



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# Puukurottajan hybridisointi

Juha Mäki

Opinnäytetyö  
Maaliskuu 2019  
Sähkövoimatekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

MÄKI, JUHA:  
Puukurottajan hybridisointi  
RTD12 KURO

Opinnäytetyö 54 sivua  
Maaliskuu 2019

---

Työssä tutkitaan puukurottajasta mitattujen muuttujien perusteella puukurottajan liikkeen kuluvaan energian palautuspotentiaalia eri hybridiratkaisuissa. Työn alussa esitellään puukurottajan valmistaja, eri puukurottajaversiot sekä ajoneuvon hybriditekniikkaa yleisesti.

Työssä suoritettiin laskelmat puukurottajan CAN-väylästä saatujen muuttujien perusteella. Laskelmien tarkoituksena oli varmistua, että palautettavaa energiaa on tarpeeksi talteenottoa varten.

Tulokset osoittavat, että palautettavaa energiaa on tarjolla tarpeeksi. Mitattuja muuttujia olivat puukurottajan pihdissä olevan taakan paino sekä korkeus maanpinnasta ja puukurottajan ajonopeus. Puukurottajan nostosylintereiden ja ajovoimansiirron tehotarpeet valittiin laskelmissa tarkasteltaviksi suureiksi. Lopulliset laskelmat perustuvat RTD12 KURO puukurottajamallin neljän työkierron mittaustietoihin. Työn lopputulos on talteen otettavan energian määrä eri hybridiratkaisuvalintoissa. Tulokset osoittavat, että hybridipuukurottajan voimalinjaksi paras vaihtoehto on sarjahybridirakenne. Sarjahybridirakenteesta saadaan suurin palautettavan energian määrä.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Power Engineering

MÄKI, JUHA:  
Log Stacker Hybridization

Bachelor's thesis 54 pages.  
March 2019

---

In this thesis energy using and energy recovery in log stacker machine was research in different hybrid versions. There is an information of different hybrid versions and different log stacker models in beginning of the work.

Purpose of the analyze is to find out that is there enough energy for energy recovery. The calculations indicate that energy recovery is possible. Measured parameters were mass of the load, load altitude above ground level and driving speed.

The power of the boom's lift cylinders and drive system were chosen as results of the calculations. The final results are potential of the energy recovery in different hybrid versions. The results prove that the serial hybrid solution in drive system is the most efficient decision.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TOIJALA WORKS OY .....	7
2.1	Esittely .....	7
2.1.1	Historia.....	7
2.1.2	Tuotanto .....	8
2.1.3	Myyntistrategia .....	8
2.1.4	Kokonaisvaltaiset toimitukset.....	8
2.1.5	Asiakkaat.....	9
2.2	TW logstacker puukurottajat.....	10
2.2.1	Kuvaus .....	10
2.3	Puukurottajan malliversiot.....	11
2.3.1	RTD3126.....	11
2.3.2	RTD1723.....	12
2.3.3	RTD12 KURO .....	13
3	HYBRIDI .....	14
3.1	Mitä hybridi tarkoittaa .....	14
3.2	Sarjahybridi.....	14
3.3	Rinnakkaishybridi.....	16
3.4	Rinnakkais-sarjahybridi .....	17
4	HYBRIDIJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT .....	19
4.1	Sähkömoottorit.....	19
4.1.1	Tasavirtamoottorit ja ohjaus.....	19
4.1.2	Vaihtovirtamoottorit ja ohjaus .....	20
4.1.3	Esimerkkimoottori .....	20
4.2	Moottorinohjain .....	21
4.2.1	Energian talteenotto .....	21
4.2.2	Esimerkki moottorinohjain .....	21
4.3	Sähköiset energiavarastot .....	21
4.3.1	Akut.....	22
4.3.2	Superkondensaattorit.....	23
5	MITOITUS.....	25
5.1	Koneen liikevastus .....	25
5.1.1	Vierintävastus.....	25
5.1.2	Ilmanvastus .....	25
5.1.3	Kokonaisliikevastus .....	27
5.1.4	Mäen nousun vastus (gravitaatiovoima) .....	29

5.1.5	Kiihdytyksen vaatima teho.....	31
5.2	Kuorman nostoon kuluva energia sekä teho .....	32
5.2.1	Potentiaalienergia ja teho .....	32
5.2.2	Kuorman noston teho .....	32
6	MITTAUKSET .....	33
6.1	Yleistä .....	33
6.2	Lajittelijalta pinoon1 .....	34
6.3	Lajittelijalta pinoon2.....	35
6.4	Lajittelijalta pinoon 3 .....	37
6.5	Sahalle varastopinosta.....	39
7	TULOKSET .....	41
7.1	Energiatarkastelu .....	41
7.2	Energiatarkastelu eri hybridiratkaisujen näkökulmasta .....	42
7.2.1	Sarjahybridi.....	43
7.2.2	Rinnanhybridi.....	45
7.2.3	Rinnakkais- sarjahybridi .....	47
7.3	Energiavarastot .....	48
7.3.1	Superkondensaattori Rinnakkais- ja sarjahybridissä.....	48
7.3.2	Akku sarjahybridissä.....	49
7.3.3	Akku rinnakkaishybridissä.....	50
8	POHDINTA.....	52
	LÄHTEET.....	55

## 1 JOHDANTO

Työkoneiden ja autojen voimansiirto on perustunut polttomoottoriin jo yli 100-vuotta. Polttomoottorin tekniikka on noiden vuosien aikana kehittynyt varsin pitkälle, joten polttoainetaloudessa ei merkittäviä saavutuksia ole tulevaisuudessa odotettavissa. Ajoneuvojen vuosi vuodelta tiukentuvat päästörajoitukset sekä vuosittaisten käyttökustannusten pienentämisen paine ohjaa työkonevalmistajia kohti erilaisia hybridisovelluksia. Hybridiajoneuvot käyttävät tyypillisesti polttomoottoria pääasiallisena energianlähteenä. Hybridiajoneuvon polttomoottori mitoitetaan yleensä pienemmäksi, kuin pelkällä polttomoottorilla varustetussa ajoneuvossa. Moottoria pyritään käyttämään parhaimman hyötysuhteen kierrosalueella.

Tavoitteena ajoneuvojen hybridisoinnissa on pienentää polttoaineen kulutusta ja sitä kautta ympäristölle haitallisia päästöjä sekä vähentää huollon kustannuksia. Hybridisoinnissa pyrkimyksenä on mitoittaa ajoneuvo keskimääräisen tehon kulutuksen mukaisesti. Polttomoottorin lisäksi ajoneuvoon asennetaan toinen energian lähde, joka yhdessä polttomoottorin kanssa tuottaa ajoneuvon tarvitseman huipputehon. Tämän lisäksi toissijainen energianlähde varustetaan jonkin tyyppisellä energiavarastolla, josta energia saadaan vapautettua nopeasti hetkellisesti suuriin tehontarpeisiin.

## 2 TOIJALA WORKS OY

### 2.1 Esittely

Toijala Works Oy on vuonna 1960 perustettu teknologiateollisuuden järjestelmätoimituksiin erikoistunut sopimusvalmistaja. Henkilöstöä on noin 200. Liikevaihto vuonna 2016 oli 28,7 M€. Tehtaat sijaitsevat Toijalassa sekä Viialassa. Yrityksen omama tuotteena on ollut vuodesta 2013 asti TW LogStacker puukurottajat (Manninen).



KUVA 1. Toijala Works Oy tehdasalue Akaassa (Manninen)

#### 2.1.1 Historia

Yritys on 1960 siirretty Toijalaan yksityisenä yrityksenä. Siihen aikaan yritys käytti nimeä Toijalan Teräsvalmiste. Tuohon aikaan tuotteena olivat nosturit, paineastiat sekä rakennuskoneet. Vuonna 1973 Toijalan Teräsvalmiste myytiin Partek Oyj:lle ja yrityksen nimi vaihtui Oy Partek Ab konepaja Toijalaksi. Tuotteena olivat pääasiassa vuorivilla- ja betoniteollisuuden koneet. Vuonna 1990 yritys yhtiöitettiin ja nimeksi tuli Toijala Works Oy. Liikeideana oli toimia alihankintakonepajana. Vuonna 1997 yritys myytiin MBO:na ja jatkoi alihankintakonepajana. Vuonna 2004 yrityksestä tuli osa SKS-konsernia. Vuonna 2006 yrityksen nimeksi muutettiin SKS Toijala Works Oy. Vuonna 2013 yritykselle tuli ensimmäinen oma tuote: TW LogStacker puukurottaja (Manninen).

### **2.1.2 Tuotanto**

Tehdas on jaettu kolmeen tuoteverstaaseen. Valmistus tapahtuu asiakastilausten pohjalta. Toimituseräkoko on 1 kappale ja valmistuserä 1- 10 kappaletta. Yrityksellä ei ole omia lopputuotevarastoja. Toimittajaverkostolla on suuri merkitys yrityksen sujuvassa toiminnassa (Manninen).

### **2.1.3 Myyntistrategia**

Asiakkaat ovat oman alansa edelläkävijöitä. Asiakkaiden kanssa on pitkäaikaiset yhteistyösopimukset. Asiakas on luokitellut tuotteet aina ostettaviksi. Asiakkaiden lukumäärä on rajoitettu (Manninen).

### **2.1.4 Kokonaisvaltaiset toimitukset**

Toijala Works Oy tarjoaa kokonaisvaltaiset tuotetoimitukset joihin kuuluu: tuotesuunnittelu, työnsuunnittelu, hankinnat, valmistus, testaus, pakkaus sekä lähetys (Manninen).



## 2.1.5 Asiakkaat



**Patria**



 **ALGOL**  
TECHNICS

**TANA**  
From Waste to Value



**MEC** **LIFT**



## 2.2 TW logstacker puukurottajat

### 2.2.1 Kuvaus

Puukurottaja on työkone, joka on suunniteltu suurien puumäärien nopeaan liikutteluun. Kaikissa TW logstacker puukurottajissa on teleskooppipuomi, jonka päässä on kuorman käsittelyyn tarkoitettu pihti. Pihti on neljään suuntaan kallistettavissa sekä vapaasti pyöritettävissä molempiin suuntiin. Kaikki konemallit on varustettu Volvon valmistamilla dieselmootoreilla, ZF:n valmistamilla vaihteistoilla sekä Kesslerin valmistamilla vetoakseleilla. Puukurottajalla saadaan tyhjennettyä nopeasti puunkuljetusauto tai puunkuljetukseen tarkoitettu junanvaunu. Isoimmat puukurottajat pystyvät tyhjentämään puunkuljetusauton yhdellä nostolla. Kaikissa TW logstacker malleissa on vetävä etuakseli ja truk-kityyppisesti kääntyvät takapyörät. Koneen perässä on suuret vastapainot, jotka mahdollistavat suurien puumäärien nostamisen kaatamatta konetta. Kaikissa TW logstacker malleissa on kattava vakiovarustus kuten keskusainevoitelu, ilmastointi sekä etävalvontajärjestelmä TW Remote. Lisävarusteena on saatavilla esimerkiksi arctic-varustelu todella kylmiin olosuhteisiin sekä automaattinen sammutusjärjestelmä joka sammuttaa tulipalon hetkessä mikäli koneen rakoihin ja koloihin kertynyt puujäte syttyy palamaan. Puukurottajaa on valmistettu Suomessa jo monta vuosikymmentä. Ensiksi Valmetin tekemänä Sisu-merkillä sekä myöhemmin kalmar-tuotemerkillä. Vuodesta 2013 alkaen konetta on tehty TW logstacker-tuotemerkillä (Manninen).

## 2.3 Puukurottajan malliversiot

### 2.3.1 RTD3126

RTD3126 on suurin TW logstacker koneista. Koneen nimellinen nostokyky on 31000 kg. Koneen paino kuormattuna on yli 100000 kg. Tähän konemalliin on saatavilla TWIN-pihti, jossa on kaksi leukaparia yhdistettynä liukupalkkiin. TWIN-pihtiä käytettäessä on mahdollista nostaa kaksi erillistä puunippua yhtäaikaaisesti. Tätä konemallia käytetään paljon sellu- ja paperitehtailla, joissa käytettävät puumäärät ovat todella suuria (RTD3126).



KUVA 3 RTD3126 (RTD3126)

### 2.3.2 RTD1723

RTD1723 on TW Logstacker tuoteperheen keskikokoinen malli. Koneen nimellinen nostokyky on 17000 kg ja koneen kokonaispaino kuormattuna on noin 67000 kg. Tämän kokoluokan konetta käytetään pienemmillä paperitehtailla sekä suurilla sahalaitoksilla (RTD1723).



KUVA 4. RTD1723 (RTD1723)

### 2.3.3 RTD12 KURO

RTD12 KURO on TW Logstacker tuoteperheen pienin ja uusin malli. Koneen nimellinen nostokyky on 8000 kg/12000 kg ja koneen kokonaispaino kuormattuna noin 49000 kg. Tämän kokoluokan konetta käytetään pääasiassa sahalaiteilla. Tässä opinnäytetyössä keskitytään juuri tämän RTD12 KURO:n hybridisointiin (RTD12).



KUVA 5. RTD12 KURO (RTD12)

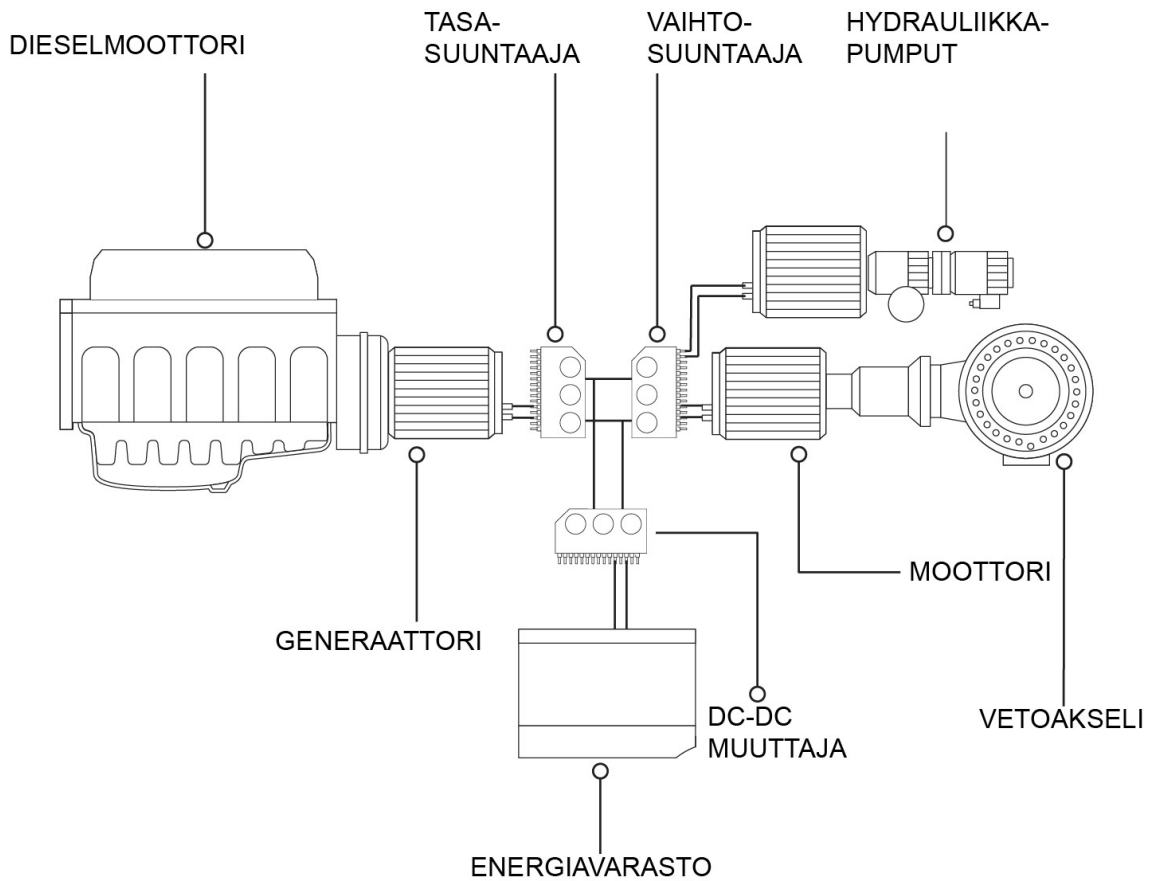
## 3 HYBRIDI

### 3.1 Mitä hybridi tarkoittaa

Hybridi tarkoittaa ajoneuvossa tai työkoneessa pääsääntöisesti sähköisen voimanlähteen yhdistämistä pääasiallisen voimanlähteen kanssa. Yleisin hybridiratkaisu on sähkömoottorin ja polttomoottorin yhdistäminen joko rinnankytkentänä, sarjakytkentänä tai niiden yhdistelmällä. Hybridijärjestelmään kuuluvat moottoreiden lisäksi energiavarastot sekä järjestelmään kuuluvien komponenttien ohjauksesta huolehtivat ohjausjärjestelmät (Hietalahti 2011/21).

### 3.2 Sarjahybridi

Sarjahybridivoimansiirrossa (KUVA 6. Sarjahybridi periaatekuva) polttomoottorin tuottama pyörimisenergia muunnetaan kokonaisuudessaan sähköenergiaksi polttomoottorin akseliin kytketyllä generaattorilla. Generaattorin tuottama sähköenergia syötetään tasa-suuntaajan kautta välipiirille, josta energia ohjataan joko energiavarastolle tai kuormaa ajavalle sähkökoneelle. Kuormapuolen sähkökonetta voidaan käyttää generaattorina jarrutusenergian sekä työkoneiden kuormanlaskuenergian talteen ottamiseksi, tätä kutsutaan regeneratiiviseksi jarrutukseksi. Sarjahybridissä polttomoottorin pyörimisnopeus on riippumaton kuorman pyörimisnopeudesta, tämä mahdollistaa polttomoottorin käyttämisen moottorin parhaan hyötysuhteen kierrosalueella. Heikkoutena sarjahybridissä on energian monivaiheinen muuntaminen polttomoottorin ja kuormakoneen välillä, mikä heikentää järjestelmän kokonaishyötysuhdetta. Sarjahybridilaitteiston toteuttamiseen tarvitaan kolme voimakonetta (polttomoottori, generaattori ja kuorman sähkökone), joka lisää voimansiirron tarvitsemaa tilaa sekä tuo lisää painoa. Puukurottajan tapauksessa voimakooneita tarvitaan neljä (polttomoottori, generaattori, ajosähkömoottori ja hydraulipumppujen sähkömoottori) sekä näiden tehoelektroniikka (Hietalahti 2011/22).



KUVA 6. Sarjahybridi periaatekuva

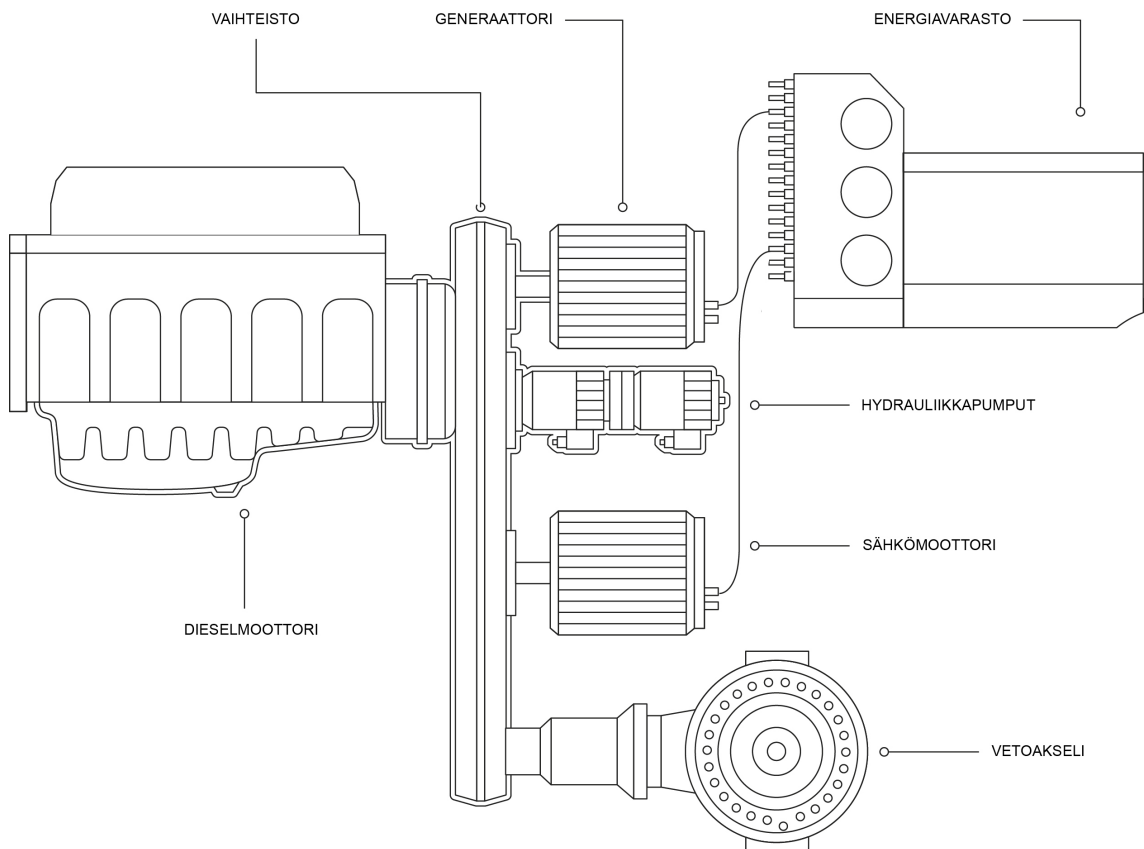
Sarjahybridirakenteessa on mahdollista käyttää perinteistä yhdellä kuormaa ajavalla sähkökoneella toteutettua rakennetta tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää pyörien sisälle integroitua napamoottoreita. Napamoottorit tekevät perinteisen vetoakselin tarpeettomaksi, joten tällä ratkaisulla voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä tilantarpeessa ja painossa. Sarjahybridit soveltuvat parhaiten koneisiin, joiden kuormitusyksiö on hyvin vaihtelevaa ja sisältäen paljon jarrutusenergian talteenottoa (Hietalahti 2011/22).

Sarjahybridivoimansiirrolla voidaan toteuttaa kuusi erilaista toimintatilaa:

Energiavarasto toimii yksin: kuormaa syötetään ainoastaan energiavarastosta ja polttomoottori on pysäytetty. Polttomoottori toimii yksin: polttomoottori - generaattori tuottaa kaiken tehon kuormalle. Hybriditila: polttomoottori - generaattori sekä energiavarasto tuottavat tehoa kuormalle. Jaetun tehon tila: polttomoottori - generaattorin tuottama teho jaetaan kuorman ja energiavaraston kesken. Lataus: polttomoottori - generaattori lataa energiavarastoa koneen ollessa pysähdyksissä. Jarrutusenergian talteenotto: ajomoottorin generoima jarrutusenergia otetaan talteen energiavarastoon (Hietalahti 2011/23).

### 3.3 Rinnakkaishybridi

Rinnakkaishybridissä (KUVA 7. Rinnakkaishybridi periaatekuva) Sähkömoottorin mekaaninen kytkentä on mahdollista toteuttaa välityssuhteella kuten vaihteiston, hihnapyörien tai ketjuhammaspyörien välityksellä. Sähkömoottori on myös mahdollista sijoittaa polttomoottorin vauhtipyörän yhteyteen, jolloin voimakoneet pyörivät aina samalla kierrosnopeudella. Rinnakkaishybridissä sähkömoottorin tehtävänä on avustaa polttomoottoria silloin, kun tarvitaan paljon tehoa kuten kiihdytyksissä tai kuorman nostamisessa työkonessa. Sähkömoottorin tehtävänä on lisäksi ottaa talteen jarrutusenergia ja polttomoottorin tuottama ylimääräinen energia alhaisilla kuormatehoilla. Verrattuna sarjahybridiin, rinnakkaishybridissä tarvitaan vain kahta voimakonetta, joten tehon muunnoksia on myös vähemmän verrattuna sarjahybridiin. Energiavaran ollessa riittävän suuri voidaan polttomoottori ja sähkömoottori mitoittaa kokoluokkaa pienemmäksi kuin vastaavan kokoisessa sarjahybridissä. Isoimpia rinnakkaishybridin haittapuolia on tarve saada kytkettyä polttomoottori mekaanisesti kuormalle, jolloin polttomoottorin toimintaa ei voida rajoittaa ainoastaan parhaalle hyötysuhdealueelle (Hietalahti 2011/24).



KUVA 7. Rinnakkaishybridi periaatekuva

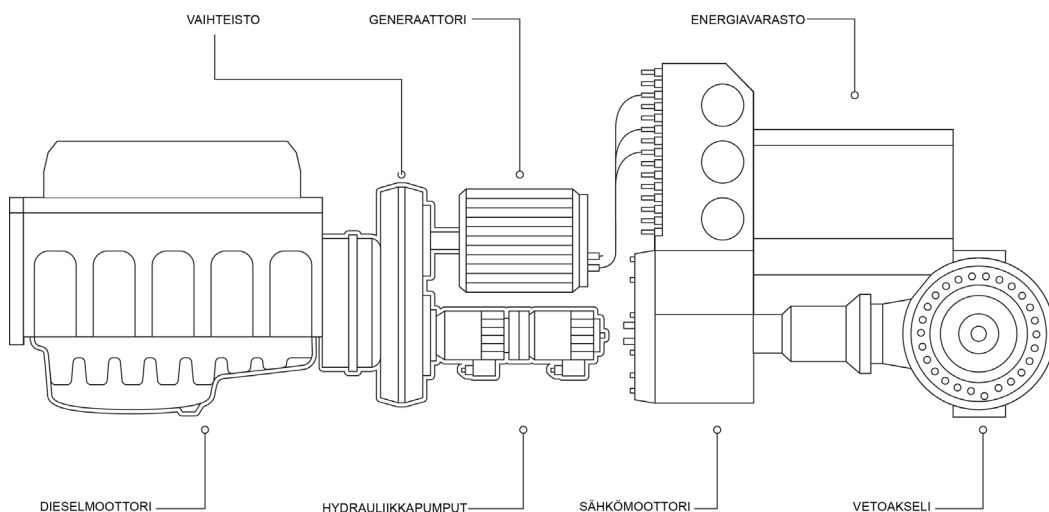


Rinnakkaishybridivoimansiirrolla voidaan toteuttaa kuusi erilaista toimintatilaa.

Energiavarasto toimii yksin: kuormaa syötetään ainoastaan energiavarastosta ja polttomoottori on pysäytettynä. Polttomoottori toimii yksin: polttomoottori tuottaa kaiken tehon kuormalle. Hybriditila: polttomoottori sekä energiavarasto tuottavat tehoa kuormalle. Jaetun tehon tila: polttomoottorin tuottama teho jaetaan kuorman ja energiavaraston kesken. Sähkömoottorista tulee generaattori. Lataus: polttomoottori lataa energiavarastoa koneen ollessa pysähdyksissä. Jarrutusenergian talteenotto: sähkömoottorin generoima jarrutusenergia otetaan talteen energiavarastoon (Hietalahti 2011/24).

### 3.4 Rinnakkais-sarjahybridi

Rinnakkais-sarjahybridivoimalinjassa (KUVA 8. Periaatekuva rinnakkais-sarjahybridi (edilog)) polttomoottori on yhdistetty mekaanisesti hydraulikkapumppeihin, eli koneen työliikkeiden tarvitsema teho otetaan suoraan polttomoottorista. Koneen ajoliikkeen vaatima teho tuotetaan sähkömoottorilla ja dieselmoottori ei ole ollenkaan mekaanisessa yhteydessä vetäviin pyöriin. Rinnakkais-sarjahybridi ratkaisussa otetaan pääosin talteen vain jarrutuksesta regeneroitu teho. Rinnakkais-sarjahybridissä polttomoottori voidaan mitoittaa merkittävästi pienemmäksi, kuin pelkästään polttomoottorilla varustetussa koneessa. Energiavarastoksi voidaan valita akusto tai superkondensaattorit riippuen käyttökohteesta. Hydrauliikan energian talteenotto on mahdollista toteuttaa paineakustoilla tai kierrättämällä eri työliikkeiden välillä (Immonen 2013/80).



KUVA 8. Periaatekuva rinnakkais-sarjahybridi (edilog)

Rinnakkais-sarjahybridissä polttomoottoria voidaan käyttää koko ajan parhaan hyötysuhteen kierrosalueella, koska koneen liikkuminen on toteutettu sähkömoottorilla. Koneen kokonaishyötysuhdetta saadaan parannettua, koska paljon tehohäviöitä aiheuttava momentinmuunnin on ollut mahdollista jättää pois. Rinnakkais-sarjahybridin suurimpia haasteita on kaikkien voimalaitteiden ja energiavarojen ohjaaminen mahdollisimman tehokkaasti (Immonen 2013/80).

## 4 HYBRIDIJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT

### 4.1 Sähkömoottorit

Sähkömoottori muuntaa energian sähköisestä muodosta mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottorin ominaisuuksia ovat teho, vääntömomentti sekä hyötysuhde. Normaalisti hybridi- tai täyssähkö-ajoneuvoissa käytetään tasavirta (DC)- tai vaihtovirtamoottoreita (AC). Tasavirtamoottori on ollut yleisimmin käytetty, koska sen säätäminen on helppoa muuttamalla syötettävää virtaa ja jännitettä. Vaihtovirtamoottorit ovat nykyään syrjäyttäneet tasavirtamoottorit ajoneuvo- ja työkonikäytössä, koska vaihtovirtamoottoreiden ohjaustekniikka on kehittynyt valtavasti viime vuosina. Vaihtovirtamoottoreiden teho/paino hyötysuhde on myös parempi kuin tasavirtamoottorin. Vaihtovirtamoottorin laajan tehollisen kierrosalueen ja suuren vääntömomentin vuoksi se ei yleensä tarvitse vaihteistoa lainkaan. Joissain tapauksissa on tarve lisätä kiinteällä välityksellä oleva alennusvaihteisto sähkömoottorin perään (Moottori1; Moottori2).

#### 4.1.1 Tasavirtamoottorit ja ohjaus

Tasavirtamoottoreita on kaksi päätyyppiä, hiiliharjoilla ja kenttäkäämeillä toteutettu moottorityyppi tai kestromagneeteilla toteutettu moottorityyppi. Hiiliharjallinen tasavirtamoottori vaatii ulkoisen jäähdytyspuhaltimen, jotta hiiliharjoista syntyvä pöly saadaan poistettua moottorista. Kestomagneettimoottorissa ei samanlaista pölyongelmaa luonnollisestikaan ilmene. Tasavirtamoottorin ohjaus toteutetaan PWM-säätimellä (pulse-width modulation), joka on taajuusmuuttajaa yksinkertaisempi (Moottori1; Moottori2).

### 4.1.2 Vaihtovirtamoottorit ja ohjaus

Käytössä olevista vaihtovirtamoottoreista suurin osa kuuluu kahteen moottorityyppiin, tahtimoottorit sekä induktio moottorit. Tahtimoottoreita ovat esimerkiksi kestopagneettimoottorit. Kestomagneettimoottorit ovat induktio moottoreita kalliimpia hankintahinnaltansa, mutta niiden hyötysuhde on induktio moottoria parempi. Kestomagneettimoottorin ominaisuudet nimellisuopeutta korkeammilla pyörimisnopeuksilla, eli kentänheikkennysalueella ovat induktio moottoria rajoitetummat (Moottori1; Moottori2).

Vaihtovirtamoottoreiden ohjaus perustuu moottorille johdetun vaihtojännitteen taajuuden muuttamiseen. Moottoreiden ohjaus pystytään molemmissa moottorityypeissä toteuttamaan nykyisillä moottorinohjaimilla. Induktio moottoria ohjataan skalaariohjauksella, jossa jännitteen taajuutta ja amplitudia kasvatetaan aina nimellisarvoihin saakka. Mikäli moottorin halutaan pyöriävän nimellisuopeutta korkeammalla nopeudella, nostetaan pelkästään jännitteen taajuutta. Tahtimoottorin ohjaus taajuusmuuttajalla on hieman monimutkaisempaa verrattuna induktio moottoriin, koska ohjaimen tarvitsee tietää tahtimoottorin roottorin asento. Ohjaustapaa kutsutaan tahtimoottoreissa skalaarisäädöksi (Moottori1; Moottori2).

### 4.1.3 Esimerkkimoottori

Raskaaseen liikkuvaan työkoneeseen löytyy esimerkiksi Danfossin valikoimista EM-PMI540-T1500 sarjan kestopagneettimoottoreita. Tämän moottorisarjan teholuokka on vastaava kuin tässä opinnäytetyössä käsiteltävän työkoneen polttomoottorissa. Moottoreita löytyy laajalle nimelliskierrosalueelle. Moottoreiden hyötysuhde on todella korkea 0,96 moottorikäytöllä ja generaattorikäytössä 0,95. Moottorit ovat nestejäähdytteisiä. (Danfoss1).

## 4.2 Moottorinohjain

Nykypäivänä järkevin valinta sähkömoottorilla liikkuvaan ajoneuvoon on vaihtovirtamoottori, joten moottorin ohjauksessa tässä työssä käsitellään ainoastaan vaihtovirtamoottorin ohjaukseen käytettävää taajuusmuuttajaa. Taajuusmuuttajalla säädetään vaihtovirtamoottorin nopeutta moottorin jännitteen taajuutta ja amplitudia säätämällä.

### 4.2.1 Energian talteenotto

Vaihtovirtamoottoreita käytettäessä on mahdollista saada otettua talteen osa jarrutusenergiasta. Energian regeneroinnissa tärkeässä osassa on moottorin ohjain. Jarrutettaessa vaihtovirtamoottorilla vaihdetaan taajuusmuuttajalla moottorin momentin suunta vastakkaisuuntaiseksi. Tämän seurauksena moottorin teho on negatiivista ja teho alkaa virtaamaan moottorista vaihtosuuntaajaan päin ja sitä kautta DC-välipiiriin. Moottori alkaa toimimaan generaattorina (Kontrolleri).

### 4.2.2 Esimerkki moottorinohjain

Esimerkkimoottorin ohjaukseen löytyy Danfossin valikoimista EC-C1200-450 moottorinohjain. Moottoriohjaimella on mahdollista tehdä tasajännitemuunnokset jännitetasosta toiseen, ladata energiavarastoja jarrutustilanteessa sekä ohjata sähkömoottoria. Nykyaikaisten tasasuuntaajien ja taajuusmuuttajien hyötysuhteet ovat todella hyviä. Puolijoh-teissa tapahtuvat häviöt ovat pieniä, joten hyötysuhteet ovat korkeita 0,97-0,99 (Danfoss2; Tekninen opas).

## 4.3 Sähköiset energiavarastot

Hybridi- tai täyssähköajoneuvolla jarrutettaessa, energia johdetaan DC-välipiiriin. DC-välipiiri ei itsessään pysty varastoimaan jarrutusenergiaa, joten se johdetaan jarruvastusten kautta lämmöksi, jos energiavarastoa ei järjestelmässä ole. Energiavarastolla varusteissa järjestelmissä DC-välipiiriin muodostuva jarrutusenergia otetaan talteen energia-

varastoon, josta se pystytään vapauttamaan tarvittaessa uudelleen käyttöön. Energiavarastot hybridiajoneuvoissa tai täyssähköajoneuvoissa ovat suurimmaksi osaksi sähköisiä, eli erityyppisiä akkuja tai superkondensaattoreita (Kontrolleri).

Yleinen vaatimus hybridivoimansiirrossa on, että suorituskyvyn tulisi olla vähintään yhtäläinen vastaavaan perinteiseen polttomoottorivoimansiirtoon verrattuna. Erityisen haastavia tilanteita hybridivoimansiirrolla varustetuille ajoneuvoille ovat kuormattuna tapahtuvat kiihdytykset ylämäkeen. Raskaat työkoneet vaativat suuria tehoja nopeasti huippukuormituksen aikana, tämä asettaa suuria haasteita energiavaraston ja koko voimalinjan suunnittelulle (Hietalahti 2011/91).

Sähköisiä energiavarastoja luokiteltaessa käytetään useita termejä, jotka ovat tärkeitä sovelluksen energiavarastoa määritettäessä. **Energiatiheydellä** ilmoitetaan tiettyyn massaan tai tilavuuteen varastoituneen energian suuruutta tilavuusyksikköä tai massayksikköä kohden. **Tehotiheys** määrittää huipputehona massaa tai tilavuutta kohden, jonka energiavaraston on mahdollista tuottaa tietyssä varaustilassa. Energiavaraston koon tulee vastata sähkömoottorin huipputehoa ja energian tulee riittää kuormitusyhteyden ajan. **Käyttökertaikä** ilmoittaa kuinka monta kertaa energiavarasto voidaan syvä-purkaa 80% kapasiteetista ja uudelleen ladata sen käyttöikänsä aikana. Käyttökertaikä voidaan ilmoittaa myös vuosina. **Ulostulojännite ja purkausprofiili** ilmoittaa kuinka energiavaraston ulostulojännite käyttäytyy sitä kuormitettaessa. **Itsepurkautumisnopeus** ilmoittaa, kuinka nopeasti energiavaraston potentiaali laskee, kun se on käyttämättömänä täyteen ladatussa tilassa. **Turvallisuustekijät**, eli kuinka energiavarasto käyttäytyy mahdollisissa erilaisissa vikatilanteissa. **Toimintaolosuhteissa** ilmoitetaan, minkälaisissa toimintaolosuhteissa energiavarastoa voidaan käyttää. **Hinta** määrittää energiavaraston koko elinkaaren kustannukset (Hietalahti 2011/91-92).

### 4.3.1 Akut

Akku varastoi energiaa. Akku ottaa vastaan sähköenergiaa ja varastoi sen kemialliseksi energiaksi. Ladattaessa akkuun syötetään suurempi sähkövaraus, kuin sitä purettaessa. Akun lataaminen ja purkaminen ovat häviöllisiä prosesseja ja siksi akulle ilmoitetaan varauskyvyn lisäksi hyötysuhde. Akun häviöt ovat suhteessa lataus- tai purkuvirtaan. Hyötysuhde suurilla virran arvoilla voi olla vain 20-30% ja pienemmillä virran arvoilla jopa

95%. Huipputeho akustosta saadaan heikoimmilla hyötysuhteen arvoilla ja varsin kapealla virta-arvojen alueella päästään parhaaseen hyötysuhteeseen. Normaali latauksessa akuston hyötysuhteeksi valmistajat ilmoittavat 90%. Syntyvät häviöt johtuvat akun sisäisestä resistanssista (Hietalahti 2011/99; Mutanen)

Sähköajoneuvoissa käytössä olevat akkutyypit ovat aikaisemmin olleet lyijyakkuja, mutta niiden hyötysuhde on alhainen suurilla virroilla ja käyttöikä on lyhyt. Nykyisissä täyssähkö- ja hybridiajoneuvoissa käytetään kehittyneempiä nikkelimetallihybridiakkuja sekä etenkin litiumioniakkuja sekä litiumrauta-akkuja. Kehittyneempien akkujen etuna vanhoihin lyijyakkuihin verrattuna on suurempi teho- ja energiatiheys, parempi hyötysuhde ja pidempi käyttöikä (Hietalahti 2011/99).

Suuremmat akustot, kuten hybridiajoneuvon akusto tarvitsee yhteyteensä akuston hallintaelektroniikan, joka antaa akuston tilatiedot ajoneuvon muiden ohjausyksiköiden ja käyttäjän tietoon. Akuston hallintaelektroniikka valvoo akuston käyttöä, latautumista sekä yleisesti sähköturvallisuutta (Hietalahti 2011/101).

### **4.3.2 Superkondensaattorit**

Ominaisuuksiltaan superkondensaattorit sijoittuvat perinteisten kondensaattoreiden ja akkujen väliin. Superkondensaattorien kapasitanssi on hyvin suuri verrattuna perinteisiin kondensaattoreihin. Suuren kapasitanssin ansiosta superkondensaattoriin voidaan varastoida huomattavasti enemmän energiaa perinteiseen kondensaattoriin verrattuna. Superkondensaattorin jännitekestoisuus on hyvin rajallinen, nykyisissä superkondensaattoreissa 3 V. Superkondensaattorin elinikä on arvioitu olevan noin kymmenen vuotta (Hietalahti 2011/101).

Akkupohjaisiin energiavarastoihin verrattuna superkondensaattorin edut ovat suuri teho- ja energiatiheys, lyhyt lataus- ja purkaus aika sekä huomattavan suuri syväpurkaussyklien lukumäärä, yli 500000 syväpurkaussykliä eliniän aikana. Superkondensaattorin energiatiheys on pieni verrattuna akkuihin. Superkondensaattoreita voidaan purkaa ja ladata huomattavasti korkeammilla virroilla kuin akkuja hyötysuhteen pysyessä korkeana noin 90-95%, akkujen hyötysuhteen ollessa 70-85%. Superkondensaattorin jännite vaihtelee paljon riip-

puen varastoidusta energian määrästä, joten superkondensaattorin yhteyteen tarvitaan tehoelektroniikkaa sovittamaan jännitetaso muille laitteistoille yhteensopivaksi. Superkondensaattorin korkea virrankesto, hyvä hyötysuhde laajalla varaustila-alueella sekä suuri syväpurkaussyklien määrä tekevät superkondensaattorista erinomaisen energiavaraston suurille työkoneille (Hietalahti 2011/101).



## 5 MITOITUS

### 5.1 Koneen liikevastus

Tässä kappaleessa lasketaan tarvittavat suureet, jotta työsyklin jokaisen ajanhetken tehontarve saadaan laskettua ja sitä kautta muodostettua tehokuvaaja. Puukurottajan CAN-väylästä ei saada mittaustietona koneen hetkellistä tehontarvetta, joten tehontarve tarvitsee laskea.

#### 5.1.1 Vierintävastus

Vierintävastus  $F_r$  lasketaan yhtälöllä (1).

$$F_r = m_v * g * f_r. \quad (1)$$

$m_v$  = ajoneuvon massa

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$f_r$  = vierintävastuskerroin (0,02)

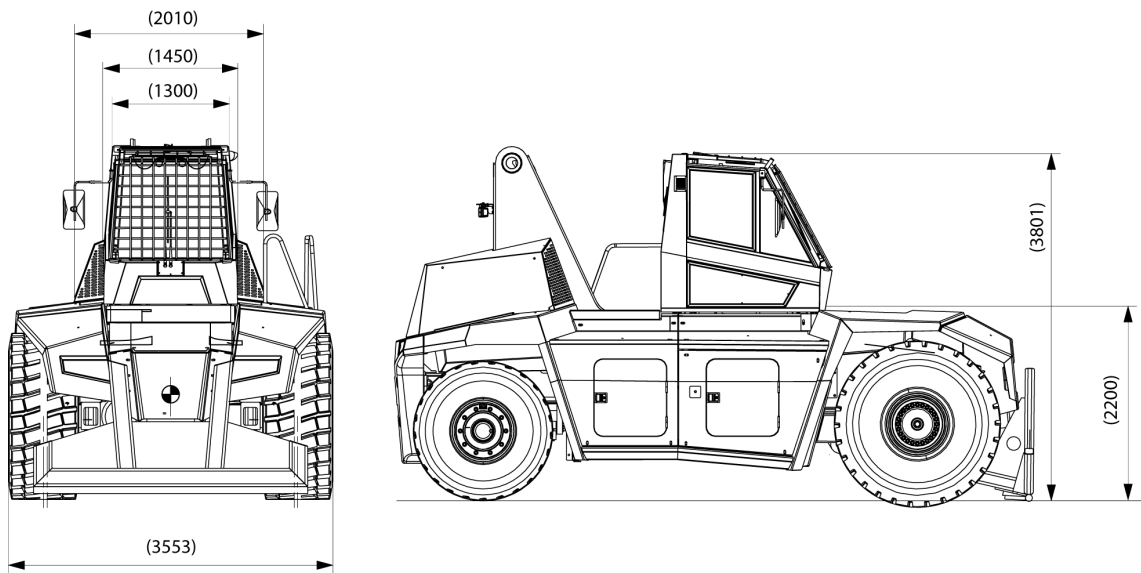
Puukenttien päällystemateriaaleissa on paljon vaihteluita. Vierintävastuskertoimeksi valitaan hienosoratien kerroin 0,02.

Vierintävastus

$F_r = 9575 \text{ Nm}$

#### 5.1.2 Ilmanvastus

RTD12 KURO:n huippunopeudeksi ilmoitetaan 30 km/h. Puukurottajan ajoprofiilitallenteissa huippunopeus oli hieman yli 30 km/h, mutta ilmanvastuksen laskemisessa kuormattuna voidaan käyttää 30 km/h. Ilmanvastuksen laskemiseksi tarvitsee laskea koneen ilmanvastuksen kohtaavan pinnan pinta-ala mittakuvasta (KUVA 9. Mittapiirros). Kovin tarkkaa pinta-alaa ei ole mahdollista laskea, koska suuren osan pinta-alasta tuo koneen kuljettama puunippu, jonka pinta-ala vaihtelee.



KUVA 9. Mittapiirros

Suuntaa antava koneen pinta-ala lasketaan mittapiirroksesta saaduista mitoista. Koneen alarungon ohjaamon alapuolinen alue.

$$A_{ala} = 3,553 \text{ m} \cdot 2,20 \text{ m}.$$

$$A_{ala} = 7,82 \text{ m}^2.$$

Ohjaamon pinta-ala lasketaan ilmanottoaukkojen leveyden mukaan, koska se on koneen levein kohta ohjaamotasolla.

$$A_{ylä} = 2,010 \text{ m} \cdot 1,601 \text{ m}.$$

$$A_{ylä} = 3,22 \text{ m}^2.$$

Kuorma kuljetetaan puukurottajalla aina nostettuna ohjaamon katon yläreunan tasalle, jotta kuorman alapuolelta on mahdollisimman hyvä näkyvyys eteenpäin ajettaessa. Kuorman kuljettaminen ohjaamon yläreunan tasalla lisää koneen ilmanvastuksen kohtaamaa pinta-alaa huomattavasti. Käytetään kuorman pinta-alana  $A_{ala}$  vastaavaa pinta-alaa.

$$A_{kuorma} = A_{ala} = 7,82 \text{ m}^2.$$

Lasketaan kokonaispinta-ala  $A_f$ .

$$A_f = A_{ala} + A_{ylä} + A_{kuorma}.$$

$$A_f = 7,820 \text{ m}^2 + 3,220 \text{ m}^2 + 7,820 \text{ m}^2.$$

$$A_f = 18,82 \text{ m}^2.$$

Lasketaan ilmanvastus  $F_\omega$ .

$$F_\omega = 0,5 * p * A_f * C_d * v_\omega^2 . \quad (2)$$

$p$  = ilman tiheys (1,28 kg/m<sup>3</sup>)

$A_f$  = pinta-ala joka kohtaa ilmanvastuksen 18,82 m<sup>2</sup>

$C_d$  = ilmanvastuskerroin (1) arvio

$v_\omega$  = ajoneuvon nopeus (8,25 m/s)

$$F_\omega = 819,8 \text{ Nm}$$

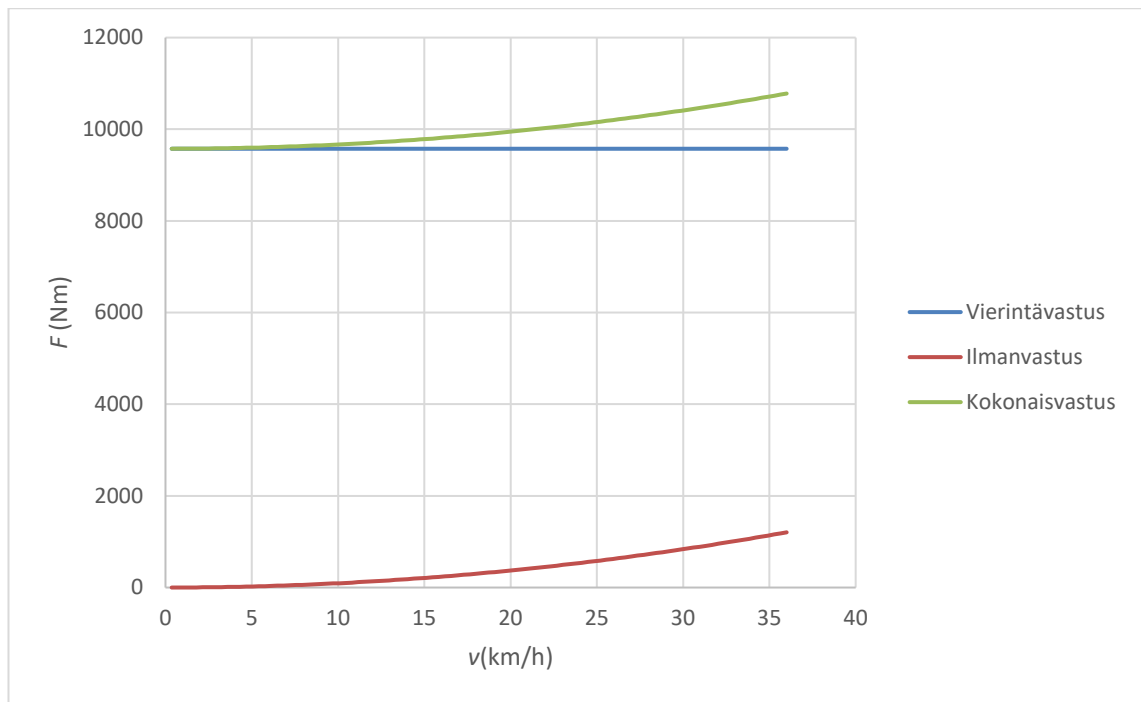
### 5.1.3 Kokonaisliikevastus

Koneen liikkumiseen tarvitseman tehon laskemiseksi tarvitsee tietää koneen kokonaisliikevastus  $F_{kok}$ . Lasketaan koneen kokonaisliikevastus tasamaalla nopeudella 30 km/h, joka saadaan laskemalla yhteen koneen vierintävästus  $F_r$  ja ilmanvastus  $F_\omega$ .

$$F_{kok} = F_r + F_\omega . \quad (3)$$

$$F_{kok(30km/h)} = 10394,8 \text{ Nm}.$$

Tuloksista voidaan todeta, että RTD12 KUROn liikettä vastustavat voimat tasamaalla ovat suurimmaksi osaksi vierintävästusta (kuvio 1).



KUVIO 1. RTD12 KURO vastustavat voimat tasamaalla

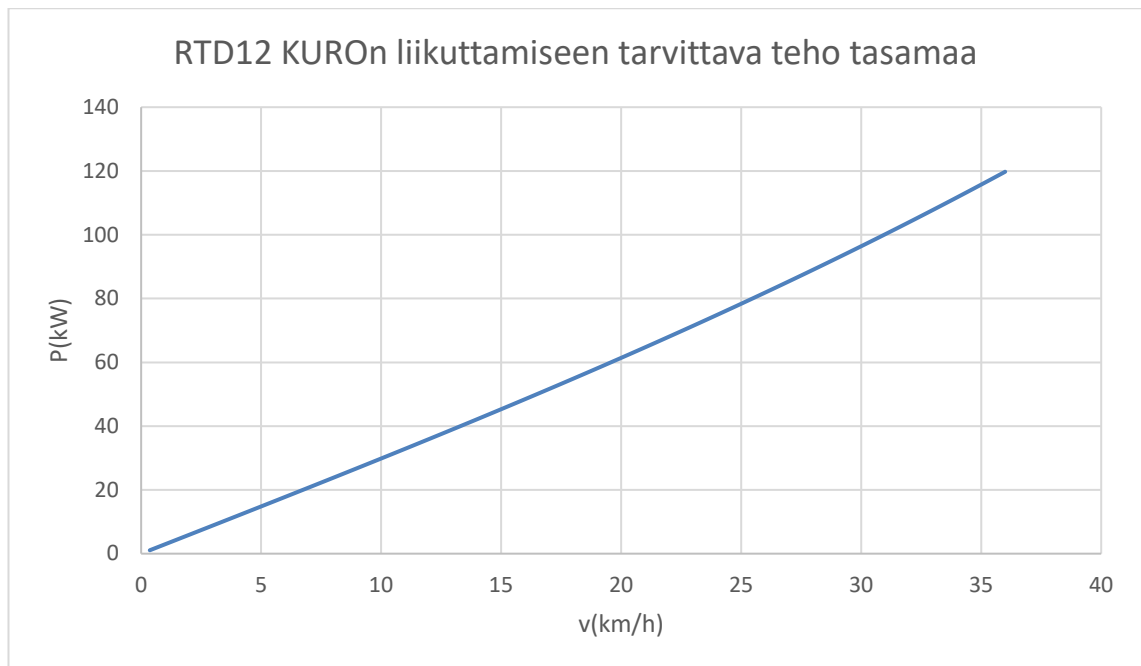
Lasketaan liikevastuksen vaatima teho  $P_{Liike}$  tasamaalla.

$$P_{Liike} = F_{kok} * v_{\omega} . \quad (4)$$

$F_{kok}$  = kokonaisliikevastus

$v_{\omega}$  = ajoneuvon nopeus

Laskennan tuloksista (kuvio 2) voidaan todeta, että koneen liikuttamiseen tarvitsema teho on lähes tasaisesti nouseva suhteessa koneen liikkumisnopeuteen. Tehon nousun kuvaajan muoto johtuu siitä, että ilmanvastuksen tarvitsema lisäteho on suhteessa varsin pieni.



KUVIO 2. RTD12 KURO liikkeen teho tasamaalla

#### 5.1.4 Mäen nousun vastus (gravitaatiovoima)

Puukentät ovat yleensä melko tasaisia paikkoja ja suuria nousuja ei juuri ole. Poikkeuksena joissakin lastaus tai tyhjennyspaikoissa voi olla erilaisia nousuluiskia, joita pitkin puukurottajaa joudutaan ajamaan. Näitä tapauksia varten mitoituksessa tarvitsee huomioida koneen nousukyky.

##### Loiva mäki (10%)

Seuraavassa on laskettu mäen nousun aiheuttama vastus loivassa mäessä.

Lasketaan arvio mäen nousun suhteella.

$$F_g = (10\%/100) * m_v * g . \quad (5)$$

$m_v$  = koneen massa

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F_g = 47872,8 \text{ Nm}$$

##### Jyrkkä mäki (15%)

Seuraavassa on laskettu mäen nousun aiheuttama vastus jyrkässä mäessä.

Lasketaan arvio mäen nousun suhteella.

$$F_g = (15\%/100) * m_v * g. \quad (6)$$

$m_v$  = koneen massa

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$F_g = 71809,2 \text{ Nm}$

### Kokonaisliikevastus ylämäessä

Kokonaisliikevastus nousussa saadaan laskemalla yhteen vierintävastus, liikevastus ja gravitaatiovoima.

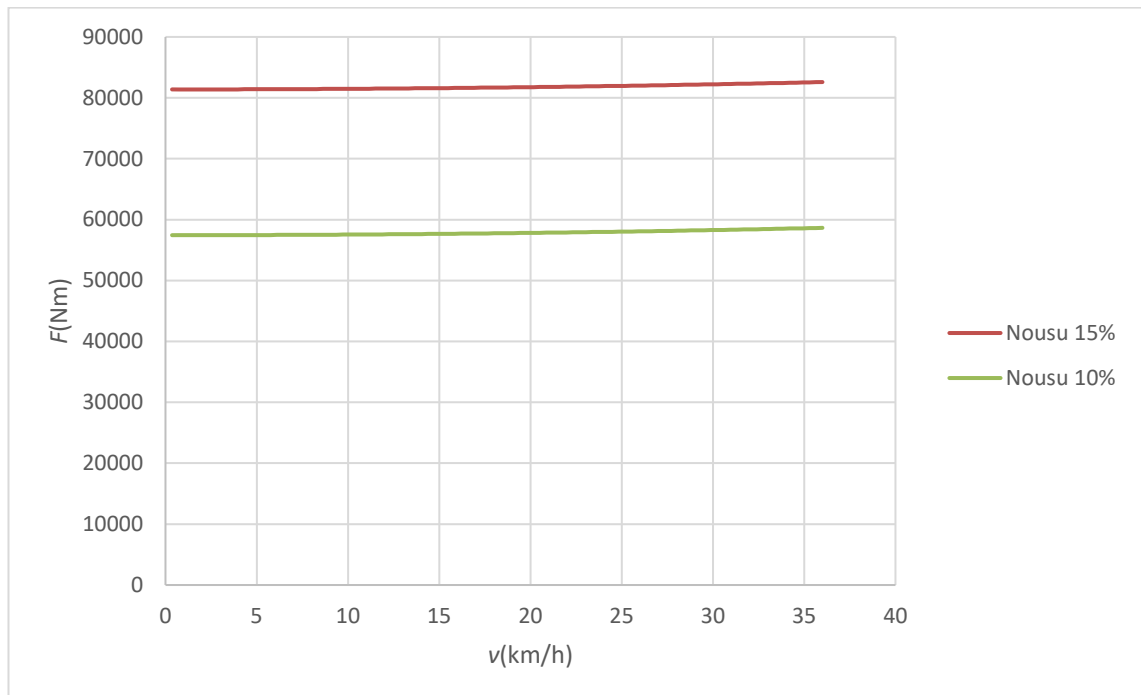
$$F_{kok} = F_r + F_\omega + F_g. \quad (7)$$

$F_r$  = liikevastus

$F_\omega$  = ilmanvastus

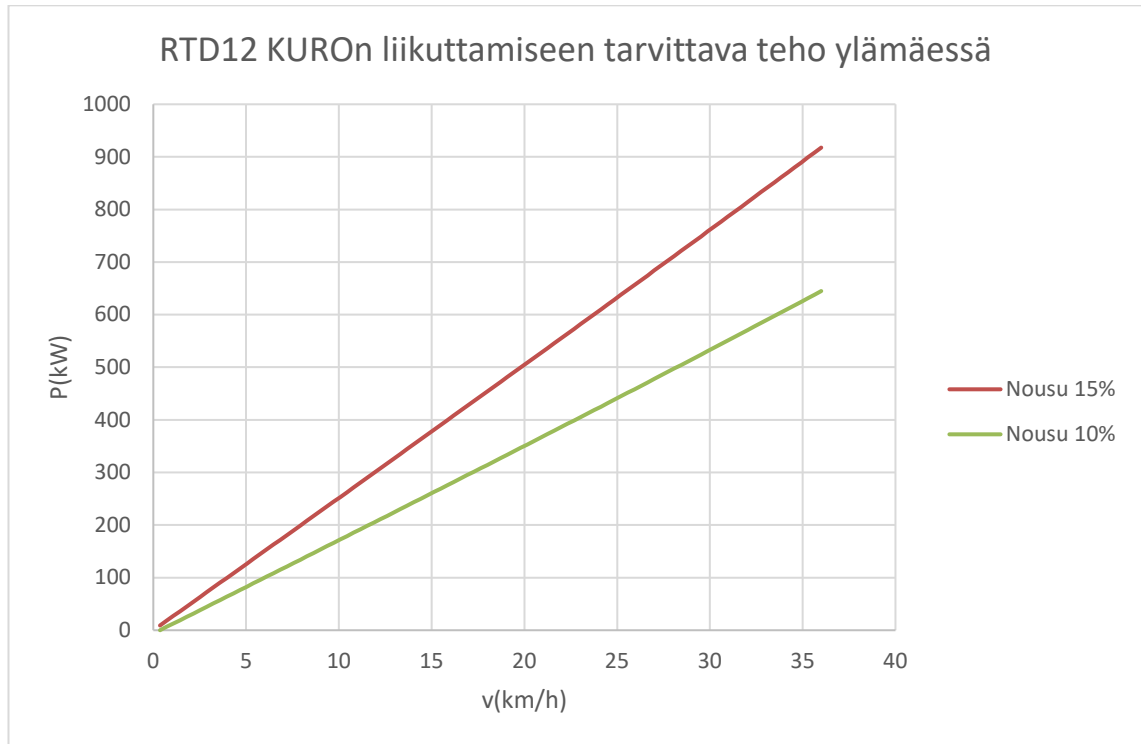
$F_g$  = gravitaatiovoima

Lasketut RTD12 KUROn liikettä vastustavat kokonaisvoimat 10%:n ja 15%:n ylämäissä (kuvio 3). Koneen suuresta massasta johtuen vastustavat voimat kasvavat monin ker-  
taiseksi ylämäessä verrattaessa kokonaisliikevastukseen tasamaalla (kuvio 1).



KUVIO 3. RTD12 KURO liikettä vastustavat voimat ylämäessä

Vastaavasti koneen liikuttamiseen tarvitsemat tehot 10%:n ja 15%:n ylämäissä kasvavat moninkertaiseksi (kuvio 4), verrattaessa koneen liikuttamiseen tarvitsemaan tehoon tasamaalla (kuvio 2).



KUVIO 4. RTD12 KURO liikkeen tehot ylämäessä

### 5.1.5 Kiihdytyksen vaatima teho

Puukurottajan työsyklissä on paljon kiihdytyksiä sekä jarrutuksia. Lasketaan kiihdytyksen vaatima teho  $P_t$ .

$$P_t = \frac{\delta \cdot m_v}{2 \cdot t_a} \cdot (v_f^2 + v_b^2) + \frac{2}{3} \cdot m_v \cdot g \cdot f_r \cdot v_f + \frac{1}{5} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_f \cdot v_f^3 \quad (8)$$

$m_v$  = ajoneuvon massa

$\rho_a$  = ilman tiheys (1,28 kg/m<sup>3</sup>)

$\delta$  = liike-energiakerroin (1,2)

$g$  = maan vetovoima

$t_a$  = kiihdytysaika

$v_f$  = ajoneuvon loppunopeus

$v_b$  = ajoneuvon perusnopeus

$F_r$  = liikevastus

$C_d$  = ilmanvastuskerroin

$A_f$  = pinta-ala joka kohtaa ilmanvastuksen

Jarrutukseen tarvittava teho, joka muuttuu perinteisessä jarrutusjärjestelmässä lämmöksi kitkapinnoilla, saadaan laskettua samalla kaavalla kuin kiihdytyksen tarvitsema teho.

## 5.2 Kuorman nostoon kuluva energia sekä teho

Puukurottajan CAN-väylästä saadaan mittaustietona pihdissä olevan taakan paino sekä pihdin kärkien korkeus maan pinnasta. Käytössäni oli myös valmistajalta saatu laskenta-  
taulukko, jolla saatiin laskettua nostosylintereille tuleva massa. Taulukko annettiin arvoina puomin teleskoopin pituus sekä puomin nostosylintereiden arvioitu pituus kuorman ollessa ylhäällä. Näiden tietojen avulla saadaan laskettua puomin nostoon kuormattuna kuluva teho sekä vastaavasti puomin alas laskusta vapautuva ja mahdollisesti talteen otettava teho.

### 5.2.1 Potentiaalienergia ja teho

Lasketaan taakan nostoon kuluva energia  $E_G$ .

$$E_G = m * g * h. \quad (9)$$

$m$  = taakan massa (kg)

$g$  = 9,81 m/s<sup>2</sup>

$h$  = taakan liikkuma matka (m)

### 5.2.2 Kuorman noston teho

Taakan nostoon kuluva teho  $P$  saadaan laskettua jakamalla nostoon kuluva energia  $E_G$  nostoon kuluvalle ajalle  $t$ .

$$P = \frac{E_G}{t} \quad (10)$$



## 6 MITTAUKSET

### 6.1 Yleistä

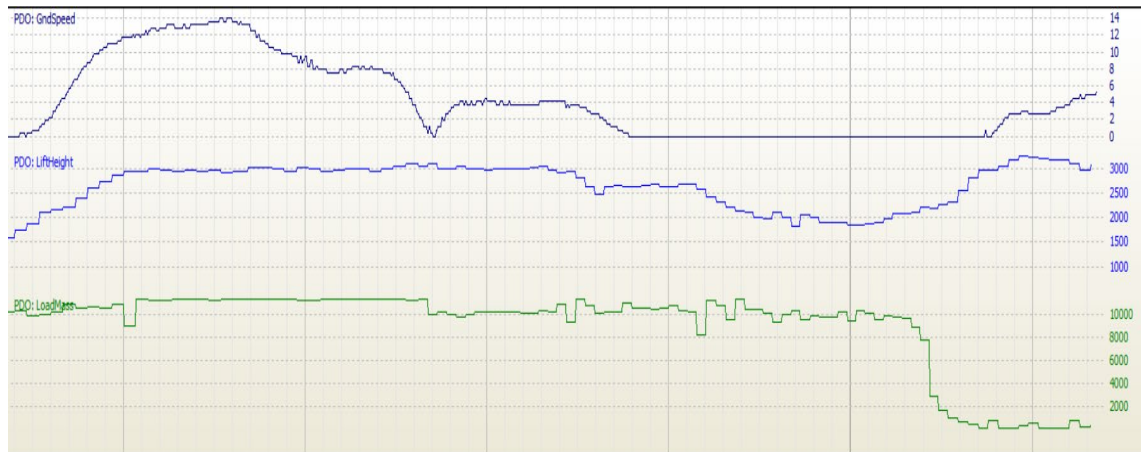
Valitsin esimerkkityösyklit Hankasalmella työskentelevän RTD12 KUROn työkierrosta. Hankasalmen sahalla työskentelevä kone tekee puukurottajalle varsin tyypillistä työkiertoa. Puukurottaja ottaa puut lajittelijan lokeroista lokeron täytyttyä ja vie puut varastointipinoihin puiden varastointikentälle. Varastointipinoista puut kuljetetaan sahalaitoksen syöttöpöydälle, josta puut kulkevat hihnaa pitkin sahaukseen. Puukurottaja tyhjentää myös puunkuljetusautoja sekä junanvaunuja, mutta vieraillessamme sahalla tämä vaihe tehtiin kauhakuormaajalla. Työkierto ei ole mitenkään säännöllistä, vaan tapahtuu tarpeen mukaan. Kuorman suuruudet pihdissä vaihtelevat työvaiheiden sekä puun paksuuden mukaan. Suurimmat kuormat ovat autojen ja junien tyhjentämisen sekä puiden sahaukseen kuljetuksen yhteydessä, jolloin pyritään ottamaan mahdollisimman paljon puuta kerralla. Pienempiä kuormia kuljetellaan lajittelijan lokeroitten tyhjennyksen yhteydessä.

Tallensimme puukurottajan CAN-väylässä kulkevaa viestiä Canto-ohjelmistolla, joka on Toijala Worksin teettämä tiedonkeruuohjelmisto. Ohjelma poimii viesteistä haluaman tiedon, tallentaa datan xml-tiedostoksi sekä Canto-ohjelmistolla tarkasteltavaksi tiedostoksi. Ohjelmistolla data voidaan nähdä myös kuvaajina. CAN-väylästä ei saada kaikkea tarvittavaa tietoa. Puomin noston tarvitsema teho sekä kiihdytyksen tarvitsema teho joudutaan laskemaan CAN-väylästä saaduista mittausarvoista.

Puukurottajan korkeuspositiota ei pystytty todentamaan mittauksien aikana, joten työskentelyalueen korkeusvaihteluita ei ole otettu huomioon tehollaskuissa. Myöskään aikaisemmin laskettuja kokonaisliikevastuksia ylämäessä ei ole käytetty tehojen määrittämisessä. Tulevaisuudessa on mahdollista lisätä puukurottajaan anturi, joka mittaa koneen korkeusposition ja silloin on mahdollista käyttää suunnittelussa laskemieni mäen nousuun tarvittavia tehoja.

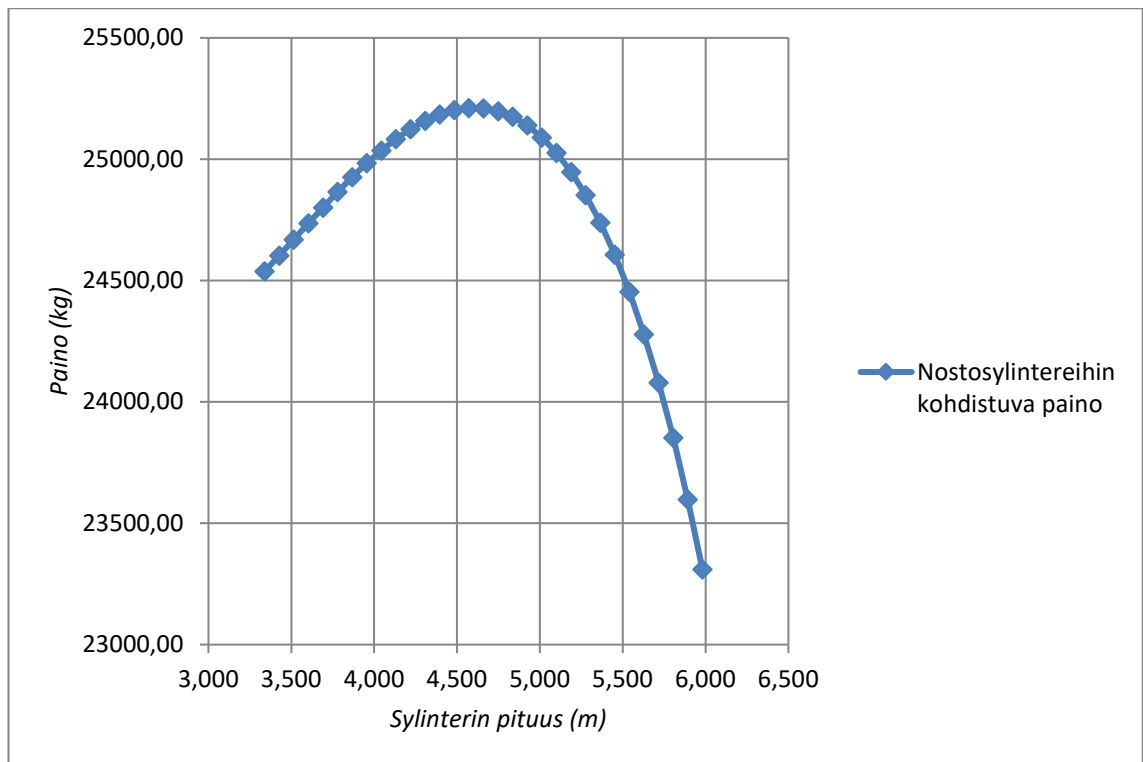
## 6.2 Lajittelijalta pinoon1

Ensimmäisenä tarkasteltavana työsyklinä on lähes maksimikuormalla tapahtuva lajittelijan lokeron tyhjennys. Puukurottaja nostaa noin 10200 kg:n kuorman ja kuljettaa sen lyhyehkön matkan päähän varastointipinoon. Kone kiihdyttää peruuttamalla noin 14 km/h nopeuteen ja jarruttaa pysähdyksiin. Tämän jälkeen kone ajaa hiljaa eteenpäin pinon luokse ja laskee puut varastointipinoon. Työsyklin ajoprofiili (KUVA 10. Lajittelijalta pinoon1, ajonopeus (km/h), kuorman korkeus (m) sekä kuorman massa (kg)). Tallennuksen alkaessa kuorma on jo pihdissä, mutta sitä ei ole vielä nostettu ilmaan.



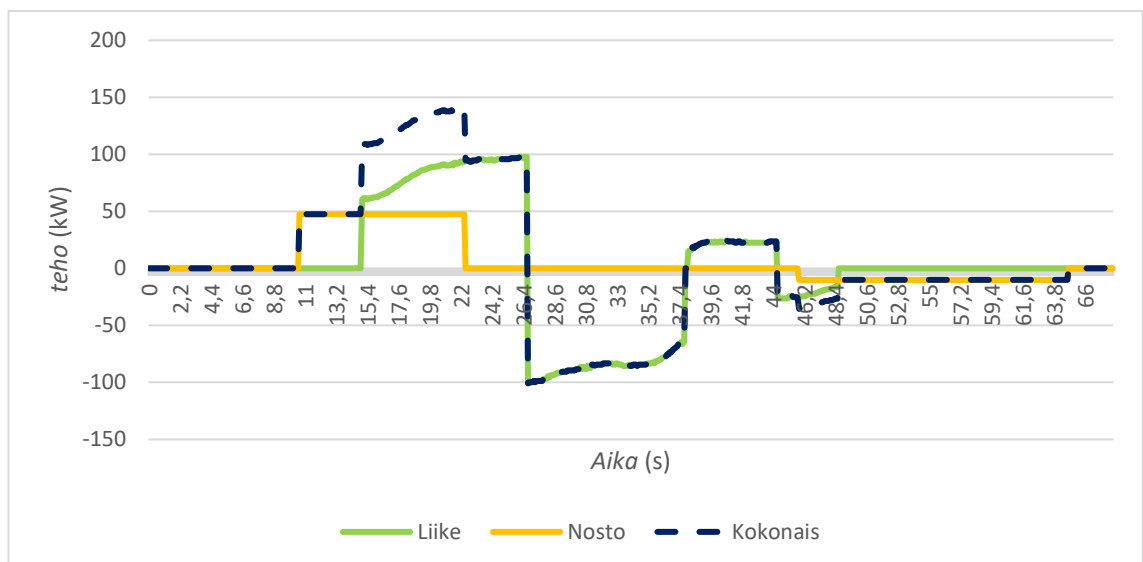
KUVA 10. Lajittelijalta pinoon1, ajonopeus (km/h), kuorman korkeus (m) sekä kuorman massa (kg)

Toijala Worksin toimittamasta taulukko-ohjelmasta saadaan kuvaaja (Kuvio 5), josta luetaan nostosylintereille tuleva kuorma. Kuorma muodostuu pihdissä olevasta kuormasta, pihdistä sekä puomista. Tässä kyseisessä nostossa sylintereiden pituus kuorman ollessa nostettuna on noin 5,4 m, joten sylintereille tuleva massa on noin 24500 kg. Lasketaan kiihdytyksiin ja hidastumiseen kuluva teho yhtälöllä (8) sekä nostoliikkeen ja laskuliikkeen teho yhtälöllä (10) työsyklin eri ajanhetkillä. Laskennan tulokset esitetään (kuvio 6).



KUVIO 5. Nostosylintereihin kohdistuva paino 10200kg:n kuormalla

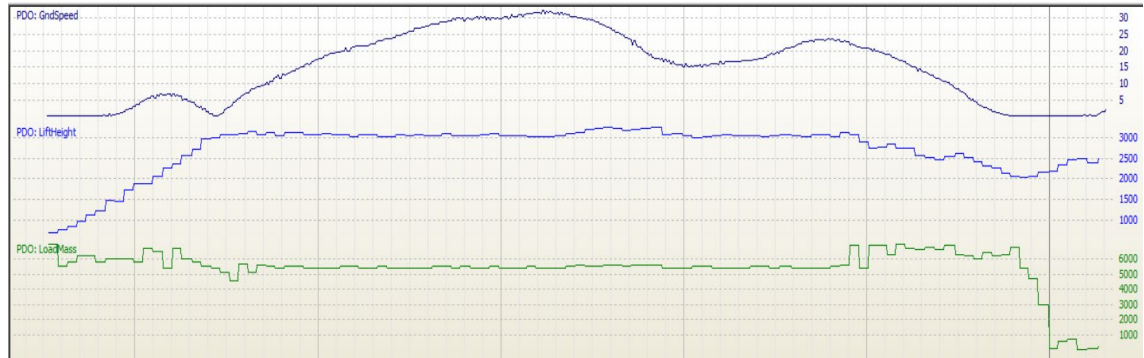
KUVIO 6. Lajittelijalta pinoon1 liikkeen ja noston tehot



### 6.3 Lajittelijalta pinoon2

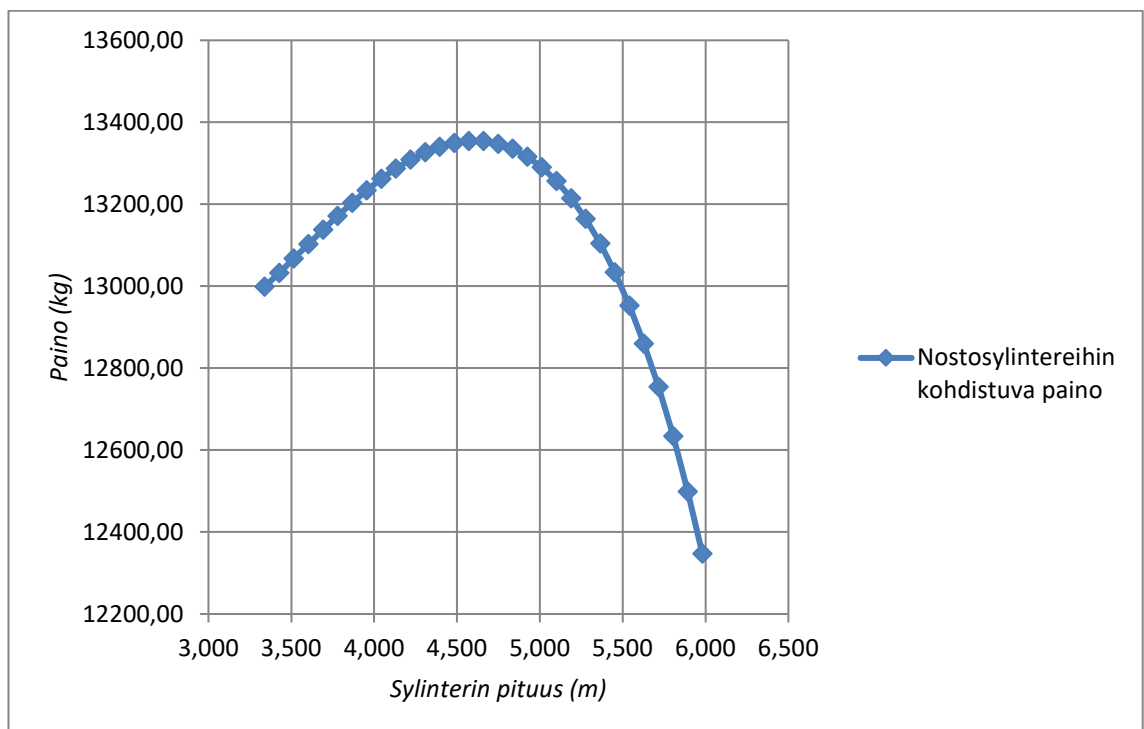
Toinen tallennettu työsykli on lajittelijan lokeron tyhjennys. Puukurottaja nostaa noin 5400 kg:n kuorman ja kuljettaa sen hieman pidemmällä sijaitsevaan varastointipinoon. Kone kiihdyttää peruuttamalla noin 6 km/h nopeuteen ja jarruttaa pysähdyksiin. Tämän

jälkeen kone kiihdyttää eteenpäin noin 32 km/h nopeuteen, jonka jälkeen kone hidastaa noin 15 km/h nopeuteen ja uudelleen kiihdyttää 23 km/h nopeuteen. Lopuksi kone jarruttaa pysähdyksiin ja laskee kuorman varastointipinoon. Työsyklin ajoprofiili (KUVA 11. Lajittelijalta pinoon 2, ajonopeus (km/h), kuorman korkeus (m) sekä kuorman massa (kg)). Tallennuksen alkaessa kuorma on jo pihdissä, mutta sitä ei ole vielä nostettu ilmaan.

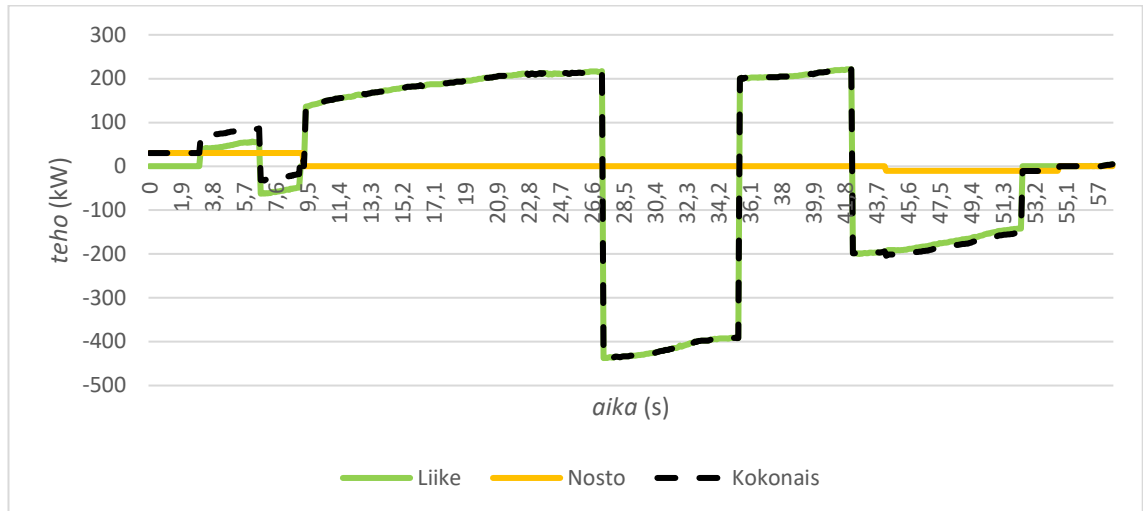


KUVA 11. Lajittelijalta pinoon 2, ajonopeus (km/h), kuorman korkeus (m) sekä kuorman massa (kg)

Kuvaajasta (kuvio 7) voidaan nähdä nostosylintereille tuleva kuorma. Kuorma muodostuu pihdissä olevasta kuormasta, pihdistä sekä puomista. Tässä kyseisessä nostossa sylintereiden pituus kuorman ollessa nostettuna on noin 5,4 m, joten sylintereille tuleva massa on noin 13000 kg. Lasketaan kiihdytyksiin ja hidastumiseen kuluva teho yhtälöllä (8) sekä nostoliikkeen ja laskuliikkeen teho yhtälöllä (10) työsyklin eri ajanhetkillä. Laskennan tulokset esitetään (kuvio 8).



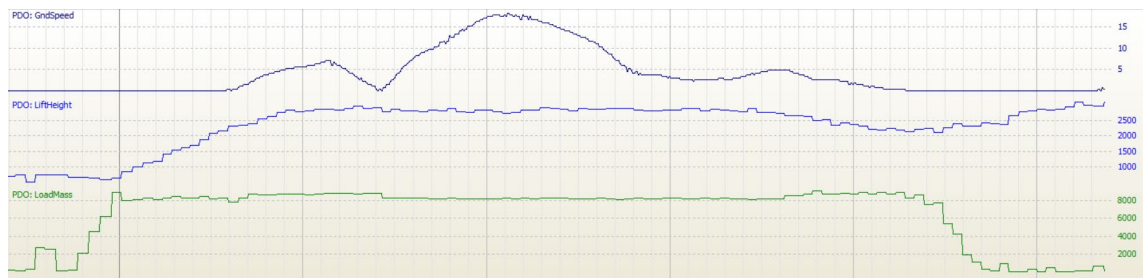
KUVIO 7. Nostosylintereihin kohdistuva paino 5400kg:n kuormalla



KUVIO 8. Lajittelijalta pinoon 2. Liikkeen ja noston tehot

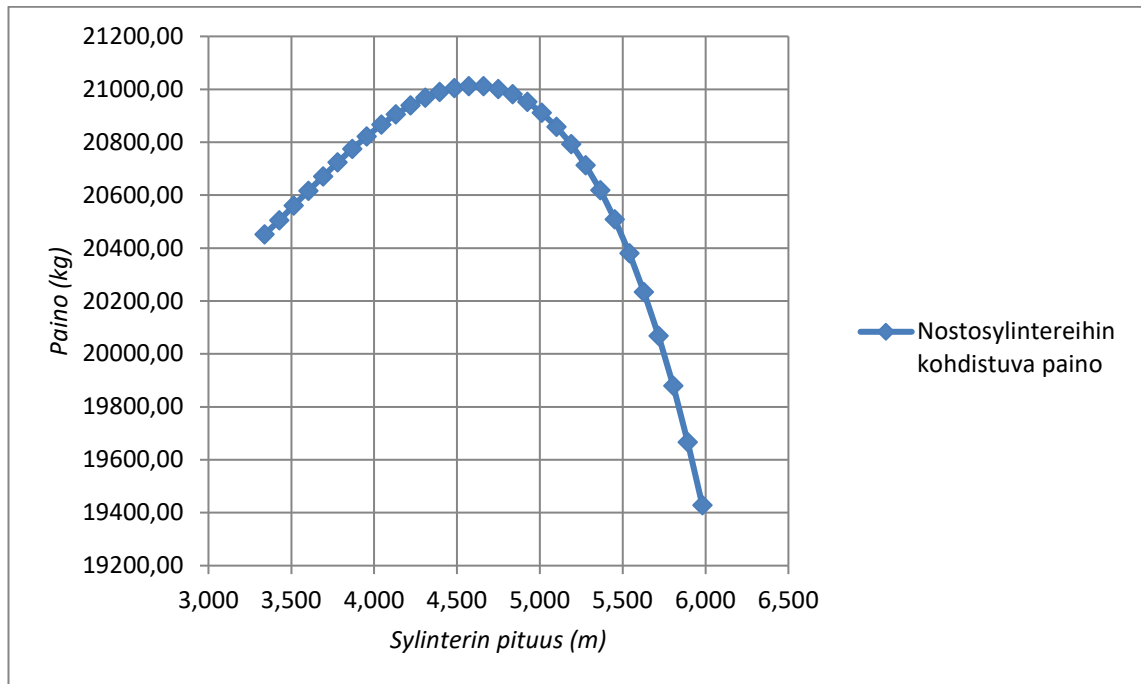
#### 6.4 Lajittelijalta pinoon 3

Kolmas tallennettu työsykli on edelleen lajittelijan lokeron tyhjennys. Puukurottaja nostaa noin 8500 kg:n kuorman ja kuljettaa sen lähellä sijaitsevaan varastointipinoon. Kone kiihdyttää peruuttamalla noin 7 km/h nopeuteen ja jarruttaa pysähdyksiin. Tämän jälkeen kone kiihdyttää eteenpäin noin 18 km/h nopeuteen, jonka jälkeen kone hidastaa pinon vierellä hieman ja kiihdyttää uudelleen. Työsyklin ajoprofiili (KUVA 12. Lajittelijalta pinoon 3, ajonopeus (km/h), kuorman korkeus (m) sekä kuorman massa (kg)). Lopuksi kone jarruttaa pysähdyksiin ja laskee kuorman varastointipinoon.

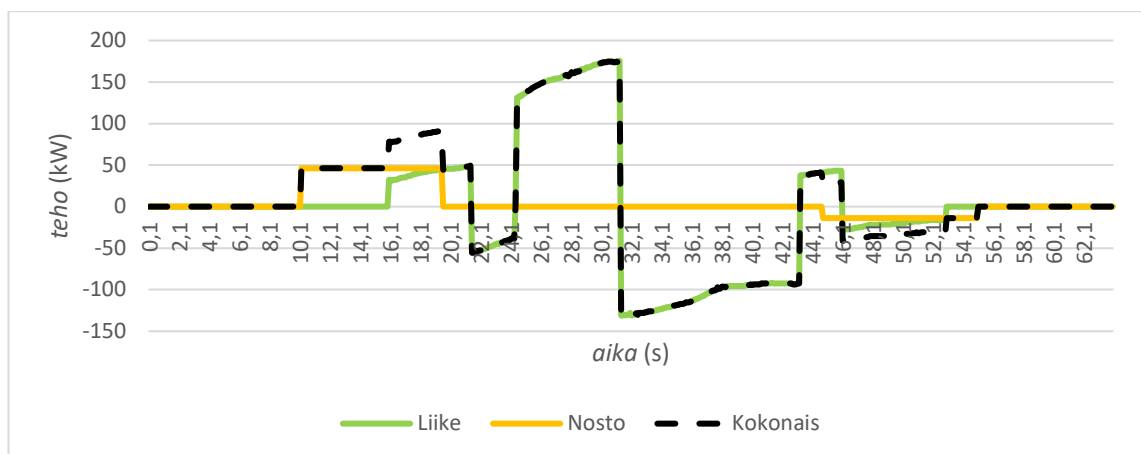


KUVA 12. Lajittelijalta pinoon 3, ajonopeus (km/h), kuorman korkeus (m) sekä kuorman massa (kg)

Kuvaajasta (kuvio 9) voidaan nähdä nostosylintereille tuleva kuorma. Kuorma muodostuu pihdissä olevasta kuormasta, pihdistä sekä puomista. Tässä kyseisessä nostossa sylinterien pituus kuorman ollessa nostettuna on noin 5,5 m, joten sylintereille tuleva massa on noin 20400 kg. Lasketaan kiihdytyksiin ja hidastumiseen kuuluva teho yhtälöllä (8) sekä nostoliikkeen ja laskuliikkeen teho yhtälöllä (10) työsyklin eri ajanhetkillä. Laskennan tulokset esitetään (kuvio 10).



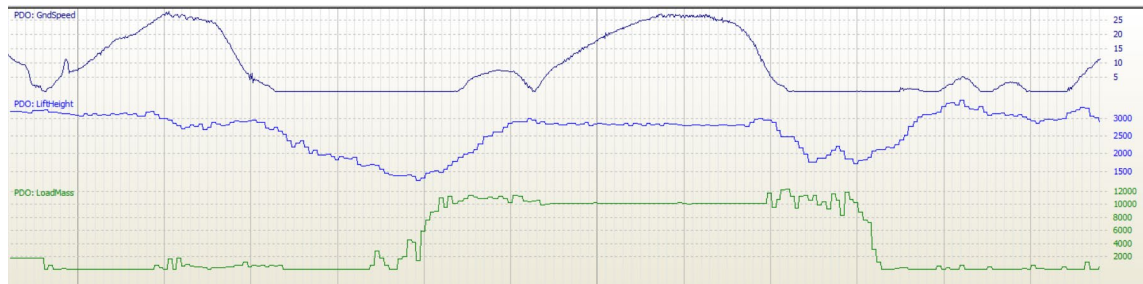
KUVIO 9. Nostosylintereihin kohdistuva paino 8500kg:n kuormalla



KUVIO 10. Lajittelijalta pinoon 3. Liikkeen ja noston tehot

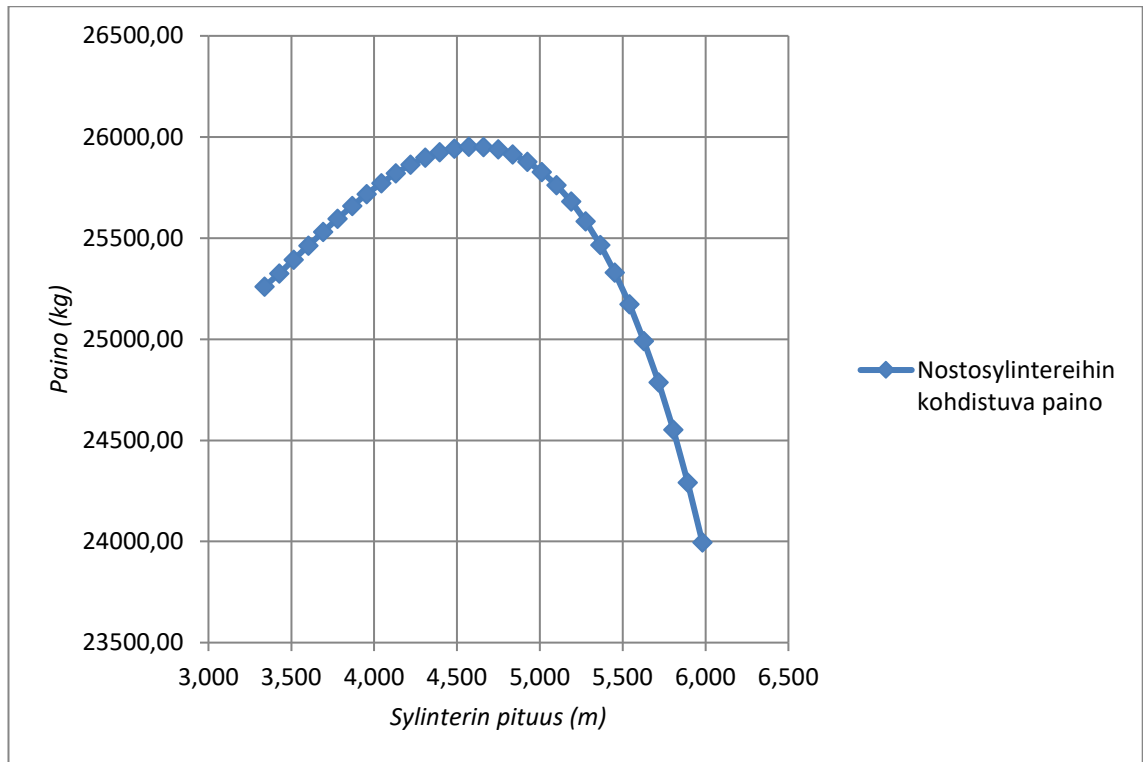
## 6.5 Sahalle varastopinosta

Neljäs tallennettu työsykli on puukuorman vienti varastopinosta sahalaitoksen syöttöpöydälle. Tässä työsyklissä puukurottaja nostaa noin 10500 kg:n kuorman ja kuljettaa sen sahalaitoksen syöttöpöydälle. Kone kiihdyttää noin 27 km/h nopeuteen ja jarruttaa pysähtyksiin varastointipinolle, josta pihtiin otetaan 10500 kg:n puukuorma. Tämän jälkeen kone kiihdyttää taaksepäin noin 7 km/h nopeuteen, jonka jälkeen kone hidastaa pysähtyksiin. Kone kiihdyttää eteenpäin 26 km/h nopeuteen ja lopuksi kone jarruttaa pysähtyksiin syöttöpöydän viereen ja laskee kuorman syöttöpöydän hihnalle. Työsyklin ajo-profiili (KUVA 13. Sahalle pinosta, ajonopeus (km/h), kuorman korkeus (m) sekä kuorman massa (kg)).

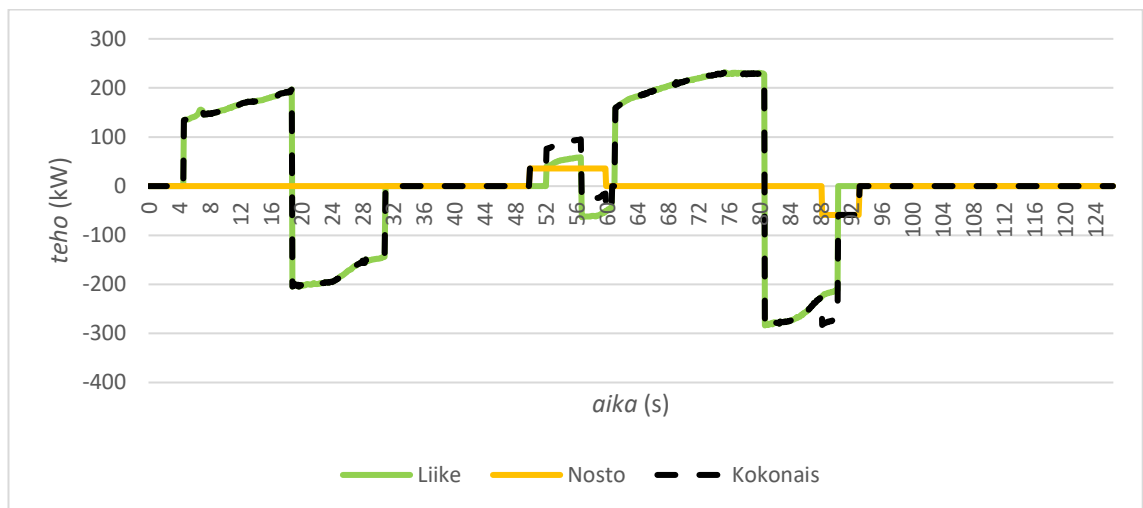


KUVA 13. Sahalle pinosta, ajonopeus (km/h), kuorman korkeus (m) sekä kuorman massa (kg)

Kuvaajasta (kuvio 11) voidaan nähdä nostosylintereille tuleva kuorma. Kuorma muodostuu pihdissä olevasta kuormasta, pihdistä sekä puomista. Tässä kyseisessä nostossa sylintereiden pituus kuorman ollessa nostettuna on noin 5,5 m, joten sylintereille tuleva massa on noin 25250 kg. Lasketaan kiihdytyksiin ja hidastumiseen kuuluva teho yhtälöllä (8) sekä nostoliikkeen ja laskuliikkeen teho yhtälöllä (10) työsyklin eri ajanhetkillä. Laskennan tulokset esitetään (kuvio 12).



KUVIO 11. Nostosylintereihin kohdistuva paino 10500kg:n kuormalla



KUVIO 12. Sahalle pinosta. Liikkeen ja noston tehot



## 7 TULOKSET

### 7.1 Energiatarkastelu

Kaikissa mitatuissa työsykleissä (kappale 5) työsykleissä on nähtävillä, että puukurottajan ajo on lähinnä kiihdyttämistä ja jarruttamista vuorotellen. Tasaista ajoa ei ilmene juurikaan. Työsyklien tehokuvaajissa nollatason yläpuolella oleva pinta-ala on kulutettua energiaa ja alapuolella on palautuvaa energiaa. Energiatarkastelua varten tehot muutetaan energiaksi.

Lasketaan koneen kokonaisliikevastuksen ylittämiseen tarvittava teho  $P_{Vkok}$ .

$$P_{Vkok} = P_{Liike} + P_t . \quad (11)$$

$P_{Liike}$  = liikevastuksen ylittämiseen kuluva teho

$P_t$  = kiihdytykseen kulunut teho

Työsyklien teho muutetaan vielä energiaksi, jotta voidaan tarkastella energiatasetta.

Energiaksi  $E$  teho muutetaan integroimalla se ajan suhteen.

$$E = \int P_{Vkok} dt . \quad (12)$$

$P_{Vkok}$  = kokonaisliikevastuksen ylittämiseen kuluva teho

$t$  = aika

Energialaskuissa on tärkeää ottaa huomioon se, että mikä energia liikkeestä voidaan todellisuudessa ottaa talteen. Liikevastuksen ylittämiseen kuluva energia ei ole mahdollista jarrutuksessa ottaa talteen, koska se osuus energiaa kuluu vähintään koko ajan koneen ollessa liikkeessä. Energialaskuissa otetaankin laskuihin mukaan ainoastaan jarrutuksessa vapautuva energia.

Koneen liikkumiseen eri työsykleissä kulutettu ja jarrutuksissa vapautunut energia esitetään (taulukko1). Yhteenlaskettuna ajosykleistä ajovoimansiirrosta on mahdollista ottaa talteen 8,07 MJ energiaa, joka on 57% kulutetusta energiasta.

TAULUKKO 1. Koneen ajon energiat

	Kulutettu energia, ajo (MJ)	Vapautuva energia, ajo (MJ)
Lajittelijalta pinoon1	1,14	0,50
Lajittelijalta pinoon2	6,18	3,62
Lajittelijalta pinoon3	1,44	0,92
Pinosta sahalle	5,47	3,05

Koneen puomin nostoon kulunut ja puomin laskusta vapautunut energia eri työsykleissä esitetään (taulukko2). Yhteenlaskettuna ajosykleistä puomin työliikkeistä on mahdollista ottaa talteen 0,73 MJ energiaa, joka on 58% kulutetusta energiasta.

TAULUKKO 2. Koneen noston energiat

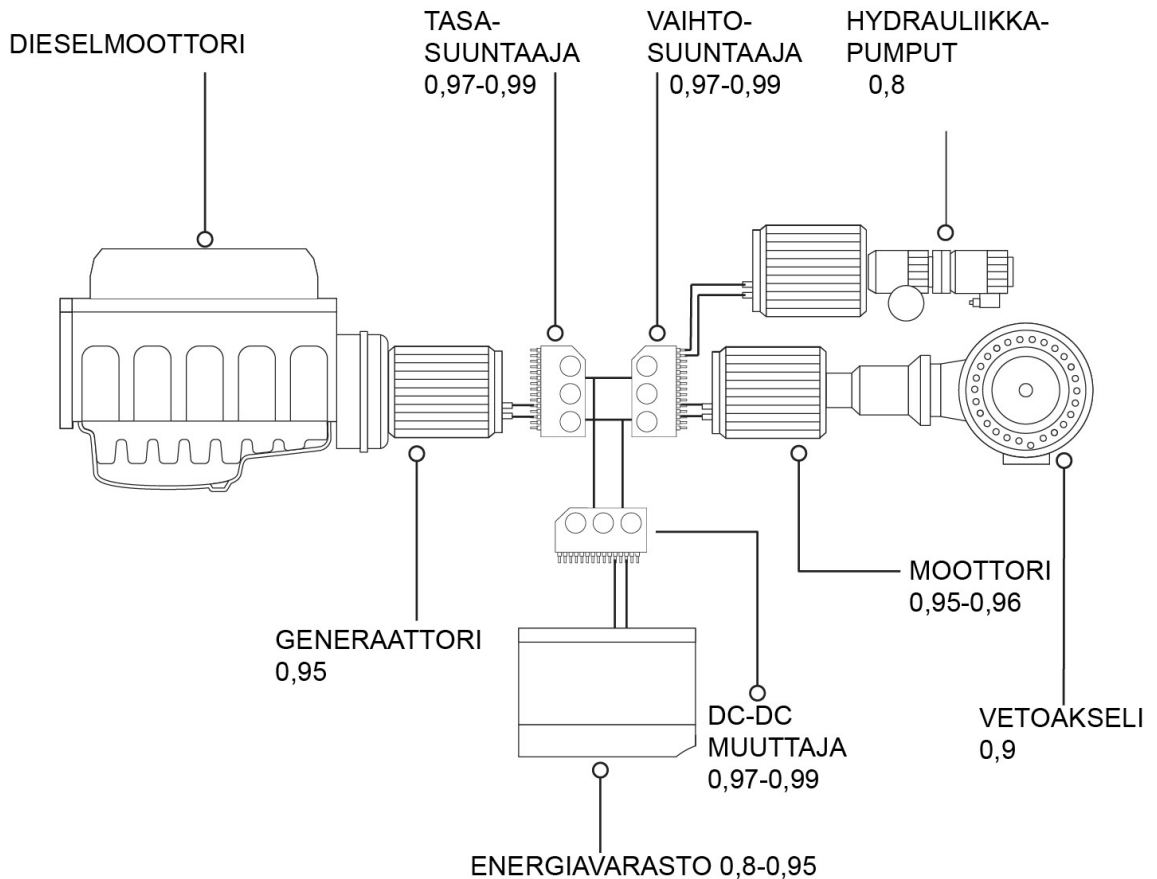
	Kulutettu energia, nosto (MJ)	Vapautuva energia, nosto (MJ)
Lajittelijalta pinoon1	0,55	0,19
Lajittelijalta pinoon2	0,28	0,11
Lajittelijalta pinoon3	0,43	0,14
Pinosta sahalle	0,36	0,29

## 7.2 Energiatarkastelu eri hybridiratkaisujen näkökulmasta

Hyötysuhteet ovat isossa roolissa hybridijärjestelmissä, koska energian kulkiessa energiavarastosta toimilaitteeseen sen muoto muuttuu useampaan kertaan. Tarkastellaan eri hybridiratkaisujen hyötysuhteiden kautta todellisia energiamääriä, jotka ovat mahdollista ottaa talteen energiavarastoon. Energiat ajovoimansiirron puolella ovat huomattavan suuria ja ne vapautuvat jarrutuksessa lyhyessä ajassa, joten energian varastoimiseenärkevin vaihtoehto on superkondensaattori. En ota huomioon tarkastelussa polttomoottoria eikä polttomoottoriin kytkettyä generaattoria. Tarkastelen voimalinjaa energiavarastosta vetoakseliin väliä sekä vetoakselista energiavarastoon väliä. Hyötysuhteet ovat aikaisemmin esiteltyjen komponenttien ominaisuuksista poimittuja (kappale 4).

### 7.2.1 Sarjahybridi

Mikäli puukurottaja tehtäisiin kokonaan sarjahybridiksi, järjestelmän laitekoonpano olisi (KUVA 14. Sarjahybridi hyötysuhteet) mukainen. Kuvasta nähdään myös eri komponenttien hyötysuhteet.



KUVA 14. Sarjahybridi hyötysuhteet

#### Ajovoimansiirto sarjahybridi

Ajovoimansiirron osalta energia kulkee energiavarastosta tasajännitemuunnoksen (DC-DC) kautta jännitevälipiiriin. Jännitevälipiiristä energia muunnetaan vaihtosuuntaajalla (DC-AC) vaihtojännitteeksi sähkömoottorille. Sähkömoottori siirtää pyörimisvoiman vetäville pyörille perinteisen vetoakselin välityksellä. Jarrutusenergian talteenotossa energia kulkee saman reitin, mutta päinvastaisessa järjestyksessä. Edellä mainitun voimalinjan rakenteella kuvan matalemmilla hyötysuhteilla saadaan komponenteissa tapahtuvien häviöiden jälkeen ajovoimansiirrosta talteen otettua energiavarastoon seuraavan suuruiset energiat (taulukko3).

TAULUKKO 3. Sarjahybridi ajo matalemmilla hyötysuhteilla

Sarjahybridi (ajo)	Energiavarastosta (MJ)	Energiavarastoon (MJ)	Talteenotto %
Lajittelijalta pinoon1	1,75	0,32	18,28
Lajittelijalta pinoon2	9,50	2,42	25,52
Lajittelijalta pinoon3	2,22	0,61	27,67
Pinosta sahalle	8,42	2,04	24,25

Valitsemalla paremman hyötysuhteen komponentit saadaan (kuva 14) mukaisella voimalinjalla ja hyötysuhteilla seuraavan suuruiset energiat (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Sarjahybridi ajo korkeammilla hyötysuhteilla

Sarjahybridi (ajo)	Energiavarastosta (MJ)	Energiavarastoon (MJ)	Talteenotto %
Lajittelijalta pinoon1	1,41	0,40	27,98
Lajittelijalta pinoon2	7,68	2,88	37,48
Lajittelijalta pinoon3	1,80	0,73	40,65
Pinosta sahalle	6,80	2,42	35,63

### Työliike sarjahybridi

Työliikkeen eli noston osalta energia kulkee energiavarastosta tasajännitemuunnoksen (DC-DC) kautta jännitevälipiiriin. Jännitevälipiiristä energia muunnetaan vaihtosuuntaajalla (DC-AC) vaihtojännitteeksi sähkömoottorille. Sähkömoottori pyörittää hydraulikkapumppuja, jotka välittävät energian öljyn välityksellä nostosylintereille. Hydraulikkasyylintereiltä laskuliikkeessä saatava energia on mahdollista ottaa talteen erillisillä hydraulikkamoottoreilla, joille öljynvirtaus ohjataan erillisillä venttiileillä. Toinen mahdollisuus on käyttää hydraulikkapumppuja, joita on mahdollista käyttää myös moottoreina. Hyötysuhteen molemmissa ratkaisuvaihtoehdoissa oletetaan olevan sama 0,8, joten valinnalla ei ole vaikutusta lopputulokseen. Hydraulikkamoottori pyörittää generaattoria, josta energia johdetaan tasasuuntaajan (AC-DC) sekä (DC-DC) kautta energiavarastoon. Edellä mainitun voimalinjan rakenteella matalemmilla hyötysuhteilla saadaan komponenteissa tapahtuvien häviöiden jälkeen puomin nostoliikkeestä talteen otettua energiavarastoon seuraavan suuruiset energiat (taulukko5).

TAULUKKO 5. Sarjahybridi nosto matalemmilla hyötysuhteilla

Sarjahybridi (nosto)	Energiavarastosta (MJ)	Energiavarastoon (MJ)	Talteenotto %
Lajittelijalta pinoon1	1,07	0,10	9,30
Lajittelijalta pinoon2	0,54	0,05	10,11
Lajittelijalta pinoon3	0,83	0,07	8,78
Pinosta sahalle	0,69	0,15	21,42

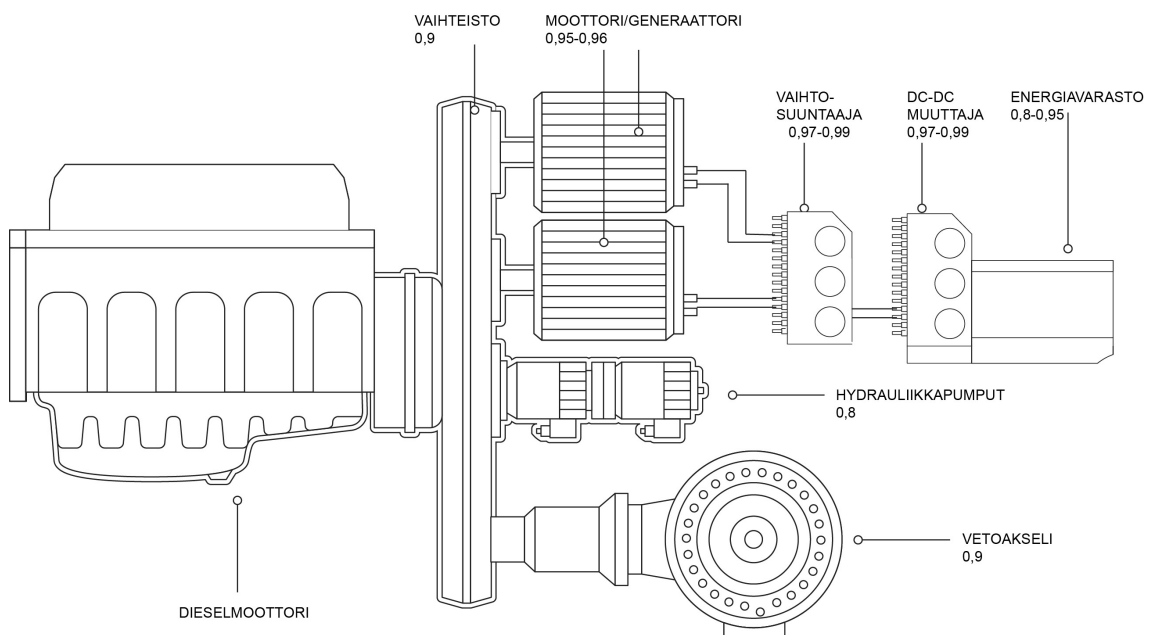
Valitsemalla paremman hyötysuhteen komponentit saadaan (kuva 14) mukaisella voimalinjalla ja hyötysuhteilla seuraavan suuruiset energiat (taulukko 6).

TAULUKKO 6. Sarjahybridi nosto korkeammilla hyötysuhteilla

Sarjahybridi (nosto)	Energiavarastosta (MJ)	Energiavarastoon (MJ)	Talteenotto %
Lajittelijalta pinoon1	0,86	0,12	14,23
Lajittelijalta pinoon2	0,44	0,07	15,47
Lajittelijalta pinoon3	0,67	0,09	13,43
Pinosta sahalle	0,56	0,18	32,78

## 7.2.2 Rinnanhybridi

Mikäli puukurottaja tehtäisiin kokonaan rinnanhybridiksi järjestelmän laitekoonpano olisi (kuva 15) mukainen. Kuvasta nähdään myös eri komponenttien hyötysuhteet.



KUVA 15. Rinnanhybridi hyötysuhteet

### Ajovoimansiirto rinnanhybridi

Ajovoimansiirron osalta energia kulkee energiavarastosta tasajännitemuunnoksen (DC-DC) kautta jännitevälipiiriin. Jännitevälipiiristä energia muunnetaan vaihtosuuntaajalla (DC-AC) vaihtojännitteeksi sähkömoottorille. Sähkömoottorilta pyörimisenergia johdetaan vaihteiston kautta perinteiselle vetoakselille ja sitä kautta vetäville pyörille. Jarrutusenergian talteenotossa energia johdetaan vetoakselilta vaihteistolle, joka ohjaa energian edelleen generaattorille. Generaattorilta vaihtojännite johdetaan tasasuuntaajan kautta jännitevälipiirille ja tasajännitemuutoksen kautta energiavarastoon. Edellä mainitun voimalinjan rakenteella matalemmilla hyötysuhteilla saadaan komponenteissa tapahtuvien häviöiden jälkeen ajovoimansiirrosta talteen otettua energiavarastoon seuraavan suuruiset energiat (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Rinnakkaishybridi ajo matalemmilla hyötysuhteilla

Rinnanhybridi ajo	Energiavarastosta (MJ)	Energiavarastoon (MJ)	Talteenotto %
Lajittelijalta pinoon1	1,94	0,29	14,81
Lajittelijalta pinoon2	10,55	2,09	19,84
Lajittelijalta pinoon3	2,47	0,53	21,52
Pinosta sahalle	9,35	1,76	18,86

Valitsemalla paremman hyötysuhteen komponentit saadaan (kuva 15) mukaisella voimalinjalla ja hyötysuhteilla seuraavan suuruiset energiat (taulukko 8).

TAULUKKO 8. Rinnakkaishybridi ajo korkeammilla hyötysuhteilla

Rinnanhybridi ajo	Energiavarastosta (MJ)	Energiavarastoon (MJ)	Talteenotto %
Lajittelijalta pinoon1	1,57	0,36	22,66
Lajittelijalta pinoon2	8,53	2,59	30,36
Lajittelijalta pinoon3	2,00	0,66	32,93
Pinosta sahalle	7,56	2,18	28,86

### Työliike rinnanhybridi

Työliikkeen eli noston osalta energia kulkee energiavarastosta tasajännitemuunnoksen (DC-DC) kautta jännitevälipiiriin, josta se muunnetaan vaihtosuuntaajalla (DC-AC) vaihtojännitteeksi sähkömoottorille. Sähkömoottori pyörittää vaihteiston kautta hydraulikka-pumppuja, jotka välittävät energian öljyn välityksellä nostosylintereille. Hydraulikkasyylintereiltä laskuliikkeessä saatava energia on mahdollista ottaa talteen käyttämällä

hydrauliikkapumppuja, joita on mahdollista käyttää myös moottoreina. Hydrauliikka-moottori pyörittää vaihteiston kautta generaattoria, josta energia johdetaan tasasuuntaajan (AC-DC) sekä (DC-DC) kautta energiavarastoon. Edellä mainitun voimalinjan rakenteella (kuva 15) matalemmilla hyötysuhteilla saadaan komponenteissa tapahtuvien häviöiden jälkeen puomin nostoliikkeestä talteen otettua energiavarastoon seuraavan suuruiset energiat (taulukko9).

TAULUKKO 9. Rinnakkaishybridi nosto matalemmilla hyötysuhteilla

Rinnanhybridi nosto	Energiavarastosta (MJ)	Energiavarastoon (MJ)	Talteenotto %
Lajittelijalta pinoon1	1,18	0,09	7,54
Lajittelijalta pinoon2	0,60	0,05	8,19
Lajittelijalta pinoon3	0,93	0,07	7,11
Pinosta sahalle	0,77	0,13	17,35

Valitsemalla paremman hyötysuhteen komponentit saadaan (kuva 15) mukaisella voimalinjalla ja hyötysuhteilla seuraavan suuruiset energiat (taulukko 10).

TAULUKKO 10. Rinnakkaishybridi nosto korkeammilla hyötysuhteilla

Rinnanhybridi nosto	Energiavarastosta (MJ)	Energiavarastoon (MJ)	Talteenotto %
Lajittelijalta pinoon1	0,96	0,11	11,53
Lajittelijalta pinoon2	0,49	0,06	12,53
Lajittelijalta pinoon3	0,75	0,08	10,88
Pinosta sahalle	0,62	0,16	26,55

### 7.2.3 Rinnakkais- sarjahybridi

Mikäli puukurottaja tehtäisiin rinnakkais- sarjahybridiksi järjestelmän laitekoonpano olisi ajovoimansiirron osalta vastaava kuin sarjahybridin ajovoimansiirto (kuva13). Työliikkeet saavat rinnakkais-sarjahybridissä nostoon tarvittavan energian suoraan polttomoottorista.

#### Ajovoimansiirto rinnakkais- sarjahybridi

Ajovoimansiirron osalta energia kulkee energiavarastosta tasajännitemuunnoksen (DC-DC) kautta jännitevälipiiriin, josta se muunnetaan vaihtosuuntaajalla (DC-AC) vaihtojännitteeksi sähkömoottorille. Sähkömoottori siirtää pyörimisvoiman vetäville pyörille perinteisen vetoakselin välityksellä.

Jarrutusenergian talteen otossa energia kulkee saman reitin, mutta päinvastaisessa järjestyksessä. Kulutetut ja talteen otettavat energiat esitetään (taulukko3, taulukko4).

### Työliike rinnakkais- sarjahybridi

Työliikkeen eli noston osalta rinnakkais- sarjahybridissä ei työliikkeen energian talteen otto ole mahdollista. Nostoon tarvittava energia, kun huomioon ollaan otettu vaihteiston, hydrauliiikkapumppujen sekä nostosylintereiden häviöt eri työsykliä kohdalla esitetään (taulukko11).

TAULUKKO 11. Rinnakkais- sarjahybridi nosto

Rinnan-Sarjahybridi	Polttomoottori, nosto (MJ)
Lajittelijalta pinoon1	0,86
Lajittelijalta pinoon2	0,44
Lajittelijalta pinoon3	0,67
Pinosta sahalle	0,56

## 7.3 Energiavarastot

Energiavaraston mitoituksessa lähdin siitä, että dieselmoottorin tehoa saataisiin pienennettyä 33%. Päädyin tuohon 33% siitä syystä, että mittausdatasta oli nähtävissä nostossa 60% suurin polttomoottorin kuormitus. Lisäsin vielä 7% varmuusmarginaalia, joten lopputuloksena on 67% alkuperäisestä. Hankasalmella työskentelevästä puukurottajan mittausdatasta saatiin selville, että suurin yhtäjaksoinen 100% kuormitus kulutti energiaa 3,9 MJ ja oli ajan kesto 15,9 s. 33% osuus on 1,3 MJ, eli energiavarastoon pitäisi saada häviöiden huomioimisen jälkeen varastoitua 2 MJ energiaa.

### 7.3.1 Superkondensaattori Rinnakkais- ja sarjahybridissä

Esimerkkimoottorin nimellisjännite on 500 V ja silloin välipiirin jännitteeksi valitaan 700 V. Päätetään, että kondensaattorien jännite saa pudota puoleen kuormitustilanteessa. Näillä lähtötiedoilla saadaan yhtälöstä (13) kondensaattorin kapasitanssi  $C_{SC}$ .

$$C_{SC} = \frac{2 \cdot E_{SC}}{U_{SC}^2} \quad (13)$$

$$C_{SC} = 10,9 F$$



$E_{SC}$  = Energiavarastoon varastoitava kokonaisenergia

$U_{SC}$  = Energiavaraston jännitevaihteluväli

Yhtälöllä (14) saadaan selville, kuinka monta kappaletta kondensaattoreita tarvitsee kytkeä sarjaan, jotta tarvittava 700 V:n jännitetaso saavutetaan. Yhden kennon jännite on 2,7 V.

$$N = \frac{U_N}{U_{kenno}} \quad (14)$$

$N = 259$  kpl

$U_N$  = välipiirin jännite

$U_{kenno}$  = yhden kondensaattorin kennojännite

Yhtälöllä (15) lasketaan yhden kondensaattorikennon kapasitanssi  $C_{kenno}$ .

$$C_{kenno} = N * C_{SC} \quad (15)$$

$C_{kenno} = 2823$  F

$N$  = sarjaan kytkettävien kondensaattorikenttien lukumäärä

$C_{SC}$  = kondensaattorin kapasitanssi

Lähimmäksi vaadittua kapasitanssia on 3000 F kenno. Mikäli energiavarasto toteutettaisiin superkondensaattoreilla, niin 3000 F kennoja tarvitaan 259 kpl. Käytännössä superkondensaattoreista muodostettu energiavarasto voitaisiin toteuttaa valmistajalta Vinatechiltä löytyviltä 48 V:n ja 166 F:n moduuleilla. Kytkemällä 14 kappaletta superkondensaattorimoduleita sarjaan, saadaan kokonaisjännitteeksi 672 V, kytkennän kapasitanssiksi 11,9 F sekä käytettäväksi energiaksi 2,2 MJ.

### 7.3.2 Akku sarjahybridissä

Sarjahybridissä akuston kanssa muodostuu ongelmaksi suuret virrat, joita jarrutustilanteissa regeneroituu energiavarastoon. Energiavaraston koko muodostuu tarpeettoman suureksi, koska isommat kapasiteetiltaan isommat akkukennot kestävät suurempia virtoja. Esimerkkimoottorin nimellisjännite on 500 V, nimellisteho 221 kW ja generaattorikäytössä virrantuotto on 268 A.

Yhtälöllä (16) saadaan selvitettyä tarvittava sarjaan kytkettävien 3,2 V litiumakkukennon lukumäärä  $Q_{sarjassa}$ , jotta tarvittava 700 V:n maksimijännite saadaan muodostettua.

$$Q_{sarjassa} = \frac{U_{bat\_max}}{U_{kenno\_max}} \quad (16)$$

$$Q_{sarjassa} = 191 \text{ kpl}$$

$U_{batt\_max}$  = akuston maksimijännite, tässä tapauksessa 700 V

$U_{kenno\_max}$  = akku kennon maksimijännite, tässä tapauksessa 3,65 V

Sopivalla latausvirran kestolla oleva akkukkenno on  $U_{kenno\_nim}$  3,2 V ja  $C_P$  90 Ah kenno, joka pystyy ottamaan 3C latausvirran vastaan. Latausvirta on tällöin 270 A, joka on yli vaaditun 268 A. Akuston energiakapasiteetti  $E_{batt\_nom}$  saadaan laskettua yhtälöllä (17) (EV-power).

$$E_{batt\_nom} = Q_{sarjassa} * U_{kenno\_nim} * C_P \quad (17)$$

$E_{batt\_nom}$  saadaan 55 kWh, joka on 198 MJ. Energiavarastoon varastoidulla energialla pystyisi avustamaan 99 kappaletta 3,9 MJ kiihdytyksiä, joka on paljon vaadittua enemmän. Akkukennon kapasiteettia ei pysty pienentämään, koska regeneroinnin latausvirta on suuri. Keinoja tarpeettoman suuren energiavaraston pienentämiseksi on akkukennojen kapasiteetin pienentäminen, joka johtaa siihen, että akuston latausvirtaa on pienennettävä. Akkukennojen kapasiteetin pienennys aiheuttaa, että energian talteen oton hyötysuhde pienenee, koska osa palautuvasta energiasta tarvitsee johtaa lämmöksi.

### 7.3.3 Akku rinnakkaishybridissä

Rinnakkaishybridi sovelluksessa sähkömoottori ja generaattori valitaan huomattavasti pienemmäksi, kuin sarjahybridisovelluksessa. Lähtökohtana oli, että sähkömoottorilla avustettaisiin 1/3 maksimitehosta, joka on 70 kW. Esimerkkimoottorisarjasta löytyy pienin vaihtoehto, joka moottorikäytössä on teholtaan 78 kW. Generaattorikäytössä moottorin tehoksi ilmoitetaan 85 kW ja virran tuotoksi 104 A (Danfoss1).

Suurin latausvirran vastaanottokyky 40 Ah akkukennolla on 120 A (13), joka on enemmän kuin generaattorin virran tuotto. Yhtälöllä (17) saadaan akuston energiakapasiteettiä 88 MJ. Rinnakkaishybridissä on mahdollista laskea järjestelmän jännitettä alaspäin, koska sähkömoottorilla tuotetaan vain noin 70 kW teho. Akuston nimellisjännitteen laskeessa 304 V ja kennojen määrän tippuessa 95 kappaleeseen akuston maksimi virta pysyy alle akkukennon maksimivirran 400 A sekä energiasisältö riittävän suurena. Yhtälöstä (17) saadaan akuston energiasisällöksi 44 MJ.

## 8 POHDINTA

Mittauksista ja laskelmista voidaan todeta, että Hankasalmella työskentelevän RTD12 KURO-puukurottajan työkierrossa on palautuvaa energiaa tarpeeksi, että se olisi järkevää ottaa talteen energiavarastoon ja uudelleen käyttää. Voimalaitteen maksimitehoa käytetään hetkellisesti kiihdytyksissä, joten kuormituksen luonteesta johtuen olisi voimalaitteen kokoa mahdollista pienentää ja ottaa hetkellisesti tarvittava lisäteho mahdollisesta sähköisestä energiavarastosta.

Energiatarkastelun perusteella keskiarvo vapautuvan energian määrä suhteessa kulutetun energian määrään ajovoimansiirron osalta on tarkastelluissa työkierron 57%. Verrattaessa eri hybridityyppejä ajovoimansiirron osalta käyttäen energiavarastona superkondensaattoria sekä paremman hyötysuhteen komponentteja, saadaan sarjahybridissä talteen otettua 35,6% kulutetusta energiasta. Rinnakkaishybridissä talteenotto prosentti on vastaavasti 28,9% kulutetusta energiasta. Käytettäessä akkua energiavarastona saadaan talteen otettua sarjahybridissä 25,1%, sekä rinnakkaishybridissä 20,4%. Näiden tulosten perusteella ajovoimansiirrosta päästään parhaimpaan tulokseen toteuttamalla koneen liikumisen mahdollistama voimalinja sarjahybridi periaatteella käyttäen energiavarastona superkondensaattoreita.

Ajovoimansiirron talteenotto prosenttia olisi mahdollista parantaa valitsemalla sähkömoottoreiksi napamoottorit, jossa sähkömoottorit ovat suoraan pyörän navoissa ja tämän johdosta olisi mahdollista jättää voimalinjasta pois perinteisen tyyppinen vetoakseli. Tämä valinta parantaisi ajoliikkeen voimalinjan kokonaishyötysuhdetta noin 8% eli 43,7%:iin. Lisäksi napamoottoreiden käyttö vähentäisi todennäköisesti koneen kokonaispainoa, joka puolestaan vähentäisi energian kulutusta kiihdytyksissä. Haittapuolena napamoottoreiden valinnassa olisi todennäköisesti korkea hankintahinta.

Tarkasteltaessa työliikkeisiin kulunutta energiaa suhteessa mahdolliseen talteen otettavan energian määrään tarkastelluissa työkierron on talteen otettavan energian osuus 45% kulutetusta energiasta. Verrattaessa eri hybridityyppejä työliikkeen energian talteen oton toteuttamiseksi käyttäen superkondensaattoreita ja paremman hyötysuhteen komponentteja, saadaan sarjahybridissä keskimäärin talteen otettua 19% kulutetusta energiasta tar-

kastelluissa työkiertoissa. Rinnakkaishybridi periaatteella toteutetussa talteen otossa vastaava talteenottoprosentti olisi 15,4%. Työliikkeiden osalta talteenottoprosentit ovat pienemmät verrattaessa ajovoimansiirtoon sekä kokonaisenergian kulutuksesta energian kulutus työliikkeessä on vain 11,5% ajovoimansiirtoon kuluneesta energiasta. Huomioiden yllä mainitut seikat voidaan todeta, että sähköistä energian talteen ottoa ei ole järkevää toteuttaa ainakaan tarkastelluissa työkiertoissa työliikkeen osalta. Mikäli talteen otto halutaan kuitenkin toteuttaa myös työliikkeeseen, niin se kannattaa toteuttaa sarjahybridi periaatteella.

Energiavaraston valinnassa sarjahybridityyppisesti toteutettuun työkoneeseen tulee huomioida juurikin sarjahybridissä generaattorin syöttämät suuret latausvirrat. Akuilla toteutettu energiavarasto ei ilman huomattavaa ylimitoitusta pysty ottamaan vastaan generaattorin tuottamia suuria virtoja. Superkondensaattorin virran kesto on merkittävästi suurempi akkuihin verrattuna ja se saadaan mitoitettua tarkasti oikean kokoiseksi, joten paras vaihtoehto tässä tapauksessa on valita energiavarastoksi superkondensaattori.

Tehtyjen mittausten ja laskelmien perusteella puukurottajan hybridisointi tulisi toteuttaa niin sanottuna rinnakkais- sarjahybridinä jossa ajovoimansiirto toteutettaisiin sarjahybridi tyyppisesti napasähkömoottoreilla, eli polttomoottori ei ole mekaanisessa yhteydessä vetäviin pyöriin. Polttomoottori toimisi generaattorin voimanlähteenä. Työliikkeiden hydraulikkapumput saisivat energiansa vaihteiston kautta suoraan polttomoottorilta. Tässä ratkaisussa voidaan joko polttomoottori säilyttää entisen kokoisena ja hakea polttoainestäsiitä, että polttomoottoria voidaan käyttää koko aikaisesti parhaan hyötysuhteen kierrosalueella. Toisena ja kustannustehokkaampana vaihtoehtona on, että polttomoottoria pienennettäisiin 33% ja mitoitaa sähköinen energiavarasto siten, että hetkelliset ajovoimansiirron kulutushuiput saadaan tasattua energiavarastosta. Nostohydrauliikan energiankulutukseen 33% pienennetty polttomoottori riittää vielä hyvin. Mittausdatan mukaan maksimitaakan nosto kuormittaa nykyistä polttomoottoria maksimissaan 60% maksimitiehosta. Silloin kun polttomoottorin energiaa ei tarvittaisi työliikkeisiin se lataisi energiavarastoja.

Saadut tulokset perustuvat tämän yhden tietyn koneen työkiertoihin, jonkin toisen koneyksilön työympäristössä tulokset voivat olla aivan toisenlaiset. Tuloksiin vaikuttaa

huomattavasti koneen työskentelyalueen korkeusasemat. Mikäli täydellä kuormalla ajetaan aina alamäkeen ja tyhjällä koneella ylämäkeen saadaan energiaa enemmän talteen suhteessa käytettyyn energiaan.

## LÄHTEET

Danfoss1 <https://www.danfoss.com/en/products/mobile-electrification/dps/electric-machines/?filter=markets%3Daut#tab-documents>

Danfoss2 <https://www.danfoss.com/en/products/mobile-electrification/dps/electric-converters/#tab-overview>

Edilog [www.edilog.se](http://www.edilog.se)

EV-power <https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/WB-LYP90AHA-LiFeYPO4-3-2V-90Ah.html#tab1>

Hietalahti 2011 Hietalahti, L. 2011. Sähkökäyttö- ja hybriditekniikka ajoneuvo- ja työkonikäyttöön. 1. painos. Tampere: Tammertekniikka 2011.

Immonen, P. 2013. Energy Efficiency of a Diesel-Electric Mobile Working Machine, Lappeenranta University. Tohtori väitöstyö.

Kontrolleri <http://www.sahkoautot.fi/wiki:kontrolleri#toc0>

Manninen, J, Director, Yritysesittely Toijala Works / TW Logstackers, sähköpostiviesti, [juha.manninen@sks.fi](mailto:juha.manninen@sks.fi), luettu 13.04.2018

Moottori1 <https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/power.pdf>

Moottori2 <http://www.sahkoautot.fi/wiki:moottori>

Mutanen [http://www.tut.fi/eee/research/inca-public/tiedostot/Raportit/Antti\\_Mutanen\\_EHV\\_INCA.pdf](http://www.tut.fi/eee/research/inca-public/tiedostot/Raportit/Antti_Mutanen_EHV_INCA.pdf)

RTD12 <http://twlogstacker.fi/stackers/rtd12-kuro/>

RTD1723 <http://twlogstacker.fi/stackers/rtd1723/>

RTD3126 <http://twlogstacker.fi/stackers/rtd3126/>

Tekninen opas [https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen\\_opas\\_nro4.pdf](https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekninen_opas_nro4.pdf)





