen valmistusketjut ovat tyypillisesti pitkät, ja prosessin asetuskustannukset ovat suuret. Normaaliilla tuotannolla ei aina ole mahdollista vastata asiakkaan vaatimiin toimitusaikoihin. Valtaosa toimeksiantajan tuotannosta on imuohjautuvaa, mutta osa nimikkeistä valmistetaan varasto-ohjautuvasti. Tämä mahdollistaa asiakkaan palvelemisen myös tilanteissa, joissa normaali toimitusaika on liian pitkä tai haluttu toimituserä on minimipursotuserää pienempi.

Toimeksiantajan laaja tavoite on kehittää kokonaisvaltaisesti varasto-ohjautuviin asiakastuotteisiin liittyvää toimintatapaa. Opinnäytetyön aiheeksi on tästä rajattu täydennystilauksen taloudellisen eräkoon määrittäminen, laskentaa helpottavan työkalun luonti ja tulevaisuuden toimintatavan ideointi.

Taloudellisen eräkoon laskennan voidaan pelkistetysti sanoa olevan asetus- ja varastointikustannuksen tasapainotilan määrittämistä. Alakohtaisessa asetus-kustannuksessa on huomioitu syntyvä romu, suulakkeen livettäminen ja normaalituotannosta menetetyt ajan kustannus. Laskenta perustuu vuoden 2020 tuotantotietoihin, joiden avulla on luotu muutama parametri määrittämään nimikekohtaista eroa asetuskustannuksissa. Varastoinnista on määritetty toimeksiantajan kulurakenteen perusteella häkkikohtainen kustannus, jolloin profiilin muoto voidaan yksinkertaisesti huomioida varastointikustannuksessa. Eräkoko on simuloitu useilla staattisilla ja dynaamisen heuristisilla mallinnusmenetelmillä.

Varastonimikkeille on tehty volyyymiin perustuva ABC-analyysi ja kysynnän keskihajonnan XYZ-analyysi. Työn tuloksena valmiissa työkalussa on huomioitu yhdistetyn kaavion eri ryhmien vaatimat ohjauksen erot. Simuloiduista mallinnusmenetelmistä on valittu neljä toimeksiantajalle parhaiten sopivaa, jotka ovat EOQ, Wagner–Whitin-, Silver–Meal-menetelmät sekä (Q, R) -malli. Työkalussa mallinnusmenetelmän antamaa taloudellista eräkoko on lopuksi optimoitu joko varastoinnin häkkikapasiteetin tai tuotannon lauttakoon mukaan. Työkaluun on luotu mahdollisuus menekin ennustamiselle joko asiakkaan tietojen tai nimikekohtaisen myyntihistoriaan perustuvan kausivaihtelun mukaan. Tutkimuksen luottamuksellinen aineisto on poistettu julkisesta raportista.

---

Asiasanat: taloudellinen eräkoko, alumiinin pursottaminen, asetuskustannus, varastointikustannus.

## **ABSTRACT**

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

KAASALAINEN, WILHELMII:  
Economical Batch Size for Aluminium Extrusion

Bachelor's thesis 99 pages, appendices 4 pages  
April 2021

---

Supply chains of aluminium extrusion are usually long and the expected setup cost is above average. With regular production it is not always possible to have the short delivery times demanded by the customer. The company's production is mainly pull-based, but a few items are being stored. This will make it possible to have a shorter delivery time and smaller batches than it otherwise would be. The demand for this approach always comes from the customer.

In the big picture the company will develop their make to stock -strategy. This study aimed to examine a limited part of this, and the focus was on economical batch size, creating assisting tool for calculation and planning how it will be done in the future.

The economical batch size calculation is primarily about finding the balance between setup and holding cost. Setup cost for aluminium extrusion included scrap, die cleaning and lost time. Cost calculations were based on 2020 production data and a couple parameters were created to present the differences in different items. Holding cost was based on the cost structure of the company. The cost was calculated for basket so physical differences of different profiles can be observed. Batch size was simulated with several different static and heuristic modeling methods.

The stored items were divided into different groups by ABC-analysis based on volume and XYZ-analysis based on standard deviation of the sales. The finished tool had different calculation methods for different groups. The chosen calculation methods were EOQ, Wagner-Whitin, Silver-Meal and (Q, R). Finally, the cost-based batch size was optimized by either basket size or finishing saw batch size. With the tool, it is possible to forecast the demand according to customer information or seasonal variation. The confidential material from the study has been removed from the public report.

---

Key words: economical batch size, aluminium extrusion, holding cost, setup cost.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
1.1	Tavoite ja rajaus.....	8
1.2	Tutkimusmenetelmät.....	8
2	PURSO OY.....	10
2.1	Purso Group Oy .....	12
2.2	Alumiiniteollisuus.....	12
2.3	Yrityksen nykytila .....	13
2.3.1	Varastointi .....	13
2.3.2	Järjestelmät .....	14
3	ALUMIININ PURSOTTAMINEN.....	15
3.1	Billetin lämmittäminen .....	17
3.2	Pursotus.....	19
3.2.1	Puristin .....	20
3.2.2	Suulake .....	22
3.3	Jäähdytys.....	23
3.4	Veto ja sahaus .....	24
3.5	Keinovanhennus .....	27
4	VARASTOINTI.....	28
4.1	Varastotyypit .....	29
4.2	Kysyntä .....	30
4.3	Materiaalinohjaus .....	31
4.4	Seuranta .....	32
4.5	Palvelukyvyyn määrittäminen .....	33
4.6	ABC- ja XYZ-analyysit avuksi ohjaustarpeen määrittämiseen.....	35
5	TALOUDELLINEN ERÄKOKO.....	37
5.1	EOQ suunnittelun lähtökohtana .....	37
5.1.1	EOQ-alueen herkkyysanalyysi.....	39
5.1.2	EOQ:n jalostaminen .....	41
5.2	Dynaamiset laskentamenetelmät .....	43
5.2.1	Wagner–Whitin-menetelmä .....	44
5.2.2	Silver–Meal-menetelmä.....	46
5.2.3	(Q, R) -malli .....	47

6	VARASTOINTIKUSTANNUS.....	51
6.1	Kustannusjakauma.....	51
6.2	Kustannuslaskennan lähtökohta .....	53
6.3	Varastointikustannus Pursossa.....	55
6.3.1	Pääoman korkokustannus .....	56
6.3.2	Tila- ja käsittelykustannus .....	57
7	ASETUSKUSTANNUS .....	58
7.1	Kustannusjakauma.....	58
7.2	Tutkinnan ulkopuolelle jätetyt tekijät.....	60
7.3	Livetyt.....	61
7.3.1	Livetystapahtuman todennäköisyys.....	62
7.3.2	Livetyskustannus .....	63
7.4	Vaihtoaika .....	64
7.4.1	Tutkimus.....	64
7.4.2	Vaihtelun perusteet.....	66
7.5	Vaihtoromu.....	67
7.6	Yhteenveto.....	69
8	TÄYDENNYSTILAUS .....	71
8.1	Ohjaustapa.....	71
8.2	Laskennassa huomioitu .....	73
8.3	Laskentaohjelmat .....	73
8.3.1	EOQ .....	73
8.3.2	Wagner–Whitin.....	76
8.3.3	Silver–Meal.....	78
8.3.4	(Q, R).....	78
8.4	Kausivaihtelu.....	80
9	TULOSEN OPTIMOINTI.....	82
9.1	Häkin tilavuus.....	82
9.2	Lauttakoko .....	84
9.2.1	Laskenta.....	84
9.2.2	Tuotantotiedot.....	86
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	88
	LÄHTEET .....	91
	LIITTEET .....	96
	Liite 1. Laadittu haastattelun muistio.....	96
	Liite 2. (Q, R) -menetelmän Excel macro.....	97
	Liite 3. Lauttakoon laskentaan luotu Excel macro.....	98
	Liite 4. Lauttakoon laskennan Excel.....	99

## ERITYISSANASTO

alumiinikanki	Jatkuvalla valulla valmistettu alumiininen sylinteri, joka on pituudeltaan 6–8 metriä.
alumiinibilletti	Alumiini kangesta sahattu prosessin edellyttämä pituus, mikä on 0,6–1,3 metrin väliltä.
anodisointi	Pintakäsittelyprosessissa alumiinin pinnalle muodostetaan suojaava oksidipinnoite sähkövirran avulla. Tämä parantaa korroosionkestävyyttä ja kestoikää.
EOQ	Taloudellinen tilauskoko (Economic Order Quantity).
EPQ	Taloudellinen tuotanto määrä (Economic Production Quantity).
huuva	Pursotuslinjaston jäähdytysjärjestelmä.
lautta	Tuotantosahan yhteen työkiertoon mahtuva profiilimäärä.
loader	Laitteisto asettaa alumiini billetin puristimeen.
puller	Laitteisto vetää ja ohjaa valmistuvan alumiini profiilin ulostuloradalla.
putkityökalu	Onttoja muotoja sisältävän profiilin suulake.
SM	Silver–Meal -menetelmä on heuristinen eräkoon laskentamenetelmä.
stacker	Laitteisto kasaa alumiiniprofiilit vanhennushäkkiin.
suora työkalu	Avoimia profiilimuotoja varten valmistettu suulake.
suulake	Teräslevy, mikä muodostaa tavoitellun profiilimuodon.
taper	Lämpötilaero alumiini billetin alku- ja loppupään välillä.
W-W	Wagner–Whitin -menetelmä on eräkoon optimoinnin laskentamenetelmä.

## 1 JOHDANTO

Alumiinin pursottamiseen liittyy tyypillisesti pitkä toimitusaika suuren kuorman ja pitkien valmistusketjujen vuoksi. Tuotteen valmistaminen voi tuotantoketjun mukaan kestää muutamasta päivästä kuukauteen. Uuden tuotannon käynnistäminen ei myöskään ole halpaa. Tällöin prosessissa tulee ylimääräisiä kustannuksia esimerkiksi romusta ja menetetyistä ajasta.

Toimeksiantajan pitkäaikainen strategia on ollut palvella kaiken suuruisia asiakkaita. Pienin tilattavissa oleva määrä on 250 kg, kun se kansainvälisillä toimijoilla voi olla kymmenkertainen. Vaikka suurin osa nykyisestä tuotannosta on asiakasohjautuvaa, silti joitain nimikkeitä varastoidaan. Tällä mahdollistetaan palvelukykyä tilanteissa, joissa toimitusaikavaatimukset ovat haastavia ja tilauseräkoot kannattamattomia.

Nykyisen varastoinnin perusta voidaan jakaa asiakaslähtöiseen, tuotannon suunnittelun määrittämään sekä Järjestelmäyksikköön, jonka liiketoimintamalli perustuu varastointiin. Asiakaslähtöisessä toimintatavassa varastomäärät sovitaan asiakkaan kanssa ja yrityksen tulee toimia sovituissa rajoissa. Tuotannon suunnitteluun perustuvassa varastoinnissa varastointipäätös tehdään tarpeen vaatiessa.

Työskentelymenetelmissä on kuitenkin ollut tapauskohtaista vaihtelua, ja pieni osa nimikkeiden ohjauksesta vie suuren osan ajasta. Suurena ongelmana on normaalin tuotannon ja tarvelaskennan materiaalivirtaan käytettävissä olevan varaston pieni koko. Toimeksiantajan tavoitteena on luoda yhtenäiset toimintatavat varasto-ohjautuvien asiakastuotteiden käsittelyyn, lyhentää keskimääräistä läpimenoaikaa ja parantaa toiminnan tehokkuutta.

## 1.1 Tavoite ja raja

Opinnäytetyön aiheeksi on rajattu täydennystilauksen taloudellisen eräköön ja tilauspisteen määrittäminen. Työ alkaa varastointi- ja asetuskustannuksen määrittämisestä. Varastointikustannuksen tavoitteena on määrittää kustannus häkikohtaiseksi, jolloin nimikekohtaisen eron laskeminen on helppoa. Asetuskustannuksessa tulee pystyä erottamaan nimikekohtaiset eroavaisuudet muutamalla parametrilla.

Lähtötietojen perusteella tulee luoda täydennystilauksen laskentaan työkalu tuotannosuunnittelun tueksi. Varastonimikkeet ryhmitellään volyymin ABC-analyysin ja kysynnän keskihajonnan XYZ-analyysin perusteella yhdeksään ryhmään. Ryhmien ohjauksen tarpeet eroavat toisistaan, ja työkalussa tämä huomioidaan suunnittelemalla ryhmäkohtainen laskentamenetelmä. Työkalussa on lopuksi tavoitteena optimoida kustannusjakauman perusteella saatua tulosta tuotannon kannalta tehokkaammaksi esimerkiksi häkki- tai lauttakoon mukaan.

Työstä rajataan pois Järjestelmäyksikkö, koska nimikkeiden nykyinen ohjaus eroaa asiakasohjautuvista nimikkeistä ja toimintatavan yhtenäistämistä saa aikaiseksi oman opinnäytetyön. Opinnäytetyön tulokset kuitenkin esitetään työn valmistumisen jälkeen myös Järjestelmäyksikössä.

## 1.2 Tutkimusmenetelmät

Asetuskustannus määritetään empiirisellä tutkimusmenetelmällä. Vaikuttavat tekijät selvitetään haastatteluiden avulla. Vaikuttavista tekijöistä lasketaan asetuskustannusrakenne tietokannoista saatavan raakadatan avulla reliabelilla tutkimuksella. Tässä otannan tulee olla suuri, tulosten tarkkoja ja tutkimuksen helposti toistettavissa. Varastointikustannuksen perustana on vastaava toimintatapa, mutta painoarvo on haastatteluissa.

Eräkoon laskenta perustuu toissijaiseen tiedonkeruuseen, eli käytetyissä menetelmissä ja kaavoissa hyödynnetään tiedonhakua esimerkiksi kirjoista ja tieteellisistä artikkeleista. Laskenta tehdään useilla tapaustutkimuksilla, joissa erityyppisiä nimikkeitä tutkitaan syvällisesti, ja näistä tehdään johtopäätökset.

Tutkimuksen luottamuksellinen aineisto on jätetty pois julkisesta opinnäytetyöstä. Luottamuksellisesta aineistosta on työn aikana tehty toimeksiantajalle kaksi erillistä raporttia. Näistä on julkisessa työssä hyödynnetty osin sensuroituja kaavioita, laskennassa osa tiedoista on korvattu satunnaisilla luvuilla ja nimikekohtaiset merkinnät on poistettu.

## 2 PURSO OY

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Nokian Siurossa toimiva perheyhtiö Purso Oy. Yritys on toiminnassaan keskittynyt alumiiniprofiilien pursottamiseen ja jatkojalostamiseen. Jatkojalostukseen yrityksessä on pulverimaalaamo, anodisointilaitos ja kevytmetallikonepaja, jossa profiilia voidaan sahata, taivuttaa, hitsata tai koneistaa. Vuonna 2019 alumiiniprofiilia valmistui 17 500 tonnia, liikevaihto oli 90 milj. €, josta liikevoitto 5,7 milj. €, ja työntekijöiden määrä oli 250 (Finder n.d.).

Purso-yhtiöiden toiminta alkoi vuonna 1959, kun Esko Ollila perusti anodisointiyhtiön Suojapinta Oy (kuva 1). Tytäryhtiö Purso Oy perustettiin 1972, ja kaksi vuotta myöhemmin ensimmäinen pursotuslinja käynnistyi. Jatkojalostamiseen panostaminen alkoi vuonna 1976 ottamalla käyttöön kevytmetallikonepaja. Vuodesta 1980 asti yrityksessä on koettu kierrättäminen tärkeäksi arvoksi – tällöin perustettiin oma sulatto Ikaalisiin. Samana vuonna toinen pursotuslinja käynnistyi. (Purso n.d.)



KUVA 1. Ensimmäinen tehdasrakennus Siurossa (Purso n.d.)

1990-luvulla jatkojalostusta kehitettiin investoimalla uuteen anodisointilaitokseen, konepajaan ja pulverimaalaamoon. 2000-luvulla alumiinitehdas laajeni kolmannella pursotuslinjalla, ensimmäinen vaihdettiin uuteen ja toinen romutet-

tiin. 2010-luvulla investoitiin uuteen anodisointilaitokseen ja vedenpuhdistamoon ja otettiin käyttöön biolämpökeskus. Kevytmallikonopajaa kehitettiin laitehankinnoin. (Purso n.d.) Nykyinen tehdasalue on nähtävissä kuvassa 2.



KUVA 2. Purson nykyinen tehdasalue (Purso n.d.)

Asiakkaan tarpeen mukaan valmistettavien profiilien ja komponenttien lisäksi yritys on panostanut rakennusjärjestelmä- ja SNEP-valaistusjärjestelmäliiketoimintayksiköihin. Rakennusjärjestelmän tuotekantaan kuuluu ovia, ikkunoita, säleitä ja julkisivujärjestelmiä. SNEP-valaistusjärjestelmä pohjautuu led-teknologiaan, ja valaisinmalleja on kehitetty teollisuuteen, liiketiloihin, toimistoihin ja varastotiloihin. (Purso n.d.)

Pitkäaikaisena strategiana on pyritty palvelemaan kaikkia asiakkaita, jolloin vahvoja ja luotettavia asiakkuuksia on kehittynyt lukuisia ja yksittäisen toimialan tai asiakkaan vaikutus kokonaisuuteen on pieni. Tuotannon tehokkuuden kannalta näin tuotettavat pienet erät eivät ole paras mahdollinen ratkaisu, mutta taantumien aikana hyödyt ovat korostuneet. Koronavuonna 2020 yrityksen volyymi pieneni edellisestä vuodesta 7 %.

## 2.1 Purso Group Oy

Purso Oy kuuluu Purso Group Oy -konserniin. Muita alumiiniteollisuuteen keskittyneitä yrityksiä konsernissa ovat Nedal Aluminium B.V., Purso Alucool Oy ja Linjapinta Oy. Yrityskerheeseen kuuluvat myös Fennosteel Oy, Purso-Tools Oy ja Veme Oy.

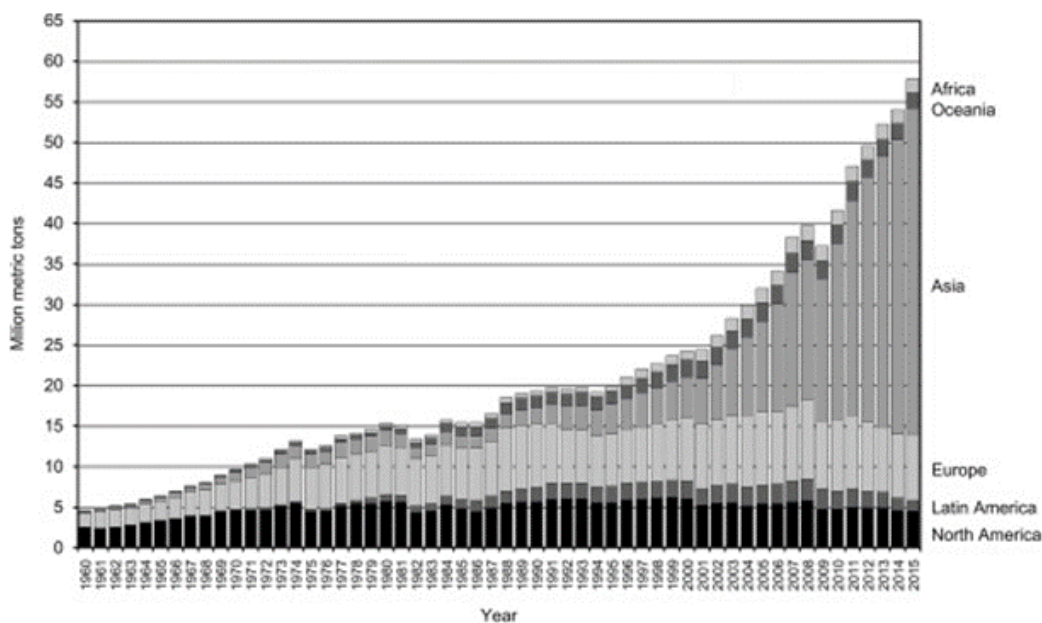
Alumiiniteollisuuden yrityksistä Linjapinta Oy toimii Purson yhteydessä Siurossa ja on erikoistunut pulverimaalauksen. Purso Alucool Oy, entiseltä nimeltään Kyronmaan CNC Koneistus Oy, valmistaa Tervajoella jäähdytyslementtejä sähkö- ja elektroniikkateknologian tarpeisiin.

Viimeisin yrityshankinta on ollut hollantilainen Nedal Aluminium B.V. vuonna 2019. Suuriin alumiiniprofileihin erikoistunut yritys kaksinkertaisti konsernin tuotantokapasiteetin. Vuonna 2018 yritys valmisti 17 500 tonnia alumiiniprofiilia, liikevaihto oli 78,6 milj. €, josta liikevoitto 2,6 milj. €.

Fennosteel Oy on Parkanossa pakoputkien ja ohutseinäputkien valmistaja. Purso-Tools Oy valmistaa raskaiden diesel- ja kaasumootoreiden osia Porissa. Laitilalaisen Veme Oy:n päätuotteita ovat ohutlevystä sekä putkimateriaalista valmistetut osakokonaisuudet. (Purso n.d.)

## 2.2 Alumiiniteollisuus

Alumiinin etuja ovat esimerkiksi keveys, sähkönjohtavuus, lämmönjohto, korroosionkesto etenkin anodisoituna, kohtalainen kovuus seostettuna ja helppo koneistettavuus (Silver City Aluminum n.d.). Alumiinin käyttö on levinnyt useille sektoreille, kuten rakentamiseen, kuljetusalalla autoihin, veneisiin, kuorma-autoihin sekä rautatie- ja metrovaunuihin. Lämmönjohtavuutta hyödynnetään ilmastointilaitteissa, sulatusyksiköissä ja lämmityslaitteissa. (Hydro n.d.) Viimeisten vuosikymmenien aikana alumiinin käyttö on kasvanut merkittävästi etenkin Aasiassa (kuvio 1).



KUVIO 1. Primäärialumiinin tuotanto 1960–2015 (Lumley 2018)

Alumiinin hyvänä puolena on myös sen raaka-aineen eli bauksiitin riittävyys. Maankuoressa on arvioitu olevan vielä 55–75 miljardia tonnia bauksiittia, josta vuosittain louhitaan 160 miljoonaa tonnia. Valmistusprosessissa bauksiitin suhde alumiiniin on 4:1, mikä on hyvä huomioida tulkittaessa kuviota 1. Alumiini voidaan täysin kierrättää, ja uusiokäyttöön tuotettu alumiini kuluttaa vain 5 % primäärialumiinin energiamäärästä. Arviolta 75 % kaikesta tuotetusta alumiinista on edelleen käytössä. (The Aluminium Association n.d.)

## 2.3 Yrityksen nykytila

### 2.3.1 Varastointi

Tehdasalueella varastot ovat jakautuneet useille osastoille. Varastoitaville nimikkeille ei ole omaa varastoaluetta, vaan varastointi tapahtuu normaalisti nimikkeen tuotantoketjun viimeisen vaiheen läheisyydessä. Toisin sanoen sama varastotila toimii kyseisen osaston käyttö-, valmis- ja tarvelaskentavarastona. Tuotannon tehokkuuden kannalta on oleellista, ettei varastonimikkeiden määrää ole ylimitoitettu.

Suuri osa varastoista on lattiavarastoja, joissa on varastoitu enintään kahdeksan häkkiä päällekkäin. Häkit siirretään varaston ja vaiheen välillä siltanosturilla. Yleisen tehokkuuden kannalta on tärkeää pitää varastossa pientä liikkumava-  
raa, jotta ylimääräisiin siirtoihin ei kulu aikaa. Tehdasalueella on myös käytössä kaksi robottitoimista varastoa.

Esimerkkivarastoon häkkeitä mahtuu 100 kappaletta, mikä keskimäärin tarkoittaa, että varastossa on 50 tonnia alumiinia. Varasto toimii kyseisen osaston käyttö-, valmis- ja tarvelaskentavarastona. Tarvelaskennan keskimääräinen osuus on 40 % ja tavarankiertonopeus 30,5 vuorokautta.

### 2.3.2 Järjestelmät

Yrityksessä käytetään omiin tarpeisiin räätälöityä CGI Power -toiminnanohjausjärjestelmää. Opinnäytetyön aikana tuli kattavasti hyödynnettyä Raportti-generaattoryökalua, jolla oli mahdollista ajaa tietoja lukuisista lähteistä, kuten myynti-, tuotanto- ja varastotapahtumia ja nimikekohtaisia tietoja.

Suulakkeet varastoidaan pääosin Kardex-korkeavarastoissa. Vanhemmat varastot käyttävät Access-kantaa. Asetuskustannuksen laskennassa edellisen vuoden vienti- ja tuontitapahtumien yhteenvedosta johdetut päätelmät olivat tärkeässä roolissa osuuksien arvioinnissa.

Pursotuslinjojen ohjaus tapahtuu Principin valmistamalla Progrex HMI -käyttöliittymällä. Käyttöliittymään on yhdistetty kaikkien pursotuslinjan osien, kuten puristimen, uunien, varaston, ulostuloradan, jäähdytyksen ja jäähdytyspöydän, PLC:t OPC-rajapinnan kautta. Käyttöliittymä tallentaa tuotantotiedot billettikohtaisella tarkkuudella SQL-palvelintietokantaan. Opinnäytetyössä tämän tietokannan hyödyntäminen oli keskeisessä roolissa asetuskustannuksen ja lauttakoon määrittämisessä.

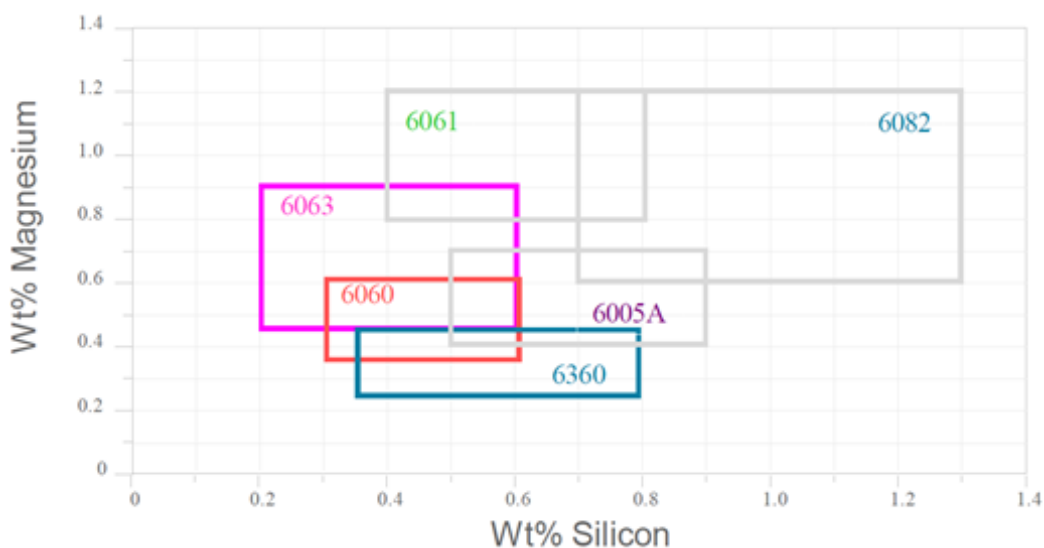
### 3 ALUMIININ PURSOTTAMINEN

Pursottamisella tarkoitetaan massan plastista muodonmuutosta: prosessia, jossa valmistetaan pitkiä vakiopoikkileikkaustuotteita. Prosessi voi materiaalin virtauksen mukaan olla eteenpäin, taaksepäin tai sivulle suuntautunutta. Eteenpäin suuntautunut pursotus on käytetyin vaihtoehto, mutta taaksepäin suuntautuvalla versiollakin on omat hyötynsä kitkan eliminoinnissa (Guo & Yang 2014). Materiaalivirtauksen lisäksi prosessi voidaan jakaa ominaisuuksien perusteella kuuma-, kylmä-, isku-, hydrostaattiseen ja rinnakkaispursotukseen. Alan yleisin vaihtoehto on kuumapursotus, jossa materiaalien lämpötilat ovat vähintään 60 % sulamispisteestä, eli prosessi tapahtuu uudelleenkiteytyslämpötilassa. (Torre Nieto 2010, 10–13.)

Valmistusmenetelmän etuina ovat tuotannon joustavuus, suurien volyymien nopea valmistettavuus, jolloin kappalekohtainen valmistuskustannus on pieni, hyvä pinnanlaatu ja mekaaniset ominaisuudet (Clubtechnical 2019). Ei ole ihme, että menetelmän käyttö on laajentunut metallien lisäksi muovien, keraamien, elintarvikkeiden ja biomassabrikettien valmistamiseen. Metallit ovat edelleen tyypillinen vaihtoehto, ja käytännössä kaikki metallit ovat pursotettavissa, mutta materiaalin muodonmuutoskyky määrää käytännöllisyyden. Pursotettavia metalleja on alumiini, magnesium, messinki, sinkki, teräs, tina ja titaani. (Torre Nieto 2010, 14.)

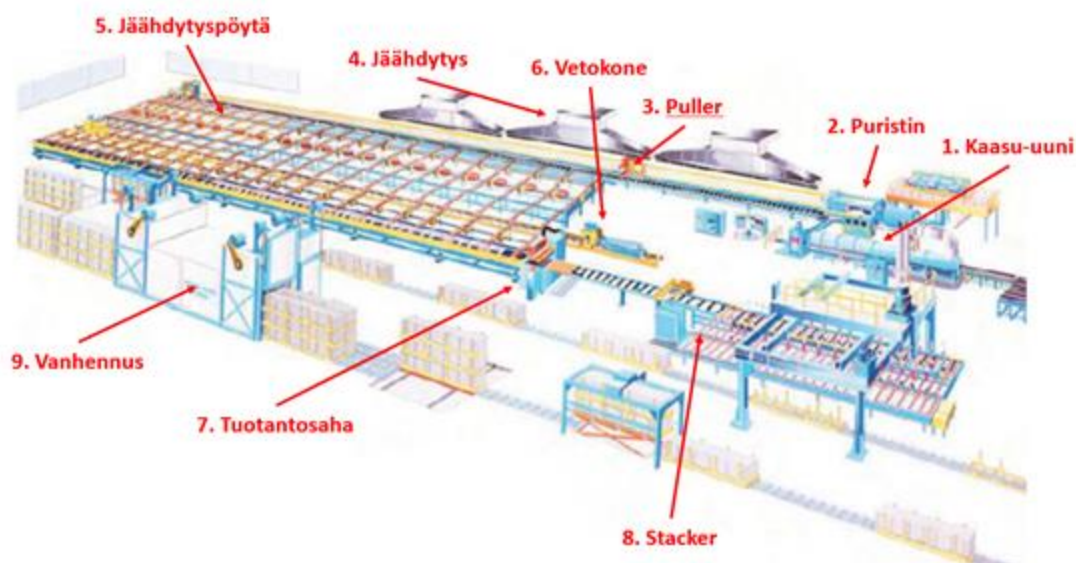
Alumiiniseokset ovat täydellinen vaihtoehto pursotettavaksi, ja valmistusmenetelmän kannalta materiaali on käytetyin. Seosvaihtoehdoista 1000-, 3000-, 5000- ja 6000-sarjalaiset pursottuvat helposti, mutta 2000- ja 7000-sarjalaiset ovat haastavampia suuren lujuuden vuoksi. Seosryhmien välillä alumiinin sidosaineet, saavutetut ominaisuudet ja käyttötarkoitukset vaihtelevat. 7000-sarjalaisten sidosaineena käytetään sinkkiä, ja tällä saavutetaan hyvät lujuusominaisuudet, mutta huono korroosionkestävyys. 6000-sarjalaisten sidosaineena käytetään magnesiumia ja piitä, joilla saavutetut ominaisuudet, kuten lujuus, korroosionkestävyys, hitsattavuus, koneistettavuus ja pursotettavuus, ovat hyvät. Seos onkin alan käytetyin. (Semiatiin 2005.) 6000-sarja sisältää 96 seosta seosaineiden pitoisuuksien ja niille asetettujen rajojen mukaan, kuten on esitetty

kuviossa 2. Pursossa käytetään seoksia 6060, 6063, 6005, 6082 ja satunnaisia testejä 1000-sarjan seoksia, joka on puhdasta alumiinia hyvän sähköjohtavuuden sovelluksiin.



KUVIO 2. 6000-sarjalaisten pitoisuuksien rajat (Fourmann 2019)

Alumiinin pursottamisen tärkeimmät vaiheet ovat billetin esilämmitys, pursotus, profiilin jäädyttäminen, veto, sahaus, keinovanhennus ja laadunvalvonta. Vaiheet voidaan toteuttaa lukemattomilla eri tavoilla, ja eräs vaikuttava tekijä linjan rakenteeseen on käytetyn puristimen koko. Puristimien tarjoama pursotusvoima vaihtelee välillä 1–200 MN, ja kun verrataan ääripään linjastoja keskenään, on yhteneväisyyksiä vaikea löytää. Kuvassa 3 on eräs esimerkki pursotuslinjasta.

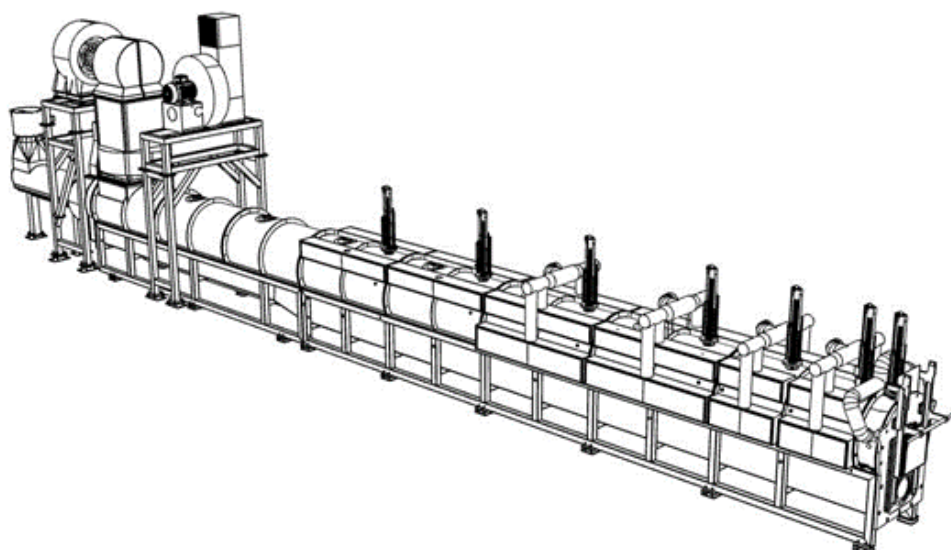


KUVA 3. Pursotuslinja (AEC 2018, muokattu)

### 3.1 Billetin lämmittäminen

Pursotuslinja alkaa kuvan 3 kaasu-uunin oikealla osittain näkyvällä laitteistolla, jossa alumiinikanget varastoidaan ja syötetään linjastoon. Tämä on toteutettavissa kallistuvalla pöydällä, kuten kuvassa, tai pysty- tai vaakakäyttöisellä haravavarastolla. Täältä 6–8 metriä pitkät alumiinikanget liikkuvat rataa pitkin lämmitettäväksi. Alumiini lämmitetään, jotta materiaali pehmenee ja sen kyky vastustaa muodonmuutosta heikkenee (Hauge & Reiso 2012). Lämpötila on yksi tärkeimmistä tekijöistä valmiin profiilin mekaanisiin ominaisuuksiin. 6000-sarjalaisilla tavoitellun lämpötilan tulisi tilanteen mukaan olla 420–510 °C. Lämmittäminen voi seoksen lämmönjohtokyvyn, kangen halkaisijan ja lämmitystekniikan perusteella kestää kolmesta minuutista kolmeenkymmeneen. Yleisimmät lämmitystekniikat ovat kaasu-uuni, sähköinen induktiouuni tai näiden yhdistelmä.

Kaasu-uuni on vaihtoehtoista halvin, ja siinä propaani- tai maakaasusta luodulla liekillä lämmitetään alumiinikankea. Lämmitysalue on jaettu itsenäisiin vyöhykkeisiin (kuvio 3), joista jokaisen lämpötila on erikseen ohjattavissa. Kylmä kanki lämmitetään kasvattamalla lämpötilaa vyöhykkeittäin vähitellen. (Torre Nieto 2010, 27.) Kaasu-uuni on 3–5 kertaa induktiouunia hitaampi ja harvinaisessa tapauksessa prosessin pullonkaula: keskimääräinen suorituskyky on noin 4 000–5 000 kg/h.



KUVIO 3. Kaasu-uuni (Turla A10.85 n.d.)

Induktiolämmitysprosessissa virtaa johtava kela synnyttää vaihtelevan sähkömagneettisen kentän, joka synnyttää lämpöä tuottavan pyörrevirran alumiiniin. Prosessiin voidaan vaikuttaa hallitusti ja tarkasti säätämällä kentän taajuutta ja tehoa. Induktiouuni (kuva 4) on teknisesti tehokkain ratkaisu, ja siinä mallin mukaan noin kuusi itsenäisesti ohjattavaa aluetta mahdollistavat tarkan lämpötilaeron muodostamisen billettiin. (SMS Elotherm n.d.)



KUVA 4. Induktiouuni (Extrutech n.d.)

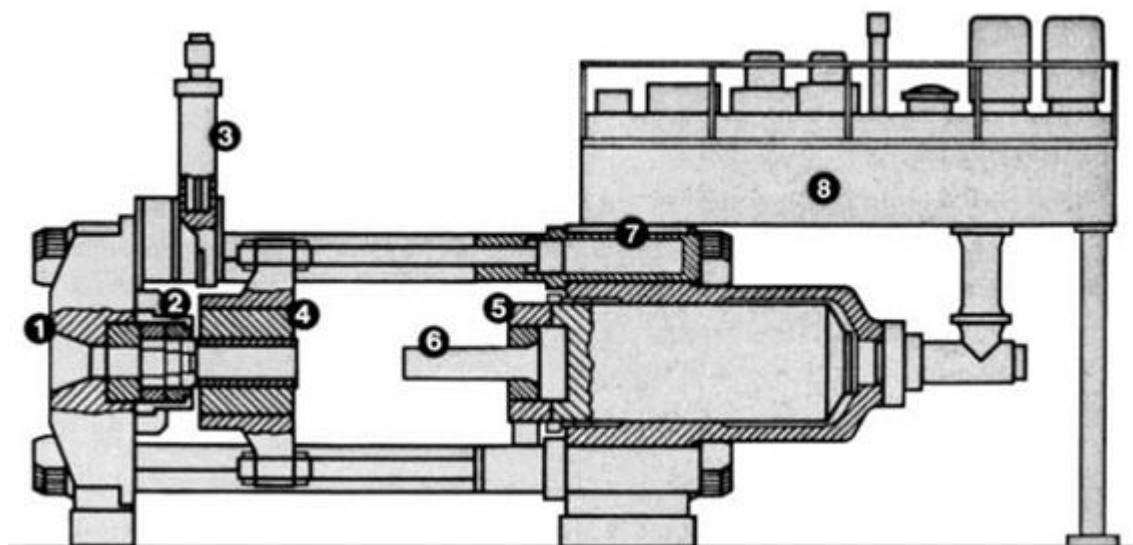
Tyypillisessä pursotuslinjassa kyse ei ole joko–tai-vaihtoehdoista vaan yhdistelmästä. Pursolla kanki aluksi lämmitetään kaasu-uunissa noin 420 °C:n tasalämpöön. Tämän jälkeen kuumaleikkuri katkaisee tuotannon vaativan mitan, joka puristimen rajoitteiden mukaan voi olla 600–1 300 mm pitkä. Billetin tuotantopituuden lopulta määrittelee profiilin metripaino, muoto ja tuotantopituus. Katkaistu alumiinibilletti siirretään induktiouuniin, jossa lämmitetään vaaditun tapersin eli billetin alku- ja loppupään lämpötilaeron mukaiseksi.

Isotermisessä pursotuksessa ulostulolämpötila eli profiilin lämpötila heti puristimen jälkeen pysyy vakiona. Tämän etuna on, että profiilin mekaanisissa ominaisuuksissa, mikrorakenteessa ja pinnanlaadussa ei ole vaihtelua, samoin se mahdollistaa suuremman pursotusnopeuden ja tuottavuuden. Jos pursotusprosessi tapahtuu vakionopeudella ja tasalämpöisellä billetillä, on profiilin lopun lämpötila kohonnut alusta prosessin kitkan nostamana. Eräs vaihtoehto tämän muuttamiseksi isotermiseksi on hiljalleen vähentää pursotusnopeutta, mutta

tuottavuuden kannalta on parempi lämmittää billetti taperiin, joka huomioi kitkan vaikutuksen lämpötilassa. Esimerkkinä billetin alkupään lämpötila on 480 °C ja taper 60 °C, jolloin loppupään lämpötila on 420 °C. Taperin suuruuden yleensä määrää profiilimuoto, ja enemmän kitkaa muodostavat putkityökalut vaativat suuremman taperin.

### 3.2 Pursotus

Lämmitetty billetti siirretään induktiouunista puristimen viereen, ja loader lataa tämän puristimeen. Edestä ladattavassa puristimessa billetti menee kuvion 4 kohdan 2 työkalupakan ja kohdan 6 männän väliin. Mäntä ottaa billetin pitopaineeseen, loader liikkuu pois ja kohdan 4 pesä etenee ympäröimään billettä. Takaapäin ladattavassa puristimessa billetti ladataan pesän takaa ja mäntä työntää sen sisään.



KUVIO 4. Puristimen kaavio (Saha 2000, 57)

Pursotussyklissä mäntä alkaa hydraulisella voimalla puristamaan billettä, joka laajenee pesän sisäseinien rajoittamaan alueeseen. Ainut reitti alumiinille virrata männän puristaessa on suulakkeen läpi, joka luo profiilin muodon. Syklin lopuksi mäntä liikkuu taakse, pesä avautuu ja kuvion 4 kohdassa 3 näkyvä jätelätkäleikkuri katkaisee jäljelle jäävän billetin suulakkeesta. Tähän ovat kerääntyneinä alkuperäisen billetin pinnan oksidit ja muut epäpuhtaudet. (Torre Nieto 2010,

28–29.) Pursolla jätelätkän pituus on 20–30 mm, mutta maailmalla on käytetty jopa 10 %:n osuutta billetin alkuperäisestä mitasta. Edellä kuvattu sykli on toistuva, ja tästä kuollut aika eli billetin vaihtoon kuluva aika on noin pari kymmentä sekuntia, kun kokonaiskesto voi tapauskohtaisesti olla minuutista neljään.

Suulakkeesta muodon saaneet kuumat profiilit ohjataan ulostuloradalla pullerin vetämänä jäähdytyksen läpi, kunnes valmis veto sahataan ja siirretään hihna-toimiselle jäähdytyspöydälle. Pullerjärjestelmä voi olla mekaanisesti tai automaattisesti toimiva, ja siinä voidaan käyttää yksittäistä tai tuplapulleria (kuva 5). Tuplapullerilla on positiivinen vaikutus tuottavuuteen. Puller on synkronoitu puristimen kanssa, ja se automaattisesti pysähtyy puristimen pysähtyessä. (AEC 2018.)



KUVA 5. Tuplapullerjärjestelmä (REISCH Maschinenbau n.d.)

### 3.2.1 Puristin

Nykypäivän puristimet toimivat lähes poikkeuksetta hydraulisesti, koska hydraulikka tarjoaa valtavan energiatihedden, joka mahdollistaa metallin muodonmuutosprosessin. Radiaali- tai aksiaalimäntäpumput pumppaavat hydraulisen nesteen eli öljyn prosessia kontrolloivan venttiilin läpi pääsylinteriin, jossa muodostunut paine saa männän liikkumaan (kuva 6). (Brightstar 2017.)



KUVA 6. 45 MN:n edestä ladattava SMS:n puristin (SMS Group 2019)

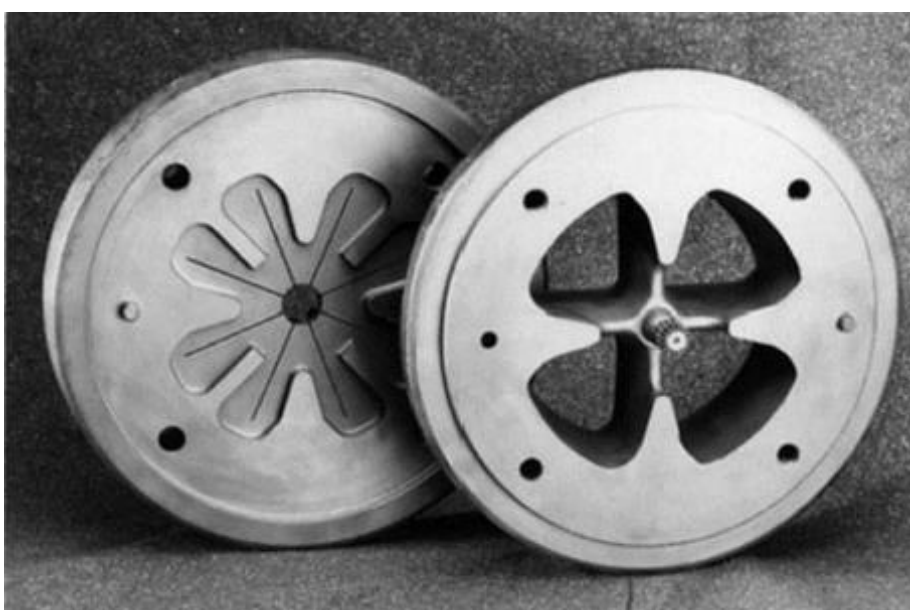
Mäntä on teräksinen sauva, joka on yhdistetty pääsylinteriin. Männän päässä on erillinen puskupala, jonka tehtävänä alumiinin työntämisessä pesän sisässä on olla suorassa kontaktissa alumiinin kanssa. Toiminnan kannalta on oleellista, ettei prosessin aikana sisälle jää kaasuja loukkuun. (Castool n.d.) Pesä on onttotäksinen kammio, joka muodostaa noin 0,5 mm:n välyksen puskupalan kanssa. Siihen on rakennettu erillinen 1–4-vyöhykkeinen lämmitys, jossa vyöhykkeiden suuruusluokka on 410 °C ja jossa samalla luodaan taper vyöhykkeiden välille.

Viime vuosina on kehitetty hybridipuristimia, kuten SMS:n HybrEx. Tässä männän puristava osuus edelleen toteutetaan hydraulikalla, mutta nopeat siirtoliikkeitä ohjataan sähköisillä servomootoreilla. Tekniikalla mainostetaan saavutettavan 35–55 %:n energiansäästöt, mutta mahdolliset kokoluokat ovat toisistaan 14–38 MN. (SMS Group n.d.)

Profiilien kokoa ja monimutkaisuutta viime kädessä rajoittavat puristimen koko ja sen tuottama voima. Nykyään kokoluokat eli käytettävien billettien halkaisijat vaihtelevat välillä 3–24 tuumaa ja niiden tuottama puristusvoima 1–200 MN. Puriossa on kaksi puristinta, jotka käyttävät 8- ja 9-tuumaisia billettejä, ja näiden maksimipuristusvoimat ovat 25 ja 35 MN.

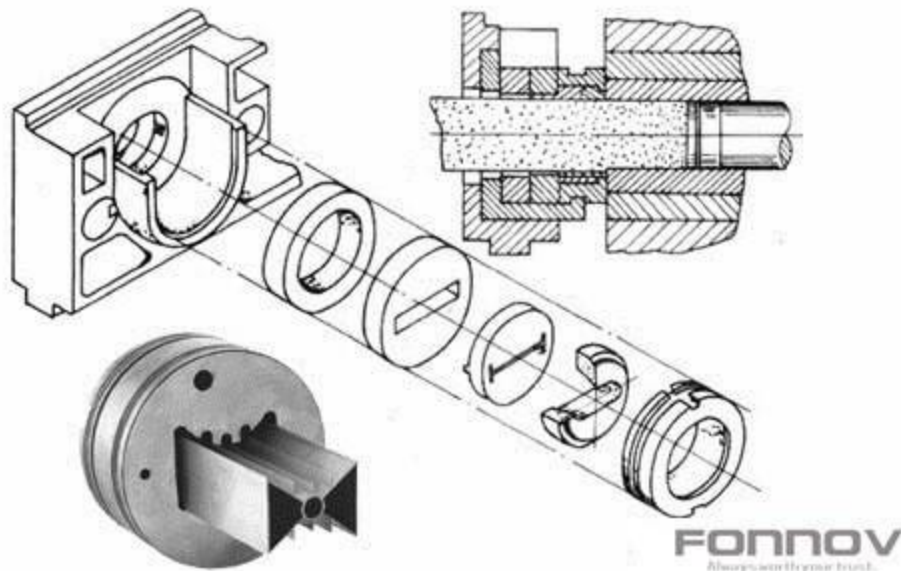
### 3.2.2 Suulake

Suulake luo valmiin profiilimuodon, ja prosessin kannalta se voidaan omaksua muotiksi. Profiilimuodon perusteella suulakkeet jaetaan suoriin ja putkityökaluihin ja näiden välimuotoihin eli suoraan profiiliin, joka muodon perusteella edellyttää putkimaisen työkalun. Suoralla profiililla tarkoitetaan muotoja, joissa ei ole onttoja kohtia. Tässä työkalun rakenne on yksinkertaisuudessaan reikä, jota ympäröivät tukipinnat muodostavat halutun profiilimuodon. Putkityökalussa profiilimuodon keskiosan määrittävä muoto on yhdistetty muuhun rakenteeseen silloilla (kuva 7), ja alumiinin virratessa se hitsaantuu siltojen jälkeen.



KUVA 7. Putkityökalu (Saha 2000, 102)

Työkalupakan osat on normaalisti valmistettu H-13-teräksestä (Vitex Extrusion n.d.). Suulake muodostuu aina profiilimuodon määrittävästä suuttimesta, rakennetta tukevasta tuesta ja mahdollisesti virtauksen helpottamiseksi käytetystä syöttölevystä. Ennen pursotusta suulake asetetaan kehälle ja lämmitetään työkalu-uunissa 460 °C:n lämpöön. Suulakkeen lisäksi työkalupakassa on takatuki, joka ohjaa aloituksessa profiilin ulostuloa ja tukee työkalupakkaa. Takatukia voi puristimen koon mukaan olla useita, joista jokaisessa reiän koko kasvaa ulostuloaukkoa lähestyessä. Pakan viimeisenä osana on takatyyny, jonka tehtävä on ohjata pursotuksen voimat puristimen tukilevyyn. Kokonaisuutta on havainnollistettu kuvassa 8.



KUVA 8. Työkalupakka (Fonnov 2020)

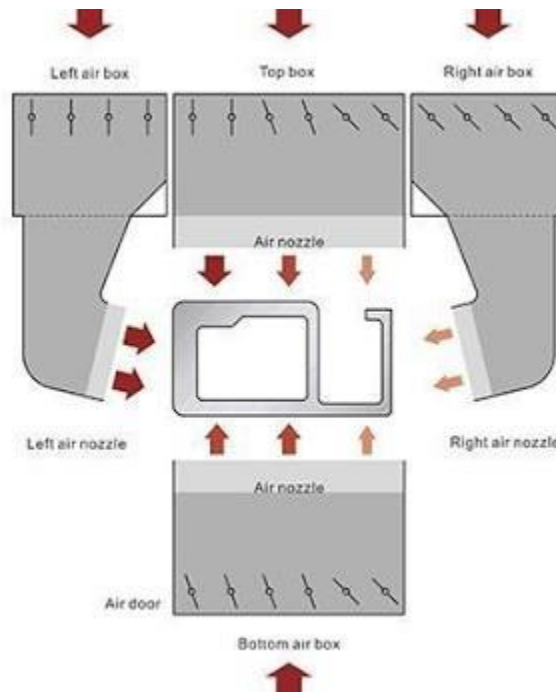
### 3.3 Jäähdytys

Jäähdytys on yksi prosessin tärkeimmistä tekijöistä, joka vaikuttaa profiilin saavuttamiin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten veto- ja murtolujuuteen. Ulostulo-  
lämpötila on 510–560 °C, ja seoksen mukaan profiili tulee jäähdyttää 3–10 °C:n/s jäähdytysnopeudella 250 °C:seen asti (AEC 2018). Jäähdytys voidaan toteuttaa ilmalla (kuva 9), vesisuihkulla, sumulla tai vesialtaalla. Näistä jokainen on edelleen käyttökelpoinen ratkaisu, mutta viime vuosina suurella paineella toimivat suihkujärjestelmät ovat yleistyneet. (Torre Nieto 2010, 29–30.)



KUVA 9. Turlan ilmajäähdytys (Turla A20.20 n.d.)

Haastavat, epäsymmetriset profiilimuodot voivat tapauskohtaisesti edellyttää optimoitua jäähdytystä. Nykyajan järjestelmälle onkin tyypillistä, että ilmavirran tai veden ylä-, ala- ja sivusuuntainen voimakkuus on säädettävissä (kuvio 5) ja sivusuuntaista jäähdytystä voi paikantaa nostamalla tai laskemalla huuvausta. Tällöin profiiliin ei synny epämuodostumia ja se ei väänny jäähdytyspöydällä sisäisten jännitysten seurauksena.



KUVIO 5. Ilmajäähdytyksen suunnan optimointi (Save Intelligent Equipment Co., Ltd. n.d.)

### 3.4 Veto ja sahaus

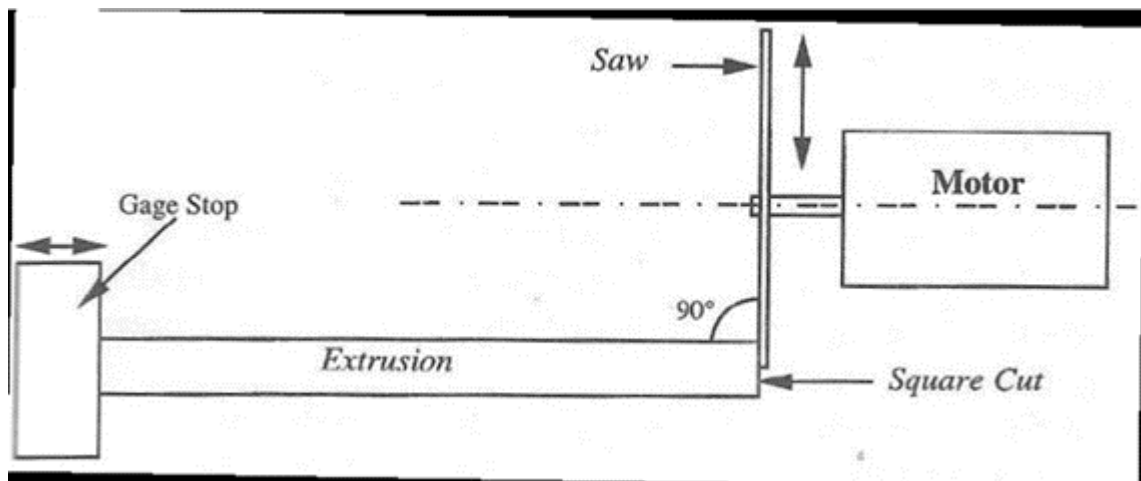
Kun pullersaha on sahannut profiiliin ja pulleri vienyt sen jäähdytyspöydälle, annetaan sen jäähtyä noin 50 °C:n lämpöön. Tämän jälkeen profiilit vedetään suoriksi (kuva 10), jotta jäähdytyksen aikaiset jäännösjännitykset ja vääristymät saadaan poistettua. Vetäminen tapahtuu ottamalla profiili molemmista päistä leukoihin kiinni ja venyttämällä sitä 1–3 %. (Torre Nieto 2010, 30.)



KUVA 10. Jäähdytyspöytä (Fourmann 2019)

Vetämisen aikana profiilin päädyt painuvat kasaan, mikä voi vääristää profiili-  
muotoa usean metrin matkalta riippuen koosta. Normaalisissa tuotannossa tämä  
huomioidaan romuttamalla profiilin molemmista päistä vähintään metrin matka.  
Vedon jälkeen useat profiilit kerätään lautoiksi, jonka leveyttä rajoittaa seuraava  
vaiheen tuotantosaha.

Tuotantosaha on nopeatoiminen pyörösaha, jossa syntyvät alumiinilastut pois-  
tetaan suurella paineella toimivalla imurilla. Sahauksen työkierto alkaa vetova-  
rojen sahaamisella, jonka jälkeen profiilit liikkuvat rullaradalla tuotantopituuteen  
asetettua stopparia vasten, profiilit sahataan, stoppari poistuu edestä ja profiilit  
liikkuvat tämän ohi (kuvio 6). Prosessi toistuu, kunnes lautta on sahattu.



KUVIO 6. Tuotantosahan toimintaperiaate (Torre Nieto 2010, 30)

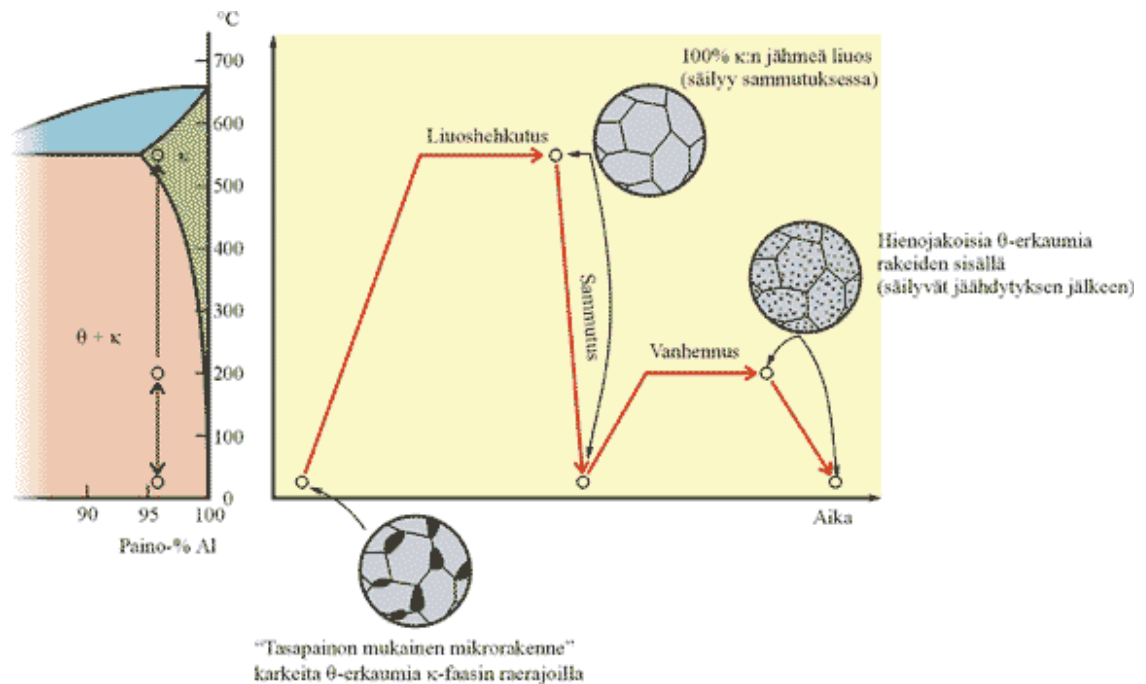
Tuotantosahan jälkeen lautat siirtyvät rullarataa pitkin stacker-järjestelmälle (kuva 11), joka on toimintaperiaatteeltaan suorakulmaisesti liikkuva manipulaattori. Järjestelmässä stacker nostaa lautan lattareiden varassa ja siirtyy vanhennushäkin ylle, johon sen laskee. Vanhennushäkin tukirakenteessa on lattareille tehty kolot, joihin ne asetetaan, eli päällekkäiset profiilit eivät ole kontaktissa toistensa kanssa. Täysi vanhennushäkki siirtyy tästä kohti keinovanhennusta.



KUVA 11. Stacker-järjestelmä (Turla n.d.)

### 3.5 Keinovanhennus

Alumiinin lujuuden kasvattaminen perustuu erkautumisilmiöön. Ilmiössä seos tulee jäädyttää yksifaasialueelta riittävän nopeasti, jotta toinen faasi ei ehdi erkautua ja materiaali jää metastabiiliksi jähmeäksi liuokseksi. Syntynyt rakenne muuttuu stabiiliksi joko luonnollisesti vanhentamalla huoneenlämmössä pitkän ajan kuluessa tai keinovanhentamalla korotetussa lämpötilassa (kuvio 7). (MOL-1210 2005.)



KUVIO 7. Erkaumakarkaisun kulku (MOL-1210 2005)

Keinovanhennus tapahtuu noin 185 °C:n lämmössä. Kestoon ja tarkkaan lämpötilaan vaikuttavat seos ja vaaditut ominaisuudet. Keskimääräinen kesto on 4–6 tuntia, mutta keinovanhennus esimerkiksi sinkkiseokselle, jolta edellytetään hyvää sähkönjohtavuutta, kestää 17 tuntia. Vanhennusunit voivat olla sivulta tai alhaalta ladattavia. Vanhennushäkit kerätään usean kappaleen nippuihin ennen uuneihin lataamista. Lataaminen voi tapahtua manuaalisesti tai automaattisesti ratoja pitkin. Vanhennusprosessin jälkeen häkit siirtyvät kohti pakkausta tai jatkojalostusta.

## 4 VARASTOINTI

Varastolla tarkoitetaan fyysistä tilaa materiaalin tai tuotteen säilömiseen, ja siihen liittyy hyviä ja huonoja puolia. Taloudellista etua varastoinnista voi saada logistiikka- ja ostokustannuksissa. Suuremmista ostoeristä toimittaja tarjoaa paljousalennuksen tai se vaikuttaa logistiikkakustannuksiin, kun kontin tilavuutta hyödynnetään tehokkaammin. Varastot tasapainottavat kysyntää ja tarjontaa sekä turvaavat tuotteiden tai materiaalin saatavuuden. Kysyntä ei ikinä ole tasaista, eivätkä valmistusketjujen toimitusajat ikinä ole täysin ennustettavissa. Jos arvio epäonnistuu, kauppoja menetetään ja maine toimijana kärsii, mitä kutsutaan puutekustannukseksi. Varastot mahdollistavat kyvyn reagoida kausivaihteluun sekä yksinkertaisempien ohjausjärjestelmien käytön, ja ne ovat tärkeä apuväline tuotannosuunnittelussa. Varastot toimivat toimitusketjun kriittisten rajapintojen puskurina. (Powell 2013, 7–8; Sakki 2003, 71–73; Stock & Lambert 2001, 228.)

Talouskielessä varastoista puhuttaessa tarkoitetaan yrityksen vaihtomaisuutta. Varastoiden ylläpitäminen on kallista, ja siihen liittyy aina riski. Varastoihin sitoutuu pääomaa, jolloin yrityksen maksuvalmius heikkenee ja toimintaa kehittäviin investointeihin on käytettävissä vähemmän pääomaa. Varastot kasvattavat työn määrää, tilan käyttöä ja materiaalinkäsittelyyn vaadittavien välineiden tarvetta, ja tuotteella on riski vanheta, esimerkkinä elintarvikkeet, mutta tuote vanhenee myös teknisesti. (Engels 2020.) Tarkemmin varastointikustannuksista luvussa 6. Varastot voivat estää lukuisten ongelmien havaitsemisen. Yrityksen palvelukyky voi varastoinnin turvin olla hyvä, mutta kun varastotasoa alennetaan, nousevat esiin ongelmat, kuten huono varastonohjaus, kysynnän ennustaminen ja tuotannon pullonkaulat. (Logistiikan maailma, A n.d.)

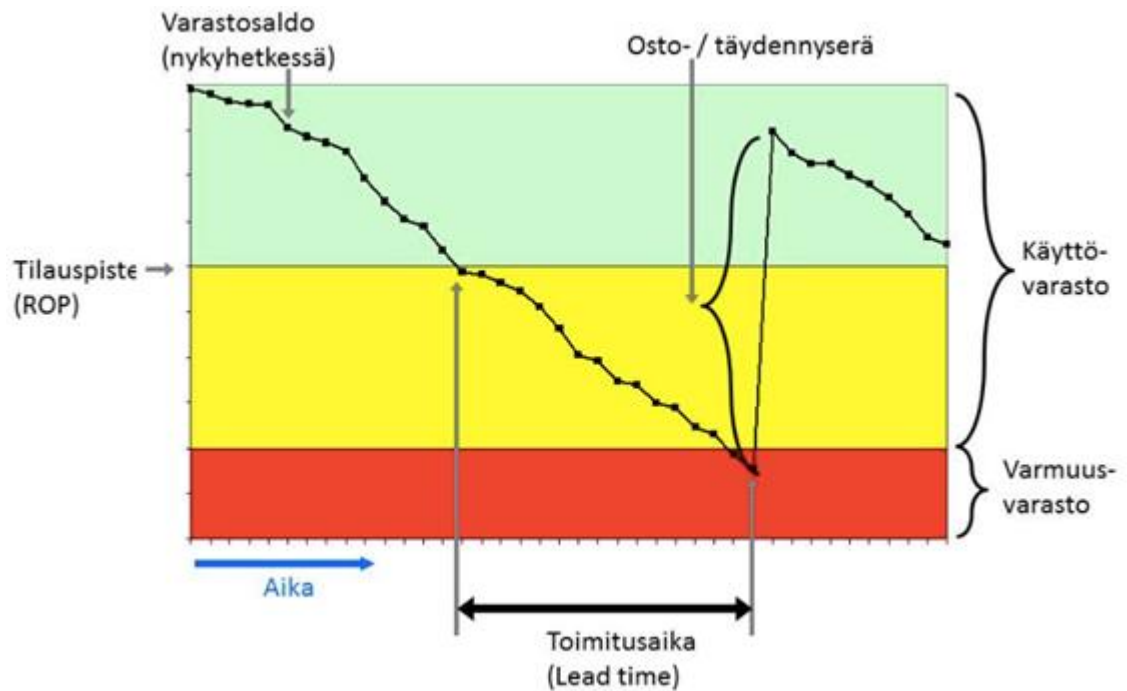
Varastonohjauksella hallitaan varastoon sitoutunutta pääomaa ja materiaalivirtoja. Sen tehtävä on estää yli- tai alivarastointi ja määrittää, kuinka valmis tuote varastoidaan. Mitä pidemmälle varastoitava puolivalmiste on valmistettu, sen suurempi on siihen sitoutuva pääoma. Varastotasoa suurempi merkitys toimituskykyyn on varastonohjauksella. Erinomaisella varastonohjauksella voidaan ylläpitää hyvää palvelukykyä pienellä varastotasolla. Tämä edellyttää hyvää

yhteistyötä toimitusketjun osapuolten välillä, jolloin tilaus-toimitus-prosessin kokonaiskestoa on myös mahdollista lyhentää. (Sakki 2003; Leino 2018.)

#### 4.1 Varastotyypit

Teollisuuslaitoksessa varastot ovat jalostamisen kannalta välttämättömät. Varastot voidaan jakaa jalostusketjun sijainnin tai käyttökohteen mukaisesti. Puhekielessä ja eri toimialan mukaisesti käyttövarastolla voidaan tarkoittaa raaka-ainevarastoa, keskeneräisen työn eli puolivalmisteverastoa tai valmis- eli tuotevarastoa. Näistä kahta ensimmäistä opinnäytetyössä nimitetään käyttövarastoksi ja tuotevarastoa valmisvarastoksi. Näiden lisäksi voidaan varastoida työvälineitä tai tarvikkeita. Edellä mainitut tyypit ovat aktiivivarastoja, joiden käyttö perustuu suunnitelmaan. Passiivivarasto on seurausta epäonnistuneesta suunnitelmasta tai vallan suunnittelemattomuudesta. Tästä esimerkkinä epäonnistunut varmuusvarastointi tai kausivaihteluun varautuva varasto. (Sakki 2003; Krajewski 2007.)

Varmuusvaraston tehtävä on toimia puskurina epävarmuustekijöitä vastaan, kuten kysyntäpiikkejä, omia tuotantokatkoksia tai alihankkijan valmistusongelmia. Näin pidetään yllä haluttu palvelukyky. Toimintaperiaatteeltaan varastosaldo vähenee ajan kuluessa, kunnes saavuttaa määritetyn tilauspisteen, jolloin tehdään täydennystilaus (kuvio 8). Oikein mitoitettuna täydennyserä saapuu samalla, kun varastosaldo saavuttaa varmuusvaraston rajan. Varmuusvarasto voi olla passiivivarasto, joka on täysin turhaa varastoa yritykselle. Näiden varastojen raja on kuitenkin häilyvä, ja niiden erona voidaan sanoa olevan menekin virheellinen arvio. (Hellman 2020.)



KUVIO 8. Varastoinnin käsitteitä (Logistiikan maailma, B n.d.)

Todellisuudessa tavarat ovat samalla tavalla käytettävissä varmuus- ja käyttövarastossa, mutta ajatustasolla jako on perustana ohjaamisessa ja laskennassa. Käyttövarastoa voi imuohjautuvassa tuotannossa syntyä, kun saapuvaa toimituserää ei välittömästi käytetä kokonaan. Siihen voivat vaikuttaa vaiheiden etäisyys ja kuljetuksen kustannus. (Sakki 2003.)

Perusvarastomalli, johon monet eräköön laskentamenetelmät perustuvat, on ajatusmalliltaan verrattavissa kuvion 8 tilanteeseen. Erona on mallin lähtöoletus. Tuotteen kysyntä on tasainen, toimitus tapahtuu kerralla ja toimitusaika on vakio. (Haverila, Kouri, Miettinen & Uusi-Rauvi 2009, 454).

## 4.2 Kysyntä

Kysyntä on suurin tekijä oikean ohjaustavan valinnassa. Se voidaan karkeasti jakaa itsenäiseen ja johdettuun kysyntään. Itsenäisellä kysynnällä tarkoitetaan kysyntää, johon ei vaikuta minkään muun nimikkeen tilanne, esimerkkeinä lopputuotteet tai varaosat. Näitä nimikkeitä voidaan ohjata visuaalisesti tai tilauspistemenetelmällä. (Logistiikan maailma, C n.d.)

Johdetulla kysynnällä tarkoitetaan sellaisen nimikkeen kysyntää, jonka määrää jokin toinen nimike. Esimerkiksi asiakas ostaa nimikettä A, joka on kokoonpano nimikkeistä B ja C. Tällöin nimikkeen A toimittamiseksi tulee tilata nimikkeitä B ja C, joiden kysynnän voi sanoa olevan johdettu. Näiden ohjaus pääasiassa tapahtuu tarvelaskennan avulla. On myös mahdollista ohjata visuaalisesti tai tilauspistemenetelmällä, kun kulutus on vähäinen. (Logistiikan maailma, C n.d.)

### 4.3 Materiaalinohjaus

Materiaalia on ohjattu ja varastoa täydennetty vuosien aikana lukemattomilla tavoilla, kuten Min–maks-menetelmällä, Kanbanilla, visuaalisella ohjauksella, jakson tarpeella, tilauspistemenetelmällä, tarvelaskennalla ja optimoivilla menetelmillä ja niin edelleen. Suuri osa näistä on toimintaperiaatteeltaan hyvin yksinkertaisia ja verrattavissa toisiinsa pienillä eroavaisuuksilla. Optimointialgoritmit ovat kehittyneemmästä päästä, mutta edellyttävät tarkan menekin tuntemisen. (Haverila ym. 2009, 454; Lahti 2015.) Työssä keskitytään tilauspistemenetelmään ja tarvelaskentaan, koska nämä ohjaavat toimeksiantajan toimintaa.

Tilauispistettä voidaan kutsua hälytysrajaksi. Varastosaldon alittaessa tilauspisteen tilataan täydennyserä. Nykyään tietojärjestelmät, kuten toiminnanohjausjärjestelmä, seuraavat reaaliaikaista tilannetta ja tekevät ostoehdotuksen, joka on helppo parametroida. Ostotapahtuma voidaan täysin automatisoida, mutta monesti tämä edellyttää ihmisen hyväksymisen. Tilauspisteen tärkein tehtävä on varmistaa, ettei varmuusvarasto pääse loppumaan ja tavoiteltu palvelukyky saavutetaan. Voimakkaassa kysynnän vaihtelussa muuttujan arvoa voidaan joutua vaihtamaan usein. (Logistiikan maailma, B n.d.; Hellman 2020.)

Tarvelaskenta (material requirements planning, MRP) on yksinkertaisimmillaan algoritmi, jossa lopputuotteen tarpeesta lasketaan sen osien ja materiaalin tarve eli johdettu tarve. Algoritmi hyödyntää varastotietoja ja tuoterakennetta, ja laskenta on sidottu aikaan. Tämän haasteet ovat monimutkaisuuden ja epävarmuuden hallinta. Syötettyjen perustietojen on tärkeää vastata todellisuutta, tai käyttö voi johtaa ali- tai ylivarastointiin. Tämän epävarmuutta normaalisti halli-

taan varmuusvarastolla, kuten tilauspistemenetelmässä, tai varmuusajalla, jossa täydennysaikaan lisätään ylimääräistä aikaa. (Logistiikan maailma, D n.d.)

Pahimmassa tapauksessa tarvelaskenta voi johtaa työntöohjaukseen. Tällöin materiaalinohjauksen perustana ei ole asiakkaan kysyntä vaan ennalta tehty suunnitelma ja valmistettavaa tuotetta työnnetään tai pusketaan markkinoille varastosta. Työntöohjauksessa keskeneräiselle tuotannolle tai varastolle ei ole asetettu ylärajaa. (Logistiikan maailma, E n.d.)

Suurin ero tarvelaskennan ja tilauspisteen välillä on aikanäkökulma. Tilauspiste seuraa nykytilan kehitystä, ja tarvelaskenta ennakoii tulevaa tarvetta nykytilanteeseen peilaten. Tarvelaskennan käyttö edellyttää usean lähtötiedon käyttöä, kuten tuoterakenne ja kysyntä. Lähtötietojen suurempi määrä on riski ja mahdollisuus. Virhe tiedoissa johtaa virheeseen tuloksessa, mutta tarkempi ohjaus-tarkkuus on mahdollinen. (Logistiikan maailma, D n.d.)

#### 4.4 Seuranta

Työn kannalta on oleellista selvittää pari oleellista varastoinnin käsitettä. Ensinnä keskivarasto. Varastolaskenta tehdään aina keskivarastoa käyttäen, koska tämän määrän voi keskimäärin olettaa olevan varastossa. Todellisuudessa kysyntä ei ole tasaista, ja todellinen pitkän ajan keskimääräinen arvo varastossa ei välttämättä ole tason puoliväli. Monet varastojärjestelmäohjelmistot laskevat arvon tarkasti ja nopeasti. Laskenta voidaan myös tehdä kaavalla (1).

$$\text{Keskivarasto} = \frac{\text{Täydennyserän koko} + \text{Varmuusvarasto}}{2} \quad (1)$$

Kiertonopeus kertoo varaston keskimääräisen vaihtuvuuden, ja yksi tapa laskea on jakaa vuosittainen tarve keskivarastolla (kaava 2). Seuranta voi perustua varaston arvoon tai nimikkeen kappalemääriin. Kun lasketaan varaston arvolla, tulee käyttää hankintahintaa tai omakustannushintaa. Yleisesti suurempi kiertonopeus on parempi, koska se kertoo tehokkaammasta varastohallinnasta. Optimaaliseen kiertonopeuteen kuitenkin vaikuttavat teollisuuden ala, tuote, sen

kate ja ohjauksen tavoitteet. Valmistavalla yrityksellä vuotuinen kierto nopeus on keskimäärin kuusi. Liian suuri kierto nopeus voi heikentää palvelutasoa ja kasvattaa täydennyskustannuksia. (Karrus 2001; Stevenson 2009.)

$$Kiertonopeus = \frac{Vuositainen\ tarve}{Keskivarasto} \quad (2)$$

Varaston kierto nopeuden rinnalla puhutaan varaston riitosta. Se kertoo, kuinka kauan keskimääräinen varasto riittää ilman lisätoimituksia. Luku on kierto nopeuden käänteisluku, kunhan ajanjakso huomioidaan.

#### 4.5 Palvelukyky määrittäminen

Palvelukyky eli toimitusvarmuus kertoo, kuinka suuri osuus kysynnästä pystytään tyydyttämään (kaava 3). Tyypin 1 palvelukyky perustuu myyntitapahtumien kokonaismäärään ja tyypin 2 toimitettujen kappaleiden kokonaismäärään (Hopp & Spearman 2008, 82). Tyyppi 1 on yleisemmin käytetty. Parempi palvelukyky parantaa aina yrityksen imagoa ja pienentää puuttekustannuksen osuutta. Palvelukyky parantuessa kasvavat yleisesti myös varastot ja varastointiin liittyvät kustannukset. Sadan prosentin palvelukyky on käytännön kannalta harvoin hyvä tavoite. (Logistiikan maailma, F n.d.)

$$Toimitusvarmuus = \frac{Ajoissa\ toimitetut\ tilaukset}{Kaikki\ tilaukset} \cdot 100\% \quad (3)$$

Palvelukyky kertoo, kuinka monta puutetta yrityksellä on varaa hyväksyä tilaus- ten lukumäärään nähden. Tähän voidaan vaikuttaa varmuusvarastotasolla, jonka määrittäminen perustuu todennäköisyyslaskentaan (kaava 4). (Hellman 2020.)

$$SS = k \cdot s \cdot \sqrt{L}, \quad (4)$$

jossa  $SS$  on varmuusvarasto,  $k$  on kerroin,  $s$  on kysynnän keskihajonta ja  $L$  on toimitusaika eli kesto tilaushetkestä täydennyksen saapumiseen.

TAULUKKO 1. Toimitusvarmuuden vaikutus kertoimeen

Tavoiteltu toimitusvarmuus	Kerroin ( <i>k</i> )
80 %	0,84
90 %	1,28
95 %	1,64
97 %	1,88
99 %	2,33
99,5 %	2,58
99,9 %	3,09

Kertoimeen *k* vaikuttaa tavoiteltu toimitusvarmuus (taulukko 1). Arvo perustuu normaalijakauman taulukkoarvoon. Kysynnän keskihajonnalla tarkoitetaan yksittäisten havaintojen keskimääräistä poikkeamista keskiarvosta (kaava 5). Kaavan (4) toimitusajassa ja keskihajonnassa tulee käyttää samaa aikayksikköä.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5)$$

Varmuusvaraston jälkeen voidaan laskea tilauspiste. Kuten kuviosta 8 voi päätellä, tilauspiste lasketaan lisäämällä varmuusvarastoon toimitusajan arvioitu kulutus (kaava 6). (Hellman 2020.)

$$R = D \cdot L + SS, \quad (6)$$

jossa *R* on tilauspiste ja *D* on keskimääräinen kysyntä samassa aikayksikössä toimitusajan kanssa.

Vaihtelevan kysynnän lisäksi toimitusaika voi sisältää vaihtelua. Toinen tapa tilauspisteen laskentaan on esitetty kaavassa (7). (Hellman 2020.)

$$R_2 = D \cdot L + k \sqrt{L \cdot s^2 + s_L^2 \cdot D}, \quad (7)$$

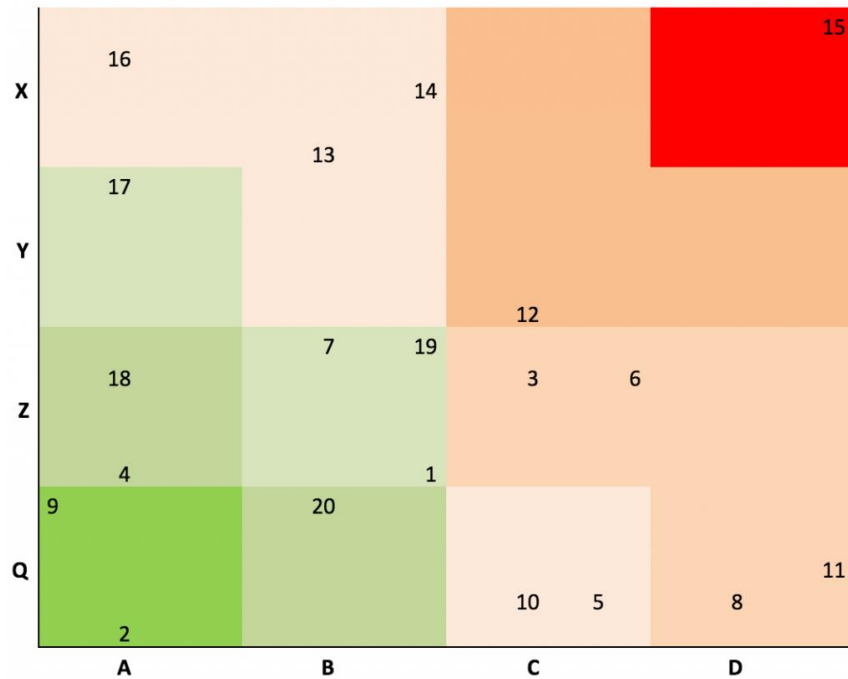
jossa *s<sub>L</sub>* on toimitusajan keskihajonta.

#### 4.6 ABC- ja XYZ-analyysit avuksi ohjaustarpeen määrittämiseen

Varastonimikkeiden määrän kasvu voi johtaa varaston kokonaisarvon hallitsemattomaan kasvuun. Joidenkin nimikkeiden loppumisella voi olla suuremmat taloudelliset seuraukset kuin toisilla. Ohjausresursseja ei ole rajattomasti käytössä. Nimikkeiden keskinäisten merkityssuhteiden selvitys luokittelun avulla on tärkeää. Luokittelu voi perustua myyntikatteeseen, kysynnän ennakoitavuuteen, hankinnan helppouteen, asiakkaiden määrään, tuotantovolyyymiin tai logistiikan tunnuslukuihin. (Logistiikan maailma, G n.d.)

Eräs työkalu jaottelun tekemiseen on ABC-analyysi. Analyysi perustuu 20/80-sääntöön, jonka ajatuksena on, että 20 % nimikkeistä tuottaa 80 % myynnistä. Näitä kutsutaan A-nimikkeiksi. B-ryhmään kuuluvat nimikkeet, joiden kumulatiivinen myynti on seuraavat 15 %, ja loput kuuluvat C-ryhmään. Tapauskohtaisesti on mahdollista käyttää D-ryhmää, jossa on alin 2 %. A-nimikkeiden kiertonopeuden tulee olla suuri, sitä on ohjattava menekin perusteella ja edellytyksenä on jatkuva seuranta. B- ja C-tuotteiden kiertonopeus voi olla pienempi, mutta turhan pääoman sitoutumista varastoon tulee välttää. (Logistiikan maailma, G n.d.)

ABC-analyysi ei ratkaise ongelmia, mutta tuo ne esiin. Suurta nimikekantaan tarkasteltaessa voi A-ryhmään kuulua tuottamattomia nimikkeitä. Tällöin on hyvä tarkentaa tarkastelua alaryhmillä. Kaksivaiheiselle analyysille on monta merkintätapaa, joista yleisin XYZ-analyysi. (Logistiikan maailma, G n.d.)



KUVIO 9. Kaksivaiheisen analyysin esimerkki (Logistiikan maailma, G n.d.)

Analyysi tehdään samalla tavalla kuin ABC-analyysi. Päätetään vertailuun käytettävä muuttuja ja ryhmitellään nimikkeet prosentuaalisen osuuden perusteella. Tämän jälkeen nimikkeet voidaan jakaa ruudukkoon (kuvio 9). Jokaiselle ruudulle suunnitellaan ohjaustapa. Esimerkiksi ruutujen BQ ja AZ nimikkeet 4, 18 ja 20 voidaan ohjata tarvelaskennan kautta tuotannosuunnittelun hyväksyen algoritmin laskentaehdotukset. Ruudun CY nimikkeen 12 ohjaamiseen voi riittää visuaalinen ohjausmenetelmä. Ruudun DX nimikkeen varastoinnin päättämistä tulee harkita. (Logistiikan maailma, G n.d.)

## 5 TALOUDELLINEN ERÄKOKO

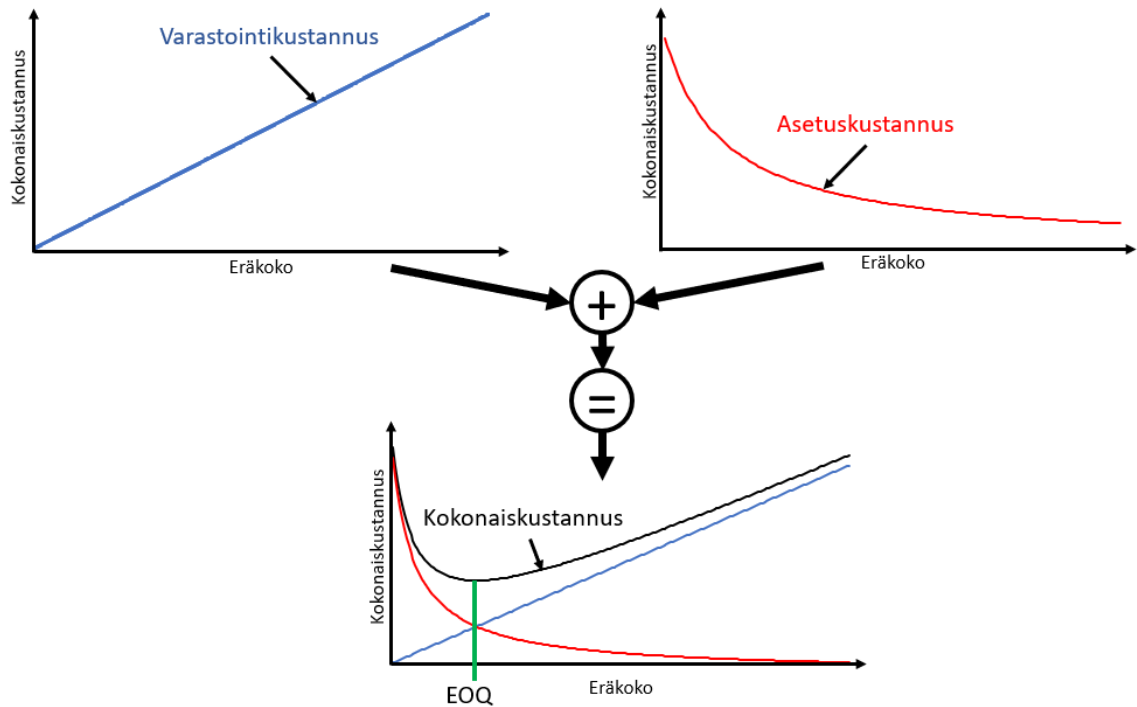
### 5.1 EOQ suunnittelun lähtökohtana

Varastot ovat olemassaolollaan aina kustannus ja riski. Varaston kasvaessa suurempi määrä pääomasta sitoutuu varastoon, varastoitava materiaali vaatii enemmän tilaa, materiaalin käsittelystä tulee ylimääräisiä kustannuksia, tuotteet vanhenevat ja niin edelleen. Nämä huomioiden on järkevää pienentää varastoa, jolloin vastaanotot ja toimitukset synkronoituvat keskenään paremmin. Toisaalta nimikkeen tuotannon aloittamiseen liittyy lähes aina kiinteä kustannus eli asetuskustannus. Varastojen pienentämisen seurauksena täydennyseräkoot pienevät ja täydennyksien määrä kasvaa, jolloin asetuskustannukset kumulatiivisesti kasvavat. Perusvarastointimallissa tulee selvittää näiden kahden kustannuksen tasapainotila, jolloin kokonaiskustannus on mahdollisimman pieni.

Kahden kustannuksen tasapainotilaa on tutkittu vuodesta 1913 alkaen, jolloin Ford W. Harris pohti ratkaisua edellä kuvattuun ongelmaan. Määrityksessä hän lähti liikkeelle kustannustekijöistä. Vuotuisen varastointikustannuksen hän laski yksikkökustannuksen ja keskimääräisen varaston koon tulona (kaava 8). (Hopp & Spearman 2008, 50.) Keskimääräisenä varaston kokona käytetään eräkoon puolikasta, jolloin varmuusvaraston varastointikustannusta ei huomioida. Kustannus kasvaa lineaarisesti eräkoon kasvaessa (kuvio 10). Asetuskustannus on tuotantotapahtumakohtaisesti vakio ja sen vaikutus on tuotannon alkuvaiheessa, eli eräkoon vaikutuksesta kustannus pienenee epälineaarisesti. Kokonaiskustannus on näiden summa (kaava 8). Kokonaiskustannus aluksi pienenee asetuskustannuksen pienentyessä, mutta kustannusten leikkauspisteen jälkeen varastointikustannuksen merkitys yhä korostuu (kuvio 10). (Mäkinen 2010, 25.)

$$\begin{aligned}
 TIC &= \text{Varastointikustannus} + \text{Asetuskustannus} \\
 &= \frac{Q}{2} \cdot h + \frac{A \cdot D}{Q},
 \end{aligned} \tag{8}$$

jossa  $TIC$  on kokonaiskustannus (total incremental cost),  $Q$  on eräkkö,  $h$  on yhden kappaleen vuotuinen varastointikustannus,  $A$  on asetuskustannus ja  $D$  on vuotuinen kysyntä.



KUVIO 10. Eräkoon kustannusjakauma

Kokonaiskustannuksen minimi etsitään derivoimalla kaavaa (8) eräkoon suhteen ja etsimällä derivaatan nollakohta. Kun yhtälö ratkaistaan eräkoon suhteen, saadaan vastauksena taloudellisen eräkoon (economical order quantity, EOQ) kaava (9). (Hopp & Spearman 2008, 53.) Kaava on alkujaan tarkoitettu ostamista varten, mutta tilauskustannuksen korvaaminen asetuskustannuksella tekee tästä käyttökelpoisen tuotannon näkökulmasta.

$$\frac{d}{dQ} \left( \frac{Q}{2} \cdot h + \frac{A \cdot D}{Q} \right) = 0$$

$$\frac{h}{2} - \frac{A \cdot D}{Q^2} = 0$$

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot D}{h}} \quad (9)$$

Kuten EOQ-kaavasta (9) voidaan havaita, siinä on yksinkertaistettu monia tuotantoon liittyviä tekijöitä. Kaavaa voidaan käyttää luotettavasti vain tapauksissa, jotka noudattavat seuraavia oletuksia:

- Tuotanto tapahtuu välittömästi. Kapasiteettiin ei liity rajoitteita, ja koko tilaus valmistuu samanaikaisesti.
- Toimitus tapahtuu välittömästi, ja toimitusaikaa ei tarvitse huomioida.
- Asiakkaiden kysyntä voidaan ennustaa. Ostojen koosta tai ajankohdasta ei ole epätietoisuutta.
- Asiakkaiden kysyntä on vakio.
- Asetuskustannus on tehtaasta ja tuotteesta riippumatta vakio.
- Valmistettavilla tuotteilla ei ole keskinäisiä sidoksia. Esimerkiksi usean komponentin kokoonpanoja ei tarvitse huomioida.

(Hopp & Spearman 2008, 51.)

Mikään todellinen tuotantotapahtuma ei ikinä noudata edellä mainittuja oletuksia, ja täydellistä ratkaisua EOQ-mallista ei kannata odottaa.

On hyvä huomioida, ettei mikään mallinnusmenetelmä pysty täydellisesti havainnoimaan todellisuutta, vaan jokaiseen liittyy oletuksia ja rajoitteita. Niiden tehtävä on helpottaa todellisen ongelman ymmärtämistä, kuten EOQ helpottaa kustannustekijöiden keskinäisen suhteen havainnointia. Täydellisen asetus- tai varastointikustannuksen selvittäminen on hyvin haastavaa, ja lähtöarvon virheestä seuraa virhe tulokseen. (Hopp & Spearman 2008, 54.) Tyypillisin käyttövirhe on, että varastointikustannus arvioidaan liian pieneksi, ja toiminnan tehokkuuden kannalta saatujen tulosten voidaan arvioida olevan 2–4 kertaa liian suuria (Haverila ym. 2009, 456).

### 5.1.1 EOQ-alueen herkkyysanalyysi

Kustannuksien perusteella laskettua taloudellista eräkokoja ei aina ole kannattavaa tai edes mahdollista noudattaa. Tuotanto voi olla valmistettavissa vain tiettyyn palettiin mahtuvan kappalemäärän kerrannaisina, tuotteet kannattaa varastoida vain täysissä häkeissä, logistisesti toimitus kannattaa tehdä vain täysinä kontteina... On hyvä tutkia, kuinka lasketusta arvosta poikkeaminen vaikuttaa kokonaiskustannukseen. Herkkyysanalyysiä varten tulee selvittää optimikustan-

nus taloudellisen eräkoon tilanteessa (Virtanen 2001, 23). Kustannus on johdettu kaavassa (10).

$$\begin{aligned}
 TIC &= \frac{Q}{2} \cdot h + \frac{A \cdot D}{Q} \\
 &= A \cdot D \sqrt{\frac{h}{2 \cdot A \cdot D}} + \frac{h}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot D}{h}} \\
 &= \sqrt{2 \cdot A \cdot D \cdot h}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Seuraavaksi määritetään mielivaltaista erokokoa kuvaava  $Q'$ , joka voi olla pienempi tai suurempi kuin taloudellinen eräko  $Q$ . Selvitetään mielivaltaisen eräkoon kustannuksen suhde taloudellisen eräkoon kustannukseen (kaava 11). (Hopp & Spearman 2008, 54).

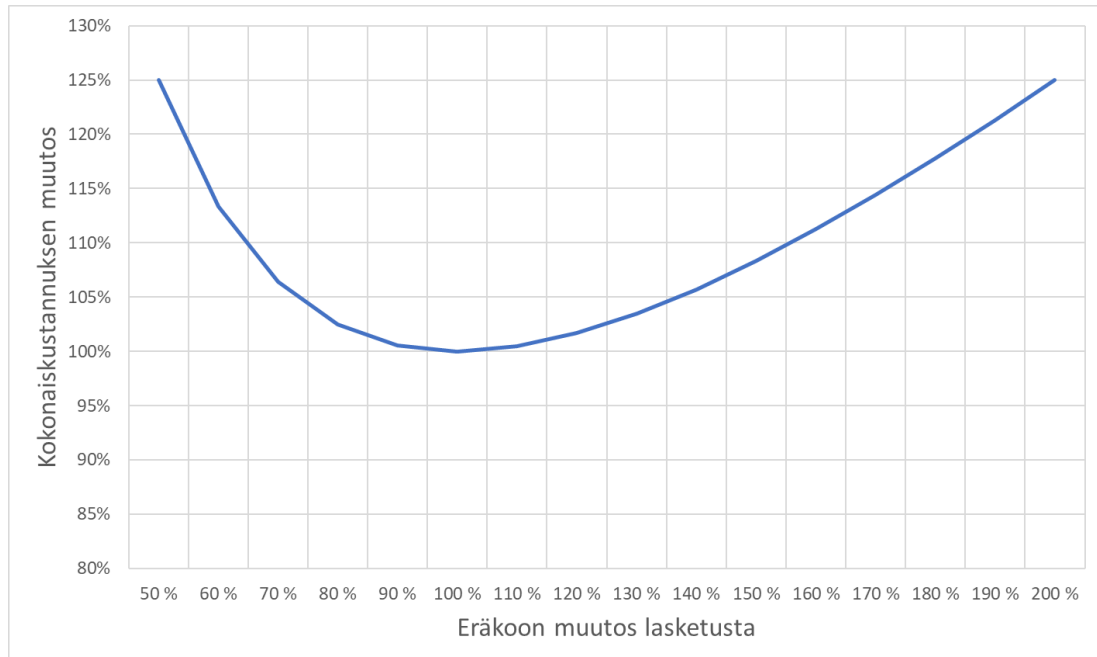
$$\begin{aligned}
 \frac{TIC(Q')}{TIC(Q)} &= \frac{\frac{Q'}{2} \cdot h + \frac{A \cdot D}{Q'}}{\sqrt{2 \cdot A \cdot D \cdot h}} \\
 &= \frac{Q'}{2} \sqrt{\frac{h^2}{2 \cdot A \cdot D \cdot h}} + \frac{1}{Q'} \sqrt{\frac{A^2 + D^2}{2 \cdot A \cdot D \cdot h}} \\
 &= \frac{Q'}{2} \sqrt{\frac{h}{2 \cdot A \cdot D}} + \frac{1}{2 \cdot Q'} \sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot D}{h}} \\
 &= \frac{Q'}{2 \cdot Q} + \frac{Q}{2 \cdot Q'} \\
 &= \frac{1}{2} \left( \frac{Q'}{Q} + \frac{Q}{Q'} \right)
 \end{aligned} \tag{11}$$

Lasketaan tilanne, jossa käytetty eräko on 50 % taloudellista suurempi eli  $Q' = 1,5Q$ . Kokonaiskustannuksen muutoksen laskenta tapahtuu kaavalla (11).

$$\frac{TIC(Q')}{TIC(Q)} = \frac{1}{2} \left( \frac{Q'}{Q} + \frac{Q}{Q'} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1,5Q}{Q} + \frac{Q}{1,5Q} \right) = 1,0833$$

Kun eräko kasvaa 50 %, kokonaiskustannus kasvaa 8,3 %. Kuviossa 11 on hahmoteltu, kuinka eräkoon muutos vaikuttaa kokonaiskustannukseen. Vaaka-

akseliin on merkitty prosentuaalinen eräkoon muutos alkuperäisestä ja pystyakseliin kokonaiskustannuksen prosentuaalinen muutos.



KUVIO 11. EOQ eräkoon muutoksen vaikutus kokonaiskustannukseen

Kaaviosta voidaan havaita, kuinka eräkoon muutos vaikuttaa kokonaiskustannukseen vain vähän. Malli on huomattavasti herkempi poikkeamille optimiratkaisun ala- kuin yläpuolella. Herkkyysanalyysi pätee vain optimin välittömässä läheisyydessä. (Virtanen 2001, 56.)

### 5.1.2 EOQ:n jalostaminen

EOQ on yli 100 vuotta myöhemmin edelleen suosituin vaihtoehto eräkoon laskentaan ongelman yksinkertaistamisen ansiosta. Tosin kuten aiemmin mainittiin, mallin asettamat oletukset tuotannolle eivät missään mielessä ole realistiset. Mallia on kehitetty alkuperäisestä korvaamalla joitain asetettuja oletuksia ylimääräisillä muuttujilla. Esimerkiksi puutekustannus, ostoerien paljousalennus, logistiikkakustannus, ennustamaton kysyntä, tuotanto ei tapahdu välittömästi ja niin edelleen. Vuosien varrella vaihtoehtoisia EOQ-malliin perustuvia malleja on kehitetty lukuisia, joista on muutama mainittu taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Eräkoon malleja kriteerien mukaan jaoteltuna (Chahal, Gupta, Jindal & Singh 2017, 314)

Author	Year	Criterion												
		Back-Ordering Cost	Demand	Demand (Deterministic)	Demand (Stochastic)	Holding Cost	Lead Time	Lead Time (Procurement)	Lead Time (Vendor)	Lead Time (Transportation)	Ordering Cost	Penalty Cost/Shortage Cost	Transportation Cost	Unit Cost
Tersine et al.	1992	√				√		√						√
Gunasekaran et al.	1993		√										√	√
Zhuang	1994		√			√								√
Chiu	1995					√	√	√			√	√		
Wee	1995			√		√					√	√		√
Chiang and Gutierrez	1996		√			√						√		
Dohi et al.	1997					√		√				√		
Shim	1997		√			√					√	√		√
Andijani and Al-Dajani	1998					√								√
Schultz and Johansen	1999	√				√					√			
Heijden	2000					√		√						
Garget al.	2001		√			√					√	√		
Tekin et al.	2001		√			√					√			
Mahadevan et al.	2003					√					√			
Axsater	2003	√			√	√	√		√	√		√		
Ghalebsaz-Jeddi et al.	2004					√						√		√
Yang	2004			√		√					√			√
Yang and Wee	2006					√					√			√
Chen and Kang	2007		√			√					√			√
Huang et al.	2010			√		√		√				√		√
Pishvae and Torabi	2010		√											√
Thangam and Uthayakumar	2010	√				√						√	√	
Glock	2011			√		√						√		
Li and Ryan	2012					√							√	√
Hartmut and Sahling	2013	√	√			√	√							
Moussawi-Haidar and Jaber	2013		√			√					√			√
Ouyang et al.	2013		√			√					√	√		

Eräessä ensimmäisistä jalostetuista malleista oletettiin, ettei tuotanto tapahdu välittömästi, vaan on olemassa vakiotuotantonopeus, joka voidaan ennustaa. Mallia nimitetään taloudelliseksi tuotantomääräksi (economic production quantity, EPQ), mutta mallista käytetään myös nimityksiä EPL, EBQ, EMQ ja POQ (Leino 2018, 29). Oletuksena tuotantonopeus on kysyntää pienempi, joten järjestelmässä on kapasiteettia vastaamaan kysyntään. Stevenson (2009) on määrittänyt mallin kaavan (12) mukaan.

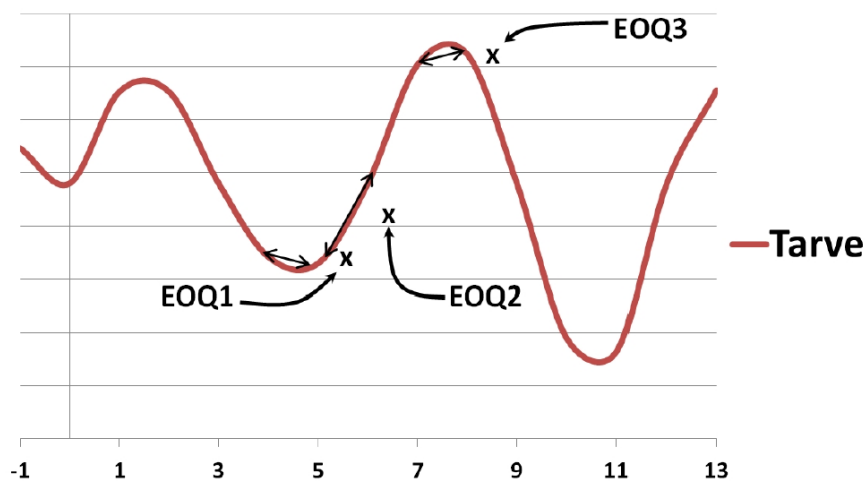
$$EPQ = \sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot D}{h}} \sqrt{\frac{p}{p - u}}, \quad (12)$$

jossa  $p$  on tuotantonopeus ja  $u$  on kysyntä samalla ajanjaksolla kuin  $p$ .

Saadut tulokset ovat suurempia kuin EOQ-mallissa, koska valmistamiseen kuuluu aikaa ja jälkimmäinen neliöjuuri saa arvoksi aina vähintään yhden. Jos tuotantonopeus kasvaa äärettömän nopeaksi, kaava vastaa EOQ:ta. (Leino 2018, 30; Hopp & Spearman 2008, 58; Mäkinen 2010, 30.)

## 5.2 Dynaamiset laskentamenetelmät

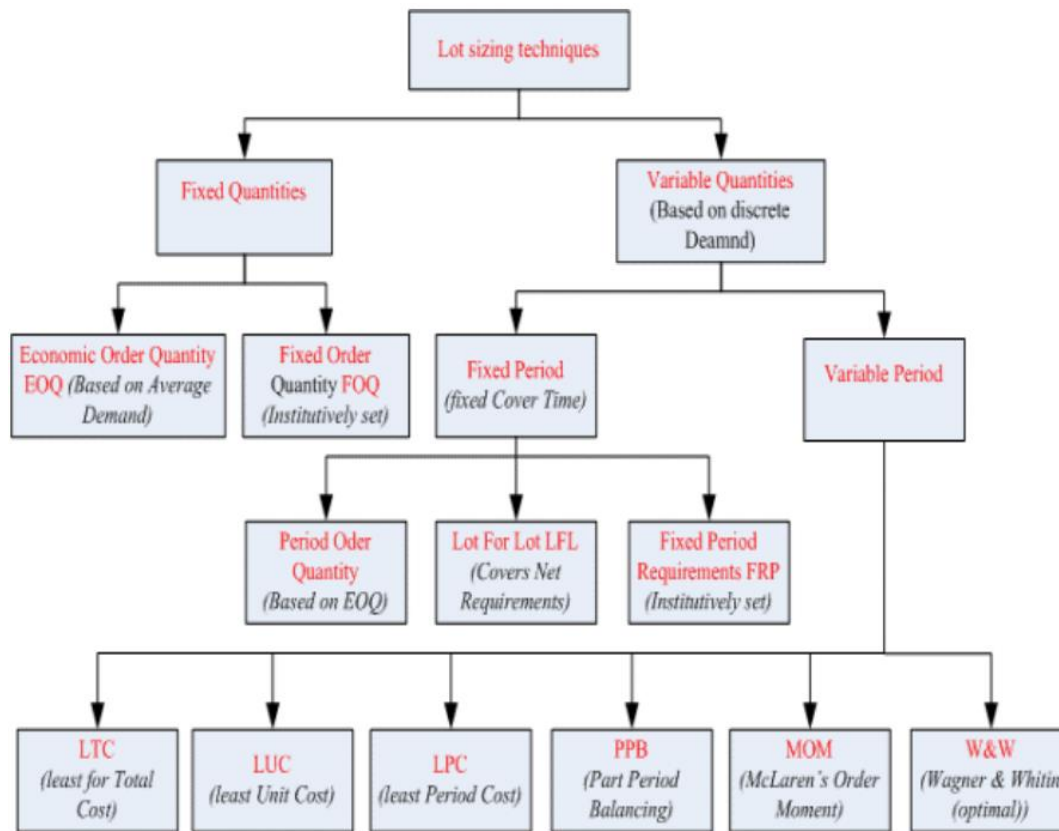
Eräs merkittävä EOQ:n käytännön ongelma on sen huono soveltuvuus vaihtelevan kysynnän tilanteisiin. Kysynnän ei tarvitse muuttua merkittävästi, jotta mallin ohjaus muuttuu jäljessä reagointiin. Tämän takia kaavassa saatetaan vuoden kysynnän sijasta käyttää 1–2 kuukauden kysyntää, jonka käytössä edelleen on ongelmia. Esimerkkinä kuviossa 12 on havainnoitu, kuinka tarpeen muuttuessa EOQ-mallin laskemat parametrit ovat kysynnästä jäljessä. Kysynnän huipussa EOQ ohjaa hankkimaan liian suuria eriä, jolloin varastointikustannukset kasvavat. Kun kysyntä kääntyy kuopassa nousuun, EOQ ohjaa hankkimaan liian pieniä eriä ja on olemassa riski varaston loppumiselle. (Happonen 2011, 23–24.)



KUVIO 12. EOQ:n reagointi tarpeen muutokseen (Happonen 2011, 24)

Vaihtelevaa kysyntää varten on luotu useita malleja (kuvio 13), ja osassa on huomioitu lisäksi vaihteleva ajanjakso. Nämä dynaamiset mallit perustuvat joko heuristiikkaan tai tuloksen optimointimenettelyyn. Heuristiikassa sovelletaan ongelmanratkaisussa valmiiksi mietittyjä ratkaisumalleja. Ratkaisumalleja vertailemalla pyritään pääsemään riittävän hyvään ratkaisuun. Tietotekniikan kehitty-

minen on mahdollistanut usean mallin nopean vertaamisen keskenään. (Özdemir n.d.; Vuorio 2019, 16.)



KUVIO 13. Eräkoon laskentamenetelmät (Jain & Agarwal 2013, 3)

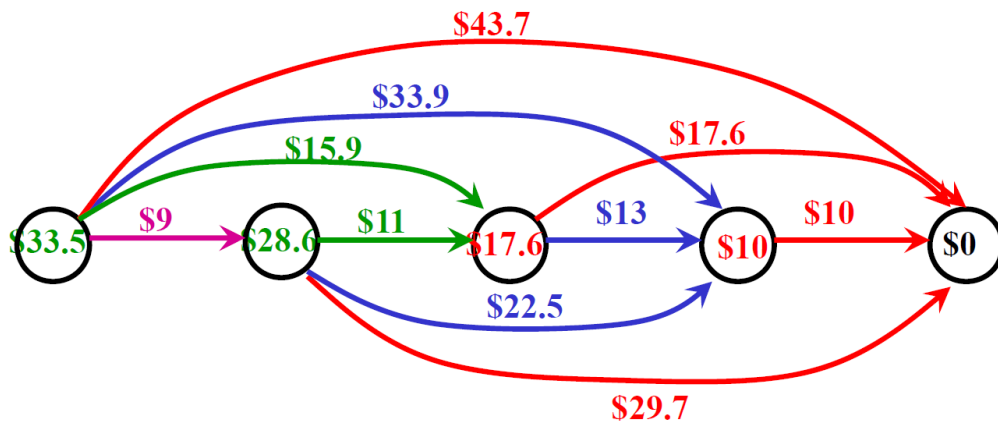
### 5.2.1 Wagner–Whitin-menetelmä

Yksi ensimmäisistä dynaamisista laskentamalleista oli Harvey M. Wagnerin ja Thompson M. Whitinin vuonna 1958 kehittämä algoritmi, josta nykyään käytetään nimitystä Wagner–Whitin-menetelmä. Menetelmässä lasketaan kaikki mahdolliset toimintatavat tarkasteltavalla ajanjaksolla ja arvioidaan lasketuista arvoista kokonaistilanteen optimi. Laskenta tapahtuu ajanjaksokohtaisesti, ja ajanjakso voi olla päivä, viikko tai kuukausi. Jokaiselle ajanjaksolle tulee laskea kokonaiskustannus, joka on asetuskustannuksen ja varastointikustannusten summa. Tuotantoa ei tarvitse olla jokaisella ajanjaksolla, vaan esimerkiksi ensimmäisellä viikolla voidaan valmistaa kahden tulevan viikon tuotteet varastoon. (Hopp & Spearman 2008, 60–65.) Ajanjaksokohtainen kokonaiskustannus saadaan laskettua kaavalla (13) (Özdemir n.d.).

$$TIC(t, m) = A + h \left( \sum_{j=t+1}^m (j - t) D_j \right), \quad (13)$$

jossa  $TIC(t, m)$  on periodin  $t$  kokonaiskustannus  $m$ -periodin ajaksi.

Kuviossa 14 on visualisoitu laskennan vaiheet. Ympyröillä on esitetty viisi ajanjaksoa, joiden sisälle on merkitty pienin kokonaiskustannus tuotannon valmistamiseksi siihen vaiheeseen. Punaisilla nuolilla on kuvattu kaikki kustannusmahdollisuudet viimeiseen solmukohtaan eli ajanjaksoon. Jos ensimmäisessä solmukohtassa valmistetaan koko periodin tuotanto, asetuskustannuksen ja varastointikustannusten summa on 43,70 \$. Sinisellä on eri mahdollisuudet toiseksi viimeiseen solmukohtaan ja niin edelleen. Tulokseksi tällöin saadaan, että tuotanto kannattaa valmistaa ensimmäisellä ja kolmannella periodilla, jolloin kumulatiiviset kustannukset ovat 33,50 \$. (Powell 2013, 54–60.)



KUVIO 14. Wagner–Whitin-menetelmän ongelmanratkaisun kuvaus (Powell 2013, 59)

W–W-mallissa tuotannolle ja käytölle on asetettu seuraavat oletukset:

- Mallin käytön aikana arvioidaan yhtä tuotetta kerrallaan.
- Valmistuksen kustannukset ovat vakiot.
- Varasto ei saa loppua, ja näin ei ole myöhästymissakkoa.
- Tuotteiden valmistamiseen vaadittava kapasiteetti on heti käytettävissä.
- Täydennystilauksen toimitusaika on vakio.

(Vuorio 2019, 22–24.)

Mallin hyvä puoli on, että siinä voidaan hyödyntää menekin tarkkoja ennusteita ja kustannukset voidaan laskea funktioiden avulla, jolloin käyttö on nopeaa. Sen heikkouksia on, että se olettaa kysynnän täysin ennustettavaksi, suunnitelman taustana on varastotasojen tyhjentäminen ennen uutta tilausta, mikä voi johtaa puutekustannuksiin, ja laskenta voi olla haastavaa ja aikaa vievää, kun sitä tehdään useille tuotteille, joilla on keskinäisiä rajoituksia. (Powell 2013, 61–62.)

### 5.2.2 Silver–Meal-menetelmä

Silver–Meal-menetelmä on yksi tunnetuimmista ja käytetyimmistä heuristisesta laskentamenetelmistä toimitusketjun ja logistiikan hallintajärjestelmään (Powell 2013, 51). Mallin kehittivät Edward A. Silver ja H.C. Meal vuonna 1973. Sen perusajatus on, että siinä pyritään löytämään edullisin keskimääräinen yksikkökustannuksen ratkaisu, vaikka se ei olisi kokonaistilanteen kannalta optimaalisin. (Meal & Silver 1973.) Keskimääräisen yksikkökustannuksen laskenta tapahtuu kaavalla (14).

$$C(m) = \frac{1}{m} \left( A + h \cdot \sum_{t=0}^{m-1} t \cdot D_t \right), \quad (14)$$

jossa  $C(m)$  on keskimääräinen yksikkökustannus  $m$  jakson aikana ja  $D_t$  on ennustettu kysyntä kyseiselle jaksolle, jossa  $t$  on  $0 \leq t < T$ , ja  $T$  on suunnitteluhorisontti.

Laskenta aloitetaan jaksosta  $m = 1$  ja lasketaan jakson keskimääräinen kustannus  $C(m)$ . Jakson arvoa kasvatetaan, kunnes suunnitteluhorisontti  $T$  on käyty läpi tai seuraavan jakson keskimääräinen kustannus on nykyistä kustannusta suurempi  $C(m+1) > C(m)$ . Tällöin eräkokoa  $Q_i$  on  $D_1 + D_2 + \dots + D_m$ . Laskenta jatkuu tämän jälkeen jaksosta  $m + i$ , ja laskentaa jatketaan, kunnes suunnitteluhorisontti on käyty läpi. (Özdemir n.d., 18–25; Vuorio 2019, 25.)

### 5.2.3 (Q, R) -malli

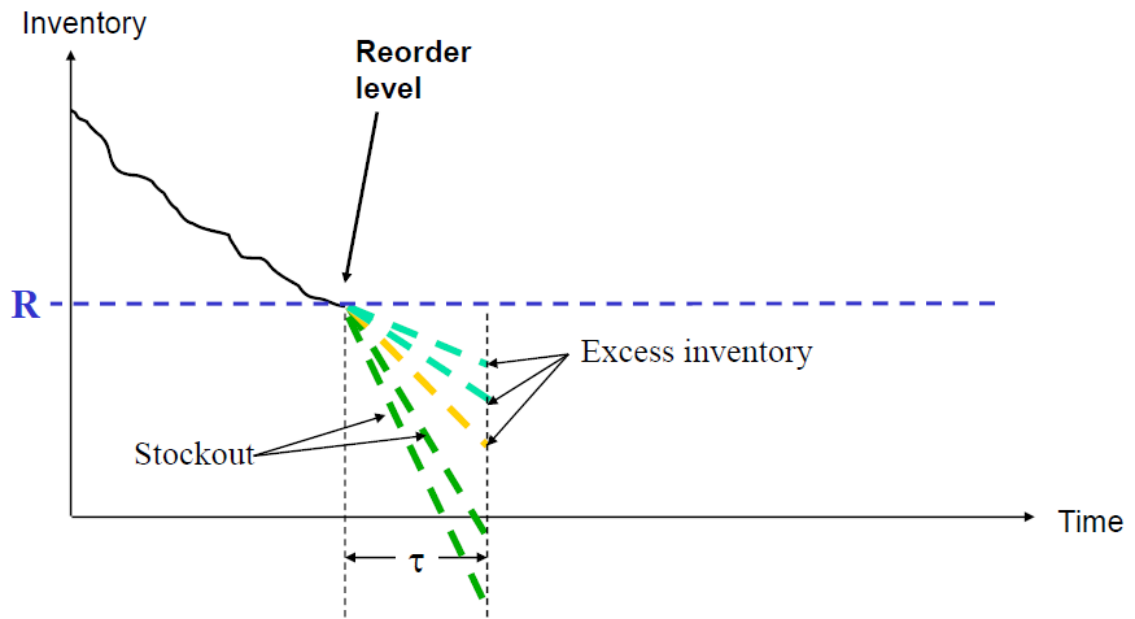
(Q, R) -malli pyrkii samanaikaisesti kertomaan, kuinka suuri täydennyserän tulisi olla ja koska se tulisi tapahtua eli mikä on tilauspiste. On hyvä muistaa muuttujien vaikuttavan kahteen erityyppiseen varastoon. Täydennyserän koko vaikuttaa sykliseen varastoon, jonka perustana on varastointi- ja asetuskustannus. Tilauspiste vaikuttaa varmuusvarastoon, jonka tehtävä on pienentää varaston loppumisen todennäköisyyttä.

Kuten aiemmilla malleilla, täydelliseen hyödyntämisen on asetettu oletukset:

- Tuotteita voidaan analysoida itsenäisesti, eli eri tuotteiden välillä ei ole vaikutussuhteita.
- Tuotteita ostetaan yksi kerrallaan eikä erissä.
- Täydennystilauksen toimitus tapahtuu ennustettavasti, ja tämän läpimenoaika on vakio.
- Kysyntää voidaan ennustaa jatkuvalla satunnaismuuttujalla.

(Hopp & Spearman 2008, 72–79.)

Malli pyrkii vastaamaan vaihtelevaan kysyntään todennäköisyyslaskennan avulla. Lähtökohtana on, että kysyntä täydennystilauksen aikana on normaalijakautunut, ja näin voidaan ennakoida monesti, että tuote loppuu varastosta täydennystilauksen aikana (kuvio 15). (Gel & Keskinocak 2013, 3–4.) Tämän takia mallin käytön edellytys on, että tilausten on tapahduttava yksi kerrallaan eikä erissä, jotka voivat tuottaa ennakoimattomia puutteita. Toisena heikkoutena ovat pienen kysynnän nimikkeet, joiden ei voi olettaa seuraavan normaalijakamaa mutta joiden varastomäärät ovat pienet.



KUVIO 15. Kysyntä täydennystilauksen aikana (Gel & Keskinocak 2013, muokattu)

Mallissa tilauspisteen määrittäminen voi perustua puutekustannukseen tai tyyppin 1 tai 2 palvelukykyyn. Puutekustannuksen ajatusmallissa varaston loppumiseen liittyy kiinteä kustannus, jonka perustana voivat olla menetetty kauppa, ylimääräiset kirjanpitokustannukset ja yrityksen maineen menetys. Kustannuksen määrittäminen on haastavaa, ja tarkkaa arvoa on mahdoton saada. (Gel & Keskinocak 2013; Hopp & Spearman 2008; Luoma 2018, 19–20.)

Erona EOQ-malliin on, että  $(Q, R)$  -mallissa tulee varastointikustannuksessa huomioida varmuusvaraston määrä. Puutekustannuksen lähtökohtana yksikkökohtainen kustannus on kerrottu todennäköisellä myöhässä olevalla määrällä. Kokonaiskustannuksen funktio on esitetty kaavassa (15). (Gel & Keskinocak 2013.)

$$\begin{aligned}
 TIC &= \text{Varastointi} + \text{Asetus} + \text{Puutekustannus} \\
 &= h \left( \frac{Q}{2} + R - D \cdot \tau \right) + \frac{A \cdot D}{Q} + p \cdot \frac{n(R) \cdot D}{Q}, \quad (15)
 \end{aligned}$$

jossa  $R$  on tilauspiste,  $\tau$  on täydennystilaukseen kuluva aika,  $p$  on puutekustannus ja  $n(R)$  on ennakoitu puute syklin aikana (kaava 16).

$$n(R) = \sigma \cdot L(z), \quad (16)$$

jossa  $\sigma$  on kysynnän varianssi täydennystilauksen aikana, jonka saa korottamalla keskihajonnan  $s$  toiseen.  $L(z)$  on tappiofunktio (standard loss function), jonka  $z$ -arvon saa normaalijakauman taulukosta (normal table).

Kokonaiskustannuksen lausekkeesta (kaava 15) saa eräkoon lausekkeen johdettua derivoimalla  $Q$ :n suhteen ja etsimällä tuloksen nollakohdan (kaava 17). Tilauspiste saadaan vastaavasti, mutta derivointi tapahtuu  $R$ :n suhteen (kaava 18). (Gel & Keskinocak 2013.)

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot D[A + p \cdot n(R)]}{h}} \quad (17)$$

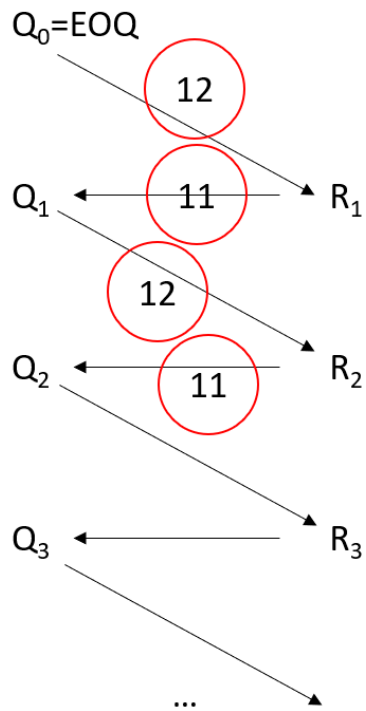
$$F(R) = 1 - \frac{Q \cdot h}{p \cdot D}, \quad (18)$$

jossa  $F(R)$  on kertymäfunktio (distribution function)  $\Phi(z)$ , jonka  $z$ -arvon saa jälleen normaalijakauman taulukosta. Kertymäfunktion arvosta tilauspisteen arvon määrittäminen tapahtuu kaavalla (19).

$$R = \sigma \cdot z + \mu, \quad (19)$$

jossa  $\mu$  on odotettu kysyntä täydennystilauksen aikana.

Kuten kaavoista (17) ja (18) voidaan havaita, eräkoossa sisältyy tilauspisteen ja tilauspiste eräkoon tekijät. Ratkaisu aloitetaan laskemalla ensimmäinen  $Q_0$ -arvo EOQ:n avulla. Seuraavaksi lasketaan tilauspisteen arvo kaavoista (18) ja (19) hyödyntäen. Tämän jälkeen tulee iteroiden laskea vuoron perään eräkoossa ja tilauspisteen arvot (kuva 16), kunnes saadut eräkoossa arvot alkavat lähestyä toisiaan. (Gel & Keskinocak 2013.)



KUVIO 16. Eräkoon ja tilauspisteen ratkaiseminen iteroimalla

Saadut eräkoon tulokset ovat tyypillisesti suurempia kuin EOQ, koska varastointikustannuksessa huomioidaan varmuusvarasto. Varastointikustannuksen pienentyessä myös eräkoko ja tilauspiste pienenevät, mutta vaikutus eräkokoon on suurempi. Puutekustannuksen kasvaessa tilauspiste kasvaa, mutta eräkoko pienenee. (Gel & Keskinocak 2013.)

## 6 VARASTOINTIKUSTANNUS

### 6.1 Kustannusjakauma

Varastot ovat olemassaolollaan aina riski ja kustannus. Varastointiin vaikuttavat kustannukset voidaan jakaa varaston ja materiaalinohjauksen kustannuksiin. Materiaalinohjauksenkustannuksessa voidaan huomioida esimerkiksi pääoma-, henkilöstö-, puute-, laatu-, reklamaatio-, logistiikka- ja riskikustannukset. Varaston suoria kustannuksia ovat tila-, laite- ja hallintakustannukset. (Haverila ym. 2009, 443–444; Vuorio 2019, 8.)

Merkittävin varastointikustannuksen osatekijä on pääomakustannus. Sillä tarkoitetaan varaston tavaroihin ja materiaaliin sitoutunutta pääomaa, joka ei ole käytävissä yritystoiminnan muuhun tarpeeseen, kuten tuottavuutta parantaviin investointeihin. Kun pääoma sitoutuu varastoihin, yrityksen maksuvalmius eli likviditeetti heikkenee. Tästä seuraa, että varastoon sitoutuvalla pääomalla lasketaan korkokustannus vaihtoehtoiskustannuksena. Monissa yrityksissä korkokustannus on markkinakorkoa suurempi, ja vuotuinen korko vaihtelee välillä 5–20 %. (Haverila ym. 2009, 444; Logistiikan maailma, F. n.d; Luoma 2018, 19–20)

Käsittelykustannuksella tarkoitetaan varastosaldon muuttumiseen liittyviä kustannuksia. Tämä sisältää saapuvan tavaran vastaanottamisen, tarkastamisen, hyllyttämisen ja järjestelmän ylläpidon sekä vastaavasti toimituksen keräilyä, pakkauksen ja toimituksen. Tähän kustannukseen vaikuttavat eniten työntekijöiden palkat ja sivukulut, jolloin henkilöstökustannuksella voidaan tarkoittaa samaa. Lisäksi tulee huomioida materiaalin käsittelemiseen vaadittujen välineiden poistot, kuten siltanosturi, trukki, keskusvarasto, koneet ja ohjelmistot. Kustannus ilmaistaan muodossa €/tilaus, ja se on riippumaton tilauksen koosta. Suuruus vaihtelee toimialan mukaan 3–10 €/tilaus. Vuotuiset täydennys- ja lähetyskustannukset vaihtelevat tilausmäärän mukaan. Eräkokojen kasvaessa tapahtumakertojen määrä vähenee ja kumulatiiviset kustannukset pienenevät. Suunta on käänteinen verrattuna muihin kustannuksiin. (Katajamäki 2011, 12–13; Russell & Taylor 2009, 531.)

Riskikustannukset johtuvat tuotteiden suunnittelemattomasta vanhenemisesta, vahingoista ja hävikistä. Esimerkiksi elintarvikkeilla on parasta ennen -päivämäärä, jonka jälkeen tuote menettää täysin tai osittain arvonsa. Vanhenemiskustannus on alkuperäisen myyntihinnan ja alennetun hinnan ero. Vanhenemista ei tapahdu vain, kun tuote menettää käyttöominaisuudet. Kymmenien vuosien varastointi lähinnä parantaa alumiiniprofiilin ominaisuuksia, mutta tuotteen korvaaminen uudella revisiolla on aina riski. Riskinä on myös alumiinin markkinahinnan vaihtelu. Vahinkokustannukset perustuvat varastotasoon, kuten tuotereklamaatiot. Hävikkiä syntyy väärin määrien ja tuotteiden toimittamisesta asiakkaalle ja varastotietojen puutteellisesta ylläpidosta. Kokonaiskustannuksen arvioidaan vuoden aikana olevan toimialan ja tuotteiden mukaan 1–6 % varaston arvosta. (Luoma 2018, 19–20; Ritvanen & Koivisto 2007, 44.)

Varaston suorissa kustannuksissa tulee huomioida tilan vuokra ja mahdollisesti lämmitys, sähkö, vartiointi, verot ja vakuutukset. Tilan vuokrasta on hyvä selvittää varastointiin käytettävän alan osuus. Varaston arvon kasvaessa kasvavat nämä kustannukset lähes lineaarisesti. Suuremman varaston vakuuttaminen on kalliimpaa. Verokäytänne on maa- ja kuntakohtainen. (Engels 2020.) Esimerkiksi Tampereella lämmitetyn varastotilan vuokraaminen maksaa 7 €/m<sup>2</sup>/kk.

TAULUKKO 3. Varastoinnin vuotuiset kustannukset varaston arvosta (Engels 2020)

Contributing factor	Range of usual rates [in annual % of value]	Hard or soft cost
Opportunity cost of capital	7.4-10%	Hard
Storage and storage surface	2-4.2%	Internal: Soft
		External: Hard
Deterioration and loss	4-6.4%	Hard
Insurance	1%	Hard
Material handling	1%	Soft
Tax	0-2%	Hard
<b>Total carrying rate</b>	<b>15.4-24.6%</b>	<b>Mixed</b>

Varastointikustannus voidaan laskea kahdella arvolla. Molemmissa merkintätavoissa edellä mainituista osakustannuksista on laskettu tapauskohtainen kokonaiskustannus. Ensimmäinen tapa on esittää, montako prosenttia varastointi keskimäärin vuodessa maksaa varastoitavan tuotteen omakustannushinnasta (taulukko 3). Toinen tapa on laskea, kuinka monta euroa yhden kappaleen tai häkin tai paletin varastointi aikayksikköä kohden maksaa. Tällöin merkintä voi olla 20 €/häkki/päivä. (Engels 2020.)

Taulukossa 3 on esitetty vuosittaiset varastointikustannukset varaston arvosta ja se, kuinka ne jaetaan osatekijöihinsä. Toimialalla, yrityksellä ja tuotteella on erittäin suuri merkitys kustannukseen. Kustannuksissa on lähteen mukaan huomattavia eroja, ja ne ovat enintään suuntaa antavia. Esimerkiksi Haverila ym. (2009) arvioivat vastaavien kustannusten olevan 19,5–36 %. Sakin (2003) mukaan kustannukset ovat 15–50 %.

## **6.2 Kustannuslaskennan lähtökohta**

Toimeksiantaja varastoi alumiiniprofiilit pääasiassa teollisuushallissa, jossa ne ovat lattiavarastoissa häkeissä kunkin tuotantovaiheen välittömässä läheisyydessä (kuva 12). Turvallisuuden takia häkkien päällekkäistä varastointia on rajoitettu enintään kahdeksaan, ja siirtäminen tapahtuu siltanosturilla. On tärkeää mitoittaa varasto oikein, jotta varastonhallinta säilyy tehokkaana. Varastointikustannuksen laskenta on merkittävä vaihe, jotta täydennystilausten laskenta antaa totuudenmukaisia arvoja.



KUVA 12. Lattiavarasto (Jalkanen 2019)

Hahmoteltu varastoinnin kustannus kasvaa lineaarisesti varastotason kasvaessa. Lattiavarastossa (kuva 12) voi ylimääräisen työn olettaa lisääntyvän huomattavasti varastotason lähestyessä maksimia. Tätä ei ole huomioitu nykyisessä kustannuslaskennassa. Todellista varastoinnin kustannusta kuvaa eksponentiaalinen kustannuksen kasvumalli paremmin kuin nykyinen lineaarinen. Robottitoimisessa keskusvarastossa syntyy varmasti ylimääräisiä kustannuksia, jos varaston annetaan suunnittelemattomasti täyttyä, vaikka häkkiin siirtoon ei kulu suhteettomasti aikaa.

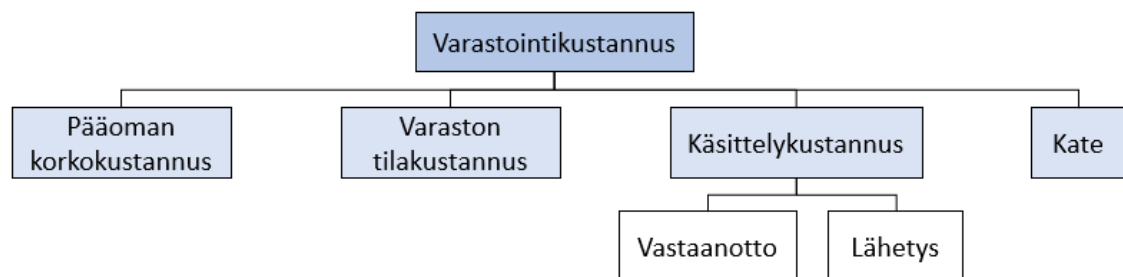
Kun varastointitilakapasiteetti alkaa täyttyä, muuttuvan kulun rakennetta on haastavaa mallintaa. Vaikka tämä olisi mahdollista, on seuraavana haasteena taata nimikkeiden yhdenvertainen myynti ja myyntihinnan suunnitteleminen. Eräs ratkaisu tilanteeseen on Lagrangen kertoja -menetelmä. Menetelmällä voidaan laskea usean muuttujan funktion ääriarvokohdat, jolloin rajoittavaksi tekijäksi asetetaan varaston koko ja selvitetään nimikkeiden keskinäinen suhde varastossa (Virtanen 2001, 44–50). Laskenta on työläs, ja dynaamisessa nimikkekannassa laskenta tulee toistaa liian usein. Menetelmä ei ole tässä tilanteessa toteutuskelpoinen.

Työssä päädyttiin määrittämään lineaarinen varastointikustannus, jossa tila otettiin yhdeksi muuttujaksi. Ensin laskettiin kulurakenteen mukainen varastointikustannus ja se, kuinka monta varastopaikkaa kullakin osastolla oli käytettävissä. Seuraavaksi laskettiin jokaisen varastonimikkeen laskennallisen keskivaraston vaatima tila nimikekohtaisesti määritellyn ohjaustavan mukaisesti ja se, missä osastossa varastointi tapahtui. Lopuksi arvioitiin, oliko laskettu keskivara varastopaikkojen puolesta mahdollinen. Jos tarve ylitti tarjonnan, varastointikustannusta kasvatettiin kertoimella, jolloin eräkoot kauttaaltaan pienenevät. Varaston tilanne tarkastettiin, ja iteroiva toiminta jatkui, kunnes laskettu tulos oli realistinen.

Toimintatapa, johon päädyttiin, ei ole aukoton. Näin saadut eräkoot eivät todellisuudessa vastaa kulurakenteen perusteella laskettua taloudellista tilannetta. Ne ovat pienemmät, jotta varaston määrä pysyy asetetuissa rajoissa. Kerroin edellyttää päivittämistä nimikekannan ja kysynnän muuttuessa. Asiaa voidaan seurata säännöllisillä varastomäärien ja kiertonopeuden raporteilla.

### 6.3 Varastointikustannus Pursossa

Varastointikustannuksen mahdollisista osatekijöistä määritettiin todellisuudessa vaikuttavat useiden haastatteluiden avulla. Nämä olivat pääoman korko-, varaston tila- ja käsittelykustannukset (kuvio 17). Myös tuotteiden vanhenemista ja hävikkiä tapahtui, mutta tätä ei huomioitu, koska laskettu osuus oli erittäin pieni. Oma toiminta tehtiin katteelliseksi.



KUVIO 17. Varastointikustannuksen rakenne

Kustannus laskettiin muodossa kuinka paljon yhden häkin varastointi maksaa päivässä eli €/häkki/päivä, koska suurin osa tuotteista varastoidaan vakiokoon häkissä (kuva 12). Nimikekohtainen varastointikustannus on helppo selvittää profiilimuodosta. Selvitetään häkkiin mahtuvien profiilien määrä, häkkikohtainen kustannus jaetaan tällä ja tuloksena on nimikkeen varastointikustannus. Luvussa ei mainita laskettuja arvoja asian luottamuksellisuuden takia, mutta laskennan peruste esitetään.

### 6.3.1 Pääoman korkokustannus

Varastoon sitoutuvaa pääomaa varten laskennassa käytettiin yrityksessä ennestään määritettyä korkokustannusta. Profiilien kilohinta laskettiin alumiinin hinnan ja myyntikatteen summana. Alumiinin hinta perustui LME:n (London Metal Exchange) markkinahintaan ja toimittajan preemioon.

Häkkikohtaista kustannusta varten tuli ensin selvittää keskimääräinen profiilin massa häkissä. Se selvitettiin toiminnanohjausjärjestelmän kollitapahtumista. Jokaisen pakatun häkin tiedot tallennetaan järjestelmään, mutta ongelmana ovat inhimilliset näppäilyvirheet. Otantana olivat kahden vuoden kollitapahtumat, ja niistä laskettiin tasattu keskiarvo Excelissä, jolloin arvojoukon molemmista päistä jätettiin 2 % arvoja laskennan ulkopuolelle.

Häkissä olevan profiilin arvon sai profiilin keskimääräisen häkissä olevan massan ja profiilin kilohinnan tulona. Tulos kerrottiin korolla, jolloin saatiin pääoman korkokustannus vuodessa, ja tästä johdettiin päivittäinen arvo.

### 6.3.2 Tila- ja käsittelykustannus

Varaston tilakustannusta varten ensin selvitettiin vertailukelpoinen vuokratustannus €/m<sup>2</sup>/kk käytössä olleelle lämmitetylle tehdashallille Siurossa. Häkin vaatima lattia-ala mitattiin, ja tuloksessa huomioitiin, että päällekkäin mahtuu kahdeksan häkkiä. Edellä mainituista tiedoista laskettiin yhden häkin tilakustannus päivässä.

Käsittelykustannus koostui lähetyksien ja vastaanottojen kokonaiskustannuksista. Selvitys aloitettiin yksittäisen tapahtuman hinnasta, jota varten tuli kellottaa molempien tapahtumien keskimääräinen kesto. Häkit siirretään osastojen välillä traktorin lavalla. Kokonaiskesto varten kellotettiin keskimääräiseen keräilyyn, paikalle ajamiseen ja purkuun kuluva aika. Niin ikään lähetystä varten arvioitiin keräilyyn ja pakkaukseen kuluva aika. Ajasta johdettiin kustannus kertomalla tuntihinnalla. Tuntihinnassa huomioitiin työntekijän tuntipalkan ja sivukulujen kustannus sekä laitteiston poistot, kuten trukki.

Tapahtumien hinnasta käsittelykustannusta varten tuli arvioida tapahtumien määrä vuodessa. Asia selvitettiin laskemalla yhteen kaikki varastonimikkeiden täydennys- ja myyntitapahtumat edellisenä vuotena. Kokonaismäärästä laskettiin nimikekohtainen keskiarvo vuodelle ja edelleen päivälle.

Päivittäinen varastointikustannus häkille saatiin yhteen laskemalla kolme edellä mainittua kustannustekijää, ja summaan lisättiin kate. Yrityksessä on käytössä kaksi robottitoimista varastoa, joiden kulurakenne eroaa lasketusta: poistot ovat suuremmat, tilakustannus on pienempi ja työmäärän vaihtelu on tapauskohtaista. Ero tulokseen ei ole merkittävä, ja kustannusta ei eritellä varaston mukaan. Pienkomponentteja varastoidaan eurolavoilla. Osuus on pieni, mutta näitä varten rinnalle on laskettu varaston arvoon perustuva keskimääräinen kustannus.

## 7 ASETUSKUSTANNUS

Asetuskustannus on arvoa tuottamattomien valmisteluoperaatioiden kustannus. Asetusoperaatio voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoisiin asetuksiin. Ulkoiset asetukset valmistellaan tuotannon aikana. Koneen käydessä haetaan seuraavaan työn vaatimat välineet. Sisäiset asetukset tehdään koneen ollessa poissa päältä, jolloin tuotteita ei synny. (Häkkinen, Joutsen, & Pötry 2003, 18.) Mikään tuotanto ei käynnisty sormia napsauttamalla. Asetusoperaatioon kuluu aina aikaa ja rahaa. Toimialan, tuotteen ja valmistusmenetelmän erot johtavat huomattavaan vaihteluun asetuskustannuksissa. Kuvainnollisesti joustavan kokoonpanotuotannon asetuskustannus voidaan mitata pullakahveilla, kun paperikoneella arvo on lähempänä henkilöautoa. Esimerkiksi työstökoneella asetusoperaation selvittäminen on yksinkertaista. Ulkoisia operaatiota voivat olla osien kiinnitys, kuten jiggit tai kiinnittimet ja terät, sekä koeajot, mittaukset ja kalibrointi. Kun tuotanto monimutkaistuu, kustannusjakauman selvittäminen on yhä haastavampaa, ja joidenkin osatekijöiden ero tuotannon kiinteisiin kustannuksiin voi olla veteen piirretty viiva.

Pursotuksen asetuskustannusselvityksen lähtökohtana oli huomioida vain ulkoinen asetus. Tavoite oli löytää kustannustekijät, joihin normaali tuotanto ei vaikuta. Esimerkiksi kun pilkotaan 1 000 kg:n tuotantoerä kahteen 500 kg:n erään, mitkä kustannukset tuplaantuvat? Tavoitteena on pystyä erottamaan tuotannon kiinteät kustannukset asetuksesta. Tutkimustuloksista on poistettu yrityksen toiminnan kannalta luottamuksellinen tieto.

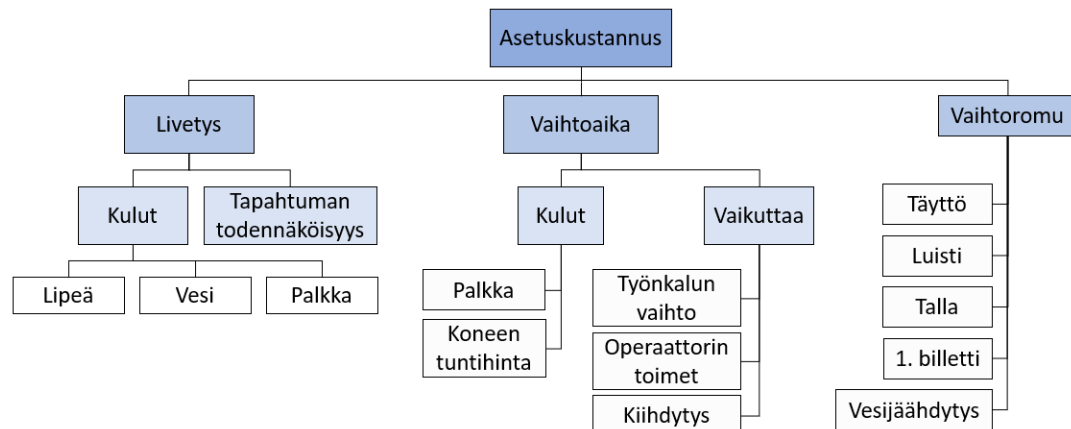
### 7.1 Kustannusjakauma

Asetuskustannustutkimuksen kohteena olivat toimeksiantajan kaksi linjastoa. Tavoitteena ei ollut luoda yleispätevää mallia, joka huomioi kaikki yritysten väliset toimintatapa- ja rakenne-erot. Aiheesta ei ollut aiemmin laadittu julkista tutkimusta. Tutkimuksen perustana on tekijän kokemus ja haastatteluiden yhteenvedo. Tutkimusta varten haastateltiin useita hyvin prosessia tuntevia henkilöitä, kuten koneen operaattoreita, muita linjaston työntekijöitä, tuotannon esimiehiä

ja talouden ammattilaisia. Haastateltujen henkilöiden määrä oli 18, ja osa haastatteluista oli jakautunut useampaan vaiheeseen. Haastatteluja ei toteutettu strukturoituna lomakehaastatteluna, vaan henkilöiden ammattitaitoon perustuvien täsmäkysymysten avoimena haastatteluna. Osa tehtiin ryhmissä paikallisia koronarajoitteita noudattaen. Jokaisesta haastattelutapahtumasta laadittiin muistio, josta on esimerkki liitteessä 1.

Haastattelujen yhteenvedon tuloksena oli lista asetuskustannukseen vaikuttavista tekijöistä, yksityiskohtainen etenemissuunnitelma ja nimikekohtaista eroa mahdollisesti määrittävät parametrit. Osa tekijöistä oli mahdollista selvittää laskennallisesti, mutta osan selvittäminen oli hyvin haasteellista, ellei mahdotonta. Näiden vaikutus oli kuitenkin hyvä tiedostaa.

Asetuskustannustutkimus perustui vaihtoaikaan, -romuun ja livetykseen. Vaihtoaika tarkoittaa tuotannon aloittamiseen kuluva ylimääräistä aikaa verrattuna normaaliin tuotantoon. Vaihtoromu tarkoittaa työn aloittamisen tai päättämisen aikana muodostuvan romun määrää. Livetyks on toimenpide, jossa alumiini liuotetaan kemiallisesti suolakkeen sisältä. Asetuskustannuksen rakenne on havainnoinut kuviossa 18, ja sen tekijät on selitetty tulevissa luvuissa.



KUVIO 18. Asetuskustannuksen rakenne

## 7.2 Tutkinnan ulkopuolelle jätetyt tekijät

Kaikkien tekijöiden laskennallista vaikutusta ei ole mahdollista selvittää, tai se vähintään edellyttää oman perusteellisen tutkimuksensa. Esimerkiksi kun ensimmäistä billettä työnnetään tuotannon alkaessa uunituoreeseen suulakkeeseen, suulake on suuren rasituksen alaisena. Tämä vaihe kuluttaa suulakkeen tukipintoja koko prosessin vaiheista eniten. Vaiheessa on myös suuri riski suulakkeen hajoamiselle, jolloin tukipinnan kohta voi räjähtää irti suulakkeesta. Asiaa voi selvittää tapaustutkimuksilla. Samaan aikaan tilataan kaksi uutta suulaketta, joista toisen tuotannon eräkoot ovat toiseen verrattuna kaksinkertaiset. Tämän jälkeen seurataan molempien suulakkeiden elinikää. Tutkimus kestää vuosia ja on sidoksissa asiakkaan tilauksiin. Tutkimus vaatisi suuren otannan huomioiden suulakkeiden eri koot, tyypit ja muodot. Tuloksesta saatava hyöty on myös kyseenalainen.

Seuraavana on profiilimuodon haastavuus. Viime vuosien aikana profiilien muodot ovat muuttuneet yhä haastavammiksi. Seinämävahvuudet pienenevät, onteloiden määrä kasvaa ja muodot yhä harvemmin ovat symmetriset. Toiminnan kehittämisen ja kilpailukyvyn säilyttämisen kannalta asia on hyvä. Kaikki profiilimuodot eivät kuitenkaan onnistu kerrasta. Lisäajojen eli työn toistomäärän nollassa on utopiaa, mutta tavoittelemisen arvoista. Epäonnistumisen taustalla ovat puutteelliset ajoparametrit, toimintatavat tai ongelma suulakkeessa. Tuotannon onnistumisen todennäköisyyttä voi arvioida profiilimuodosta ja vaatimuksista. Tietyn nimikkeen valmistaminen voi keskimäärin vaatia tuotannon aloittamisen kolmesti. Eikö olisi tuotannon onnistuessa loogista ajaa suurempi määrä, jolloin keskeytyskustannuksen merkitys pienenee? Tilanne ei ole yksinkertainen. Jatkuvan parantamisen tulee olla osa yrityskulttuuria. Jos lisäajoja ennakoidaan eli valmistaudutaan epäonnistumiseen, on suuri riski, että tuotannon edellyttämä kehitys hidastuu. Ennakointi luo täysin turhia ylimääräisiä varastoja eli hukkaa, joka piilottaa kehittämistä vaativat kohteet.

Seuraavat eivät ole asetuskustannuksen suorita tekijöitä, mutta vaikuttavat eräkokoon, joka on vaikutussuhteessa asetuskustannuksen kanssa: Yksittäisen eräkoon kasvaessa keskeneräisen tuotannon määrä kasvaa. Tästä seuraa, että läpimenoaika kasvaa ja tuotannon ohjattavuus heikkenee. Viimeisenä on laatu-

kustannus. Tuotannon reagointi laatuvirheeseen vaatii prosessin monimuotoisuuden takia aina aikaa, jonka aikana muodostuu romua. Tähän eräkoon ei tulisi vaikuttaa. Laatuvirhe voi kuitenkin syntyä minä hetkenä tahansa suulakkeen kulumisen tuloksena. Jatkuvasta seurannasta huolimatta suurempien valmistuserien keskimääräinen romun määrä on pienempiä eriä suurempi.

### 7.3 Livetytys

Livetykseksi kutsutaan prosessia, jossa lipeällä liuotetaan suulakkeen sisään jäänyt alumiini. Lyhyesti kuvattuna prosessin aikana suulakepaketti puretaan ja asetetaan koriin. Kori etenee lipeä- ja huuhtelualtaan kautta, minkä jälkeen kori puretaan. Seuraavaksi suulake etenee märkäpuhalluskoneen läpi, tukipinnat hiotaan ja suulakepaketti kasataan. Lopuksi suulake varastoidaan seuraavaa tilausta varten.

Kaikki suulakkeet eivät etene livetyksen läpi. Osa suulakkeista varastoidaan suoraan työn päättymisen jälkeen, jolloin alumiinit jäävät suulakkeeseen. Näistä jälkimmäinen tapa on toivottavampi, jolloin ylimääräisiä kustannuksia ei synny. Livetyksestä on hyötyä esimerkiksi suulakkeissa, joiden reikäluku on vähintään kuusi. Reikäluku tarkoittaa sitä, montako profiilia valmistuu samaan aikaan. Tällöin aloituksen nopeuseron todennäköisyys pienenee, koska alumiinin virtaus suulakkeen läpi on kauttaaltaan tasaisempi. Livetytys myös vaikuttaa profiilin pinnanlaatuun, koska suulakkeen tukipinnat ovat uuden tuotannon alkaessa paremmin huolletut.

Livetykskustannuksen selvittämiseksi on oleellista aloittaa määrästä: montako suulaketta livetetään vuoden aikana, mitkä tekijät vaikuttavat livetykskustannukseen sekä lasketut arvot vuoden ajalta. Johdettuna tuloksena saadaan yhden suulakkeen livetykskustannus. Tämän jälkeen tulee selvittää täytenä varastoitujen suulakkeiden määrä sekä tapahtuman todennäköisyys. Johdettu suulakekohtainen livetykskustannus lasketaan todennäköisyyden avulla. Arvo on käyttökelpoinen jokaiselle työlle.

### 7.3.1 Livetystapahtuman todennäköisyys

Livetystapahtuman todennäköisyyden selvittämisen tekee haastavaksi puutteellinen livetystapahtumien kirjanpito. Asian voisi selvittää tapaustutkimuksella: lasketaan livetyksen suulakemäärät päivittäin ja suhteutetaan tehtyihin töihin. Opinnäytetyön kannalta tutkimukseen ei olisi ollut käytettävissä viikkoa kauempaa, joka otantana olisi ollut liian pieni. Menetelmässä olisi ollut muitakin epävarmuustekijöitä.

Asia selvitettiin varastointitapahtumien, tarkemmin suulakkeen kiertonopeuden, avulla. Tutkimus alkoi selvittämällä työkaluvaihtojen lukumäärä. Progrexin tietokannasta sai billetin tarkkuudella profiilinumeron, sukupolven, tuotantonumeron ja tapahtuma-ajan. Vuoden otannalla molempien puristimien rivimäärä Excelissä oli satoja tuhansia. Raakadatasta suodatettiin vaihtojen lukumäärä erinäisin välivaihein.

Suurin osa suulakkeista on varastoitu Kardex-korkeavarastoihin ja järjestelmän ohjaamiin lavoihin, mutta eivät kaikki. Varastoinnin erikoistapaukset on huomioitu laskennassa. Näiden parin kymmenen Kardexin tapahtumatiedot haettiin Exceliin, ja tapahtumatietojen määrä oli kymmeniä tuhansia.

Kahta luotua tietokantaa verrattiin Excelissä. Tavoite oli selvittää jokaista työtä seuranneen varastointitapahtuman ajankohta ja se, kuinka kauan tapahtumien välillä kului aikaa. Tutkimus tehtiin vuoden otannalle, ja aikaeron eli suulakkeen kiertonopeuden perusteella graafisesti mallinnettiin kestojen esiintymistiheyttä. Kuvaajassa on havaittavissa voimakas piikki heti pursotuksen jälkeen, minkä jälkeen tapahtumien määrä väheni nopeasti nolnaan. Vuorokauden kuluttua tapahtumien määrä alkoi jälleen kasvaa. Tuloksen perusteella kun kiertonopeus oli alle vuorokauden, suulake on varastoitu alumiinit sisällä.

Luodun päätelmän perusteella oli mahdollista laskea vuoden aikana livetettävien suulakkeiden määrä. Kuitenkin nitraustapahtumat tulee poistaa, jotta voidaan laskea suulakkeen kahden mahdollisen kiertotavan keskinäinen todennäköisyys. Nitrauksessa suulake käsitellään ammoniakkikaasussa ja pinnalle luodaan ohut suojaava kerros, joka parantaa kulutuskestävyyttä ja pienentää kit-

kaa. Nitraus tehdään määritetyin väliajoin, ja se edellyttää livetyksen. Tällöin suulake voidaan livettää vain nitrauksen takia, ja nämä tapahtumakerrat eivät kerro kiertotapojen todennäköisyydestä. Nitraustapahtumista oli järjestelmässä olemassa hyvä kirjanpito, joka teki tapausten suodattamisesta helpon.

### 7.3.2 Livetyskustannus

Suulakkeen livettämisen kustannuksessa tulee huomioida lipeä, työntekijäkustannukset ja vesi, jolla laimennetaan lipeää. Jätelipeän kierrätyksestä on aiemmin joutunut maksamaan, mutta moni teollinen prosessi on kehittynyt hyödyntämään sitä omissa valmistusprosesseissaan. Lipeän vuotuisen kulutuksen ja kustannuksen selvitti helposti raportoinnista. Työntekijäkustannukset ja lisäkulukertoimet perustuivat myös valmiisiin raportteihin keskiarvoista. Työtehtäväkohtaiset tuntimäärät vuodelle sai Jotbar-ohjelmistolla. Vesi tuli porakaivosta, mutta kaupungin jätevesimaksu tuli huomioida. Käyttöä pystyi seuraamaan osastokohtaisella mittarilla. Livetyksen kokonaiskustannus on kolmen edellä mainitun tekijän summa.

Suulakekohtaisen kiinteän kustannuksen selvitti aiemmin määritetyn suulakkeiden livetysmäärän avulla. Suulakkeen johdetussa livetyskustannuksessa tuli huomioida tapahtuman todennäköisyys. Esimerkkinä keksityin arvo: Suulakekohtainen kustannus on 10 € ja tapahtuman todennäköisyys 50 %. Tällöin johdettu kustannus on  $10 \text{ €} \cdot 50 \% = 5 \text{ €}$ .

Laskennassa on oletettu kustannuserien olevan suoraan verrannollisia livetettävään suulakemäärään, mikä osittain pitää paikkansa. Suulakekohtaisessa vertailussa tarkan arvon saamiseksi tulisi huomioida myös suulakkeen koko, tyyppi ja muoto. Suuremmissa suulakkeissa sisätilavuus kasvaa, jolloin liuotettavan alumiinin määrä kasvaa. Näin lipeää ja vettä kuluu enemmän ja suulakkeen käsittely on työläämpää. Vaikka suulakekohtainen kustannus sisältää vaihtelua, on suuren otannan keskiarvo tähän tutkimukseen riittävä.

## 7.4 Vaihtoaika

Pursotuksen vaihtoajalla voidaan asiayhteydestä riippuen tarkoittaa eri asioita. Esimerkiksi tuotannossa voidaan keskittyä tekijöihin, joihin omalla toiminnalla voidaan vaikuttaa. Tutkimuksessa tässä huomioidaan kaikki normaalista tuotannosta poikkeava.

Työn vaihto voidaan jakaa työkalupakan vaihtoon, operaattorin tehtäviin ja tuotantonopeuden kiihdyttämiseen. Ennen vaihdon alkamista on puristimen vieressä olevaan työkaluluistiin valmisteltu seuraavan työn vaatima työkalupakka. Operaattorin tehtävät sisältävät esimerkiksi kuluvan ajon lopuksi grafiittien poiston, vedon lähettämisen eteenpäin, pullerisahan kutsumisen ulostuloaukolle, seuraavan työn profiilien keräämisen pullerisahaan, päiden tasaamisen sahaamalla ja niin edelleen. Grafiiteilla erotellaan vedon useat profiilit toisistaan ja korjataan mahdollisia muotovirheitä. Työkalupakan vaihdossa puristimessa oleva kuluvan työn työkalupakan luisti vaihdetaan juuri valmisteltuun luistiin. Pursotuksen tuotantonopeus tulee kiihdyttää hallitusti. Liian nopealla kiihdytyksellä on mahdollista hajottaa suulake, liian hidas kiihdytys heikentää tuottavuutta.

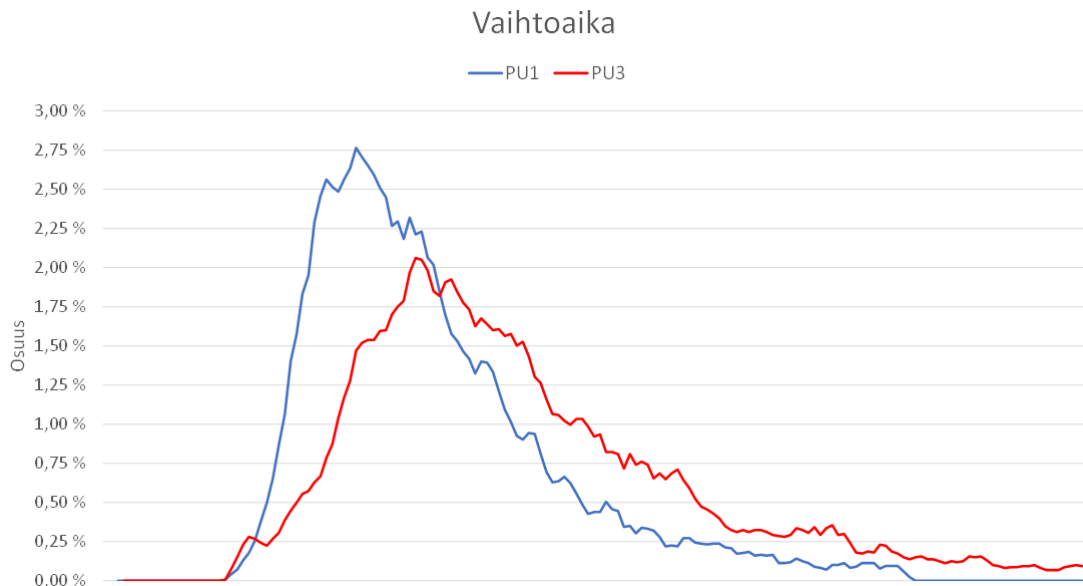
### 7.4.1 Tutkimus

Tutkimuksen perustana ovat Progrexin tietokannan edellisen vuoden tuotantotapahtumat. Tietokannan yhteen sarakkeeseen on merkitty pursotussykliin kuuluva aika sekunteina. Tämä on billetin kokonaisaika, mukaan lukien pursotus, kuollut aika sekä kaikki normaalista poikkeava. Tuotantonopeuden kiihdytykseen kuuluva aika on tapauskohtainen, mutta lopullinen nopeus saavutetaan viimeistään kolmannella billettillä. Vaihtoajan selvittämiseksi tutkitaan kolmen ensimmäisen billetin syklin aikaa: jos billetin aika on 20 % yli työn mediaanin, huomioitiin tämän kesto laskennassa. Laskentaan määritettyjen billettien syklin ajasta vähennettiin työn mediaani, ja tuloksena saatiin vaihtoaika. Laskennan vaiheita on havainnoitu muokatuin arvoin kuviossa 19.

Pursotuksen aloitusaika	Työnumero	Pursotussyklin aika (s)
22.12.2020 19:11:07	849098	177
22.12.2020 19:07:32	849098	215
22.12.2020 19:00:50	849098	402
22.12.2020 18:57:07	829771	148,7
<b>Työn 849098 mediaani</b>		<b>177,2</b>
<b>Vaihto aika</b>	$402 + 215 - 2 \times 177,2 = 262,6 \text{ s}$	<b>4 min 22s</b>

KUVIO 19. Vaihtoajan laskenta

Kuviossa on 20 on esitetty vaihtoaikojen esiintymistiheys eli frekvenssi molemmille puristimille. Kaaviosta on poistettu vaak akseli, jossa on ilmoitettu kesto minuutteina.



KUVIO 20. Vaihto aikojen osuudet

Selvitystapa ei huomioi työn alussa syntyvää romua. Tutkimusta tuli tarkentaa selvittämällä toimituskelpoisen profiilin valmistamisen alkuun kuluva aika. Esimerkiksi profiilin vesijähdytyksen käynnistäminen edellyttää, että veto on edennyt vesikaukaloiden ohi, mikä on huomattava matka. Tämä osuus tulee kokonaisuudessa romuttaa kovuusongelmien takia. Ensimmäisten billettien romuttamiseen on myös lukuisia vaihtoehtoisia syitä, joiden taustalla ovat laatu virheet ja kovuusvaihtelu.

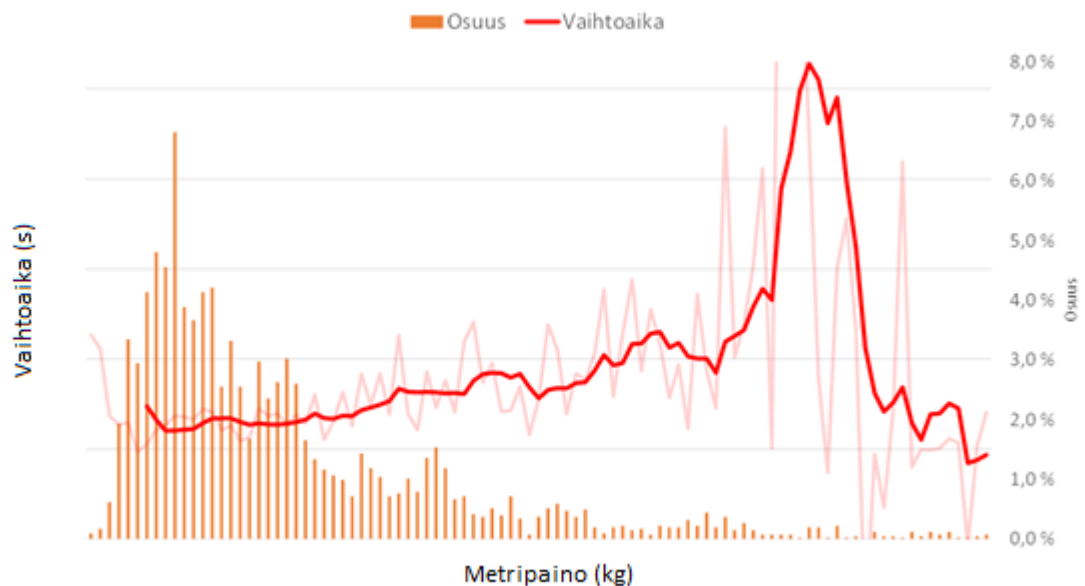
Vesijähdytyksen takia syntyvän romun pystyi selvittämään tuntemalla vesikaukalon pituuden ja vertaamalla sitä vedon pituuteen. Arvio tuli pyöristää täysien tuotantopituuksien kerrannaisena ylöspäin, vetovarot huomioiden. Matkaan kuluneen ajan sai billettikohtaisista tuotantotiedoista. Muiden romuttamisien perusteet johdettiin samalla tavalla. Tuloksena vaihtoajan keskiarvo nousi.

#### **7.4.2 Vaihtelun perusteet**

Kuviosta 20 voidaan havaita suurta vaihtelua vaihtoajoissa. Vaihtelun syitä selvitettiin suunnitteluvaiheessa mietittyjen parametrien avulla. Parhaiten pienen puristimen vaihtelua kuvasi suulakkeen reikäluku, koska reikäluvun kasvaessa aikaa enemmän kului profiilien jakamiseen ja nopeuserojen kanssa taisteluun. Tätä havaintoa ei tule huomioida reikäluvun päättämisprosessissa. Vaihdoissa menetetyt ajan kustannus on merkityksellinen verrattuna suuremmalla reikäluvulla saavutettaviin kokonaishyötyihin.

Isommalla puristimella vaihtoajan vaihtelua kuvasi parhaiten vedon metripaino. Vedon metripainolla tarkoitetaan profiilin metripainon ja reikäluvun tuloa. Metripainon kasvaessa kiihdytys tulee tehdä rauhallisemmin. Alun romuttamisen keskimääräinen määrä kasvaa, mikä tarkoittaa, että toimituskelpoisen profiilin valmistamisen alkuun kuluu kauemmin aikaa.

Kuviossa 21 on esitetty aloitusajan kehitys metripainon kasvaessa. Mitä suuremmaksi metripaino kasvaa, sen pienempi on menekki. Tällöin vertailukelpoisten arvojen määrä vähenee ja tulosten keskihajonta kasvaa. Tämän osalta tutkimustulokset sisältävät virhettä. Kaaviossa voidaan kuitenkin havaita vaihtoajan lineaarinen kasvu metripainon kasvaessa. Tutkimukselle tehtiin regressioanalyysi, jonka tuloksen leikkauspistettä ja kerrointa hyödynnettiin tapauskohtaisen vaihtoajan laskennassa.



KUVIO 21. Vedon metripainon vaikutus vaihtoaikaan.

Vaihtoajassa tuli huomioida työntekijäkustannukset ja koneen tuntihinta. Työntekijäkustannukset laskettiin kuten livetyslaskennassa. Koneen tuntihinnan perustana oli menetetty kate. Tuntihinta oli ennestään määritetty ja tällä on merkittävä vaikutus tulokseen.

## 7.5 Vaihtoromu

Pursotuksen aikana syntyy romua useista syistä. Keskimäärin 24 % käytetystä billettistä romutetaan. Merkittävin tekijä on prosessiromu eli prosessin aikana jokaisesta billettistä romutettava määrä. Vaikuttamismahdollisuudet ovat pienet, mutta kehittämistä on aina. Prosessiromusta esimerkkinä vetovarot, jätelätkät ja sydänvianpoistot. Romuttamisperusteena voi myös olla laatuvirhe tai työn vaihto. Luvussa syvennytään viimeksi mainittuun syyhyn.

Syitä vaihtoromun muodostumiseen on monia, kuten kuviossa 18 on listattu. Työn aloituksessa tyhjän suulakkeen täyttöön kuluu alumiinia. Ensimmäisen vedon alkupää tasataan sahaamalla lyhyt matka pois, jotta profiilit mahtuvat pullerisahan leukoihin. Toisaalta epätasaisen profiilin pääty voi aiheuttaa ongelmia prosessin edetessä. Täytenä varastoidussa suulakkeessa tämän syyn takia romutettava määrä on pienempi. Tämän romutusmäärän arvio perustuu

odotettuihin pituuksiin. Billetin pituuden ja metripainon perusteella pystyy laskemaan laskennallisen vedonpituuden. Kun toteutunut on laskennallista lyhyempi, voi erotuksen olettaa kuluneen suulakkeen täyttöön tai alkuromuun. Lähtötiedot laskennalle ovat saatavilla Progrexin tietokannasta. Teoreettisen laskennan ongelmana on lähtötietojen pieni virhe etenkin metripainossa. Tämän takia laskenta tehtiin jokaisen työn mediaaniarvojen perusteella.

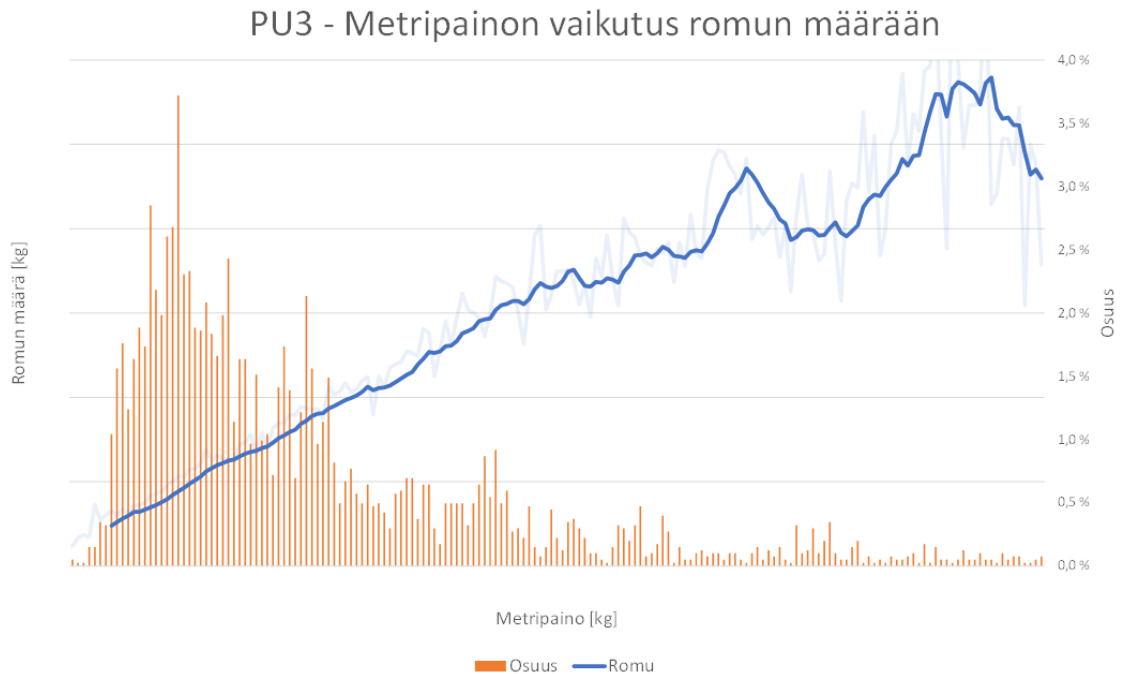
Puristimen luistin päällä on kehäleikkuri. Tämän tehtävä on työn välittömän päättymisen jälkeen nostaa suulakkeen työkalupakasta yhden osan ylös, joka katkaisee viimeisen profiilin irti suulakkeesta. Tätä ei kuitenkaan ole mahdollista käyttää kaikilla suulakemitoilla, koska riskinä on suulakkeen hajoaminen.

Toinen vaihtoehto on katkaista profiili luistin sivuttaisliikkeellä. Tällöin profiilin viimeinen sahuu vääntyy ja se tulee romuttua. Tämän romutuksen laskenta tehtiin vain tapauksissa, joissa suulakekoko täsmäsi asetettuun listaan. Viimeisen sahuun romutettava massa laskettiin tuotantopituuden, metripainon ja reikäluvun avulla.

Pursotusprosessi alkaa, kun profiilin päät ilmestyvät suulakkeesta ja etenevät ulostuloaukosta operaattorin käsiteltäväksi. Hän asettaa päät pullerisahan kynsiin, ja pullerisaha ohjaa, sekä varmistaa profiilin liike ulostulorataa pitkin. Tämän jälkeen profiilit siirtyvät pullerisahasta pulleriin. Toimenpide vaatii puristimen pysähtymisen ja jättää jäljen profiiliin. Edettyyn matkaan vaikuttaa linja, ja tyypillisesti matka on 5–10 metriä. Pysähdysjäljen takia alun matka on romutettava. Toinen syy romuttamiselle on pehmeys. Profiilin kovuus perustuu lämpötilan riittävän suureen ja nopeaan putoamiseen eli jäähdytykseen. Tämän edesauttamiseksi on suotavaa lähteä korkeasta lämpötilasta. Billetin alkuperäisestä lämpötilaa nostaa kitka. Kiihdytyksen aikana kitka ei välttämättä nosta lämpöä riittävästi. Asiaa kompensoidaan ensimmäisen billetin normaalia korkeammalla lämpötilalla, jolloin kiihdytyksen aikana profiili ei teoriassa jää pehmeäksi. Pysähdysjäljen takia romutettavan osuuden laskennassa on huomioitu pysähdyksen etäisyys, ja romutettava matka on pyöristetty tuotantopituuden perusteella ylöspäin. Matkasta on johdettu massa metripainon ja reikäluvun avulla.

Kuten luvussa 7.3.1 mainittiin, alun romuttamista tapahtuu vesijäähdytettävillä profiileilla sekä kovuusvaihtelun ja laatuvirheiden huomioimisesta. Myös tämä

lisättiin vaihtoromun laskentaan. Vaihtoromun tekijöistä laskettiin kokonaismäärä. Tapauskohtaisesti romutus saattoi perustua useaan syyhyn. Esimerkiksi profiili jäähdytetään veteen ja ensimmäinen billetti romutetaan kokonaisuudessaan. Tällöin ei tarvitse erikseen laskea täytön ja pysähdyksen romua.



KUVIO 22. Metripainon vaikutus vaihtoromuun

Vaihtoajan tavoin tapauskohtainen vaihtelu oli huomattava. Kuviossa 22 on esitetty, kuinka vedon metripaino vaikuttaa romutettavaan määrään. Tutkimustuloksista määritettiin regressioanalyysin avulla leikkauspiste ja kerroin molemmille puristimille erikseen. Romutuksen kustannus laskettiin uudelleensulatushinnalla.

## 7.6 Yhteenveto

Asetuskustannukseen vaikuttaa kolme tekijää. Vakio livetykustannus lisätään jokaiseen asetukseen. Vaihtoajan kulut on määritetty sekuntia kohden. Pienemmän puristimen vaihto aika perustui työssä käytetyn suulakkeen reikäluukuun. Jokaiselle reikäluvulle oli määritetty keskimääräinen vaihtoon kuluva aika. Suuremman puristimen vaihto aika laskettiin metripainon funktiona. Vaihtoromun

uudelleensulattamiskustannuslaskenta oli kiloa kohden. Romutettava määrä oli molemmilla puristimilla metripainon funktio.

Asetuskustannuksen puristin- ja nimikekohtaista eroa päädyttiin kuvaamaan profiilin metripainolla ja reikäluvulla. Parametrit ovat hyvät. Niiden määrittäminen laskentaa varten on helppoa, toisin kuin vaihtoehtoisesti mietityt tavat, kuten laskenta suulakkeen tyyppin ja halkaisijan perusteella. Lisäksi ne selittivät laskettua vaihtelua odotettua paremmin. Asetuskustannuksen laskemiseksi luotiin erillinen laskentaohjelma, johon kaikki luvussa mainittujen kustannusten tekijät voidaan päivittää. Laskennan lähtöarvojen yksinkertainen syöttö on esitetty kuviossa 23. Asetuskustannuksen laskennan algoritmi lisättiin eräkoon laskentaohjelmaan.

Linja	PU1	
Metripaino	0,52	kg/m
Reikäluuku	4	kpl

Asetuskustannus [REDACTED] €

KUVIO 23. Asetuskustannuksen laskennan taulukko-ohjelma

Ohjelmaan luotiin mahdollisuus hakea asetuskustannus nimiketunnuksen ja tuotantopituuden perusteella. Vuoden 2020 tuotannossa olleille nimike- ja tuotantopituus-yhdistelmille selvitettiin tapahtumiin perustuvat arvot. Profiilin tuotantopituus vaikuttaa yleiseen tuottavuuteen ja asetuskustannukseen. Tämän takia nimikkeiden kaikki toimitetut tuotantopituudet tuli selvittää ja erotella laskennassa. Suuren menekin nimikkeiden tulokset olivat luotettavammat kuin toisen ääripään. Tästä huolimatta nimikekohtainen laskenta antoi luotettavampia tuloksia kuin algoritmiin perustuva laskenta.

## 8 TÄYDENNYSTILAUS

Alumiiniprofiileista valmistettujen komponenttien tuotantoketjut ovat pitkät. Tämän lisäksi normaalitilanteessa lähitulevaisuuden kapasiteetti on myyty täyteen, mikä pidentää toimitusaikaa. Varasto-ohjautuvien tuotteiden suunnittelun lähtökohtana on toimitusaikataavoite. Tapauskohtaisesti arvioidaan, mistä tuotantoketjun puolivalmisteesta voidaan aikataulun puitteissa valmistaa tavoiteltu myyntinimike. Ketjussa tulee pyrkiä mahdollisimman lähelle billettä: billetti on paras ratkaisu. Tällöin tuotteen arvo varastossa on pienempi ja toimintatapa mahdollistaa useat valmistusketjut.

Samasta alumiiniprofiilista voidaan jalostaa useita komponentteja eri vaiheiden kautta, ja näistä jokaiselle on luotu oma nimike. Yleisin eroavaisuus saman profiilin nimikkeissä on tuotantopituus, mutta profiileita voidaan maalata eri värein, koneistaa eri tavoin, anodisoida ja niin edelleen. Esimerkiksi yhdessä tuotantoketjussa billetin ja myyntinimikkeen välissä on viisi puolivalmistetta. Ketjun viimeistä puolivalmistetta varastoidaan, ja siitä valmistetaan 119 eri myyntinimikettä.

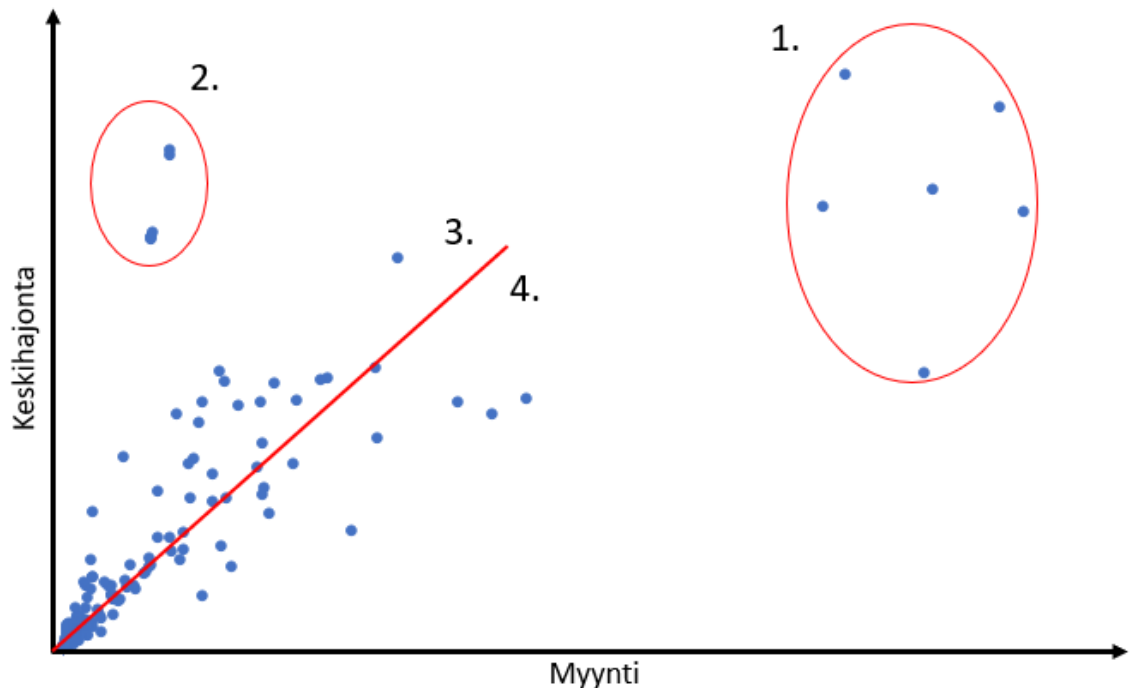
Toimeksiantaja ylläpitää varasto-ohjautuvien myyntinimikkeiden listaa. Listassa oli merkitty myyntinimikkeen valmistuksen varastonimike. Täydennystilauksen laskentaan luodun ohjelman rakenne oli suunniteltu tämän listan tarpeiden mukaiseksi.

### 8.1 Ohjaustapa

Listan analysointi alkoi selvittämällä kaikki ainutkertaiset varastonimikkeet, minkä jälkeen luotiin viite niiden myyntinimikkeisiin, joiden määrät vaihtelivat.

Listan kaikki tutkimukset tehtiin varastonimiketasolla, mutta tiedot perustuivat rinnastettuihin myyntinimikkeisiin. Esimerkiksi varastonimike X:n vuosittainen menekki on tästä valmistettavien myyntinimikkeiden X1 ja X2 tapahtuneen myynnin summa.

Jokaisen varastonimikkeen vuosien 2019 ja 2020 tapahtunut myynti ja kuukausittainen keskihajonta selvitettiin. Koronavuoden takia tutkimusten pääpaino oli vuodessa 2019, vaikka koronan vaikutukset eivät olleetkaan merkittävät. Tapahtuneen myynnin mukaan nimikkeet jaettiin ABC-analyysiin. Keskihajonnan tietojen perusteella tehtiin XYZ-analyysi. Analyysien jälkeen tiedoista tehtiin kuvaaja. Vaaka-akselilla on myynti ja pystyakselilla keskihajonta (kuvio 24). Pisteiden tulkinta antoi paremman tilannekuvan kuin analyysien laatikkotulkinta.



KUVIO 24. Nimikkeiden sijoittuminen myynti-keskihajontakuvaajalle

Kun pisteitä tulkitaan, numeron 1 nimikkeiden tapahtunut myynti on merkittävin. Ryhmä edellyttää perusteellisen ohjauksen esimerkiksi dynaamisen laskennan menetelmillä ja jatkuvalla seurannalla. Numeron 2 nimikkeiden keskihajonta on suuri ja myynti vähäinen. Varastoinnin lopettamista tulee harkita. Loput ovat ohjattavissa EOQ:lla yhdistettynä tilauspistemenetelmään. Nämä on jaettu seurantarpeen mukaan numeroin 3 ja 4. (Q, R) -malli voi antaa luotettavampia arvoja kuin EOQ ryhmälle 3.

## 8.2 Laskennassa huomioitu

Useista profileista on johdettu monia nimikkeitä eri sahuumittojen takia. Esi-merkiksi profiilin tuotantopituus on vähän päälle kuusi metriä, ja se varastoidaan puolivalmisteena. Myyntinimikkeen toimituspituus on metri, jolloin puolivalmisteesta saadaan kuusi kappaletta. Johdetun tarpeen laskennassa tulee aina huomioida keskinäinen suhde.

Järjestelmässä käytettyä myyntiyksikköä ei ole vakioitu. Asiakkaan tarpeiden mukaan määrä voidaan ilmoittaa metreissä, kappaleissa tai kiloissa. Yksikön huomioiminen on tuloksen kannalta tärkeää. Yksikkömuunnos tulee tehdä kappaleiksi, koska laskennan valmiiksi johdetut muuttujat ovat tässä muodossa.

## 8.3 Laskentaohjelmat

### 8.3.1 EOQ

EOQ:n, tilauspisteen ja varmuusvaraston laskenta on yksinkertainen (kaavat 9, 6 & 4). Kaavojen syöttämisessä Exceliin kuluu kymmenen sekuntia. Laskentatyökalun tavoite oli tehdä laskenta mahdollisimman helpoksi. Kuva valmiin työkalun käyttöikkunasta kuviossa 25.

Varastonimike		Varasto
Myyntinimike		
Linja	PU1	
Metripaino	0,723	kg/m
Reikälukku	2	kpl
Tarkasteluvuosi	2020	
Toimitusvarmuus	95 %	
Kuorman lisä toimitusaikaan	5,0	vrk

	Syöttö	Haku	
Häkkiin mahtuva määrä		72	kpl
Tuotantopituus		3800	mm
Toimituspituus		613	mm
Tuotantoon kuluva aika		1	vrk
Asetuskustannus			€
Myynti vuodessa		2000	myyntiyks.
Keskiahjonta		85	myyntiyks.
Lauttakoko	100		kpl

<b>EOQ</b>	<b>557</b>	kpl
<b>Varmuusvarasto</b>	<b>63</b>	kpl
<b>Tilauspiste</b>	<b>97</b>	kpl

Kiertonopeus	3,3	kk
Eräkoko	247	kg

Optimointi		
<b>Häkki</b>	<b>576</b>	kpl
<b>Lautta</b>	<b>600</b>	kpl

KUVIO 25. EOQ:n laskenta

Työkalussa on mahdollisuus arvojen syötölle tai haulle. Haku perustuu kirjoitettuun varastonimikkeeseen, ja se tehdään työkirjan muilta välilehdiltä. Kuvassa ylhäällä näkyvä metripaino ja reikäluku haetaan luodun listan perusteella, joka sisältää koko profiilikannan. Tapauskohtaisesti saman profiilin suulakkeiden reikäluvut voivat vaihdella. Tällöin lista sisältää ensimmäiseksi prioriteetiksi määritellyn suulakkeen tiedot. Asetuskustannus lasketaan näistä, ja taulukossa se sijaitsee vähän alempana. Linjan syöttäminen on käyttäjän vastuulla.

Häkkiin mahtuvat määrät on valmisteltu lähtötietoihin. Jos nimikkeestä ei ole tallennettu arvoa järjestelmään ja käyttäjä ei syötä arvoa manuaalisesti eli molemmat kentät jäävät tyhjäksi, laskenta perustuu keskimääräiseen massaan. Tuotanto- ja toimituspituus ja tuotantoon kuluva aika käyttäytyvät samalla tavalla.

Työkalu yhdistää syötetyn varastonimikkeen sen myyntinimikkeisiin. Usean myyntinimikkeen tapauksissa voidaan valita yksittäistarkastelu, kuten tässä, tai yhteenveto. Tämän perusteella haetaan vuoden myynti ja kuukausittainen keskihajonta. Tiedosto sisältää myyntitapahtumat edelliseltä kahdelta vuodelta, tarkasteluvuosi on valittavissa. Lisäksi syöttöalueen alle päivitty kuukausittainen myynti (kuvio 26).

Toteutunut myynti			kpl
	Vuosi	Kuukausi	
	2019	1	0
	2019	2	0
	2019	3	0
	2019	4	0
	2019	5	0
	2019	6	0
	2019	7	6
	2019	8	0
	2019	9	200
	2019	10	200
	2019	11	100
	2019	12	200
	2020	1	100
	2020	2	300
	2020	3	200
	2020	4	200
	2020	5	100
	2020	6	100
	2020	7	300
	2020	8	100
	2020	9	100
	2020	10	300
	2020	11	100
	2020	12	100
	2021	1	500
	2021	2	300

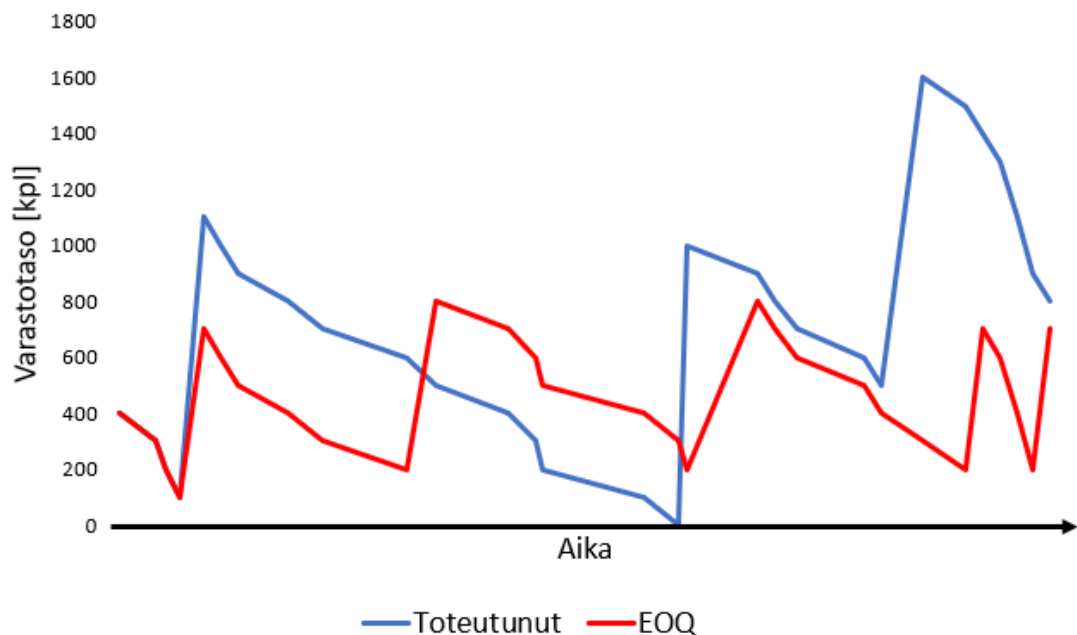
KUVIO 26. Nimikkeen kuukausittainen myynti.

Työkaluun tulee syöttää tavoiteltu toimitusvarmuus, jota hyödynnetään varmuusvaraston laskennassa, sekä kuorman tuoma lisä toimitusaikaan. Tuotannon keston pystyy määrittämään tarkasti. Tilannekohtaisen kuormituksen eli tilauskannan tuoma lisä toimitusaikaan on haastava ennustaa. Arvio jää käyttäjän vastuulle.

EOQ (kaava 9), varmuusvarasto (kaava 4) ja tilauspiste (kaava 6) lasketaan teoriassa esitetyn mukaisesti. Kaavat sisältävät yksikkömuunnoksen. Esimerkiksi myyntimäärä on perusyksikön mukaan tallennettu järjestelmään ja näin haettu tähän. Esimerkki varmuusvaraston laskennasta on esitetty kuviossa 27.

```
=JOSVIRHE(PYÖRISTÄ.DES.YLÖS(NORM.JAKAUMA.NORMIT.KÄÄNT(B11)*
LET(x;JOS(B21="";C21;B21);JOS(G15="m";x/C17*1000;JOS(G15="kg";x/(B7*C17/1000);x)))*)
NELIÖJUURI((B12+JOS(B18="";C18;B18))/30);0);"")
```

KUVIO 27. Varmuusvaraston laskenta



KUVIO 28. Esimerkki varastotason kehityksestä

Edellä mainitun nimikkeen varastotason kehitys on esitetty kuviossa 28 sinisellä. Punaisella on hahmoteltu, kuinka varastotaso olisi kehittynyt EOQ-laskennalla. Laskennan yksi ongelma on tilauspiste. Laskennallinen arvo todennäköisesti toimisi, jos tilaukset olisivat yhden kappaleen välein. Todellisuudessa tilauserät ovat vähintään 100 kappaletta, jolloin 97 kappaleen tilauspiste-

teessä ei ole järkeä. Tilauspiste nostettiin kahteen sataan. Toteutunut keskimääräinen varastotaso oli 672 ja laskennallinen 414. Useata asetuksesta huolimatta säästö kokonaiskustannuksessa oli yli sata euroa.

### 8.3.2 Wagner–Whitin

Wagner–Whitin-mallista löytyi joitain valmiita Excel-pohjia muttei modulaarisia, ja kausien muuttaminen oli työlästä. Esimerkiksi tarkastelujakson muuttaminen 12 kuukaudesta 52 viikkoon ei onnistunut. Kuviossa 29 on esitetty laskentaohjelmaan suunniteltu malli. Tunnetun menekin tilanteista eli dynaamisista laskentamenetelmistä laadittiin oma tiedosto.

		Kausien määrä		Varastointikustannus		Asetuskustannus							
		12		0,7		135		€/kpl/kausi		€			
TIC		135	270	405	540	610	680	945	1015	1085	1350	1420	1490
Tuotanto		1	2	3	4	4	4	7	7	7	10	10	10
Kysyntä		100	300	200	200	100	100	300	100	100	300	100	100
Kausi		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		135											
2			270										
3				405									
4					540	610	680						
5						675	745						
6							810						
7								945	1015	1085			
8									1080	1150			
9										1215			
10											1350	1420	1490
11												1485	1555
12													1620

KUVIO 29. Wagner–Whitin-laskentaohjelma

Ohjelmassa tulee ensin syöttää kausien haluttu määrä, jolloin jonofunktion avulla taulukkoalue päivittyy automaattisesti. Tämän jälkeen syötetään varastointikustannus muodossa montako euroa yhden kappaleen varastointi kauden aikana maksaa sekä asetuskustannus. Kuvan arvot ovat keksittyjä. Lopuksi syötetään jokaisen kauden tunnettu tai ennustettu kysyntä.

Laskenta-alueen jokainen solu on laskettu kaavan 13 mukaisesti, ja epätaloudelliset tulokset ovat piilotettuina. Vaakarivien kausien arvot esittävät tutkittavan kauden, ja pysty rivit kertovat, millä kaudella tutkittava kysyntä valmistetaan. So-

luun on merkitty vaihtoehdon kokonaiskustannus. Kuviossa 30 on esitetty, mihin jokaisen laskenta-alueen solu perustuu. Koodi kirjoitetaan alueen ensimmäiseen soluun, minkä jälkeen sen voi vetää koko alueelle.

```
=JOSVIRHE(JOS(JA($A10=B$9;A10>0);$D$3*$A10;
JOS($A10>B$9;"";
LET(x;A10+B$8*$D$2;JOS(TAI(x>B11;B11="";B$8="";"";x)))));""))
```

### KUVIO 30. Wagner–Whitin-laskenta-alueen koodi

Kaaviossa TIC-rivi näyttää kauden pienimmän kustannusvaihtoehdon ja sen alapuolella, millä kaudella valmistus tapahtuu. Kuvion 29 esimerkissä 12 kauden eli kuukauden tuotannot valmistetaan tammi-, helmi-, maaliskuu-, huhti-, heinä- ja lokakuussa. Kuviossa 31 on esitetty, kuinka tilanne kehittyy, kun asetuskustannus nousee 35 €. Tällöin kuudesta asetuksesta jää jäljelle neljä.

	Kausien määrä		Varastointikustannus		Asetuskustannus								
		12	0,7	€	kpl/kausi								
			170	€									
TIC	170	340	480	620	690	760	1190	1260	1330	1700	1770	1840	
Tuotanto	1	2	2	2	2	2	7	7	7	10	10	10	
Kysyntä	100	300	200	200	100	100	300	100	100	300	100	100	
Kausi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	170												
2		340											
3			480										
4			510	620									
5				650	720								
6				680	750	820							
7					850	920							
8						1020							
9							1190	1260	1330				
10								1360	1430				
11									1530				
12										1700	1770	1840	
											1870	1940	
												2040	

### KUVIO 31. Wagner–Whitin-tilanne 2

### 8.3.3 Silver–Meal

Silver–Meal-menetelmän käyttö ja arvojen syöttö on verrattavissa Wagner–Whitiniin, mutta laskenta eroaa. Tavoitteena on laskea periodien keskimääräinen kustannus: kun kustannus kääntyy kasvuun, aiempi pienempi kustannus merkitään muistiin ja jatketaan seuraavasta kaudesta. Laskenta voidaan tehdä taulukkolaskentana, mutta se on haastavaa. Excel-makron käytöllä pääsee helpommalla. Laskennasta löytyi useita valmiita ohjelmia, joista on kuviossa 32 on esitetty Mustafa Canbolatin (2020) tekemä.

Period	Demand	Average Cost Up to	Production Quantity
1	100	170	100
2	300	170	500
3	200	155	0
4	200	170	300
5	100	120	0
6	100	170	100
7	300	170	400
8	100	120	0
9	100	170	100
10	300	170	400
11	100	120	0
12	100	170	100
Holding Cost Per unit Per Period (h)			\$0,70
Ordering Cost Per Order (K)			\$170,00

KUVIO 32. Silver–Meal-laskenta (Canbolat 2020)

Laskenta on tehty samoilla lähtöarvoilla kuin Wagner–Whitin-esimerkissä (kuvio 31). Asetusmäärän tuplaantuminen on hyvä huomioida.


### 8.3.4 (Q, R)

(Q, R) -mallin laskenta huomioi kysynnän ja toimitusajan epävarmuuden. Menetelmä ei luo kausittaista tuotantosunnitelmaa kuten kaksi edellistä. Tässä puutekustannus korvaa toimitusvarmuuden. Toimitusvarmuuden käyttö on kaavassa mahdollinen. Tyypin 1 toimitusvarmuus supistuu EOQ- ja tilauspistemenetelmän tasolle. Tyypin 2 toimitusvarmuus tekee laskennasta pari pykälää haas-

tavamman, mutta toimeksiantaja ei hyödynnä tätä toiminnassaan. Tämän takia laskenta perustuu vain puutekustannukseen. Tarkan puutekustannuksen laskenta on mahdoton eikä ole työn tavoite. Esimerkiksi Bob Betken ja Jeff Klinen (2004) tutkimuksen mukaan puutekustannus on verkkokaupassa 11–15 \$. Brian Barry (n.d.) arvioi verkkoartikkelissaan kustannuksen olevan keskimäärin 15–20 \$. Curt Barry (2015) puolestaan arvioi omassa verkkojulkaisussaan kustannuksen 7–12 \$:n tasolle. Tulevissa laskuissa toistaiseksi käytetään 10 €:n kustannusta.

Kuten kuviossa 16 on esitetty ja kaavoista 16–19 havaitaan, malli edellyttää iterointia. Tyypillisesti kolme iterointikierrosta riittää, jolloin tulokset lähestyvät toisiaan. Kolmen kierroksen iteroinnin voisi hyvin tehdä taulukkopohjaisesti, mutta ohjelma on varmuuden vuoksi tehty makropohjaan.

Varastonimike		Varasto	
Myyntinimike			
Linja	PU1		
Metripaino	0,723	kg/m	
Reikälukku	2	kpl	



Tarkasteluvuosi	2020	
Puutekustannus	10	€
Kuorman lisä toimitusaikaan	5,0	vrk

	Syöttö	Haku	
Häkkiin mahtuva määrä		72	kpl
Tuotantopituus		3800	mm
Toimituspituus		613	mm
Tuotantoon kuluva aika		1	vrk
Asetuskustannus			€
Myynti vuodessa		2000	kpl
Keskihajonta		85	kpl
Lauttakoko	100		kpl

Q	695	kpl
R	105	kpl

Kiertonopeus	4,2	kk
Eräkkoko	308	kg

**Optimointi**

Häkki	720	kpl
Lautta	700	kpl

KUVIO 33. Eräkoon ja tilauspisteen laskenta (Q, R) -mallilla

Kuviossa 33 on esitetty tietojen syöttö, joka perustuu EOQ-laskennan pohjaan tarvittavin muutoksin. Tietojen haku on tehty kuten aiemmin. Eräkoon ja tilauspisteen laskenta on esitetty liitteessä 2. Laskennan lähtöarvot ovat toimitusvarmuutta ja puutekustannusta lukuun ottamatta samat kuin aiemmassa esimerkissä.

## 8.4 Kausivaihtelu

Wagner–Whitin- ja Silver–Meal-menetelmät edellyttävät kysynnän tuntemisen, jotta käyttämisestä on hyötyä. Nykyisessä tarpeen ennustamisessa on kehitettävää, ja tämän perusteella dynaamisista laskentaohjelmista ei ole hyötyä. Jotta ohjelmien käyttö olisi mahdollista, selvitettiin kuvion 24 ykkösnimikkeiden kausivaihtelu vuosien 2017–2020 aikana.

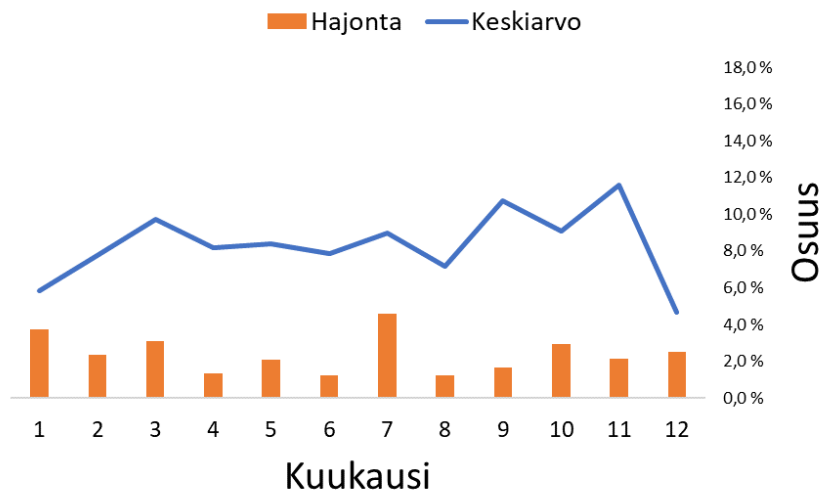
Kausivaihtelu tehtiin Excel-taulukkopohjassa. Tässä selvitettiin nimikkeen kuukausittainen myynti ja osuus kyseisen vuoden myynnistä. Tämän jälkeen selvitettiin osuuksien kuukausittainen keskiarvo ja -hajonta. Kuukauden jokaiselle keskiarvolle laskettiin suhteellinen kerroin. Kertoimien välinen keskiarvo oli 1. Laskentaan syötettiin vuoden tunnettu kysyntä, ja kertoimien avulla kysyntä johdettiin kuukausitasolle (kuvio 34).

Lähtötiedot				Laskenta				Menekki vuodessa	30370
Vuosi	Kuukausi	Myynti	Myyntin %-osuus	Kuukausi	Keskiarvo	Hajonta	Kerroin	kk	
2017	1	1457,45	4,80 %	1	5,82 %	3,73 %	<b>0,70</b>	<b>1768</b>	
2017	2	2657,14	8,75 %	2	7,76 %	2,33 %	<b>0,93</b>	<b>2358</b>	
2017	3	3473,83	11,44 %	3	9,73 %	3,07 %	<b>1,17</b>	<b>2955</b>	
2017	4	2931,77	9,65 %	4	8,19 %	1,32 %	<b>0,98</b>	<b>2488</b>	
2017	5	2136,8	7,04 %	5	8,39 %	2,06 %	<b>1,01</b>	<b>2548</b>	
2017	6	1777,85	5,85 %	6	7,85 %	1,26 %	<b>0,94</b>	<b>2384</b>	
2017	7	2445,15	8,05 %	7	8,98 %	4,61 %	<b>1,08</b>	<b>2727</b>	
2017	8	1850,12	6,09 %	8	7,19 %	1,25 %	<b>0,86</b>	<b>2183</b>	
2017	9	3148,57	10,37 %	9	10,76 %	1,68 %	<b>1,29</b>	<b>3267</b>	
2017	10	2608,97	8,59 %	10	9,07 %	2,93 %	<b>1,09</b>	<b>2755</b>	
2017	11	4543,39	14,96 %	11	11,61 %	2,13 %	<b>1,39</b>	<b>3527</b>	
2017	12	1339,41	4,41 %	12	4,64 %	2,49 %	<b>0,56</b>	<b>1409</b>	
2018	1	3635,19	12,04 %						

...

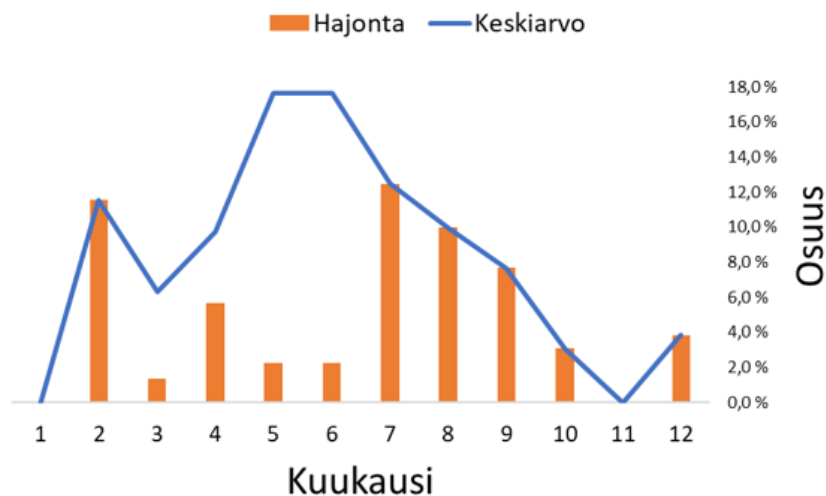
KUVIO 34. Nimikkeen kausivaihtelun laskenta

Tuloksissa oli huomattavia eroja, minkä toimialojen ja yritysten monimuotoisuudesta saattoi aavistaa. Joissain tapauksissa menekki oli tasainen vuodenvaihdetta lukuun ottamatta, kuten aiemmassa esimerkissä. Tästä on luotu kaavio kuviossa 35.



KUVIO 35. Kausivaihtelu – esimerkki 1

Toisaalta joidenkin nimikkeiden kysyntä kasvoi voimakkaasti kesällä (kuvio 36). Tämä oli rakentamisen puolelta odotettu ilmiö. Joidenkin nimikkeiden kuukausittainen vaihtelu oli erittäin suurta, ennustamatonta ja selittämätöntä.



KUVIO 36. Kausivaihtelu – esimerkki 2

Ykkösnimikkeistä luotujen kausivaihtelujen kertoimet lisättiin dynaamisen eräkoon laskentaohjelmaan. Kertoimia ei kannattanut täysin uskoa. Yhdistetty käyttö keskihajonnan kanssa antoi suunnitteluperusteen suuren menekin nimikkeille. Selvitysprosessiin luotiin työkalu, joka mahdollisti minkä tahansa nimikkeen kausivaihtelun selvittämisen helposti.

## 9 TULOKSEN OPTIMOINTI

Kulurakenteella laskettu taloudellinen eräkokoko ei aina ole kokonaistilanteen kannalta kannattavin vaihtoehto. Tarpeet vaihtelevat toimialoittain. Tilannekohtaisesti tuotettava määrä saattaa perustua tuotannon tai materiaalinhankinnan asettamiin raameihin, kuten jiggin kokoon tai aihoiden määrään. Toisinaan rajoittavana tekijänä on logistiikka. Tavara lähetetään täysissä konteissa, tai sitten tulee huomioida varastointimenetelmä.

Luvussa 5.1.1 tutkittiin taloudellisesta eräkokoa herkkyyksanalyysin avulla. Tuloksentekijän mukaisesti poikkeama EOQ-alueen läheisyydessä vaikuttaa kokonaiskustannukseen rauhallisesti. Ylöspäin suuntautuvan poikkeaman merkitys on pienempi. Tavoitteena on analysoida kokonaisvaltaisesti Purson tuotantoketjua sekä arvioida eräkokoa rajoittavat tekijät ja huomioida ne laskennassa.

### 9.1 Häkin tilavuus

Purson sisäinen logistiikka ja varastointi tapahtuu yleensä kuvan 12 häkissä. Varastointikustannuksen kannalta on yhdentekevää, onko häkki täynnä vai puolillaan. Asetuskustannusta ajatellen on kannattavampaa tuottaa täysi häkki, eli eräkoon kannattaa olla häkkiin mahtuvan määrän kerrannainen.

Profiilin mittojen ja häkin poikkipinta-alan perusteella voi arvioida häkkiin mahtuvien profiilien määrän. Tapauskohtaisesti profiilit voidaan asettaa lomittain toistensa sisään. Tutkinta ei ole haastavaa, mutta se on aikaa vievää, ja tavoitteena on tehdä se jokaiselle varastonimikkeelle.

Ensimmäinen harkittu menetelmä oli nestaus. Nestausprosessi tarkoittaa muodon tietokoneavusteista sijoittelua tietylle alueelle, ja se on luotu levyjen leikkaamiseen. Ohjelmaan syötetään halutun muodon piirustus, määrä ja levyn mitat, ja ohjelma laskee sijoitteluehdotuksen, jolloin materiaalihukka on mahdollisimman pieni. Määrittämisen kyseenalaisti profiilikuvien tallennusmuoto. Tuloksesta saatava hyöty ei ollut varma, koska ohjelmisto oli alkujaan suunniteltu toi-

senlaiseen käyttöön ja toimintaa ohjaavat parametrit eivät olleet parhaat. Toimintatavan arvioitu riski-hyötysuhde ei ollut ajankäytön kannalta kannattava.

Varastointikustannus selvityksen tavoin käyttökelpoinen vaihtoehto oli hyödyntää kahden edellisen vuoden kollitapahtumien yhteenvetoa häkkien pakkaustapahtumista. Arvojoukossa tuli huomioida käyttäjien näppäilyvirheet ja häkkien pakkaaminen vajaiksi, mitä prosessin aikana tapahtui. Jokaisen varastonimikkeen kaikki pakkaustapahtumat listattiin luotuun tietokantaan. Nimikkeiden menekki vaikutti tutkimustulosten luotettavuuteen. Mitä enemmän nimikettä kulutettiin, sen useampia pakkaustapahtumia oli tallentunut tietokantaan ja tulosten keskijajonta pieneni. Luotettavin tutkintatapa oli moodiarvo, joka kertoi useimmiten esiintyvän arvon eli mikä oli yleisin häkkiin pakattu profiilimäärä. Nimikkeiden tilausmäärän vähetessä tulosten luotettavuus heikkeni. Osa nimikkeistä analysoitiin mediaaniarvolla sekä manuaalisesti käymällä läpi pakatut määrät. Kun häkkimäärä yhä pieneni, ei ollut muuta mahdollisuutta kuin käyttää maksimiarvoa, joka oli erittäin kyseenalainen vaihtoehto.

Tutkimuksen päätyttyä oli varastonimikelistaan yhdistetty häkkiin mahtuva määrä. Tulosta käytettiin valmiissa laskentaohjelmassa. Tässä tapauksessa keskiarvon sijasta oli mahdollista käyttää yksittäisen profiilin varastointikustannusta. Tämän lisäksi oli mahdollista optimoida laskettua tulosta. Kustannusjakauman perusteella laskettu arvo pyöristettiin ylöspäin häkkiin mahtuvan määrän kerrannaiseksi, jotta tuotanto tapahtuisi täysissä häkeissä. Laskettu arvo ilmoitettiin ohjelmassa alkuperäisen määrän rinnalla (kuvio 25). Jos esimerkiksi EOQ-arvo on 425 kpl ja häkkiin mahtuu 50 kpl, pyöristetty määrä on 450 kpl. Osa nimikkeistä varastoidaan vaihtoehtoisilla tavoilla, kuten eurolavoilla. Määrä on pieni, mutta nämä edellyttivät oman tutkimuksen. Tutkimuksen osasto tuli vaihtaa, koska pakkaaminen ei tapahtunut pursotuslaitoksella.

## 9.2 Lauttakoko

Pursotusprosessin pullonkaula voi sijaita useassa paikassa. Eräät mahdolliset pullonkaulan sijainnit ovat tuotantosaha ja keinovanhennus. Tuotantosahan pullonkaulatodennäköisyyttä voi pienentää sahaamalla vain täysiä lauttoja. Lautalla tarkoitetaan tuotantosahan yhteen työkiertoon mahtuvien profiilien kokonaisuutta (kuva 13).

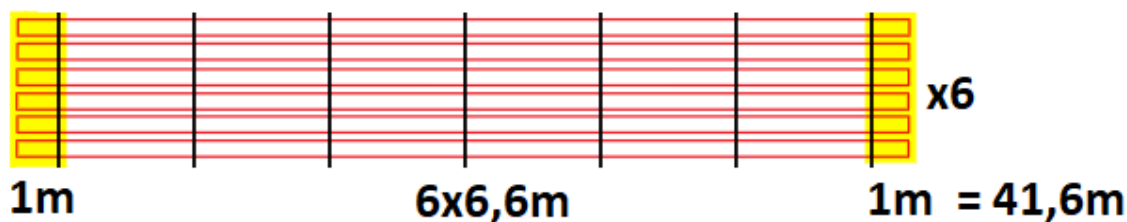


KUVA 13. Lautta (Genesis Aluminium Industries n.d.)

Tavoite olisi, että pullonkaula saadaan puristimelle. Tuotantosahan työkiertoon kuluu aina sama aika. Mitä useampi profiili lautassa on, sen kauemmin aikaa pursotus kestää. Tämän takia on järkevää tähdätä siihen, että sahaus tehdään aina täydelle lautalle, jolloin käyttöajan suhde puristimeen paranee.

### 9.2.1 Laskenta

Kuvan 13 lautasta saatavien profiilien määrään vaikuttaa vedonpituus, tuotantopituus, vierekkäisten profiilien määrä ja vetovarot. Kuvion 37 esimerkin vedonpituus on 41,6 metriä; vedon alusta ja päädyistä sahataan vääntynyt matka, joka tässä tapauksessa on metri. Tuotantopituus on 6,6 metriä, ja tällöin vedosta saa kuusi sahuuta. Profiileita on lautassa vierekkäin kuusi kappaletta. Lauttakoko eli lauttaan mahtuva määrä on näiden tulo eli 36 kappaletta.



KUVIO 37. Profiilien määrä lautassa

Laskenta tuotantotietojen perusteella ei ole yksinkertaista, ja se tehdään käännteisessä järjestyksessä kuin edellä mainittiin. Vierekkäisten profiilien määrää rajoittaa häkin leveys. Tämä jaetaan profiilin leveydellä, mutta laskennallisesti tulee huomioida riittävä välys vanhennuksen ja käsittelyn kannalta sekä laitteiston nostokyky.

Vedonpituuden tulee lähtökohtaisesti olla mahdollisimman pitkä, koska tuottavuus paranee. Laskentaan vaikuttavat profiilin metripaino, suulakkeen reikäluku, tuotantopituus ja puristimen perustiedot. Perustiedoista tulee selvittää billetin halkaisija, maksimi- ja minimipituus ja seoksen tiheys. Näiden avulla voidaan laskea raja-arvot eli se, minkä tulee olla vedon vähimmäis- ja maksimimassa.

Yksi tapa aloittaa laskenta on asettaa sahuiden määräksi pöydän pituuden perusteella laskettu teoreettinen maksimi, eli pituus jaetaan tuotantopituudella, pyöristetään alaspäin ja tarkistetaan, että vetovarat riittävät. Tämän jälkeen lasketun vedon massaa verrataan raja-arvoihin. Jos massa on suurempi, sahuita vähennetään, kunnes vedon massa laskee raja-arvojen väliselle alueelle. Jos massa on raja-arvoa pienempi, vetojen määrää lisätään. Vaiheita iteroidaan, kunnes toteuttamiskelpoinen ratkaisu on selvillä. Tähän malliin perustuvasta Excel-makron koodista on esimerkki liitteessä 3, ja syöttöalue on liitteessä 4.

Laskennan aikana tulokseksi sai myös häkkiin mahtuvien profiilien määrän, profiilien välyksen, billetin pituuden ja häkin massan. Häkin massa on myös tapauskohtaisesti rajoittava tekijä laitteiston nostokyvyn takia. Luotu laskentamalli oli kaikkea muuta kuin aukoton. Todellisuus poikkeaa lasketusta esimerkiksi, kun profiilit asetetaan päällekkäin tai käännetään. Sahuiden määrää voidaan

vähentää pursotuspaineiden takia, ja monesti profiili on valmistettavissa niin pitkällä kuin lyhyellä billettillä. Laskenta tavoittelee näistä ensimmäistä.

Edellä kuvattu laskentamalli on poikkeamista huolimatta yksinkertainen ja toimii pienillä metripainoilla. Metripainon kasvaessa tulee lisäksi huomioida useamman billetin vedot ja sydänvianpoistot. Nämä tekevät teoreettisen laskennan entistä haastavammaksi. Tämän takia luotu ohjelma oli käytössä vain tulosten varmuuslaskentaan.

## 9.2.2 Tuotantotiedot

Lauttakokoa päädyttiin selvittämään tapahtuneiden tuotantotietojen perusteella. Vaihe oli työläs, joten nimikkeiden määrä rajattiin volyyminä tehdyn ABC-analyysin A-luokkaan. Ryhmän kumulatiivisen volyymin osuus varastonimikkeiden kokonaisuudesta oli 80 %. Tehdyt tutkimukset perustuivat Progrexin tietokantaan.

Luotu nimikelista jaettiin puristimittain ja selvitettiin näiden nimikkeiden yleisimmät tuotantopituudet, joihin tutkimus perustui. Lautan leveys laskettiin kuten aiemmin eli profiilin leveyden perusteella. Sahuiden ja vetojen määrä perustui toteutuneeseen, eli eroavista toimintatavoista selvitettiin yleisin ja tulokset listattiin.

Kuten aiemmin on todettu, todellisuus eroaa teoreettisesti lasketusta. Tämän takia tuloksista laadittiin yhteenveto, johon pyydettiin alan ammattilaisten eli linjalla työskentelevien mielipiteet siitä, kuinka todellisuudessa tapahtuu. Laaditun yhteenvedon lähtötiedoista ja tuloksista on esimerkki kuviossa 38 ja 39. Kommenttien perusteella alkuperäinen lista päivitettiin.

Profiili-numero	Sahuumitta [mm]		Reikäluke [kpl]	Metripaino [kg/m]	Pituus KA				Profiilin [mm]		
					Billetti [mm]	Veto [m]	Vetoja / billetti [kpl]	Billettejä / veto [kpl]	Sahuut vedossa [kpl]	Leveys	Korkeus
	6150		1	2,120	1225	48,4	1	1	7	170,0	65,0
	3000		6	0,154	1112	101,3	2	1	16	20,0	20,0
	6150		1	1,228	717	48,1	1	1	7	108,0	65,0
	6000		2	0,745	905	50,7	1	1	8	56,5	40,4

KUVIO 38. Lauttakokoselvityksen lähtötiedot

Profiili-numero	Sahuumitta [mm]	Lauttaan mahtuvat vedot [kpl]	Kerroksia häkissä [kpl]	Vanhennus-häkkiin mahtuvat profiilit [kpl]	Vierekkäisten profiilien välys [mm]	Profiilien paino vanhennus-häkissä [kg]	Profiilit lautassa [kpl]	Kommentointi
	6150	5	4	20	12,5	260,8	35	
	3000	7	8	336	1,5	154,7	672	Pyörästetty ylös seitsemään vetoon.
	6150	8	4	32	5,1	241,6	56	
	6000	7	4	56	8,9	250,3	112	

### KUVIO 39. Lauttakokoselvityksen tulokset

Häkkikoon tavoin taloudellisen eräkoon laskentaohjelma päivitettiin ehdotta-  
maan tuloksen optimointia lauttakoon mukaan. Hyödyntämispäätös jäi tuotan-  
nonsuunnittelulle. Ongelmana ovat tapauskohtaisesti suuret kappalemäärät,  
mikä tekee optimoinnista taloudellisesti kyseenalaisen. Käytettävyys paranee  
etenkin suuremmissa erissä.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteet olivat seuraavat:

1. Nimikekohtaisen eräkoon kustannusjakauman määrittäminen toimeksiantajan toimintaympäristössä. Alumiinin pursotuksen asetuskustannus tuli määrittää 8 ja 9":n pursotuslinjastoille. Varastointikustannuksen oli perustuttava käytössä olevan tehdasympäristön lattiavarastoihin.
2. Ryhmitellä varastonimikkeet ohjaustarpeen mukaan.
3. Luoda laskentaohjelmisto varasto-ohjautuvan nimikkeen eräkoon ja tilauspisteen laskentaan, mikä huomioi nimikekohtaisen kustannus- ja ohjaustarve-eron.
4. Optimoida kustannusrakenteen perusteella laskettu taloudellinen eräko ko tuotannon kannalta tehokkaammaksi.

Asetuskustannustutkimuksen tuloksena oli algoritmi, joka linjaston, profiilin metripainon ja suulakkeen reikäluvun perusteella laskee tilannekohtaisen asetuskustannuksen. Luotu algoritmi perustui alumiinin pursotuksen todelliseen kulurakenteeseen toimeksiantajan linjastoilla. Nimikekohtaista eroa määrittävien parametrien eli linjaston, profiilin metripainon ja suulakkeen reikäluvun valinnat perustuivat todellisiin tutkimustuloksiin. Asetuskustannus kasvoi lineaarisesti profiilin metripainon ja suulakkeen reikäluvun kasvaessa.

Varastointikustannustutkimuksen tuloksena oli varastointiyksikkö- eli häkkikohmainen kiinteä kustannus. Määritetyssä kustannuksessa oli huomioitu toimeksiantajan toimintatavan, varaston rakenteen ja tuotteiden luomat tapauskohtaiset kustannukset. Tutkimuksen aikana oli huomioitu varastoinnin suurin haaste eli varastointiin käytettävissä olevan tilan pieni koko. Työn lopuksi keskimääräinen varastorakenne oli saatujen tulosten perusteella simuloitu, ja sen oli varmistettu olevan tilan puolesta toteutuskelpoinen. Simuloinnista oli tehty määräajoin toistettava tehtävä, koska nimikekanta muuttuu ajan kuluessa.

Varastonimikeryhmittelyn tuloksena oli kolme pääryhmää. Ryhmäjako varten nimikekannalle oli tehty kaksivaiheinen analyysi myyntivolyymien ja keskihajonnan mukaan. Nimikkeet oli asetettu myyntivolyymien keskihajonnan funktiona kuvaajalle ja nimikeryppäät jaettu A-, B- ja C-luokkiin:

- A-luokan nimikkeiden volyymit ja keskihajonnat olivat suurimmat ja edellyttivät tarkimman ohjaustavan.
- B-luokka sisälsi suurimman osan nimikkeistä, ja ohjaus oli automatisoitavissa.
- C-luokan keskihajonta oli suuri, mutta volyymit pienet, jolloin varastoinnin lopettamista tuli pohtia.

Luotu laskentaohjelmisto sisälsi kolme ohjaustapaa. A-luokan ohjaus tapahtui dynaamisilla laskentamenetelmillä ennustetun menekin perusteella. Menekkiä oli mahdollista ennustaa kausivaihtelulla, jolloin laskenta tehtiin SM-menetelmällä. Kun asiakkaan tarkka menekki tunnettiin, laskenta tehtiin W-W-menetelmällä. Laskentaohjelmassa B-luokan nimikkeitä ohjataan EOQ:n, varmuusvaraston ja tilauspisteen laskentakaavoilla. Tapauskohtaisesti oli mahdollista käyttää (Q, R) -mallia, kun nimikkeiden keskihajonta kasvoi. Tästä esimerkkinä kuviossa 24 numerolla kolme merkitty alue.

Laskentaohjelmiston eräkoon optimoinnin tuloksena oli häkkiin mahtuvan määrän ja lauttakoon mukainen tarkastelu. Jokaisen varastonimikkeen häkkiin ja lauttaan mahtuvat määrät selvitettiin ja lisättiin laskentaohjelmiston perustietoihin. Laskentaohjelmisto ehdotti taloudellisen eräkoon lisäksi edellä mainittuihin kerrannaisiin ylöspäin pyöristetyn määrän. Työssä arvioitiin taloudellisesta eräkoosta poikkeamisen kustannus herkkyyksanalyysin avulla. Optimoinnin käyttökohteita varten luotiin tapauskohtaiset suuntaviivat tuotannosuunnittelulle, mutta lopullinen hyödyntäminen jäi heidän päätettäväkseen.

Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin. Asetuskustannukseen valitut parametrit olivat käyttäjäystävälliset sekä todellisuuteen perustuvat. Tuloksista oli havaittavissa selkeät nimikekohtaiset eroavaisuudet. Varastointikustannuksen määrittäminen häkkitasolle mahdollisti sen, että kustannus oli profiilimuotojen perusteella helppo johtaa nimiketasolle. Varaston tilan huomioiminen kokonaistilanteen säännöllisellä simuloinnilla ja varastointikustannuksen mahdollisella ker-

toimella vaikutti parhaalta vaihtoehdolta. Ohjaustarpeen määrittäminen nimikkeiden volyymin ja keskihajonnan perusteella oli selkeää, mutta ryhmien raja-arvojen luominen ei ollut suoraviivaista. Paras vaihtoehto vaikutti olevan analysoida yhteenveto manuaalisesti määrääjain.

Luotu laskentaohjelmisto tehtiin Excel-pohjaan. Excel on hyvä väline tilannekohtaisille ad hoc -analyysille ja tarpeen mallintamiselle. Tulevaisuuden materiaalinohjaukseen Excel on kuitenkin kankea työkalu, mutta hyvä ensimmäinen askel suunnittelussa. Tarvelaskenta on tulevaisuudessa mahdollista ohjata esimerkiksi kehittämällä nykyistä ERP-järjestelmää tai investoimalla SCM-ohjelmistoon.

Jatkotutkimuksena kannattaa määrittää tarkka puutekustannus sekä optimoinnin vaikutus kokonaiskustannukseen. Täydennystilauksen ja nimikkeiden säilyminen tarvelaskennan piirissä prosessikaaviot tulee päivittää. Asetuskustannustutkimuksen yhteydessä pinnalle nousi tuotannon selkeitä kehityskohteita, joihin opinnäytetyön tekijä keskittyy työn jälkeen.

## LÄHTEET

AEC. 2018. Aluminum Extrusion Manual, 4.2 Edition. Luettu 2.3.2021.  
<https://www.aec.org/page/aluminum-extrusion-manual>

Barry, B. n.d. The True Cost of a Backorder. Luettu 21.3.2021.  
<https://www.fcbco.com/blog/the-true-cost-of-a-back-order>

Barry, C. 2015. The High Cost of Back Orders. Luettu 21.3.2021.  
<https://multichannelmerchant.com/blog/high-cost-back-orders/>

Betke, B. & Kline, J. 2004. A Study of Backorder Costs for Non-Store Retailers. Luettu 21.3.2021. <http://images.fedex.com/us/retail/backorders.pdf>

Brightstar. 2017. Parts of aluminum extrusion machine and its function. Luettu 3.3.2021. <https://www.machine4aluminium.com/parts-of-aluminum-extrusion-machine-and-its-function/>

Canbolat, M. 2020 Production Planning and Optimization Video 2: Determining Lot Sizes using Silver-Meal Heuristic. Youtube-video. Julkaistu 19.8.2020. Viitattu 21.3.2021. <https://www.youtube.com/watch?v=a9smN-1IGX8>

Castool. n.d. Dummy block. Luettu 3.3.2021.  
<https://castool.com/extrusion/dummy-blocks/>

Chahal, V., Gupta, A., Jindal, S. & Singh, M. 2017. Evaluation and Selection of Lot Sizing Techniques using SAW Approach for Indian Automobile Industries. International Journal of Theoretical and Applied Mechanics 12 (2), 311–318.

Clubtechnical. 2019. Extrusion Process | Types, Advantages, Disadvantages, Applications. Julkaistu 24.3.2019. Luettu 2.3.2021.  
<https://clubtechnical.com/extrusion>

Engels, A. 2020. Dynamic Lot Sizing: A Guide to Understanding the Total Cost of Ownership. Luettu 16.3.2021. <https://genlots.com/dynamic-lot-sizing-a-guide-to-understanding-the-total-cost-of-ownership/>

Extrutech. n.d. Product: Induction Heaters. Luettu 2.3.2021. <https://www.extrutech-gmbh.de/en/produkte/induction-heaters/>

Finder. n.d. Purso Oy. Luettu 15.3.2021.  
<https://www.finder.fi/Alumiini/Purso+Oy/Siuro/yhteystiedot/2092752>

Fonnov. 2020. What Needs To Be Considered In Extrusion Die Design? Luettu 3.3.2021. <https://www.fonnovaluminium.com/extrusion-die-design.html>

Fourmann, J. 2019. Aluminum Extrusion Quality for Anodizing Characteristic. Wadsworth, OH: RioTinto.

Gel, E. & Keskinocak, P. 2013. Lot size/Reorder level (Q,R) Models. ISYE 3104.

Genesis Aluminium Industries. n.d. About us. Luettu 19.3.2021.

<https://www.genesis-ai.com/about-us/>

Guo, L. & Yang, H. 2014. Comprehensive Materials Processing. Amsterdam: Elsevier.

Happonen, A. 2011. Muuttuvaan kysyntään sopeutuva varastonohjausmalli. Teknistaloudellinen tiedekunta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Väitöskirja.

Hauge, T. & Reiso, O. 2012. From Liquid Aluminium to Aged Profiles. Hydro.

Haverila, M., Kouri, I., Miettinen, A. & Uusi-Rauva, E. Teollisuustalous. 2009. 6. painos. Tampere: Infacs.

Hellman, O. 2020. Varaosavaraston ohjauksen kehittäminen ABC-analyysin avulla. Logistiikan tutkinto-ohjelma. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Hopp, W. & Spearman, M. 2008. Factory physics. 3. painos. Lontoo: McGraw-Hill Education.

Hydro. n.d. Uses of Aluminum Extrusions. Luettu 15.3.2021.

<https://www.hydro.com/en-US/profiles/uses-of-aluminum-extrusions>

Häkkinen, K., Joutsen, P. & Pötry J. 2003. Konepajateollisuuden alihankinta-prosessien kehittämisedellytykset ja -tavat pk-sektorilla. VTT. Koneali-projektin loppuraportti.

Jain, R. & Agarwal, U. 2013. Lot sizing: least unit cost. Luettu 9.3.2021.

[https://www.slideshare.net/RishabhJain2/opc-least-unit-cost?from\\_action=save](https://www.slideshare.net/RishabhJain2/opc-least-unit-cost?from_action=save)

Jalkanen, J. 2019. Tekniikka & Talous. Purso Group tuplaa kokonsa ostamalla hollantilaisen Nedal Aluminiumin. Luettu 17.3.2021.

<https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/purso-group-tuplaa-kokonsa-ostamalla-hollantilaisen-nedal-aluminiumin/7b361beb-18a4-3be1-b70c-71ddb68073d4>

Karrus, K. 2001. Logistiikka. Helsinki: WSOY.

Katajamäki, A. 2011. Varaston toiminnan tehostaminen. Logistiikan koulutusohjelma. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Krajewski, L. 2007. Operations management: Processes and value chains. 8. painos. New Jersey: Pearson Education.

Lahti, N. 2015. Varastonohjauksen tehostaminen. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Leino, M. 2018. Tuotantotoiminnan kehittäminen varastonhallinnan avulla. Johdantamisen ja tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö.

Logistiikan maailma, A. n.d. Varastoinnin logistiikka. Luettu 16.3.2021.

<https://www.logistiikanmaailma.fi/aineistot/logistiikka-lukiolaisille/varastoinnin-logistiikka/>

Logistiikan maailma, B. n.d. Tilauspiste. Luettu 16.3.2021.

<https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/materiaalinohjaus/tilauspiste/>

Logistiikan maailma, C. n.d. Materiaalin ohjaus nimiketasolla. Luettu 16.3.2021.

<https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/materiaalinohjaus/materiaalin-ohjaus-nimiketasolla/>

Logistiikan maailma, D. n.d. Tarvelaskenta - MRP. Luettu 16.3.2021.

<https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/materiaalinohjaus/tarvelaskenta-mrp/>

Logistiikan maailma, E. n.d. JIT (JUST-IN-TIME) ja imuohjaus. Luettu

16.3.2021. <https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/prosessien-kehittaminen/jit-just-in-time-ja-imuohjaus/>

Logistiikan maailma, F. n.d. Varaston toiminnan mittaaminen. Luettu 16.3.2021.

<https://www.logistiikanmaailma.fi/logistiikan-toimijat/varastointi/varastonohjaus/varaston-toiminnan-mittaaminen/>

Logistiikan maailma, G. n.d. Varastonohjaus. Luettu 16.3.2021.

<https://www.logistiikanmaailma.fi/logistiikan-toimijat/varastointi/varastonohjaus/>

Lumley, R. 2018. Introduction: Aluminium, the Strategic Material. Teoksessa Lumley, R. (toim.) Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Recent Advances. Cambridge: Woodhead Publishing, xvii-xxx.

Luoma, I. 2018. Kustannusten hallinta maahantuontiyrityksen toimitusketjussa. Liiketalouden koulutusohjelma. Haaga-Helia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Meal, H. C. & Silver, E. 1973. A heuristic for selecting lot size quantities for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment. Washington, DC: APICS.

MOL-1210. 2005. Alumiini. Tampereen teknillinen yliopisto Materiaaliopin laitos.

Luettu 3.3.2021. [http://www.tut.fi/vmv/2005/vmv\\_4\\_2\\_1.php](http://www.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_2_1.php)

Mäkinen, T. 2010. Tuotannon eräkokojen optimointi ja optimointityökalun kehittäminen. Tuotantotalouden koulutusohjelma. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Powell, W. B. 2013. Deterministic inventory problems. Luettu 10.3.2021.

[https://castlelab.princeton.edu/html/Presentations/ORF411\\_2013/ORF%20411%202014%20Deterministic%20inventory%20problems.pdf](https://castlelab.princeton.edu/html/Presentations/ORF411_2013/ORF%20411%202014%20Deterministic%20inventory%20problems.pdf)

Purso. n.d. Yritysesittely. Luettu 15.3.2021. <https://purso.fi/purso/>

REISCH Maschinenbau. n.d. Double puller with additional flying saw. Luettu 3.3.2021. <https://www.reisch.at/en/references-clients/double-puller-additional-flying-saw.php>

Ritvanen, V. & Koivisto, E. 2007. Logistiikka PK-yrityksissä. Porvoo, Helsinki: WSOY Oppimateriaalit.

Russell, R. & Taylor, B. 2009. Operations Management. 6. painos. Hoboken: John Wiley & Sons.

Saha, P. 2000. Aluminum Extrusion Technology. Ohio: ASM International.

Sakki, J. 2003. Tilaus-toimitusketjun hallinta. Espoo: Jouni Sakki.

Save Intelligent Equipment Co., Ltd. n.d. Aluminium Extrusion Process with Quenching. Luettu 3.3.2021. <http://aluminum-process.com/2018/1-aluminum-extrusion.html>

Semiatin, S.L. 2005. ASM Handbook Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming. Ohio: ASM International.

Silver City Aluminum. n.d. Top Industries That Use Custom Aluminum Extrusion Solutions. Luettu 15.3.2021. <http://scaluminum.com/2018/05/top-industries-that-use-custom-aluminum-extrusion-solutions/>

SMS Elotherm. n.d. Induction heating for extrusion IAS/SMS Elotherm. Luettu 2.3.2021. <https://www.sms-elotherm.com/en/induction-heating/bolts/>

SMS Group. 2019. Constellium Singen again relies on aluminum extrusion technology from SMS group. Luettu 3.3.2021. <https://www.sms-group.com/press-media/press-releases/press-detail/constellium-singen-again-relies-on-aluminum-extrusion-technology-from-sms-group-1308/>

SMS Group. n.d. HybrEx. Luettu 3.3.2021. <https://www.sms-group.com/press-media/media/downloads/download-detail/17556/>

Stevenson, W. 2009. Operations Management. 10. painos. New York City: McGraw-Hill/Irwin.

Stock, J. & Lambert, D. 2001. Strategic Logistics Management, international edition. 4. painos. Singapore: McGraw-Hill Companies.

The Aluminium Association. n.d. Bauxite. Luettu 15.3.2021. <https://www.aluminum.org/industries/production/bauxite>

Torre Nieto, J. 2010. Feature based costing of extruded parts. Mechanical Engineering. University of Illinois. Pro gradu -tutkielma.

Turla A10.85. n.d. Aluminium extrusion log gas heated furnace STeP5. Luettu 2.3.2021. <https://www.turla.it/products/before-the-press-id2/aluminium-extrusion-log-gas-heated-furnace-step5-id9.html#parentHorizontalTab22>

Turla A20.20. n.d. Quench mod. QA. Luettu 3.3.2021.

<https://www.turla.it/products/from-press-to-cooling-table-id3/quench-mod-qa-id17.html>

Turla. n.d. Cutting system of hot saw sawing. Luettu 3.3.2021.

[https://www.turla.it/references/cutting-system-of-hot-saw-sawing\\_1.html](https://www.turla.it/references/cutting-system-of-hot-saw-sawing_1.html)

Virtanen, I. 2001. Mallintamisesta, esimerkkinä varastomallit. Talousmatematiikan perusteet. Julkaistu 10.4.2001. Luettu 9.3.2021.

<http://lipas.uwasa.fi/~itv/TMPslide.pdf>

Vitex Extrusion. n.d. Aluminum Extrusion Manufacturing 101: Understanding Extrusion Die Types. Luettu 3.3.2021. <https://vitextrusions.com/aluminum-extrusion-die-types/>

Vuorio, J. 2019. Tuotantosuunnitelman optimointi numeerisella simuloinnilla.

Johtamisen ja tietotekniikan tutkinto-ohjelma. Tampereen yliopisto. Diplomityö.

Özdemir, R. n.d. IE652 - Chapter 6. Dynamic Lot Sizing Techniques. Luettu

10.3.2021. [http://web.iku.edu.tr/~rgozdemir/IE652-lecturenotes-summer\\_files/2009-2010-Summer/IE652-chp6\(2009-2010\)summer.pdf](http://web.iku.edu.tr/~rgozdemir/IE652-lecturenotes-summer_files/2009-2010-Summer/IE652-chp6(2009-2010)summer.pdf)

## LIITTEET

### Liite 1. Laadittu haastattelun muistio

Esimerkissä on ensimmäinen sivu kolmesivuisesta muistiosta.

**Paikka:** Teams

**Aika:** 18.1.2021 kello 10–11

**Paikalla:** WKa ja SJä

[Palaveri: Asetuskustannusten suunnittelu - Opinnäytetyö](#)

### Muistio

- Vaihtoajan selvittäminen Progrex datasta:
  - o Työkalun vaihto aika suoraan.
  - o Kiihdytys: datassa jokaisen billetin aloitus- ja päätösaika. Tilaukselle voi määrittää keskimääräisen billetin keston ja tätä verrata ensimmäisiin billetteihin, jolloin saa suoraan selville kiihdytykseen kuluneen ylimääräisen ajan.
    - Näkyvillä työkalukohtaisesti juokseva numerointi, jolla voi eritellä ensimmäiset billettit.
  - o Vaihto aika on näiden summa.
    - Suodattaa epämääräisen otannan pois. (Nopeuserot, takatuen haku...)
    - Selvitys esimerkiksi viikon otannasta molemmilla puristimilla.
  - o Poweredissa jatkossakin voidaan käyttää nykyisiä [REDACTED] minuutin vaihto aikoja.
- Progrexista tiedon tuonti Exceliin on mahdollista. Simo lupasi avustaa tämän kanssa.
  - o Suunnittelen tarvittavan, lähetän ja seuran vierestä toteutuksen.
- Järjestelmässä viikon billettidata ainakin latautuu siedettävässä ajassa.
- Tyhjän kalun täyttöä voi selvittää vertaamalla ensimmäisen billetin mittaa ja vedonpituutta työn keskiarvoon tai myöhempisiin vetoihin.
  - o Tässä on huomioitava pursotus ilman pulleria eli patkka, minkä ajuri sahaa pois ennen kuin asettaa vedon pullerin leukoihin.
  - o Pitää muistaa suhteuttaa billetin pituuteen.
    - Tieto löytyy Progrexista.
  - o Saatu arvo voi olla merkittävä isoilla kaluilla & pienillä ajoilla. Toisaalta vaikutus voi olla mitätön isoilla ajoilla pienestä kalusta.
- [REDACTED] tekee Power BI raporttia prosessiromun määrästä.
  - o Progrexin datan perusteella määriteltä eri romun määriä.
- Työkalujen määrä, jotka varastoidaan alumiinit sisällä voi arvioida ottamalla huomioon:
  - o livetyksen läpimenevän suulakemäärän eli noin [REDACTED] vuorokaudessa + [REDACTED] kokeisiin.
  - o Suhteuttaa päivässä ajettujen työkalujen määrään.
  - o Nitrausten ajankohta löytyy poweredissa: "Sulake verstaalle" -> "Nitrus" ja rivillä ilmoitettu nitrauksen päivämäärä ja kellonaika.
    - Selvittää päivän nitrausmäärän.

## Liite 2. (Q, R) -menetelmän Excel macro

```

i = 1
valmis = False
R = 1
u = myynti_v / 365 * toimitusaika
variassi = VBA.Sqr((12 * keskihajonta_kk ^ 2) / 365 * toimitusaika)

EQ = VBA.Sqr((2 * asetuskustannus * myynti_v) / varastointikustannus)
Z = 1 - (EQ * varastointikustannus) / (puutekustannus * myynti_v)
R = Application.WorksheetFunction.NormSInv(Z) * variassi + u
N_R = (Application.WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Z, False) - Z * _
(1 - Application.WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Z, True))) * variassi
Q = VBA.Sqr((2 * myynti_v * (asetuskustannus + puutekustannus * N_R)) / varastointikustannus)

Do While valmis = False
    Z = 1 - (Q * varastointikustannus) / (puutekustannus * myynti_v)
    R_u = Application.WorksheetFunction.NormSInv(Z) * variassi + u
    N_R = (Application.WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Z, False) - Z * _
(1 - Application.WorksheetFunction.Norm_S_Dist(Z, True))) * variassi
    Q_u = VBA.Sqr((2 * myynti_v * (asetuskustannus + puutekustannus * N_R)) / varastointikustannus)

    If i > 20 Or Application.WorksheetFunction.RoundUp(Q_u, 0) = Application.WorksheetFunction.RoundUp(Q, 0) Or _
Application.WorksheetFunction.RoundUp(R_u, 0) = Application.WorksheetFunction.RoundUp(R, 0) Then
        valmis = True
        Q = Application.WorksheetFunction.RoundUp(Q_u, 0)
        R = Application.WorksheetFunction.RoundUp(R_u, 0)
    Else
        Q = Q_u
        R = R_u
        i = i + 1
    End If
Loop
Cells(14, 6) = Q
Cells(15, 6) = R

```

### Liite 3. Lauttakoon laskentaan luotu Excel macro

```

Valmis = False
Sahuumitta = ActiveWorkbook.Worksheets("Laskenta").Cells(5, 4).Value
Maksimi = ActiveWorkbook.Worksheets("Vakiot").Cells(4, 2).Value
Vetovara = ActiveWorkbook.Worksheets("Vakiot").Cells(5, 2).Value
Bil_metripaino = ActiveWorkbook.Worksheets("Vakiot").Cells(8, 2).Value
Prof_metripaino = ActiveWorkbook.Worksheets("Laskenta").Cells(3, 4).Value
Reikaluku = ActiveWorkbook.Worksheets("Laskenta").Cells(4, 4).Value
Sahuiden_vahennys = ActiveWorkbook.Worksheets("Laskenta").Cells(10, 4).Value

Vetojen_maara = 1
i = 1

Bil_max_paino = Bil_metripaino * (ActiveWorkbook.Worksheets("Vakiot").Cells(6, 2).Value - Jätelätkä)
Bil_min_paino = Bil_metripaino * (ActiveWorkbook.Worksheets("Vakiot").Cells(7, 2).Value - Jätelätkä)

Sahuut = Maksimi / Sahuumitta

Do While Valmis = False
  If (Sahuut * Sahuumitta + Vetovara) > Maksimi Then
    Sahuut = Sahuut - 1
  ElseIf (Sahuut * Sahuumitta * Reikaluku * Prof_metripaino * Vetojen_maara) > Bil_max_paino Then
    Sahuut = Sahuut - 1
  ElseIf (Sahuut * Sahuumitta * Reikaluku * Prof_metripaino * Vetojen_maara) < Bil_min_paino Then
    Vetojen_maara = Vetojen_maara + 1
  ElseIf i > 20 Then
    Valmis = True
  Else
    If Sahuiden_vahennys > 0 Then
      Sahuut = Sahuut - Sahuiden_vahennys
    End If
    Valmis = True
  End If
  i = i + 1
Loop

' Billetin pituus
Cells(31, 4) = ((Vetojen_maara * Sahuut * Reikaluku * Prof_metripaino * Sahuumitta) / (Bil_metripaino) * 1000)
Cells(30, 4) = Vetojen_maara
Cells(17, 4) = Sahuut

```

## Liite 4. Lauttakoon laskennan Excel

**Lähtöarvot**

<b>Metripaino</b>	0,24	kg/m
<b>Reikäluke</b>	4	kpl
<b>Tuotantopituus</b>	6,6	m
<b>Profiilin leveys</b>	50	mm
<b>Profiilin korkeus</b>	34	mm
<b>Päällekkäisiä</b>	1	kpl
<b>Sahuiden vähennys</b>	0	kpl
<b>Vetojen muutos lautassa</b>	0	kpl

**Tulokset**

## Lautta

<b>Sahuiden määrä</b>	7	kpl
<b>Profiileita vierekkäin lautassa</b>	16	kpl
<b>Profiileita lautassa yhteensä</b>	112	kpl

## Häkki

<b>Kerroksia</b>	8	kpl
<b>Profiileita häkissä</b>	128	kpl
<b>Profiilien välys</b>	6,7	mm
<b>Häkin paino</b>	202,8	kg

## Veto

<b>Vetojen määrä</b>	2	kpl
<b>Billetin pituus</b>	1013,1	mm

Suorita

Tyhjennys

Kaikki

Tulokset