

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

**METALLINJALOSTUSINTEGRAATIN SÄHKÖTASEEN HALLINTA JA KYSYN-
NÄNJOUSTON MAHDOLLISUUDET**

Kari Enbuske

Työn tarkastajat: Professori Samuli Honkapuro

 Professori Jukka Lassila

Työn ohjaaja: DI. Susanna Södervall

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Kari Enbuske

Metallinjalostusintegraatin sähkötaseen hallinta ja kysynnänjouston mahdollisuudet

Diplomityö

2020

95 sivua, 50 kuvaa, 11 taulukkoa

Työn tarkastajat: Professori Samuli Honkapuro
Professori Jukka Lassila
Työn ohjaaja: DI. Susanna Södervall

Hakusanat: sähkötase, energianhallintajärjestelmä, kysynnänjousto, 15 minuutin taseselvitysjakso, Elspot, Elbas

Keywords: balancing power, energy management system, demand response, 15 minutes imbalance settlement period, Elspot, Elbas

Metallinjalostusteollisuus on merkittävä sähköenergian kuluttaja. Toiminta on erittäin energiaintensiivistä. Outokumpu Oyj:n Tornion tehdasintegraatti kuluttaa yksistään Suomen sähköenergiantarpeesta noin 3,5 % (3,4TWh/v). Suurien energiavolyymien vuoksi pienikin parannus sähkötaseen hallinnassa voi kerryttää huomattavia kustannussäästöjä vuositasolla. Työ on rajattu koskemaan kulutustasetta. Tuotantotase käydään läpi esimerkinomaisesti antamaan lukijalle käsitys sähkömarkkinoiden toiminnallisista mekanismeista. Sähkötasetta voidaan parantaa tarkemmalla sähkönkulutuksen ennustamisella. Jäljelle jäävää ennustusvirhettä voidaan korjata päivänsisäisillä Elbas-markkinoilla myymällä tai ostamalla sähköä ennen varsinaista käyttötuntia. Työn tavoitteena on selvittää millä keinoilla tehdasintegraatin kulutusennustetta sekä Elbas-hankintaa voidaan parantaa ja automatisoida. Lisäksi työn tavoitteena on löytää uusia mahdollisia kysynnänjouston mahdollisuuksia sekä tutkia vuonna 2023 tulevan 15 minuutin taseselvitysjakson vaikutuksia tasesähkökustannuksiin. Kysynnänjoustoa ja siihen liittyviä sähkömarkkinoiden mekanismeja tutkitaan kirjallisin menetelmin. Tulevan 15 minuutin taseselvitysjakson kustannusvaikutuksia tutkitaan Fingridin 15 minuutin aktivoitujen alas- ja ylössäätötehojen avulla muodostaen niistä 15 minuutin ylös- ja alassäätösuunnat yhdistäen ne autenttiseen kulutusdataan. Sähkönkulutuksen ennustamiseen löydettiin parannuskeinoja. Kysynnänjouston kohteita ei löytynyt lisää jo olemassa olevien joustojen lisäksi. Tiettävästi tulevan 15 minuutin taseselvitysjakson vaikutuksista todellisiin tasesähkökustannuksiin ei ole tehty juurikaan aikaisemmin julkaistua tutkimusta. Odotusarvona oli, että 15 minuutin taseselvitysjaksoon siirtyminen saa aikaan merkittävää kulutustasesähkökustannusten nousua. Tässä työssä tutkimustuloksena osoitetaan, että kulutustasesähkökustannukset eivät muutu merkittävästi siirryttäessä tunnin taseselvitysjaksoista 15 minuutin taseselvitysjaksoon.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy System
Electrical Engineering
Kari Enbuske

Electricity balance management and the possibilities of demand response at an integrated metal processing plant

Master's thesis
2020
95 pages, 50 pictures, 11 tables

Examiners: Professor Samuli Honkapuro
Professor Jukka Lassila
Supervisor: M.Sc. (Tech.) Susanna Södervall

Keywords: balancing power, energy management system, demand response, 15-minutes imbalance settlement period, Elspot, Elbas

The metal processing industry is a significant consumer of electrical energy. The industry is extremely energy-intensive. Outokumpu Oyj's Tornio plant alone is responsible for consuming about 3.5 % (3.4TWh/yr) of Finland's electricity demand. Due to the large volumes of energy, even a slight improvement in electricity balance management could accumulate considerable cost savings on an annual basis. This study focuses on consumption balance. The production balance is outlined by way of example to acquaint the reader with the functional mechanisms of the electricity market. The electricity balance can be improved by a more accurate prediction of energy consumption. The remaining forecast error can be compensated by selling or buying electricity in the Elbas intraday market prior to the actual hour of use. This study aims at finding out means to improve and automate consumption forecast as well as the Elbas trading of the integrated plant. Further objectives of the study are to find new possibilities for demand response and to examine the impact of the 15-minute imbalance settlement period, to be implemented in 2023, on the costs of imbalance power. The demand response and connected mechanisms of the electricity market are studied using written methods. The cost impact of the forthcoming 15-minute imbalance settlement period is examined using Fingrid's activated up- and down-regulation powers by forming 15-minute up- and down-regulation directions and combining them with authentic consumption data. The study succeeded in finding means to improve electricity consumption forecast. No further applications for demand response were found in addition to those that already exist. Reportedly, there has not been much previous research on the impact of the forthcoming 15-minute imbalance settlement period on the actual costs of imbalance power. It was expected that the transition into the 15-minute imbalance settlement period would lead to a significant increase in consumption imbalance power costs. The findings of this study indicate that there will not be any significant changes in the consumption imbalance power costs when transitioning from the one-hour imbalance settlement period to the 15-minute imbalance settlement period.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Outokumpu Oyj:n Tornion ja Kemin tehtaille. Kiitokset Outokummulle mielenkiintoisesta työn aiheesta, tuesta ja kannustuksesta työni aikana. Erityiskiitokset työn ohjaaja Susanna Södervallille. Lisäksi kiitokset Anne Kärjelle, Roger Ekholmille ja Aurora Infrastructure Oy:n Pentti Alatalolle. Koen itseni etuoikeutetuksi, kun pääsin tämän työn kirjoittamisen ohella tekemään tehtaalle hankitun energianhallintajärjestelmän määrittelyjä ja käyttöönottoa. Kiitos myös työn tarkastajille professori Samuli Honkapurolle sekä professori Jukka Lassilalle hyvistä neuvoista työn etenemisen aikana. Lämpimät kiitokset myös Petri Eklundille taustatuesta opiskelujeni aikana.

Lopuksi kiitos rakkaalle vaimolleni Tainalle siitä äärettömästä tuesta, jota olen saanut kokea hänen taholtaan tämän opiskelumatkani aikana.

Oulussa 16.03.2021

Kari Enbuske

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	5
1.1 Tausta	5
1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset.....	6
1.3 Työn rakenne	6
2. OUTOKUMPU TORNION JA KEMIN TEHTAAT.....	8
2.1 Prosessin kuvaus.....	9
2.2 Sähköverkon topologia.....	10
2.3 Tornion tehdasalueen tuotanto-osastojen ja Kemin kaivoksen keskituntitehot...	11
2.4 Outokumpu Tornion tehtaat energian käyttö energialajeittain	12
3. POHJOISMAIDEN SÄHKÖMARKKINAT JA SÄHKÖPÖRSSI.....	14
3.1 Nord pool sähköpörssi.....	15
3.2 Sähköenergian markkinahinnan muodostuminen Nord Pool sähköpörssissä	16
3.3 Sähköenergian hinnan volatilitteetti	18
3.4 Nord Pool sähköpörssin tuotteet.....	21
3.4.1 Nord Pool Elspot ja Elbas fyysinen sähköpörssikauppa	22
3.4.2 Nord Pool sähköpörssin johdannaismarkkinat	26
3.5 OTC-markkinat.....	29
4. TASE- JA SÄÄTÖSÄHKÖMARKKINAT	30
4.1 Valtakunnallinen tehotasapainon ylläpito ja reservimarkkinat	31
4.2 Säätosähkömarkkinat ja säätosähkökauppa.....	34
4.2.1 Kaksihintajärjestelmä tuotantotase	36
4.2.2 Yksihintajärjestelmä kulutustase	37
4.2.3 Esimerkkejä korkeista tasesähköhinnoista	39
5. TEOLLINEN KOHDE SÄHKÖMARKKINOILLA	42
5.1 Outokumpu Tornion sähkönhankintapalveluiden rakenne.....	43
5.2 Kulutusennusteen laadinta.....	45
5.3 Nykyinen Elspot-hankinnan prosessi	46
5.4 Nykyisen sähkönhankinnan toimintamallien kehityskohteet	47
5.5 Teollisen toimijan kysynnänjousto.....	49
5.6 Teollisen toimijan mahdolliset kysynnänjouston markkinapaikat	50
6. EMS JÄRJESTELMÄ	53
6.1 EMS kulutusennuste Elspot ja Elbas	55
6.2 EMS ajantasaisen kulutuksen seuraaminen ja automaattiennuste.....	57
6.3 EMS raportointi	58
6.4 EMS käyttöliittymät	59

7. TUNNIN TASEESTA 15 MINUUTIN TASEESEEN.....	60
7.1 Outokumpu Stainless Oy kulutusennuste ja toteutunut kulutus	61
7.2 Outokumpu Chrome Oy:n kulutusennuste ja toteutunut kulutus	63
7.3 Outokumpu Tornion tehtaat kulutusennusteet ja toteutunut kulutus yhteensä....	65
7.4 Esimerkkilaskelma tasapainotilanne tunnin tase ja 15 minuutin tase	65
7.5 Esimerkkilaskelma epätasapainotilanne tunnin tase ja 15 minuutin tase	67
7.6 VKU1 ja VKU2 tasesähkötarkastelut.....	69
7.7 Koko Tornio kulutus ja ennuste sekä tasesähkökustannukset.....	72
7.8 Skenaario koko Tornio kulutus ja ennuste sekä tasesähkökustannukset.....	77
7.9 Arvio tulosten luotettavuudesta	79
8. LOPPUTULOKSET JA YHTEENVETO	80
LÄHTEET	84

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve, automaattinen taajuudenhallintareservi
AOD	Argon Oxygen Decarburization, AOD-konverterteri
CfD	Contract for Difference, aluehintaerotuote
CO ₂	Hiilidioksidi
CHP	Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
CRM1	Cold rolling mill 1, kylmävalssaamo 1
CRM2 (RAP5)	Cold rolling mill 2 (Rolling Annealing Pickling 5), kylmävalssaamo 2 (valssaus, hehkutus, peittäus 5)
EAF	Electric Arc Furnace, valokaariuuni
EPAD	Electricity Price Area Differentials, aluehintaerotuote
EMS	Energy Management System, energianhallintajärjestelmä
Elbas	Jälkimarkkinapaikka Nord Poolissa fyysiselle sähkönhankinnalle, päivänsisäinen (intra-day)
Elspot	Markkinapaikka Nord Poolissa fyysiselle sähkönhankinnalle (day-ahead)
FCR-N	Frequency Containment Reserve for Normal Operation, taajuusohjattu käyttöreservi
FCR-D	Frequency Containment Reserve for Disturbances, taajuusohjattu häiriöreservi
FeCr	Ferrokromi
FFR	Fast Frequency Reserve, nopea taajuusreservi
HRM	Hot rolling mill, kuumavalssaamo
Kuti	Kunnossapidon tietojärjestelmä
LNG	Liquefied natural gas, nesteytetty maakaasu
mFRR	Manual Frequency Restoration reserve, säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoiden manuaalinen taajuuden palautusreservi
Mg	Mangaani
Ni	Nikkeli
SCADA	Verkonhallinta-automaatio
Si	Pii

SMS	Steel melting shop, terässulatto
UMM	Urgent Market Message, suunnitellut ja suunnittelemattomat keskeytykset
VKU1	Valokaariuuni 1
VKU2	Valokaariuuni 2
Qmato	Terässulattojen tuotannonohjausjärjestelmä

1. JOHDANTO

1.1 Tausta

Outokumpu Stainless Oy:ssä on tehty paljon työtä Tornion ja Kemin tehtaiden sähköenergian käytön ennustamisessa, optimoinnissa ja energiatehokkuuden parantamisessa. Suuren tehdasintegraatin sähköenergian kulutusennusteen ja sitä kautta sähkötaseen saaminen hyväksyttävälle tasolle on vaativa tehtävä. Muuttujia on paljon. Esimerkiksi tehtaiden häiriötilanteissa sähkötase poikkeaa ennustetusta. Sähkötaseen poiketessa ennustetusta korjataan sitä ensisijaisesti sähkön jälkimarkkinoiden Elbas-kaupankäynnin avulla. Jos tase-eroa ei saada korjattua kokonaan tai osittain korjaantuu se tasesähköllä. Tasesähkömarkkinoiden sähkön hinta, niin tuotanto- kuin kulutustaseen sähkönhinta, poikkeaa lähes aina spot-hinnasta. Kuluvan ja edellisten vuosien perusteella voidaan todeta, että muutaman kerran vuodessa tasesähkön hinta voi kivuta ajoittain useisiin tuhansiin euroihin megawattitunnilta. Kun huomattavia tasesähköhintoja tulee jatkossakin epäilemättä esiintymään niin sitä kautta tasesähköriski ja siitä aiheutuva tasesähkökustannusriski on huomattava, jos sähkötase on sähkön korkean hinnan aikana epätasapainossa. Tällöin kaikkein edullisinta, niin sähköntuottajan kuin sähkön kuluttajan kannalta, on ennustaa mahdollisimman tarkasti tuotanto ja kulutus. Toisin sanoen mitä tarkemmin kulutettava sähkö pystytään ennustamaan ja ostamaan Elspot- ja Elbas-markkinoilta niin sitä vähemmän tarvitaan hankkia normaalisti kalliimpaa tasesähköä. Käytännössä pyrkimys on taloudellisen hyödyn saavuttamiseen.

Tällä hetkellä Pohjoismaissa toimitaan yhden tunnin taseselvitysjaksoissa. Tällöin yhden tunnin sisällä energiankulutus voi vaihdella suurestikin, kunhan tunnin loputtua keskikulutuksessa on päädytty ennustettuun. Tällöin olet toiminut oikein sähkömarkkinasääntöjen puitteissa mutta toisaalta olet tunnin sisällä heiluttanut koko voimajärjestelmän tehotasapainoa, joka on mahdollisesti aiheuttanut järjestelmälle ylös- tai alassäätöä. Tilanne on muuttumassa. Tätä työtä kirjoitettaessa Suomessa ja Pohjoismaissa ollaan vuoden 2023 toisen neljänneksen aikana siirtymässä 15 minuutin taseselvitysjaksoon. Tällöin 15 minuutin taseessa toimittaessa tasesähkökustannukset saadaan kohdennettua tarkemmin tasevirhettä aiheuttaville. (Fingrid 2020i)

Kulutusennusteen laatiminen on pitkälti manuaalinen prosessi. Ennusteen laadintaa ei tällä hetkellä koeta ongelmalliseksi mutta toisaalta on vaikea nähdä 15 minuutin taseselvitysjak-

soon siirryttäessä manuaalista ennustamista käytettävän tehokkaasti monimutkaisissa teollisuusprosesseissa ilman, että siitä aiheutuisi mahdollisia tasesähköriskejä. Tästä syystä Outokumpu Oy on hankkinut 08/2020 energianhallintajärjestelmän (EMS). EMS:n avulla on tarkoitus parantaa sähkötasehallintaa automaattisen ja ajantasaisemman ennustamisen muodossa tapahtumahorisontin ollessa tämänhetkinen yhden tunnin taseselvitysjakso ja myöhemmin 15 minuutin taseselvitysjakso. EMS on tarkoitus ottaa käyttöön vuoden 2021 keväällä. EMS:n toiminnallisuuden määrittely ja siihen rakennettavat tehdastason liitännät ja määrittelyt muista tuotannon järjestelmistä sekä verkonhallinta-automaatiosta (Scada) on yksi tärkeä osa tätä diplomityötä.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Työn päätavoitteita on kartoittaa integraatin sähkötasehallinnan nykytila ja siihen liittyvät päivittäiset toimintamallit ja etsiä niille kustannustehokkaampia ratkaisuja. Työn tavoitteisiin liittyy myös tulevan 15 minuutin taseselvitysjakson mahdollisten kustannusvaikutusten numeerinen tarkastelu sekä niiden vertailu nykyiseen tunnin taseselvitysjakson kustannuksiin sekä Fingridin nykyisten reservituotteiden tarkastelu osana kysynnänjouston mahdollisuuksia. Työ rajataan sähkön kulutustaseen hallintaan ja optimointiin sekä kysynnänjouston mahdollisuuksiin. Sähkön tuotantotase ja finanssituotteet käsitellään vain lyhyesti antamaan lukijalle peruskäsitys sähkömarkkinoiden toiminnallisista mekanismeista.

1.3 Työn rakenne

Luvussa *kaksi* käydään läpi Outokumpu Oyj konsernin rakenne, liiketoiminta-alueet ja Tornion tehdasintegraatin alueella sijaitsevat tuotantolaitokset sekä niiden keskituntitehot. Luvussa *kolme* tarkastellaan Nord Poolin sähköpörssin toiminnallisia mekanismeja, tuotteita, sähkönhinnan muodostumista sekä sähkönhinnan volatilitteettia niin lyhyellä kuin pitkällä aikavälillä.

Luvussa *neljä* käsitellään tase- ja säätösähkömarkkinoita. Luvussa käydään läpi yksityiskohtaisesti mekanismit, joilla tasesähkön hinta muodostuu säätösähkömarkkinoilla sekä valtakunnallisen tehotasapainon ylläpitäminen sekä siihen liittyvät reservimarkkinat.

Luvussa *viisi* käydään läpi teollisen kohteen sähkönhankintamekanismeja ja erityispiirteitä sähkömarkkinoilla toimittaessa sekä Outokumpu Tornion kysynnänjouston mahdollisuuksia.

Luvussa *kuusi* käydään läpi tehtaalle hankitun energianhallintajärjestelmän määrittelyjä ja sen käyttämistä yhtenä osana nykyaikaista energianhallintaa ja sähkön käytön ennustamista.

Luvussa *seitsemän* tarkastellaan tehtaan todellisia kuormituksia osastoittain ja pyritään osoittamaan missä tuotanto-osastoissa syntyy suurimmat tasesähköerot verrattuna ennustettuun. Lisäksi luvussa tarkastellaan numeerisin keinoin olemassa olevien autenttisten aikasarjojen avulla tulevan 15 minuutin taseselvitysjakson kustannusvaikutuksia verrattuna nykyiseen tunnin taseselvitysjaksoon.

Luvussa *kahdeksan* ovat tulokset, loppuyhteenveto sekä pohdinnat.

2. OUTOKUMPU TORNION JA KEMIN TEHTAAT

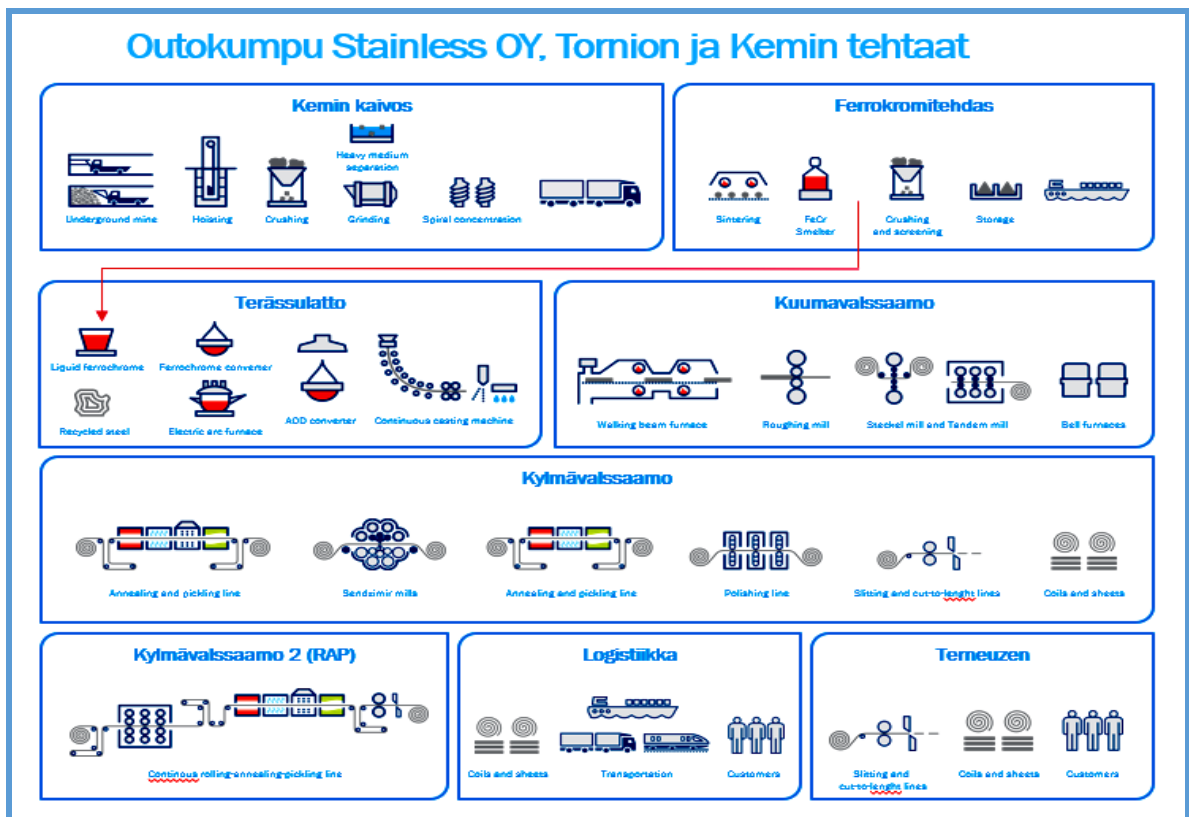
Outokumpu Tornion ja Kemin tehtaat ovat osa Outokumpu Oyj konsernia. Konsernilla on tuotantolaitoksia ja palvelukeskuksia noin 30 maassa. Pääliiketoiminta-ala on ruostumaton teräs (Stainless Steel). Pääliiketoiminta jakautuu kolmeen liiketoiminta-alueeseen. **Euro-pe-alueen** liiketoiminta käsittää Euroopan, Lähi-idän, Afrikan, Aasian ja Tyynenmeren alueen. **Americas-alue** käsittää niin Etelä- kuin Pohjois-Amerikan liiketoiminnat. Kolmas liiketoiminta-alue on ns. **Long Products**, jotka ovat pitkiä teräsnauhoja, tankoja, lankoja. Konsernina Outokumpu Oyj työllistää hieman yli 10000 työntekijää kokonaisuutena ympäri maailman. Tornion tehtaiden ja Kemin kaivoksen tuotantoketjussa työskentelee noin 2100 outokumpulaista. Arvioitu työllisyysvaikutus lähikuntien alueelle on noin 7000 henkilöä. (Outokumpu Oyj 2019a)

Outokumpu Oyj:n Tornion ja Kemin tehtaat sijaitsevat Perämeren pohjukassa noin 130 km Oulusta pohjoiseen. Tornion tehdasalueen maapinta-ala on kaiken kaikkiaan yli 600 hehtaaria. Alueen sisällä on kevyen liikenteen väyliä noin 10 km sekä 50 km tieväyliä. Rakennettuja kerrosneliömetrejä on noin 56 hehtaaria. Tornion ja Kemin tehtaat ovat maailman suurin integroitu ruostumattoman teräksen tuotantolaitos satamineen. Toisin sanoen raaka-aine jalostuu tehtaalla valmiiksi lopputuotteeksi, josta se kuljetetaan asiakkaalle. Kemin kaivoksesta louhitaan yhtä ruostumattoman teräksen pääraaka-ainetta kromia, joka tuodaan rikastettuna Tornion tehtaille, jossa se lisätään sulatusprosessiin. Ilman kromia ei olisi ruostumatonta terästä koska juuri kromi tekee teräksestä ruostumattoman. Kemin kaivos on ainoa EU:n alueella toimiva kromikaivos. Tornion tehtaiden yksi pääraaka-aine on kierrätysteräs (romu), jota käytetään vuositasolla noin 1,3 miljoonaa tonnia. Muita ruostumattoman teräkseen käytettäviä seosaineita, kuten esimerkiksi nikkeli (Ni), mangaani (Mg), pii (Si) ja edellä mainittua Kemin kaivoksen kromia, käytetään noin 0,3 miljoonaa tonnia. Tornion tehtaat ovat käytännössä yksi iso kierrätystehdas ja onkin Euroopan suurin materiaalien kierrätyslaitos volyymltaan. Kierrätysteräs hankitaan lähinnä Pohjoismaista sekä Euroopasta. (Outokumpu Oyj 2019b)

Edellä mainittujen materiaalivolyyymien ansiosta on helppo ymmärtää, kuinka paljon tarvitaan sähköenergiaa, jotta raaka-aine (kierrätysteräs) muuttuu muotoaan sulan teräksen kautta valssatuksi ruostumattomaksi lopputuotteeksi.

2.1 Prosessin kuvaus

Kuvassa 1 on esitetty Outokumpu Oyj:n Kemin ja Tornion tehtaiden yksinkertaistettu prosessikaavio. Kuvassa näkyvä ferrokromitehdas käsittää kolme itsenäistä ja erillistä ferrokromitehdasta FeCr 1, FeCr 2 ja FeCr 3. Prosessiteknisesti FeCr-tehtaat ovat kutakuinkin samanlaisia poiketen toisistaan vain tehonkulutuksen ja tuotantovolyymien suhteen. Myös terässulaton osalta prosessikaavion kuvaa on yksinkertaistettu. Käytännössä itsenäisiä terässulattoja on kaksi. Terässulatto 1 ja terässulatto 2. Ne ovat myös prosessiteknisesti käytännössä samanlaisia poiketen toisistaan lähinnä tuotantovolyymien ja valokaariuunien tehojen suhteen. Kylmävalssaamo 1 koostuu noin 20 erillisestä linjasta käsittäen mm. Senzimir-valssaimet, hehkutus- ja peittauslinjat, halkaisulinjat ja muut tuotteen valmistamiseen sekä käsittelyyn tarvittavat linjastot. Kylmävalssaamo 2 (RAP5) on jatkuvatoiminen integroitu valssaus-, hehkutus- ja peittauslinja. Mittasuhteiltaan tehdasalueella sijaitsevat tehdaslaitokset ovat suuria. Yksistään RAP5:n tuotantohallin pituus on 732 metriä, leveys 55 metriä ja korkeus 28 metriä.



Kuva 1. Tornion ja Kemin tehtaiden yksinkertaistettu prosessikaavio. Muokattu lähteestä (Outokumpu Oyj 2019b)

Prosessi alkaa Kemin maanalaisesta kaivoksesta, jossa louhittu malmi esimurskataan maan alla. Esimurskattu malmi nostetaan maan päälle, murskataan uudelleen ja rikastetaan pala- ja hienorikasteiksi. Pala- ja hienorikaste kuljetetaan 20 kilometrin päähän Tornion ferrokromitehtaalle. Ferrokromitehtaalla hienorikasteeseen sekoitetaan bentoniittia ja koksia ja syötetään sekoite pelletointirumpuihin. Pelletoinnin jälkeen syntyneet pelletit syötetään sintrausuuniin. Sintrauksen jälkeen pelletit ajetaan siloihin, josta ne ajetaan edelleen sulatusuuneihin palarikasteen mukana. Sulatusprosessin jälkeen ferrokromisula kuonataan ja kaadetaan senkkoihin. Terässulaton käyttöön menevä ferrokromisula siirretään tämän jälkeen sulana senkoissa terässulaton, jossa se kaadetaan ferrokromikonvertteriin. Terässulaton valokaariuuneilla sulatettuun kierrätysterässpanokseen lisätään ferrokromikonvertterillä käsitelty kromisula. Kierrätysterässula ja ferrokromisula sekoitetaan keskenään ja kaadetaan AOD-konvertteriin (Argon Oxygen Decarburization). AOD-konvertterin käsittelyn jälkeen saavutetaan haluttu teräksen koostumus. Sen jälkeen sula valetaan valukoneella aihioiksi, jotka siirtyvät kuumavalssaamolle valssattavaksi askelpalkkiuunin kautta. Askelpalkkiuunissa aihoiden lämpö nostetaan noin 1200 °C asteeseen. Tämän jälkeen aihio valssataan etuvalssaimella edestakaisin haluttuun paksuuteen, jolloin se muuttuu esinauhaksi. Esinauhaa ohennetaan entisestään valssaamalla sitä Steckel- ja Tandemvalssaimilla ja kelataan rullaksi. Rullat siirretään sen jälkeen kylmävalssaamoille tai myydään ulos mustana kuumanauhana. Kylmävalssaamalla mustat kuumanauhat hehkutetaan ja peitataan, jolla palautetaan teräksen mekaaniset ominaisuudet. Sen jälkeen hehkutetut ja peitatut nauhat kylmävalssataan haluttuun paksuuteen. Jotta teräksen mekaaniset ominaisuudet saadaan palautettua kylmävalssauksen jälkeen, suoritetaan vielä uudestaan hehkutus ja peittäminen. Uuden hehkutus ja peittämisen jälkeen nauhat kiillotetaan viimeistelyvalssaimella ja leikataan asiakkaan haluamiin mittoihin joko nauhoiksi tai levyiksi. Lopputuotteet pakataan automaattisilla pakkauslinjoilla ja lähetetään asiakkaille. (Outokumpu Oyj 2019a)

2.2 Sähköverkon topologia

Tehdasalueelle tulee yksi 400 kV:n voimajohto (SELLEE 400 kV) sekä kaksi 110 kV:n voimajohtoa (KEM1/RÖY A ja KEM2 RÖY B).

SELLEE 400 kV voimajohto tulee 22 km:n päästä Keminmaan sähköasemalta, jossa se yhdistyy Suomen 400 kV:n kantaverkkoon. 110 kV:n linjat, KEM1/RÖY B ja KEM2 RÖY A, tulevat myös Keminmaan sähköasemalta. SELLEE 400/110 kV päämuuntajan teho on 400 MVA. Tehtaiden suurimmat yksittäiset kuormat (FeCr:n uppovalokaariuunit 1,

2, 3 ja terässulaton valokaariuunit VKU 1, VKU 2) on ryhmitelty SELLEE 400/110kV:n muuntajan perään. Edellä mainitut kuormat ovat kaikki valokaariuuneja, joiden aiheuttama kuormitus verkkoon päin on erittäin haastavaa.

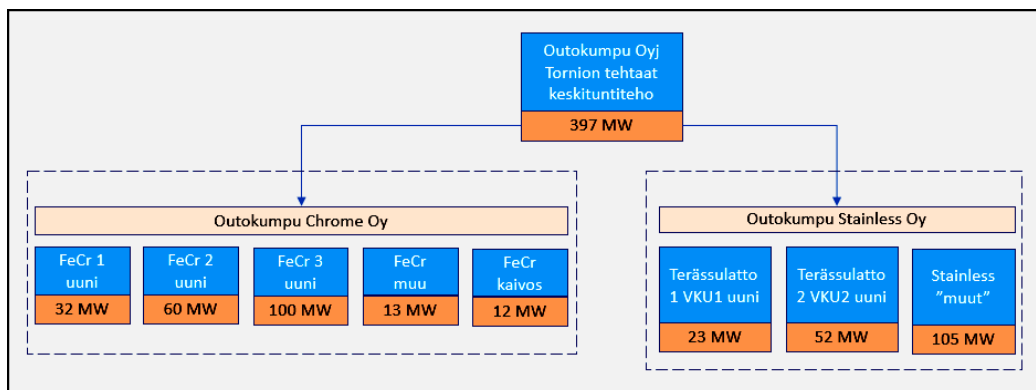
FeCr:n uppovalokaariuunit 1, 2, 3 käyvät jokseenkin tasaisella teholla. Toisinaan FeCr-uunit voivat ajautua epäsymmetriaan (kaikki vaiheet eivät ota samaa määrää virtaa tai jokin vaihe ei ota juuri yhtään virtaa). Uunien vinokuorma aiheuttaa tehdasverkkoon jännite-epäsymmetriaa.

Terässulaton valokaariuuneilla 1 ja 2 (VKU 1, VKU 2) loistehot ja virrat vaihtelevat voimakkaasti sulatuksen aikana. Se on tyypillistä valokaariuuneille. Varsinkin sulatuksen alussa loisteho ja virrat ja sitä myöden uunien päteho heittelevät rajusti. Valokaariuunit tuottavat myös epäharmonisia yliaaltoja harmonisten lisäksi (Korpinen et al. 2020). Virta on lisäksi erittäin säröytynyttä.

Kaikilla viidellä sulatusuunilla (FeCr 1, FeCr 2, FeCr 3, VKU 1, VKU 2) on omat erilliset automaattiset loistehon kompensointilaitteet. Yhteensä tehdasalueella 670 MVar loistehon kompensointikapasiteettia. 110/33/20 kV (160–63 MVA) muuntajia on 9 kpl, 20 kV/690/400 V (24–2 MVA) muuntajia on yhteensä 400 kpl. 20 kV:n kaapelointia on noin 70 km. (Alatalo 2020)

2.3 Tornion tehdasalueen tuotanto-osastojen ja Kemin kaivoksen keskituntitehot

Tornion tehdasalueen ja Kemin kaivoksen keskimääräiset keskituntitehot jakautuvat tehtaiden kesken kuvan 2 mukaisesti. Esitetyt tehot (MW) kuvaavat keskimääräistä tuntikoh- taista keskitehoa tuotantoprosessien ollessa päällä. Hetkelliset tehohiput voivat käydä lähes 500 megawatissa.



Kuva 2. Tornion tehdasalueen tehtaiden sekä Kemin kaivoksen keskimääräiset keskituntitehot.

Suurimpia yksittäisiä kuluttajia ovat FeCr:n ja terässulattojen uunit. Stainless ”muut” (105 MW) kulutus on summateho, joka pitää sisällään terässulattojen 1 ja 2, kuumavalssaamon, kylmävalssaamo 1:n linjat, RAP5, happitehtaan, paineilmalaitoksen sekä tehdasalueen muut pienet kuormat. Happitehtaan ja paineilmalaitoksen kuormat ovat vakioita eivätkä ne juuri vaihtelee.

Stainless ”muut” kulutuksen sisällä on raskaita kuormia kuten esimerkiksi kuumavalssaamon etuvalssaimet, kylmävalssaamo 1:n Senzimir valssaimet, kylmävalssaamon hehkutuspeittäuslinjat sekä kylmävalssaamo 2 (RAP5). Jos jokin edellä mainituista raskaista kuormista pysähtyy kesken kaiken, vikaan tai jostain muusta syystä, menee Stainless ”muut” kulutusennuste melko varmasti virheeseen. Toisaalta Stainless ”muut” kulutuksen sisäl- täessä useita tehtaita ja tuotanto-osastoja niin niiden tehot voivat risteillä sopivasti siten, että välttämättä yhden tuotantolinjan pysähtyminen ei näy edes Stainless ”muut” sähköta- seessa. Voi käydä myös niinkin, että Stainless ”muut” kulutuksen sisällä pysähtyy kaksi tai kolme linjaa yhtä aikaa ennakoimatta, jolloin kulutusennuste menee varmasti virheeseen. Tästä syystä osastojen sisällä olevat raskaat kuormat (prosessi) sekä osastojen ”yhteiset” kulutukset on syytä erottaa Stainless ”muut” kulutuksesta ja ottaa ne erikseen tulevaisuu- dessa tehtävään sähkönkulutusennusteeseen. Kuvassa 3 on esitetty Stainless ”muut” kulu- tuksen ”sisällä” olevat kulutuskohteet sekä niiden keskimääräiset keskituntitehot. Tulevan EMS:n avulla on helppo laskea todelliset kulutukset näiden kaikkien tehdasosastojen osalta riippumatta siitä, miten yksittäiset linjat käyvät tehtaiden sisällä ja alkaa tekemään niille tarkempaa kulutusennustetta.

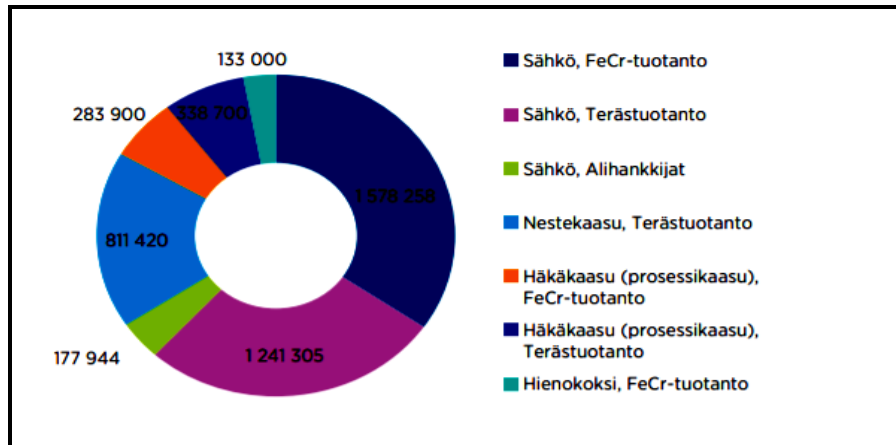
Stainless ”muut” keskituntiteho 105 MW								
Terässulatot yhteiset	Terässulatot prosessi	Kuumavalssaamo yhteiset	Kuumavalssaamo prosessi	Kylmävalssaamo 1 yhteiset	Kylmävalssaamo 1 prosessi	Kylmävalssaamo 2 (RAP5) yhteiset	Kylmävalssaamo 2 (RAP5) prosessi	Muut
3MW	10 MW	3 MW	28 MW	3 MW	15MW	3MW	27 MW	15 MW

Kuva 3. Stainless ”muut” kulutuskohteiden keskituntitehot.

2.4 Outokumpu Tornion tehtaat energian käyttö energialajeittain

Energiaintensiiviselle teollisuudelle sähkön kilpailukykyinen hinta on merkittävä kansain- väliseen kilpailukykyyn vaikuttava tekijä. Sähköenergiakustannukset ovat merkittävä osa tuotteen valmistukseen tarvittavista muuttuvista kustannuksista. Tuotteen valmistuksessa käytettävän sähköenergian määrään voidaan vaikuttaa tehostamalla tuotantomenetelmiä ja

käyttämällä energiatehokkaita laitteita sekä löytämällä kohteelle sopiva ja mahdollisimman hyvä sähkönhankintamalli. Kaikkien näiden tehostamistoimien jälkeenkin energian hinnan on oltava kilpailukykyinen kilpailijoihin verrattuna, koska energian hinta tuotteen valmistuskustannuksista metallinjalostusteollisuudessa on huomattava. Se vaihtelee 10–40 %:n välillä riippuen valmistustekniikoista (TEM 2017). Kuvassa 4 on esitetty Outokumpu Tornion tehtaiden energian kulutus energialajeittain (MWh/a).



Kuva 4. Outokumpu Tornio energian käyttö energialajeittain (MWh/a) vuonna 2015. (TEM 2017)

Kuvasta on huomioitavissa se, että ruostumattoman teräksen valmistamiseen tarvittavasta energiasta noin 65 %:n osuus tulee sähköenergiasta. Myös muita energialähteitä käytetään huomattavia määriä. Kuvassa esitetyn nestekaasun tilalle on vaihtunut nesteytetty maakaasu (LNG).

3. POHJOISMAIDEN SÄHKÖMARKKINAT JA SÄHKÖPÖRSSI

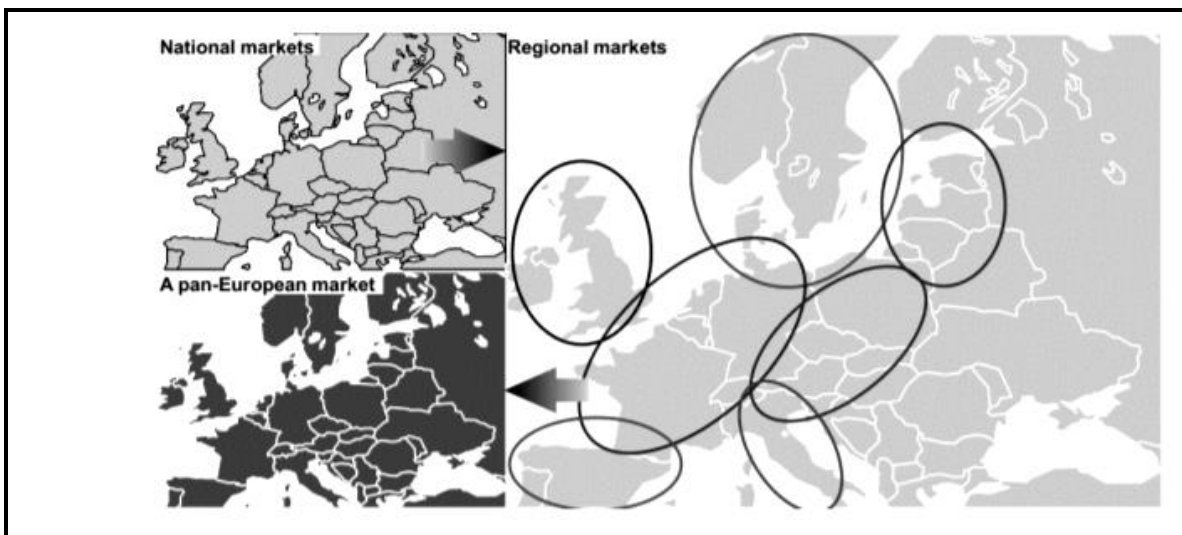
Sähkömarkkinaudistus vuonna 1995 muutti sähkökauppaa siten, että sähkön tuotannon ja myynnin osalta sallittiin vapaa kilpailu. Kolmen vuoden siirtymäajan jälkeen vuonna 1998 myös yksittäisillä kotitalouksilla oli mahdollisuus kilpailuttaa sähkönmyyjänsä vapaasti ja ostaa sähkö haluamaltaan toimittajalta. Ennen sähkömarkkinaudistusta sähkön toimittaja oli käytännössä aina alueella toimiva paikallinen verkkoyhtiö. Markkinaudistus avasi monipuolisemmat kanavat sähkön hankintaan niin sähkön suurkäyttäjille kuin vähittäismyyjille. Aikaisemmat sähkönhankintatavat olivat olleet tuottajien kanssa tehdyt kahdenväliset pitkäaikaiset sopimukset sekä voimalaitosten tai niiden osuuksien omistaminen. (Partanen et al. 2020) Myös Outokumpu on omistanut aikaisemmin voimalaitoksia ja niiden osuuksia.

Sähkömarkkinoiden uudistuessa ja kilpailun vapauduttua sähkömarkkinoille tuli Nord Pool Spot sähköpörssi (”pool”, yhteenliittymä) uudeksi sähkön hankintakanavaksi aikaisempien kahdenvälisten sopimusten rinnalle (vuonna 2016 Nord Pool Spotin nimi muuttui Nord Pooliksi). Yhteenliittymät eli sähköpörssit kuten esimerkiksi *Nord Pool*, *NYMEX (New York Mercantile Exchange)* ja *EEX (European Energy Exchange, Leipzig)* ovat virallisia kauppapaikkoja, jossa kauppaa käydään siellä muodostuneilla hinnoilla. (Luolahti 2015)

Sähköpörssin kaupankäynnin osapuolilta vaaditaan vakuudet, jotka ovat kaupan kokoon nähden verrannolliset. Sähköpörssi toimii myös kauppojen selvitystalona. Tällöin sähkökauppojen vastapuoliriski poistuu. Myös kahdenvälinen ns. bi-lateraalin OTC-kaupankäynti on mahdollista, kuten ennen sähkömarkkinoiden uudistustakin, mutta tällöin kaupan osapuolien on huolehdittava tarvittavista keskinäisistä vakuuksista. OTC-kauppa käydään sähköpörssin ulkopuolella. Vaikka OTC-kaupankäynti on kahdenvälistä ja sähkön hinnaksi voidaan sopia mitä vaan, niin hintareferenssinä käytetään sähköpörssin Elspot systeemihintaa, joka on käytännössä muodostunut sen hetkisestä parhaasta markkinanäkymästä kysynnän ja tarjonnan mukaan. (Partanen et al. 2020, Luolahti 2015)

Suomi kuuluu yhtenä osana yhteispohjoismaiseen Nord Poolin sähköpörssiin, jossa käytävä kauppa johtaa sähkön fyysiseen toimitukseen. EU:n tavoitteena on sähkömarkkinoiden

yhdistäminen ja tavoite luoda integroidut sähkömarkkinat Euroopan alueelle kuvan 5 mukaisesti. Vuonna 2014 otettiin käyttöön seitsemän eurooppalaisen sähköpörssin toimesta *PCR (Price coupling of region)* malli, jonka tarkoituksena on yhdistää pörssien välinen hinnoittelu Euroopan laajuisesti. Mallissa jaetaan rajasiirtokapasiteetit ja lasketaan hinnat samanaikaisesti ja samalla metodiikalla kuin Nord Poolissa kaikille maille. Tämä edistäisi markkinoiden likviditeettiä, tehokkuutta ja sosiaalista hyvinvointia. Hidaste tälle integraatiolle on ollut eri maiden väliset sekä maiden sisäiset heikot siirtoverkot, joten integraatio ei yksinkertaisesti onnistu, jos halutaan siirtää sähköä ylituotantoalueelta alituotantoalueelle siirtorajoitteiden vuoksi. Suunnitelmia verkkojen kehittämiseksi ja vahvistamiseksi on Euroopassa olemassa mutta jo yksin tilan puute on Keski-Euroopassa yksi suurimmista esteistä niiden toteuttamiseksi. (Partanen et al. 2020)

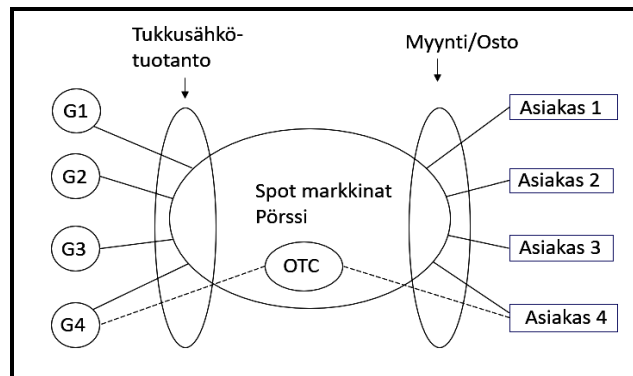


Kuva 5. Kohti eurooppalaista sähkömarkkinaa. (Luolahti 2015)

3.1 Nord pool sähköpörssi

Nord Pool sähköpörssin perustoimintamekanismi voidaan kuvata kuvan 6 sivu 16 avulla. Kuvassa vasemmalla on sähköntuottajat (G) ja oikealla sähkön kuluttajat (asiakas) ja myynti. Välissä on tukkusähkömarkkinat, pörssi ja OTC-kauppa. Sähköntuottajat tuottavat sähköä tukkusähkömarkkinoille ja asiakkaat ostavat sitä markkinoilta. OTC-kauppaa ei tehdä sähköpörssin välityksellä vaan kaupankäynti on kahdenkeskistä (bi-lateraalista) sähkön tuottajan ja sähkön ostajan välillä. Kuvassa sähkön tuottaja G4 voi käydä kahdenkes-

kistä OTC-kauppaa esimerkiksi asiakkaan 4 kanssa ennalta sovitulla määrällä ja hinnalla osallistuen samalla myös spot-markkinoille.



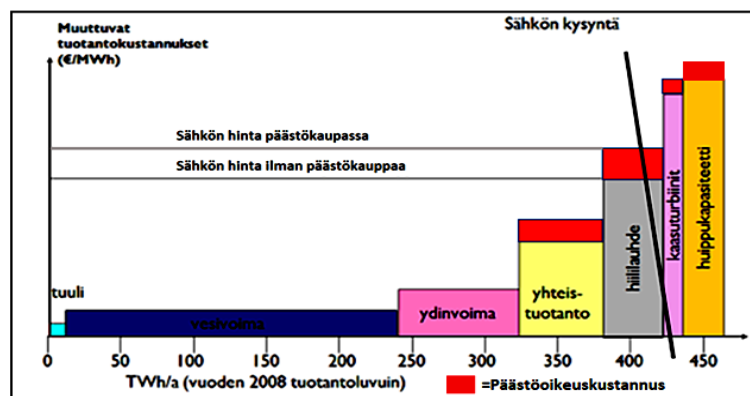
Kuva 6. Sähköpörssin yksinkertaistettu toimintamekanismi. Muokattu lähteestä (Partanen 2020a)

Pääperiaatteena sähkömarkkinoilla toimijoilla, sähkön myyjillä ja kuluttajilla, on hankkia sähkö mahdollisimman edulliseen hintaan, mahdollisimman riskittömästi, oikealle ajalle ja oikealla määrällä. Toisesta näkökulmasta tarkasteltuna sähkön tuottajien intressinä taas on pyrkiä optimoimaan oma tuotantonsa mahdollisimman kustannustehokkaasti kohti maksimaalista tuottoa. Esimerkiksi jokivoimalaitoksien altaiden on tällöin syytä olla kevään tullen tullessa tyhjinä ja luparajoissa. Ennen tätä hetkeä koko jokivoimalaitosketjun vesi on ajettu talven mittaan turbiinien läpi optimoiden kapasiteetti ja tuotto luparajojen puitteissa. Kokonaisuudessaan kyse on siis laajasta optimointitehtävästä kaikkien osapuolien näkökulmasta tarkasteltuna.

3.2 Sähköenergian markkinahinnan muodostuminen Nord Pool sähköpörssissä

Nord Pool sähköpörssin spot sähköhinnan periaatteellinen muodostuminen voidaan esittää kuvan 7 sivu 17 avulla. Kuvassa näkyvä musta kysyntäkäyrä on käytännössä lähes pystysuora mutta havainnollisuuden vuoksi se on piirretty hieman vinoon koska etenkin korkeiden sähköhintojen aikana kysynnässä tapahtuu markkinaehtoista kysynnänjoustoa. Kuvassa on esitetty myös päästöoikeuksien vaikutus sähkön hintaan. Kun sähkön tuottamiseen tarvitaan päästöoikeuksia vaativaa sähköntuotantolaitteistoa niin sillä on sähköhintaa nostava vaikutus. Hiilidioksidia (CO₂) tuottavalle sähköntuotannolle vaaditaan päästöoikeuksia.

Kaikki sähköpörssissä toimivat sähköntuottajat antavat seuraavan päivän jokaiselle tunnille tarjouksensa suljetussa tarjouskilpailussa klo 13.00 mennessä kuinka paljon ja millä hinnalla ovat valmiina sähköenergiaa myymään. Samoin kaikki sähkön ostajat jättävät tarjouksensa samaan aikaan millä hinnalla ovat valmiita ostamaan sähköä seuraavan päivän eri tunneilla. Kysynnän ja tarjonnan leikkauspisteeseen muodostuu systeemihinta, spot-hinta. Systeemihinta muodostetaan näin seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. On huomattava, että kuvassa näkyvä leikkauspiste ja samalla sähkön hinta muuttuu pitkin päivää (myös viikonpäivien ja vuodenaikojen välillä) kysynnän ja tarjonnan muuttuessa. Näin saadaan vuorokauden jokaiselle tunnille systeemihinta. Yöaikaan sähkönkulutuksen ollessa vähäisempää kuin päivällä sähkön hinta laskee ja taas päivällä hinta nousee. Toisin sanoen yöaikaan sähkön tarpeen ollessa vähäisempää tarvittava sähkö voidaan tehdä pienemmillä muuttuvilla kustannuksilla toimivilla sähköntuotantolaitoksilla eli vesi- ja ydinvoimalla ja mahdollisesti CHP-laitoksilla. Päiväsaikaan taas sähkön kulutuksen ollessa suurempaa sähköä joudutaan tekemään lisäksi suuremmilla muuttuvilla kustannuksilla toimivilla tuotantolaitoksilla. Toisin sanoen Nord Pool pörssissä muodostuva sähkön markkinahinta kuvastaa kalleimman tuotantoon tulevan tuotantomuodon keskimääräisiä muuttuvia kustannuksia. Sähkön markkinahinnan muodostuminen Elspot- ja Elbas-markkinoilla käydään tarkemmin läpi luvussa 3.4.1.



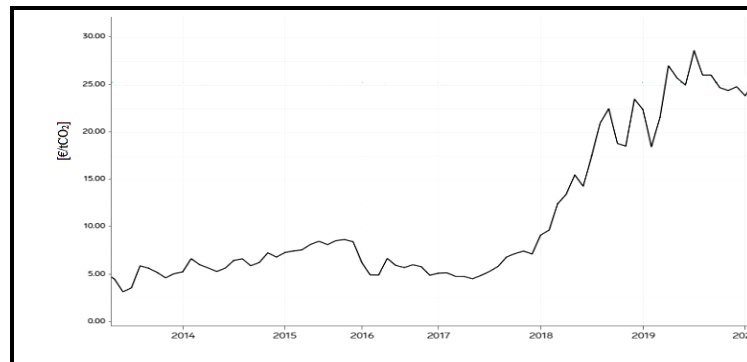
Kuva 7. Sähköenergian markkinahinnan muodostuminen Nord Pool sähköpörssissä. Muokattu lähteestä (ELFI 2020)

Taulukon 1 sivu 18 avulla voidaan todeta miten päästöoikeuksien hinta vaikuttaa sähköntuotantokustannuksiin erityyppisillä hiilidioksidia tuottavilla polttoaineilla. Merkitys on huomattava.

Taulukko 1. CO₂ päästöoikeuksien aiheuttamat lisäkustannukset €/MWh polttoaineittain. (Makkonen 2014)

Polttoaine	Hiilidioksidin päästöt, CO ₂ (t/MWh)	Polttoaineen veroton hinta (€/MWh)	Päästöoikeuden aiheuttama lisäkustannus				
			2 €/tCO ₂ (€/MWh)	5 €/tCO ₂ (€/MWh)	10 €/tCO ₂ (€/MWh)	20 €/tCO ₂ (€/MWh)	30 €/tCO ₂ (€/MWh)
Turpe	0,382	13,2	0,8	1,9	3,8	7,6	11,5
Kivihiili	0,341	9,3	0,7	1,7	3,4	6,8	10,2
Raskas polttoöljy (vähä rikkinen)	0,279	39,0	0,6	1,4	2,8	5,6	8,4
Kevyt polttoöljy	0,267	52,0	0,5	1,3	2,7	5,3	8,0
Maakaasu	0,202	34,8	0,4	1,0	2,0	4,0	6,1
Metsähake	0	20,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Kuvassa 8 on esitetty päästöoikeuksien hinnan kehitys vuosina 2013-2020 (Market Insider 2020). Kuvasta voidaan nähdä huomattava päästöoikeuksien hinnan nousu vuodesta 2018 lähtien verrattuna vuosiin 2013-2017, jolloin päästöoikeuksien hinta on ollut useita vuosia noin 5€/tCO₂ tasolla.



Kuva 8. CO₂ European emission allowances. (Market insider 2020)

Taulukon 1 ja kuvan 8 perusteella voidaan todeta, että nykyisillä päästöoikeuksien hinnoilla hiilidioksidia aiheuttava sähköntuotanto ei enää kannata, varsinkin kivihiilen ja turpeen osalta, joten ne poistunevat tulevaisuudessa käytöstä sitä mukaa kun korvaavaa halvempaa ja päästötöntä sähköntuotantoa rakennetaan lisää. Esimerkiksi turpeen ja kivihiilen polttaminen päästöoikeuden hinnalla 30€/tCO₂ aiheuttaa noin 11 €/MWh lisäkustannuksen sähköntuotantolaitoksen muuttuvien tuotantokustannuksien päälle. Se on jo yksinään noin 3/4 ydinvoimalaitoksen muuttuvista tuotantokustannuksista, jotka ovat keskimäärin noin 16 €/MWh (Vakkilainen & Kivistö 2017). Korvaava rakennettava sähköntuotanto on lähinnä tuulivoimaa.

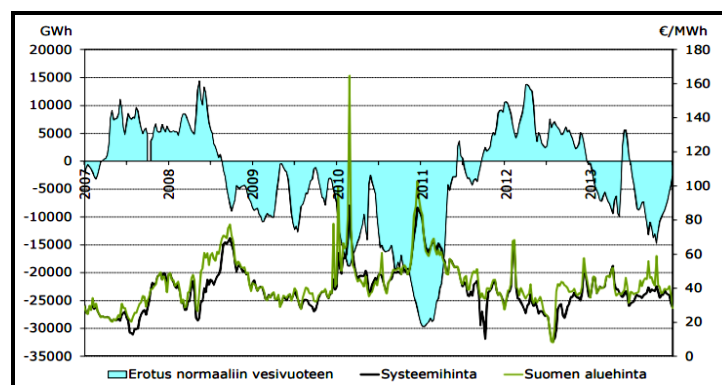
3.3 Sähkönenergian hinnan volatilitetti

Sähköenergiaa on tuotettava joka hetki juuri sen verran kuin sen hetkinen kulutus on. Sähköenergiaa ei voida vielä kannattavasti varastoida. Tämä on tärkein syy sille, että hinta

voi vaihdella voimakkaasti jopa peräkkäisten tuntien välillä. Jos ajatellaan sähköenergiaa raaka-aineena niin sitä ei voi verrata mihinkään muuhun raaka-aineeseen juuri sähkön hinnan voimakkaan volatilitiitin suhteen. Vertauskuvana voisi käyttää vaikkapa riisin hintaa. Olisi varsin hankala kuluttajan kannalta ostaa riisiä tunti tunnilta rajusti vaihtuvalla kilohinnalla. Päivällä riisi maksaisi välillä tuplahinnan yöhintoihin verrattuna. Välillä riisin hinta voisi kohota jollakin tunnilla lähes satakertaiseksi keskimääräisestä normaalihinnasta.

Sähköenergian hintaan vaikuttavimmat tekijät lyhyellä aikavälillä

Lyhyellä aikavälillä sähkön hintaan vaikuttavat sen hetkinen säätila, kysyntä sekä tarjonta. Kylmä sää lisää sähkönkulutusta eli kysyntää ja sitä kautta sähköenergian hintaa ja päinvastoin. Lyhyen aikavälin hintaan vaikuttaa myös Pohjoismaiden sen hetkinen vesitilanne. Pohjoismaiden tarvittavasta sähköenergiasta noin puolet tehdään vesivoimalla normaalina vesivarantovuotena. Pohjoismaissa sähkönenergian keskimääräinen hinta seuraa aika tarkasti maiden hydrologista vesitasetta. Toisin sanoen jos on ollut sateinen kesä ja altaat täynnä niin sähkön hinta pohjoismaisessa sähköpörssissä laskee ja päinvastoin. Kuvassa 9 on esitetty hydrologisien vesivarantojen vaikutus pohjoismaiseen sähköenergian hintaan. Sähkönenergian hinta on erityisen voimakkaasti riippuvainen Norjan vesivarannoista. Kuvan 0-taso kuvaa normaalia vesivarantovuotta. (Partanen et al. 2020)



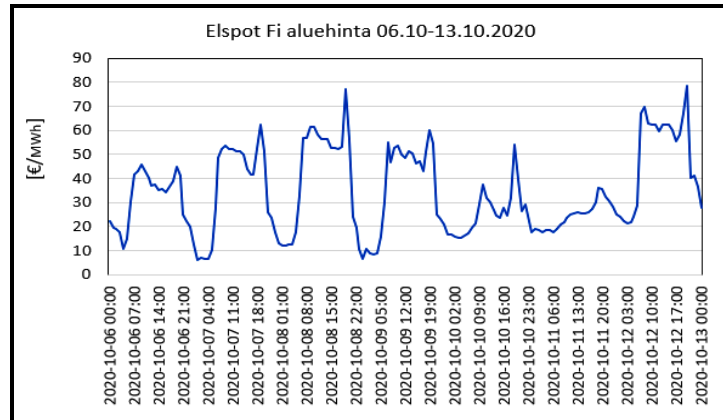
Kuva 9. Sähköenergian hinnan vaste hydrologisiin vesivarantoihin. (Partanen et al. 2020)

Sähköenergian hintaan vaikuttavimmat tekijät pitkällä aikavälillä

Pitkällä aikavälillä sähkön hintaan vaikuttavat tulevaisuudessa toteutuvat päästöoikeuksien ja kivihiilen hinnat sekä kysynnän ja tarjonnan näkymät. Lisäksi mukana on valtion ja

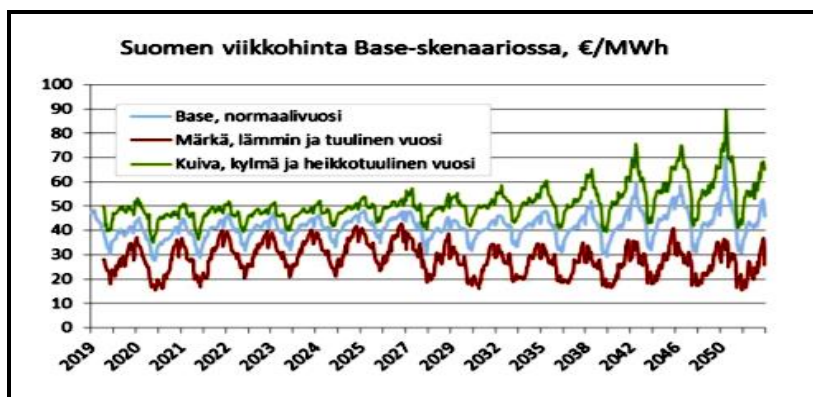
viranomasten mahdolliset toimet reguloinnin ja verotuksen suhteen sekä kansainvälisen politiikan kautta tulevia ajurit ja makrotalouden muutokset.

Kuvassa 10 on esitetty Suomen Elspot-aluehinnan volatilitteettia viikon ajalta lokakuussa 06-12.10.2020. Kuvasta voidaan huomata, että sähköenergian hinta vaihtelee voimakkaasti päivän tuntien sisällä ollen yöllä huomattavasti halvempaa kuin päivällä. Syynä tähän on öiseen aikaan alhaisempi kulutus. Päivällä taas kulutus kasvaa ja sitä kautta sähkön hinta.



Kuva 10. Suomen Elspot-aluehinnan volatilitteettia viikon 06.10-12.10.2020 tuntien aikana.(NordPool 2020b)

Työ- ja elinkeinoministeriön teettämässä tutkimuksessa ”Sähköntuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050” on pyritty mallintamaan Suomen aluehinnan volatilitteetin kehitystä vuoteen 2050 kuvan 11 mukaisesti. Arvio perustuu viikkohintojen kehitykseen sääolosuhteiltaan keskimääräisinä sekä keskimääräisestä poikkeavina vuosina. Keskimääräisestä poikkeavat vuodet (keskimääräinen toistuvuus kymmenen vuoden välein aikajaksolla 1958–2014) ovat joko märkiä, lämpimiä ja tuulisia tai kuivia, kylmiä ja heikkotuulisia vuosia. (TEM 2019)



Kuva 11. Sähköntuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050. (TEM 2019)

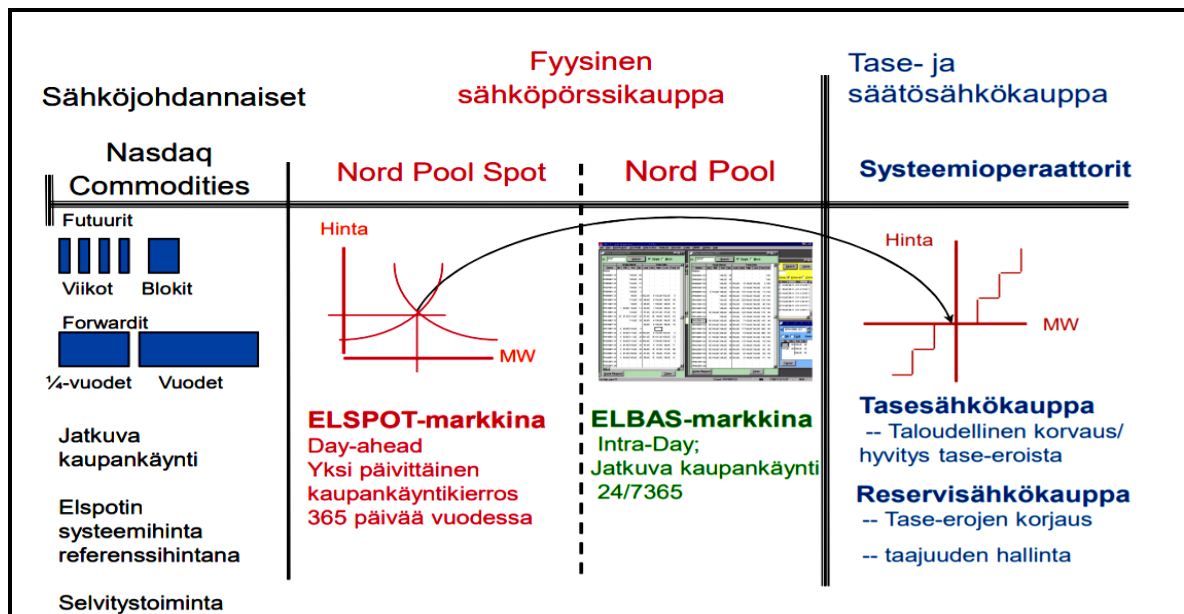
Skenaariossa on oletettu Pohjoismaiden aurinko- ja tuulivoimatuotannon kasvavan nykyisestä noin nelinkertaiseksi 170 TWh:iin. Suomen osalta aurinko- ja tuulivoimatuotannon oletetaan kasvavan huomattavasti voimakkaammin. Kasvun oletetaan olevan vuoden 2017 viidestä terawattitunnista noin 45 terawattituntiin vuoteen 2050 mennessä eli noin yhdeksänkertainen (TEM 2019).

Base-skenaarion mukaisesti vuosina 2020–2030 säätyypiltään vastakkaisten (vihreä ja punainen käyrä) vuosien kesä- ja talvihintojen ero ei kasva oleellisesti. Kun Hanhikivi 1-ydinvoimalayksikkö sekä Suomen ja Pohjois-Ruotsin välinen kolmas vaihtosähköyhteys otetaan käyttöön niin erityisesti märkien, lämpimien ja tuulisten vuosien hintataso laskee 2030 vuodesta eteenpäin. 2030 vuosikymmenen puolivälissä, ydinvoimalakapasiteetin vähetessä, kuivien, kylmien ja heikkotuulisten vuosien talviviikkojen hinnat kääntyvät nousuun. Tuulivoiman kasvun myötä kesäviikkojen hintataso pysyy kutakuinkin aiemmalla tasolla, jolloin sähkön aluehinnan volatilitteetti kasvaa. Skenaarion perusteella kuivien, kylmien, ja heikkotuulisten vuosien sähkön hinnan volatilitteetti on vähäisempää seuraavien 15 vuoden aikana kuin sateisten, lämpimien ja tuulisten vuosien. Tähän on syynä olemassa oleva lämpövoimatuotanto, joka pitää hinnan kurissa talviviikkojen aikana. Sen sijaan kesäkuukausina, hydrologialaan vahvana ja tuulisena vuonna, hinta painuu alas kasvattaen volatilitteettia kesä- ja talvihintojen välillä. Kun skenaarion mukainen sääriippuva tuotanto (aurinko- ja tuulivoima) nousee pohjoismaisella tasolla 170 TWh:iin kasvattaa se uusiutuvan tuotannon noin 80 %:iin, vesivoima mukaan lukien. Tämä tarkoittaa, että sähkön talvihinnat saattavat nousta korkeiksi varsinkin kylminä, kuivina ja heikkotuulisina vuosina kun tarkastelujakson loppupuolella poistuu käytöstä perusvoimaa tuottavia ydinvoimalaitoksia. Selvityksen tulos osoittaa selkeästi sen, että korkealla tasollakaan oleva uusiutuvan energian tuotanto ei riitä estämään sähkön hinnan volatilitteettia ilman riittävää perusvoimaa. (TEM 2019)

3.4 Nord Pool sähköpörssin tuotteet

Kuvassa 12 sivu 22 on esitetty Nord Poolin sähköpörssin tuotteet. Nord Poolin sähköpörssin tuotteet liittyvät fyysiseen sähköpörssikauppaan sekä sähköjohdannaisiin (Nasdag Commodities). Kuvassa näkyvä tase- ja säätösähkökauppa liittyy sen sijaan tase- ja sää-

tösähkömarkkinoihin, jotka on kuvattu luvussa 4. Kuva on piirretty siten, että historia on vasemmalla. Tulevaisuus oikealla. Paksu musta pystyviiva kuvaa nykyhetkeä.



Kuva 12. Nord Pool sähköpörssin tuotteet. (Partanen 2020a)

Fyysinen sähköpörssi käydään Nord Poolin Elspot- ja Elbas-markkinoilla ennen sähkön toimitushetkeä. Tase- ja säätösähkökauppa käydään toimitustunnin jälkeen. Tase- ja säätösähkökauppaa (taseselvitystä) hoitaa eSett Oy (aikaisemmin Fingrid). (Fingrid 2020o)

Sähköjohdannaiset (sähköjohdannaiskauppa) ovat sähkön hinnan suojaukseen liittyvä tuote. Kaupankäyntipaikkana on Nasdaq OMX Commodities finanssimarkkinat. Kaupankäynnin kohteena on finanssijohdannaiset. Johdannaisten tilitys suoritetaan nettoarvon tilityksenä. Tilitykseen ei liity sähkön fyysistä toimittamista tai luovuttamista. Vain raha vaihtaa omistajansa. (Partanen et al. 2020)

3.4.1 Nord Pool Elspot ja Elbas fyysinen sähköpörssi

Elspot (day-ahead market)

Elspot-kaupankäynnissä kauppaa käydään seuraavan vuorokauden (01–24) sähkön toimitustunneista. Tarjoukset on jätettävä klo 13.00 mennessä. Huutokauppa käydään kerran päivässä viikon jokaisena päivänä ympäri vuoden. Tarjoukset jätetään anonymisti suljetuna huutokauppana. Markkinoille jätettyjen tarjousten tulokset julkaistaan noin tunnin

päästä markkinoiden sulkeutumisesta. Tarjous, myynti tai osto, sisältää kaupattavan sähkön määrän 0.1 MWh kerrannaisina koskien seuraavan vuorokauden toimitustunteja ja hinnan (hintavälin), jolla sähkömarkkinaosapuoli on valmis kauppaan. Kaupat syntyvät markkinahinnalla, mikäli hinta osuu tarjouksen hintaväliin. Käytännössä tarvittavat ostot ja myynnit perustuvat sähkömarkkinaosapuolien kulutus- ja tuotantoennusteisiin. Kauppaa voidaan käydä myös blokkituotteilla, jotka ovat tarjouksia joko ostaa tai myydä sähköä peräkkäisinä tunteina. Blokin minimipituus on 3 tuntia ja maksimi pituus 24 tuntia. Blokkitarjoukset toteutuvat, kun hinta ja volyymit kohtaavat. (Partanen et al. 2020)

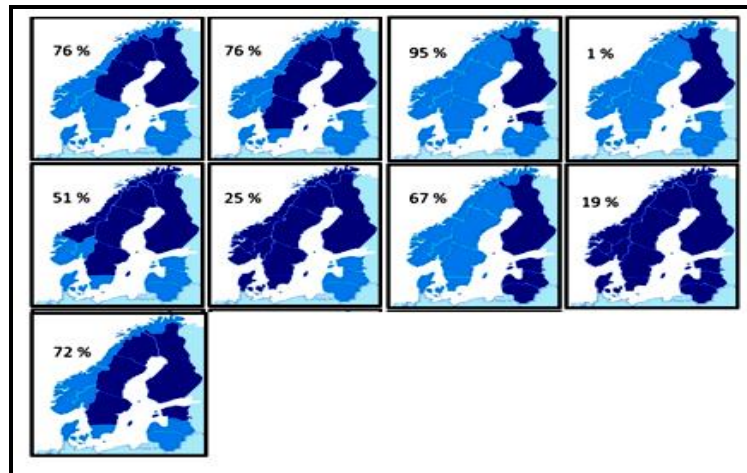
Blokkitarjous sopii siis erityisesti sellaiselle tuotannolle, jota ei kannata ajaa ylös vain hetkeksi.

Kysynnän ja tarjonnan mukaisesti huutokaupankäynnin tuloksena saadaan seuraavalle päivälle kaikille tunnille yksi spot-markkinahinta (systeemihinta) sähkömarkkinaosapuolille. Markkinat on jaettu maantieteellisesti eri tarjousalueisiin. Ruotsissa on neljä tarjousaluetta. Norjassa viisi. Virossa, Suomessa, Liettuassa ja Latviassa kussakin maassa yksi tarjousalue (Nord Pool 2020d).

Kun maiden välillä on siirtokapasiteettirajoituksia (pullonkauloja), lasketaan kullekin maalle (tarjousalueelle) oma aluehinta. Norjan ja Ruotsin jakautuminen useisiin tarjousalueisiin (aluehintoihin) johtuu pääosin edellä mainittujen maiden sisäisten kantaverkkojen siirtokyvystä. Suomessa on vahva kantaverkko, jossa siirrettävä teho siirtyy vaivatta sen päästä päähän, joten tarvetta maan sisäisille tarjousalueille ei ole. Kun Suomi erkaantuu systeemihinnasta siirtorajoitusten vuoksi ja sille lasketaan oma aluehinta niin käytännössä se tarkoittaa sitä, että Suomessa joudutaan tekemään tämä erotus kalliimmilla sähköntuotantomuodoilla. Esimerkiksi CHP-laitoksilla ja hiililauhteella.

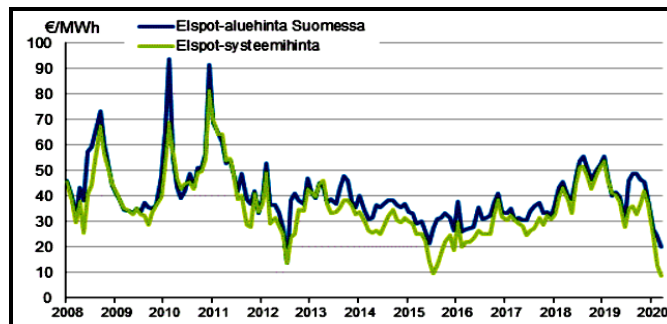
Kuvassa 13 sivu 24 on esitetty kaaviomuodossa tarjousalueiden yhtenäisyys vuonna 2018. Prosenttilukemat kertovat kuinka paljon vuoden tunneista prosentuaalisesti on oltu samassa systeemihinnassa. (Fingrid 2018)

Tumman sininen kuvaa samaa aluehintaa. Kuvasta voidaan päätellä, että pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla sama systeemihinta toteutuu 19 % tapauksessa vuoden tunneista Pohjoismaiden ja Baltian maiden kesken. Muina aikoina Suomessa ollaan samassa aluehinnassa vaihtelevasti Ruotsin ja Norjan eri tarjousalueiden sekä Baltian maiden kanssa. Mikäli maiden välisiä siirtokapasiteettirajoituksia ei olisi, niin systeemihinta (spot-hinta) olisi Pohjoismaissa sekä Baltian maissa kaikille sama.

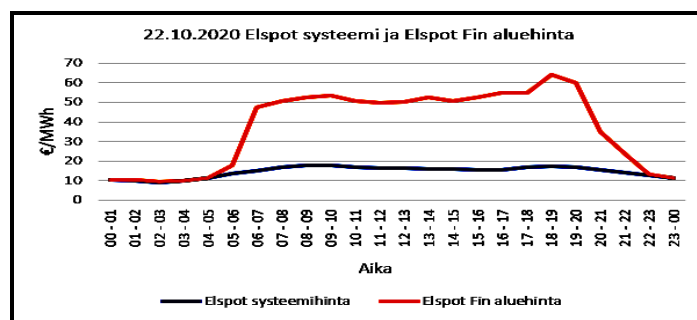


Kuva 13. Tarjousalueiden yhtenäisyys. (Fingrid 2018)

Kuvassa 14 on esitetty Suomen Elspot-aluehinnan ja Elspot-systeemihinnan kuukausikeskiarvot vuosina 2008–2020 (Tilastokeskus 2020). Kuukausikeskiarvon sisältä löytyy yksittäisille päiville suuriakin eroja. Kuvassa 15 on esitetty 22.10.2020 jokaiselle tunnille Elspot-aluehinnan ja Elspot systeemihinnan ero (Nord Pool 2020b). Kuvasta voidaan huomioda, että päivän sisällä Elspot-aluehinta saattaa poiketa kymmeniä euroja Elspot-systeemihinnasta.



Kuva 14. Nord Pool sähköpörssin kuukausikeskiarvot. (Tilastokeskus 2020)



Kuva 15. 22.10.2020 päivän toteutuneet Elspot-systeemi sekä aluehinnat. (Nord Pool 2020b)

Elbas (intra-day market)

Elbas-markkinat on luotu jälkimarkkinapaikaksi Elspotille. Elbas-markkinoilla voi tasata omaa sähkötasettaan, joko tuotanto- tai kulutustasettaan, lähellä sähkön toimitushetkeä. Toisin sanoen Elbas-markkinoilla tuetaan ja tasapainotetaan myös koko sähköjärjestelmän tasapainoa, kun kulutus ja tuotantoennusteet tarkentuvat lähestyttäessä toimitushetkeä. Elbas-markkinat ovat myös yksi mahdollisuus turvata oma tuotantotase, jos tuotantolaitos putoaa esimerkiksi viasta alas. Uudet Elbas-tuntisarjat avautuvat, kun Elspot tulokset on julkistettu noin klo 15.00 alkaen. Elbas-markkinat ovat avoinna joka päivä periaatteella ja kauppaa voidaan käydä vielä tunti ennen käyttötuntia. Toisin kuin Elspot-kaupassa, jossa hinta on kaikille sama, Elbas-kaupassa syntyy jokaiselle kaupalle oma yksilöllinen hinta ja volyymi markkinaosapuolien välillä. Tarjoukset jätetään määrästä (MW) ja hinnasta (€). (Partanen et al. 2020) Kaupankäynti perustuu periaatteeseen *first come-first serve* (Luolahti 2015).

Taulukossa 2 sivu 26 on esitetty Suomen alueen Elbas-kaupankäynti 22.10.2020 päivän tunneille toteutuneet hinnat ja volyymit. Product sarakkeessa on päivän jokainen tunti. *High* ja *Low* kuvaavat korkeimman ja matalimman toteutuneen hinnan kullekin tunnille. *Last* on viimeisin tunnille toteutunut kauppa. Toteutuneiden kauppojen keskimääräinen hinta jokaiselle tunnille kuvataan lyhenteellä *Avg. Volume* sarakkeessa on jokaiselle tunnille toteutunut kumulatiivinen kaupattu teho megawatteina. Esimerkiksi klo 20 tunnin korkein hinta on ollut 100,00 €/MWh ja matalin 54,10 €/MWh. Kauppaa on käyty sille tunnille 225,5 MWh:n volyymilla. Suomen aluehinta samalle päivälle ja tunnille on ollut 60,03 €/MWh. (Nord Pool 2020b)

Elbas-kauppaa on käyty siten aluehintaa korkeammalla ja matalammalla tasolla kokonaisvolyyymillä 4830 MWh. Toisin sanoen joku markkinoilla toimija on ollut valmis maksamaan Elbas-kaupassa korkeampaa hintaa kuin Suomen aluehinta sillä hetkellä. Se kertoo siitä, että toimija on halunnut korjata tasevirhettään eikä ole halunnut päästää sitä tasesähkökauppaan, jossa tasesähkön hinta olisi voinut olla moninkertainen verrattuna Elbas-hintaan.

Elspot-kauppaa on käyty 22.10.2020 Suomen osalta noin 153500 MWh, joten Elbas-jälkimarkkinakaupankäyntiä on tehty noin 3 % verrattuna Elspot-kaupankäyntiin. Vuositasolla tarkasteltuna Suomen Elspot kaupankäyntimäärä on ollut vuonna 2020 noin 56 TWh. Elbas-kauppaa on käyty kokonaisvolyyymilla (osto ja myynti) noin 2 TWh, joka

on noin 3,5 % Elspot- kaupankäynnin määrästä. (Nord Pool 2020c) Tästä voidaan päätellä, että Elbas-kaupankäynnin volyymi ja sitä kautta likviditeetti on huomattavasti pienempi kuin Elspot-kaupankäynnissä.

Pullonkaulatilanne vaikuttaa Elbas-kaupankäyntiin. Mikäli Suomen ja Ruotsin rajajohtojen siirtokapasiteetti on täynnä niin maiden välillä ei voi käydä Elbas-kauppaa. Elbas-markkinoiden keskeiseksi puutteeksi voidaan mainita jo edellä mainittu likviditeetin puute. Tämä tarkoittaa sitä, että joskus osto- tai myyntitarjouksia ei ole riittävästi tarpeeseen nähden. (Kolehmainen 2016)

Taulukko 2. Nord Pool intra-day statistic 22.10.2020. (Nord Pool 2020a)

Nord Pool Intraday Statistics					
Product	High	Low	Last	Avg	Volume
PH-20201022-01	15,2	-6,0	10,4	8,1	171,3
PH-20201022-02	9,9	-1,6	9,4	5,6	212,4
PH-20201022-03	10,0	-0,6	4,0	6,0	254,8
PH-20201022-04	11,5	-0,5	11,0	6,3	183,5
PH-20201022-05	16,8	8,1	16,8	10,4	62,2
PH-20201022-06	33,0	17,6	17,6	19,0	74,9
PH-20201022-07	51,1	41,9	41,9	49,6	44,6
PH-20201022-08	61,0	50,8	55,3	53,0	70
PH-20201022-09	74,2	43,5	43,5	55,9	113,8
PH-20201022-10	72,5	58,2	58,5	60,5	77,7
PH-20201022-11	76,1	57,0	70,0	66,5	100,9
PH-20201022-12	71,5	53,5	53,5	60,0	93,6
PH-20201022-13	102,0	50,2	100,0	67,4	128,1
PH-20201022-14	102,0	55,0	95,0	78,6	105,5
PH-20201022-15	200,0	50,8	200,0	79,0	104,5
PH-20201022-16	150,0	53,1	63,0	80,1	188,1
PH-20201022-17	86,1	55,0	71,0	70,3	205,7
PH-20201022-18	99,0	56,0	75,1	77,8	164,1
PH-20201022-19	95,6	59,6	80,1	74,6	166,5
PH-20201022-20	100,0	54,1	75,0	69,9	225,5
PH-20201022-21	61,0	30,1	49,0	47,2	440,3
PH-20201022-22	60,0	12,6	32,0	45,3	635,2
PH-20201022-23	62,4	8,1	18,0	44,6	584,2
PH-20201022-24	35,0	10,6	17,0	19,1	408,6
Sumvolume					4830,3

3.4.2 Nord Pool sähköpörssin johdannaismarkkinat

Johdannaiskauppaa käydään Nord Poolin järjestämällä Nasdaq OMX Commodities-finanssimarkkinoilla. Kauppaa käydään standardoiduilla finanssijohdannaisilla. Johdannaisilla kauppaa käydessä markkinaosapuolien välillä liikkuu vain raha. Johdannaisilla ei myydä tai hankita sähköä fyysisesti. Varsinaisen fyysisen sähkön hankinta ja myyminen on tehtävä joko Elspot-, Elbas- tai OTC-markkinoiden kautta.

Johdannaiskaupan tuotteita ovat *futuurit*, *DS-futuurit*, *optiot* sekä *aluehintaaerotuotteet* (*EPAD*, *Electricity Price Area Differentials*). Kaupankäynti tapahtuu pörssin välityksellä, jolloin vastapuoliriski poistuu sekä anonymiteetti toteutuu. (Partanen et al. 2020)

Koska sähköä hankitaan ja myydään useiden vuosien päähän niin johdannaisilla voidaan varmistaa sähkön myynti- tai ostohinta tulevaisuudessa sen hankintahetkellä. Tämä on tarkoituksenmukaista, kun tiedetään varmuudella, että sähköä tullaan hankkimaan tai myy-

mään jollakin ajanhetkellä tulevaisuudessa. Näin voidaan keskittyä itse ydinbisnekseen eikä yrityksen voimavaroja tarvitse tuhata sähkömarkkinoiden seuraamiseen.

Tärkeää on huomata, että sähkön hinnan suojaamisella (*hedging*) ei ole tarkoitus tehdä voittoa vaan sillä pyritään hankkiutumaan eroon riskeistä, joita ei haluta ottaa (Luolahti 2015).

Johdannaisten referenssihintana käytetään Elspot-systeemihintaa, jota verrataan itse johdannaista maksettuun hintaan. Netotus tapahtuu näiden hintojen erotuksena (Elspot hinta – johdannaisten hinta). (Partanen et al. 2020) Johdannaisilla voidaan käydä myös pelkkää finanssikauppaa, kuten normaaleilla osakemarkkinoilla, koska siihen ei liity fyysisen sähkön hankintaa.

Futuurit ja DS-futuurit

Futuurit ja DS-futuurit ovat Nasdaq Commoditiesin ja sähkömarkkinaosapuolien välisiä sopimuksia, ennalta määrätyillä ehdoilla (volyymi, toimitusaika, hinta), ostaa tai myydä hyödyke tulevaisuudessa. Futuurisopimuksessa sopimusperiodi on päivä, viikko, kuukausi, neljännesvuosi ja vuosi, kun taas DS-futuurin sopimusperiodi on kuukausi, neljännesvuosi tai vuosi. Futuurisopimuksessa futuurin arvon netotus jakautuu kahteen osaan. Heti kaupan teon jälkeiseen (daily market settlement) netotukseen sekä toimitusaikana tehtävään (spot reference settlement) netotukseen. DS-futuurissa netotus suoritetaan myös toimitusaikana päivittäin (spot reference settlement) kuten futuurissakin mutta ennen toimitusaikaa tilitys suoritetaan vain kerran sopimuksen viimeisenä kaupankäyntipäivänä (expiry market settlement).

Optiot

Optiot, joko osto- tai myyntioptiot, ovat sopimuksia tulevaisuudessa tehtävästä kaupasta. Nasdaq OMX commodities-pörssissä noteerattavien optioiden kohde-etuudet ovat *futuureja*. Optiosopimuksissa velvoite koskee vain option myyjää. Option myyjä saa option ostajalta *preemion* korvaukseksi ottamastaan riskistään.

Osto-option (*call option*) ostaja saa mahdollisuuden, muttei velvollisuutta, ostaa option määräämä kohde-etuus ennalta sovitulla hinnalla option myyjältä ja toisinpäin osto-option myyjää koskee velvoite luovuttaa kohde-etuus ennalta sovitulla hinnalla.

Vastaavasti myyntioption (*put option*) ostaja saa oikeuden, muttei velvollisuutta, myydä option osoittama kohde-etuus myyntioption myyjälle ja toisaalta myyntioption myyjällä on velvoite ostaa kohde-etuus ennalta määrätyllä hinnalla. Option ostajalla on mahdollisuus myydä tai ostaa kohde-etuus vain option päättymispäivänä. Optioissa toisella osapuolella (myyjällä) on velvoitteet ja toisella osapuolella (ostajalla) mahdollisuudet. Myyjä saa riskitostaan ennalta sovitun preemion, mikäli optio ei toteudu. Ostajalla on mahdollisuus tehdä voittoa käytännössä rajattomasti ja myyjä voi kokea vastaavasti suuria tappioita. Kun osto-option määräämän kohde-etuuden (*Ds-futuuri, futuuri*) markkinahinta ylittää option päättymispäivänä sovitun sopimushinnan niin osto-optio toteutetaan. Myyntioptio toteutetaan, kun kohde-etuuden (*Ds-futuuri, futuuri*) markkinahinta option päättymispäivänä alittaa option sopimushinnan (Partanen et al. 2020, Rothovius et al. 2013).

Kuvassa 16 on selvennetty option myyjän ja ostajan velvollisuuksia.

	Ostaja (premio -)	Myyjä (premio +)
Osto-optio (Call)	Oikeus ostaa kohde-etuus	Velvollisuus myydä kohde-etuus
Myynti-optio (Put)	Oikeus myydä kohde-etuus	Velvollisuus ostaa kohde-etuus

Kuva 16. Optiosopimuksen velvollisuudet ja oikeudet. (Partanen et al. 2020)

Aluehintaerotuote (EPAD, Electricity Price Area Differentials)

Johdannaissopimuksien netotus tapahtuu systeemihinta vasten. Koska systeemihinta voi poiketa huomattavasti aluehinnasta ja aiheuttaa merkittävän hintariskin niin hintaeroa vastaan voidaan suojautua EPAD-tuotteella (*Electricity Price Area Differentials*). Aiemmin nimeltään CfD-tuote (Contract for Difference). EPAD:n sekä muiden johdannaisten avulla sähkön hinnalle voidaan muodostaa kattava suojaus, jos näin halutaan menetellä (Sihvonen 2015). EPAD-tuotteita on saatavilla termiineinä ja optioina (Nasdaq 2021).

Kyseessä on tärkeä suojaustuote koska Suomessa Elspot-aluehinta poikkeaa Elspot-systeemihinnasta lähestulkoon aina. Hintaero voi olla useita kymmeniä euroja. Katso kuva 15 sivu 24.

3.5 OTC-markkinat

OTC-markkinat (*Over The Counter*) ovat sähköpörssin ulkopuolella käytävää sähkön tukkukauppaa. Kauppa perustuu kahden osapuolen, myyjän ja ostajan, väliseen bilateraaliseen kauppaan. Kaupankäynnin ehdot kuten esimerkiksi volyymit, hinta ja muut ehdot ovat kahdenkeskeisesti joustavasti sovittavissa. Normaalisti esimerkiksi iso teollinen tuotantolaitos (sähkön kuluttaja) tai sähkön vähittäismyyjä tietävät sähkön tarpeensa vuosien päähän. Tällöin sähkön hankinnan perustarve tyydytetään pitkäaikaisilla kahdenkeskisillä toimitussopimuksilla isoilta sähkön tuottajilta. Ennen toimitussopimuksen tekoa on luonnollista kilpailuttaa sähkön hinta sähkön tuottajien välillä maksuehtoineen. Sähkön hinta suojataan OTC-markkinoilla termiinisopimuksella, *forwardilla*, joka on myyjän ja ostajan kahdenvälinen transaktio. Forwardit on sitoumus ostaa (long-position) tai myydä (short position) kohde-etuus ennalta sovittuun hintaan, sovittuna aikana. Forwardin laskee liikkeelle yleensä sähkön tuottaja (*short-forward*) varmistaakseen myyntihinnan tulevaisuuden tietyille ajanhetkille ja toisaalta sähkön ostaja varmistaa tulevaisuuden sähkön hintansa tietyille ajanhetkille ostamalla forwardin (*long-forward*). Hintareferenssi OTC-markkinoiden sähkön hinnoille haetaan johdannaismarkkinoilta (futuureista), jossa on paras sen hetkinen ”näkemys” kohde-etuuden oikeasta hintatasosta. (Partanen et al. 2020, Luolahti 2015)

Toisin kuin johdannaismarkkinoilla OTC-markkinoilla on olemassa vastapuoliriski.

Kuvassa 17 on esitetty *forwardin* ja johdannaismarkkinoiden *futuurin* periaatteelliset erot.

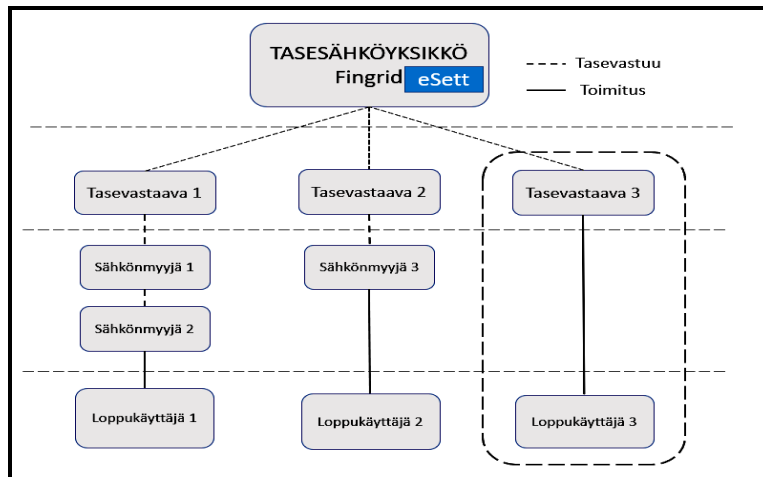
FORWARD	FUTURE
Bi-lateraalisopimus	Johdannaispörssi
Standardoimaton	Standardoitu
Yleensä 1 toimitusperiodi	Useita toimitusperiodeja
Selvitys sopimuksen päättyessä	Selvitys päivittäin
Toimitus- / rahoitussopimus	Yleensä rahoitussopimus
Luottoriski	Ei luottoriskiä

Options, Futures, and Other Derivatives, 8th Edition, Copyright © John C. Hull 2012

Kuva 17. Forwardin ja futuurin periaatteelliset erot. (Luolahti 2015)

4. TASE- JA SÄÄTÖSÄHKÖMARKKINAT

Sähköverkon kulutuksen ja tuotannon on oltava joka hetki tasapainossa. Mikäli sähkön kulutus kasvaa sähkön tuotantoon nähden suuremmaksi pyrkii verkon taajuus laskemaan ja toisin päin, mikäli sähkön kulutus on pienempää kuin sähkön tuotanto pyrkii verkon taajuus nousemaan. Taajuus pyritään pitämään koko ajan 50,0 Hz:ssä. Pohjoismaisessa yhteiskäyttöjärjestelmässä taajuus kuvaa koko voimajärjestelmän tehotasapainoa. Taajuus on sama kaikissa maissa, jokaisena ajanhetkenä, mitattiin se sitten Oslon tai Helsingissä. Verkon jännite on sen sijaan paikallinen suure riippuen alueellisista pätö- ja loistehotarpeista. Toisin sanoen Oslon verkkojännite ei välttämättä ole täsmälleen sama kuin Helsingissä. Tehotasapainon ylläpitämisestä teknisesti, eli valtakunnallisesta tasehallinnasta, vastaa Suomessa Fingrid Oyj. Ruotsissa vastaavaa tehtävää hoitaa Svenska kraftnät, Norjassa Statnett ja Tanskassa Energinet. Sähkömarkkinalakiin 588/2013 § 73 on myös kirjattu, että jokaisen sähkömarkkinaosapuolen (kuluttajat, tuottajat) on pyrittävä oman sähkökulutuksensa ja sähkön tuotannon kattavaan ennustamiseen vuorokauden kaikkina tunteina. Toisin sanoen kaikilla sähkömarkkinaosapuolilla on *tasevastuu* myös omasta toiminnastaan sähkömarkkinoilla. Sähkömarkkinaosapuolien *tasevastuu* on toteutettu siten, että jokaisella osapuolella on oltava avoin toimittaja, joka vastaa mahdollisista osapuolien tasevirheistä. Avoin toimittaja on vastuussa siitä, että asiakkaalle toimitetaan sähköä sen mukaan kuin sitä on kulunut. Ylimmällä tasolla on järjestelmävastaava Fingrid Oyj, joka on tasevastaavien avoin toimittaja, ketjun viimeinen lenkki. Tuotanto- ja kulutusennusteet eivät juuri koskaan toteudu tarkalleen, joten verkossa on aina joko yli- tai alijäämää. Tehotasapainon ylläpitämiseen vaadittava säätösähkö toteutetaan *säätösähkökaupan* avulla. Kuvassa 18 sivu 31 on esitetty periaatekuva avoimien toimituksien ketjuista. Ylimpänä lenkinä on Fingridin tasesähköyksikkö, joka toimii tasevastaavien avoimena toimittajana. eSett hoitaa taloudellisen taseselvityksen. Tasevastaavien avoimessa toimituksessa voi olla useampia osapuolia. Esimerkiksi tasevastaava 1:n avoimessa toimituksessa on sähkömyyjä 1 joka taas on avoimena toimittaja sähkömyyjälle 2. Oleellista on, että kaikille sähkömarkkinoilla toimijalle löytyy yksi avoin toimittaja ketjun varrelta. Outokummun avoimen toimituksen ketju voidaan esittää kuvan suljetulla katkovivulla. Tasevastaavana toimii palveluntuottaja 3. Tätä kirjoitettaessa 14.12.2020 Suomessa toimii 53 tasevastaavaa (eSett 2020a).

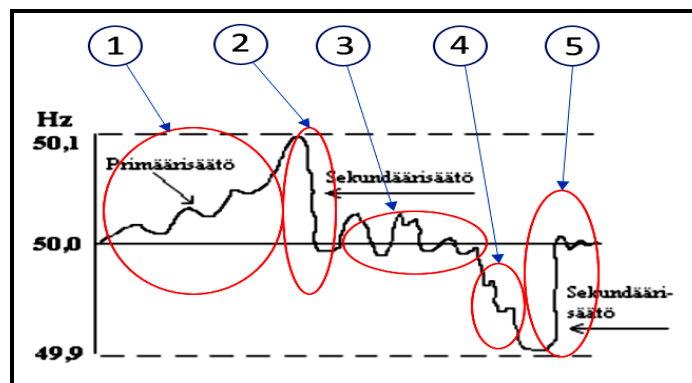


Kuva 18. Avointen toimitusten ketju. Muokattu lähteestä (Fingrid 2020k)

4.1 Valtakunnallinen tehotasapainon ylläpito ja reservimarkkinat

Valtakunnallista tunnin sisällä tapahtuvaa tehotasapainoa pidetään yllä Fingridin tasesähköyksikön sähkökaupalla Ruotsin ja Norjan vastaavien yksiköiden kanssa, automaattiseen taajuuden säätöön kykenevillä primäärisäätölaitoksilla (käytännössä vesivoimalaitoksia) sekä sekundäärisäädöllä. Pohjoismaisessa yhteiskäyttöjärjestelmässä (Ruotsi, Norja, Suomi, Tanska) järjestelmävastaavat ovat varanneet noin 600 MW taajuusohjattua käyttöreserviä FCR-N (primäärisäätöreserviä) taajuuden pitämiseen 49,9–50,1 Hz:n alueella. Tästä reservistä Suomen osuus on noin 120 MW. (Fingrid 2020a)

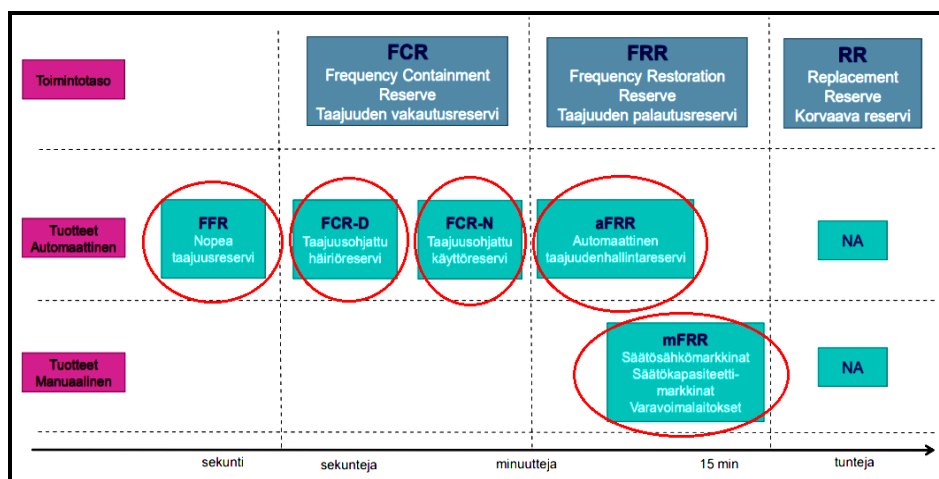
Taajuusohjatut käyttöreservit (primäärisäätöreservit) koostuvat lähinnä vesivoimalaitoksista ja enenevässä määrin ohjattavista kuormista, joilla on nopea ja hyvä säätökyky. Kuvas-
sa 19 on esitetty tehotasapainon ylläpitämiseen vaadittava primääri- ja sekundäärisäädön periaate.



Kuva 19. Valtakunnallisen tehotasapainon ylläpitämisen periaate. Muokattu lähteestä (Partanen et al. 2020)

Kun taajuus poikkeaa 50,0 Hz:stä taajuusohjatut käyttöreservit aktivoituvat ja rupeavat säätämään. Kuvan 19 kohdassa *yksi* (1) taajuus nousee, vaikka käyttöreservien tehoja vähennetään (verkossa on liian paljon tuotantoa kulutukseen nähden). Taajuus nousee ja nousee kunnes kohdassa *kaksi* (2), 50,1 Hz:n kohdalla tai hiukan ennen kyseistä taajuutta, todetaan ettei taajuutta pystytä pitämään käyttöreservien turvin alle 50,1 Hz:n. Tällöin Fingrid ilmoittaa (soittamalla tai muulla sovitulla tavalla) mFRR säätösähkömarkkinoilla säätösähkökauppaan osallistuneille (joiden tarjous on hyväksytty), pyynnön vähentää tehoja. Näin taajuus saadaan pysymään säätösähkömarkkinoiden avulla hyväksytyissä rajoissa. Kohdassa *kolme* (3) taajuus on vakaa ja hallinnassa käyttöreservien avulla, kunnes kohdassa *neljä* (4) verkossa on liian paljon kulutusta tuotantoon nähden, joten taajuus rupeaa laskemaan. Käyttöreservit lisäävät tuotantoaan mutta taajuus vain laskee, kunnes kohdassa *viisi* (5) 49,9 Hz:n tai hiukan ennen sitä, todetaan ettei taajuutta pystytä pitämään käyttöreservien turvin hyväksyttävässä rajassa ja tällöin Fingrid ilmoittaa (soittamalla tai muulla sovitulla tavalla) säätösähkömarkkinoilla säätösähkökauppaan osallistuneille (joiden tarjous on hyväksytty), pyynnön lisätä tehoja tai pudottamalla kulutusta (säätösähkömarkkinoille voi osallistua myös pudottamalla kulutusta).

Fingrid ylläpitää valtakunnallisen tehotasapainon ylläpitämiseksi FCR-N:n ohella kuvan 20 mukaisia reservituotteita. (Fingrid 2020b)



Kuva 20. Fingrid reservituotteet ja reservien markkinapaikat. Muokattu lähteestä (Fingrid 2020b)

FFR on nopea taajuusreservi tuottaen nopean tehovasteen verkon alitaajuustiloissa. FFR on Fingridin uusi yhdessä Pohjoismaiden verkkoyhtiöiden kanssa keväällä 2020

käyttöönotettava reservituote. Pohjoismaissa nopean taajuusreservin tarve on noin 300MW riippuen tilanteesta josta Suomen osuus on noin 20 % (Fingrid 2020n). FFR:ää varataan reserviin kun sähköverkkko on pieni-inertiaisessa tilassa. Puhuttaessa sähköverkon inertiaista tarkoitetaan sillä sähköverkkoon sitoutunutta liikenergiaa joka tulee pyörivistä koneista niin voimalaitoksissa kuin tehtaissa ja joissa koneet pyörivät samalla taajuudella kuin sähköverkkko. Pyörivä massa tuottaa sähköverkkoon inertiaa ja on hyvä asia sähköverkon näkökulmasta. Mitä enemmän inertiaa sähköverkossa on niin sen hitaammin tuotannon ja kulutuksen vaihtelut vaikuttavat taajuuteen. Pienen inertian tilanteessa, suuren sähköntuotantolaitoksen pudotessa äkillisesti verkosta, taajuus putoaa nopeasti jolloin FFR kykenee nopeasti vastaamaan tilanteeseen. Pienen inertian tilanteita ovat normaalisti kevät-, kesä-, ja syysaika sekä viikonloput. Toisin sanoen silloin kun sähkönkulutus on vähäisempää ja siitä syystä verkossa on tuotannossa vähemmän pyörivää massaa eli inertiaa. Myös kasvava tuulivoimatuotanto vähentää inertiaa vaikka pyörivissä roottoreissa on liike-energiaa. Tämä johtuu siitä, että tuulivoimalan roottorin ja sähköverkon välissä on yleensä taajuusmuuttaja jolloin liike-energia ei välity verkkoon taajuuden muutostilanteissa kuten esimerkiksi perinteisten pyörivien vesivoimalaitoksien turbiinien inertia. Tuulivoimatuotannon lisääntyessä on syytä olettaa myös FFR-markkinoiden kasvavan tulevaisuudessa.

FCR-D on taajuusohjattu häiriöreservi joka on luotu vastaamaan verkon isoihin äkillisiin taajuuspoikkeamiin. Vain ylössäätilanteisiin. *FCR-D* voi olla voimalaitosten ohella myös kuormien pudottamista vasteiden ollessa 49,7 Hz 5 s, 49,6 Hz 3 s, 49,5 Hz 1 s.

FCR-N on taajuusohjattu käyttöreservi joka on käsitelty luvussa 5.6.

aFRR on automaattinen taajuudenhallintareservi. Voimalaitoksen tehoa säädetään Fingridin toimesta kahden minuutin viiveellä.

mFRR on säätösähkömarkkinatuote joka käydään läpi luvussa 5.6.

Kaikilla yllämainituilla reservillä, niin jatkuvan tehotasapainon kuin häiriötilanteiden näkökulmasta, pyritään turvaamaan verkon häiriötön käyttö jokaisessa tilanteessa jokaisella ajanhetkellä. Mekanismi on monimutkainen mutta toimiva.

4.2 Säätosähkömarkkinat ja säätosähkökauppa

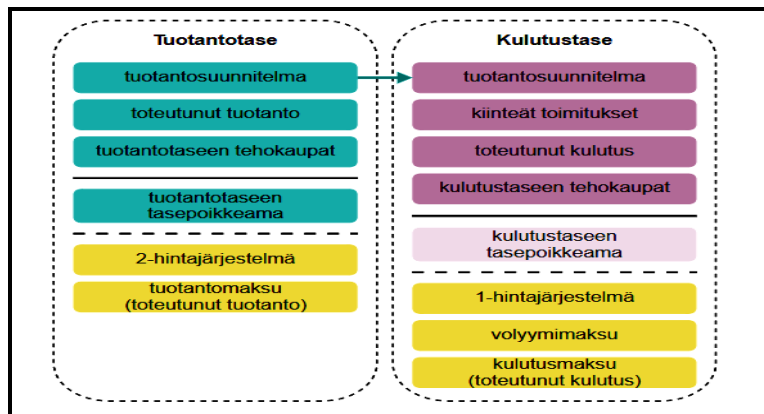
Fingrid ylläpitää ja ostaa tasesähkökauppaa varten tarvitsemansa sähkön säätosähkömarkkinoilta. Säätosähkömarkkinat (*mFRR*) on Fingridin ylläpitämä mekanismi yhdessä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Säätosähkömarkkinoille voivat osallistua kaikki sähkömarkkinaosapuolet ja jättää tarjouksen, mikäli osapuolilla on riittävästi säätökykyistä kapasiteettia. Tarjoukset on jätettävä aikaisintaan kuukautta ja viimeistään 45 minuuttia ennen tarjouksen kohteena olevaa käyttötuntia. Tarjouksesta on käytävä ilmi säätötarjouksen koko (teho MW:ssa), hinta €/MWh sekä onko tarjous kulutusta vai tuotantoa sekä siirtoalue (säätökapasiteettina voi olla myös poiskytkettävät kuormat tuotannon lisäksi). Kapasiteettia pitää olla vähintään 10 MW, joko yksinään tai aggregoituina pienemmistä kapasiteeteista. Kapasiteetti pitää olla käytettävissä 15 minuutin kuluessa siitä, kun Fingrid haluaa aktivoida tarjouksen. Aktivointi tapahtuu manuaalisesti Fingridin kantaverkkokeskuksesta joko suoraan soittamalla tai muulla etukäteen sovitulla tavalla. Tarjouksen minimikoko voi olla minimissään 5 MW jos aktivointi voidaan tehdä elektronisesti. Käyttötunnin tarjoukset kootaan yhteen Fingridin toimesta ja ne lähetetään yhteispohjoismaisille säätosähkömarkkinoille, jossa kaikkien maiden ylös- ja alassäätöhintatarjoukset pistetään järjestykseen ja niistä muodostetaan säätökäyrä kuvan 21 mukaisesti. (Fingrid 2020c) Ylös-säätöhinnaksi muodostuu kallein käytetty ylös-säätötarjous, minimissään kuitenkin Suomen alueen spot-hinta. Alassäätöhinnaksi muodostuu halvin alassäätötarjous mutta kuitenkin enintään Suomen alueen spot-hinta. Kaikissa Pohjoismaissa on samat ylös- ja alassäätöhinnat mikäli ollaan samassa Elspot-systeemihinnassa eikä rajasiirtokapasiteettirajoituksia ole. Mikäli käyttötunnilla on rajasiirtokapasiteettirajoituksia, Suomi erkaantuu omaksi hinta-alueeksi myös säätosähkömarkkinoilla vastaavasti kuin Elspot-markkinoilla. Tällöin Suomen ylös- ja alassäätöhinnat poikkeavat Ruotsin ja Norjan vastaavista hinnoista.



Kuva 21. Tasesähkön hinnan muodostuminen säätosähkön hinnasta. (Laine 2011)

Suomessa säätösähkön hinta muodostaa hinnan tuotantotase- sekä kulutustasesähkölle kuvan 21 mukaisesti. Tuotantotasesähköllä on kaksihintahintajärjestelmä ja kulutustasesähköllä on yksihintajärjestelmä. Tuotantotasesähkön hintajärjestelmä on muuttumassa yksihintajärjestelmään, joka olisi vastaavanlainen kuin kulutustasejärjestelmässä.

Tasesähkön hinta on sähkömarkkinoilla toimijoille erittäin kiinnostava tieto koska toimijan taseen poiketessa ennustetusta maksaa se siitä käyttötunnille tasesähkölle muodostuneen hinnan. Hinta riippuu siitä, onko kyseisellä käyttötunnilla ollut ylös- tai alassäätöjä. Mikäli käyttötunnille ei ole ylös- tai alassäätöjä silloin tasesähkön hinta on joko Elspot-systeemihinta tai Suomen spot-aluehinta. Tasevastaaville on määritelty erikseen tuotanto- ja kulutustase. Kuvassa 22 on esitelty tuotanto- ja kulutustaseen periaatteellinen muodostuminen ja niille määräytyvät muut maksut.



Kuva 22. Tuotanto ja kulutustaseen tasepoikkeamien määrittäminen. (Fingrid 2020g).

Tasevastaava maksaa Fingridille kaikesta toteutuneesta tuotannosta ja kulutuksesta sekä kulutustaseen tasesähkön ostolle sekä myynnille volyymimaksun. Lisäksi maksuihin sisältyy kiinteä viikkomaksu. Taulukossa 3 on esitetty 01.07.2020 lähtien voimassa olevat maksut.

Taulukko 3. Fingrid tasepalvelumaksut 01.07.2020 alkaen. (Fingrid 2020h)

Kiinteä viikkomaksu	30 €/vko
Toteutunut tuotanto	0,22 €/MWh
Toteutunut kulutus	0,35 €/MWh
Kulutustaseen tasesähkön volyymimaksu	0,50 €/MWh

Tasevastaavan tuotanto- ja kulutustase lasketaan kuvissa 23 ja 24 sivu 36 olevien kaavojen mukaisesti.



Kuva 23. Tuotantotaseen laskenta. (eSett 2020b)

Tuotantotaseen tasemäärän ollessa positiivinen (ylijäämäinen) tasevastaava myy sähköä Fingridille ja tasemäärän ollessa negatiivinen (alijäämäinen) tasevastaava vastaavasti ostaa tuotantotasesähköä Fingridiltä.



Kuva 24. Kulutustaseen laskenta. (eSett 2020b)

Kulutustasemäärän ollessa positiivinen (ylijäämäinen) tasevastaava myy kulutustasesähköä Fingridille ja tasemäärän ollessa negatiivinen (alijäämäinen) tasevastaava vastaavasti ostaa kulutustasesähköä Fingridiltä.

4.2.1 Kaksihintajärjestelmä tuotantotase

Tuotantotaseelle on olemassa kaksihintajärjestelmä. Toisin kuin kulutustasesähkölle tuotantotasesähköllä ei ole volyymimaksua. Taulukossa 4 on esitetty tuotanto- ja kulutustaseen sekä spot-hinta ylös- ja alassäätötilanteessa eräälle käyttötunnille. Taulukossa olevat hinnat ovat kuvitteellisia hintoja, joita on käytetty ainoastaan laskentaesimerkkeinä tässä luvussa sekä luvussa 4.2.2. Esitetyt hinnat eivät ole siis yleispäteviä. Todellisuudessa hinnat vaihtuvat käytännössä tunti tunnilta.

Taulukko 4. Esimerkki kaksi- ja yksihintajärjestelmästä. (Fingrid 2020d)

	2-hinta			1-hinta			€/MWh
	Ylösäättötunti	Ei säätöjä	Alassäätötunti	Ylösäättötunti	Ei säätöjä	Alassäätötunti	
Ylösäättöhinta	100	50	50	100	50	50	
Spothinta	50	50	50	50	50	50	-
Alassäätöhinta	50	50	20	50	50	20	-
Tasevastaavan tasesähkön ostohinta	100	50	50	100	50	20	-
Tasevastaavan tasesähkön myyntihinta	50	50	20	100	50	20	-

Taulukossa ylösäättöhinta on ollut eräällä ylösäättötunnilla 100 €/MWh (kallein aktivoitunut ylösäättötuntihinta säätösähkömarkkinoilta) sekä taas toisella tunnilla on ollut alassä-

tötunti ja tunnin hinta on ollut 20 €/MWh (halvin alassäätötuntihinta säätösähkömarkkinoilta). Spot-aluehinta näillä tunneilla on ollut 50 €/MWh. Mikäli tasevastaavan tuotanto on ollut pienempi kuin ennustettu tuotanto, niin tasevastaava joutuu ostamaan erotusta vastaavan määrän tasesähköä Fingridiltä. Tällöin tasesähkön hinnaksi tulee ylössäätötilanteessa tunnin ylössäätöhinta (esimerkissä 100 €/MWh). Mikäli ei ole tehty ylössäätöä tai tunti on ollut alassäätötunti niin tuotantotasesähkön myyntihinnaksi tulee tällöin Suomen spot-aluehinta 50 €/MWh. Toisin sanoen sähkön tuottajaa rangaistaan siitä, että tuotantotase on ollut ylössäätötilanteessa alijäämäinen ja toisaalta alassäätötilanteessa alijäämästä ei rangaista mutta siitä ei hyödykään.

Mikäli tasevastaavan tuotanto on ollut suurempi kuin ennustettu tuotanto, tasevastaava joutuu myymään vastaavan määrän tasesähköä Fingridille. Mikäli kyseessä on ollut alassäätötunti niin sähkön tuottaja saa siitä esimerkin mukaan 20 €/MWh. Mikäli kyseessä ei ole ollut alassäätötunti tai tunti on ollut ylössäätötunti tuottaja saa siitä Suomen spot-aluehinnan. Toisin sanoen sähkön tuottajaa rangaistaan, jos sen tuotantotase on ollut ylijäämäinen alassäätötunnilla ja taas toisaalta ylössäätötunnilta ei rangaista mutta siitä ei hyödykään. Käytännössä tuotantosuunnitelman poiketessa toteutuneesta tuotannosta niin siitä rangaistaan. Tasevastaava on aiheuttanut verkon sähköiselle tasapainolle haittaa, jota pitää korjata säätämällä verkon tehotasapainoa. Tällä kannustetaan siihen, että sähkön tuotantoennusteet pyritään tekemään mahdollisimman hyvin. Kannuste oikeanlaisen ja oikea-aikaisen tuotantoennusteen tekemiseen on vahva koska käytännössä aina, mikäli tuotantotase poikkeaa ennustetusta, joutuu maksamaan tasesähköstä hinnan, joka poikkeaa spot-hinnasta. Normaalisti tasesähkön hinnat ovat lähellä Suomen Spot-aluehintaa mutta joissain tapauksissa tasesähkön hinta ylössäädön aikana saattaa olla satoja tai jopa tuhansia euroja.

4.2.2 Yksihintajärjestelmä kulutustase

Kulutustaseelle on olemassa niin sanottu yksihintajärjestelmä, jolloin tasesähkön hinnaksi tulee ylössäätötunnilla ylössäätöhinta ja alassäätötunnilla alassäätöhinta. Jos käyttötunnille ei ole tehty säätöjä hinta on tällöin Suomen spot-aluehinta.

Tasevastaavan kuluttaessa enemmän sähköä käyttötunnilla ennusteeseensa nähden, syntyy taseeseen alijäämä. Tällöin tasevastaava joutuu ostamaan puuttuvan osan sähköä Fingridiltä taseensa kattamiseksi. Jos käyttötunti on ollut ylössäätötunti niin tasevastaavan ostaman

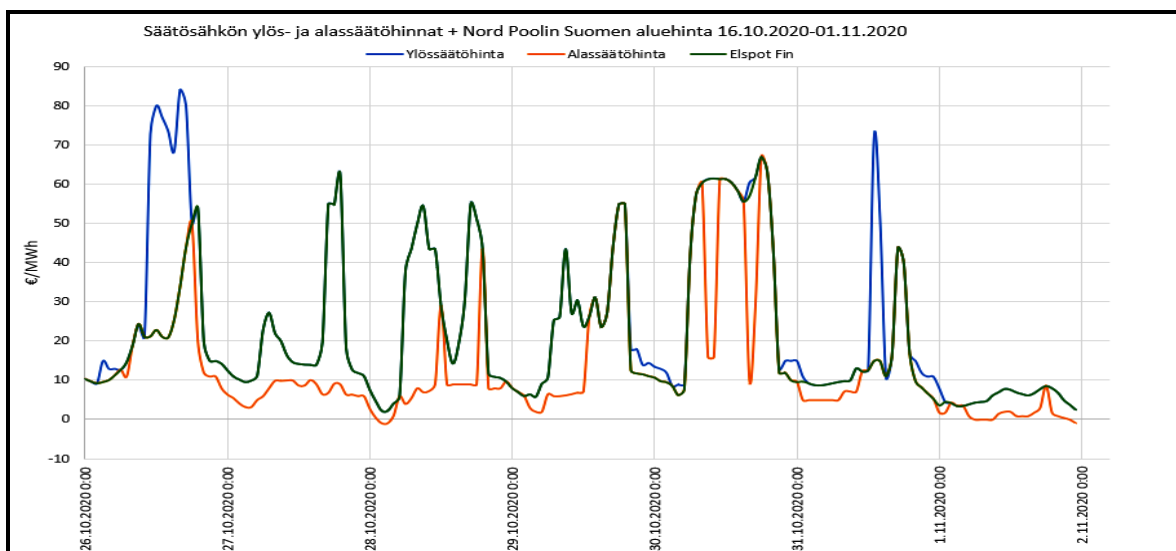
tasesähkön hinnaksi tulee silloin taulukon 4 sivu 36 käyttötunnin esimerkkihinta 100 €/MWh.

Toisaalta mikäli tasevastaava kuluttaa vähemmän sähköä kuin kulutusennusteensa syntyy taseeseen tällöin alijäämä, jolloin Fingrid ostaa tasevastaavalta kuluttamatta jääneen osan. Mikäli kyseessä on ollut ylössäätötunti maksaa Fingrid tasevastaavalle taulukon 4 sivu 36 esimerkissä 100 €/MWh ylössäätötunnille. Mikäli käyttötunti on ollut alassäätötunti tällöin Fingrid maksaa tasevastaavalle 20 €/MWh.

Kulutustaseen yksihintajärjestelmässä, kuten tuotantotaseen kaksihintajärjestelmässäkin, joudut maksamaan ylimääräistä Suomen spot-hintaan verrattuna, jos toteutunut kulutus ei täsmää kulutusennusteeseen nähden koska tällöin tasevastaavan epätasapainossa oleva kulutustase on aiheuttanut verkon sähköiselle tasapainolle haittaa ja siitä syystä verkon sähköistä tasapainoa joudutaan säätämään. Yksihintajärjestelmässä on tosin ansaitsemisen mahdollisuus silloin kun kulutus on ollut ylössäätötunnilla pienempi kuin ennustettu koska kuluttamatta jääneestä sähköstä saa paremman hinnan kuin Suomen spot-aluehinta. Ansaitsemisen mahdollisuus on myös silloin kun kulutus on alassäätötunnilla suurempaa kuin ennustettu. Tällöin sähköstä tarvitsee maksaa vähemmän kuin spot-hinta. Toisin sanoen kulutustaseessa tasevastaavan olisi edullista olla oston puolella säätöhinnan ollessa spot-hintaa alhaisempi ja myyntipuolella säätöhinnan ollessa on spot-hintaa korkeampi. Toimivalla ylös- ja alassäätöennustealgoritmeilla voisi siis ansaita rahaa. Tätä on yritettykin. Partanen (2020) mukaan Suomessa on tehty useita diplomitöitä, väitöskirjoja ja useita erillisiä tutkimuksia, joissa on pyritty ennustamaan erilaisilla algoritmeilla ovatko tulevat tunnit ylös- vai alassäätötunteja, siinä onnistumatta (Partanen 2020b). Fingridin ja tasevastaavan välisessä sopimuksessa tahallinen kulutuksen virheellinen ennustaminen on kuitenkin kielletty (Fingrid 2020f). Jos kaikki sähkömarkkinoilla olevat toimijat pyrkisivät ennustamaan kulutuksensa virheellisesti, vain pelkkää taloudellista hyötyä tavoittelakseen, aiheuttaisi se epäilemättä markkinoiden vääristymistä ja vaikeuttaisi verkon tehotasapainon hallintaa ja sitä kautta jopa vaaratilanteita verkon hallittavuuden kannalta. Kun Elspot-tarjouksia tehdään seuraavalle päivälle ei koskaan voi olla varma seuraavan päivän ylös- ja alassäätötilanteista, joten kulutustaseen puolelta tuleva tasesähkökaupan mahdollinen voitto on vielä tänä päivänä pelkkää tuurin kauppaa.

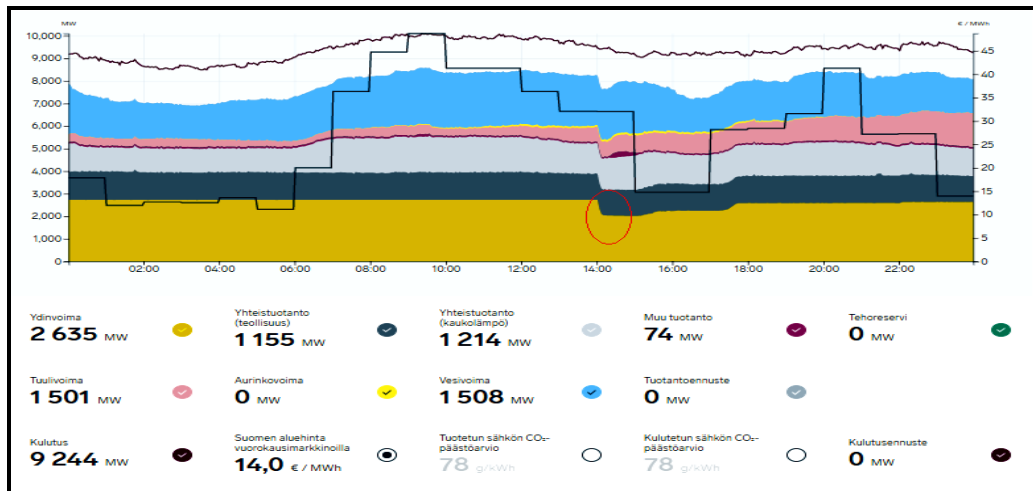
4.2.3 Esimerkkejä korkeista tasesähköhinnoista

Kuvassa 25 on esitetty aikavälillä 26.10.2020-01.11.2020 Suomen ylös- ja alassäätohinnat sekä Spot-aluehinta. Kuvasta voidaan huomioda esimerkiksi 26.10 päivällä ylösäätohinnan olleen noin 80 €/MWh Spot-aluehinnan ollessa samaan aikaan noin 20 €/MWh.



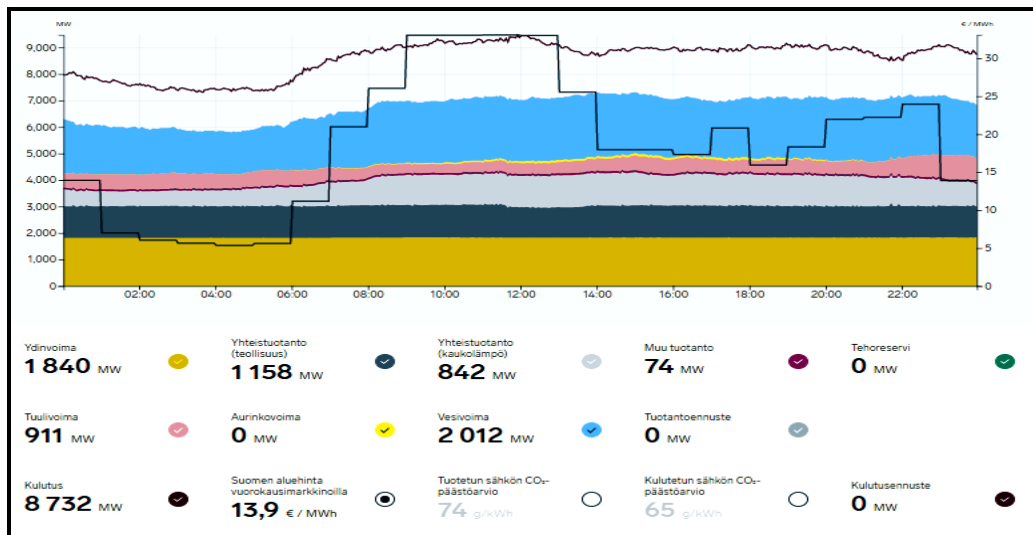
Kuva 25. Sääto sähköön ylös- ja alassääto hinnat sekä Nord Poolin Suomen aluehinta 16.10.2020-01.11.2020. (Fingrid 2020e, Nord Pool 2020b)

Vuonna 2020 07.11 mennessä suurimmat ylösääto hinnat ovat olleet 16.04 klo 13.00–14.00 **3500 €/MWh** sekä 11.05 klo 11.00–14.00 **2999 €/MWh** (Fingrid 2020e). Syy 16.04 klo 14.00 syntyneeseen 3500 €/MWh ylösääto hintaan johtui Suomen ydinvoimalayksikön irtaantumisesta verkosta. Irti kytkeytynyt teho oli noin 700 MW. Kuvassa 26 sivu 40 on esitetty ydinvoimalan irti kytkeytyminen 16.04.2020 klo 14.00 ja sen vaikutus Suomen sähköntuotantotaseeseen (Fingrid 2020j). Kuvasta voidaan päätellä, että Suomessa toiminnassa olleet tuotantolaitokset eivät juurikaan nosta tehoja vian aikana. Ainoastaan CHP-laitokset (yhteistuotanto kaukolämpö) nostavat tehoja noin 100 MW. Samaan aikaan kulutus ei juurikaan laske, joten korvaavan sähköön on täytynyt tulla rajasiirtojohtojen tehon lisäyksen myötä.



Kuva 26. Fingrid sähköjärjestelmän tila 16.04.2020. (Fingrid 2020j)

Syy 11.05.2020 klo 12.00-14.00 2999 €/MWh:n ylössätöhintaan ei ollut tekninen. Se voidaan havainnoida kuvasta 27. Kaikki tuotantolaitokset ovat olleet normaalisti toiminnassa. Varsinainen syy korkeaan ylössätöhintaan johtui tuuliennusteiden vuoksi noin 500 MW:n tuulivoimalatuotannon yläkanttiin ennustamisesta ja vesivoiman maksimi ajotilanteesta, jolloin ylöspäin säätäviä yksiköitä on ollut rajallisesti ja sitä kautta markkinoilla säätötarjouksia vähän (Röntynen 2020). Korkeat ylössätöhinnat voivat siis konkretisoitua ilman sähköverkon teknistä ongelmaa.



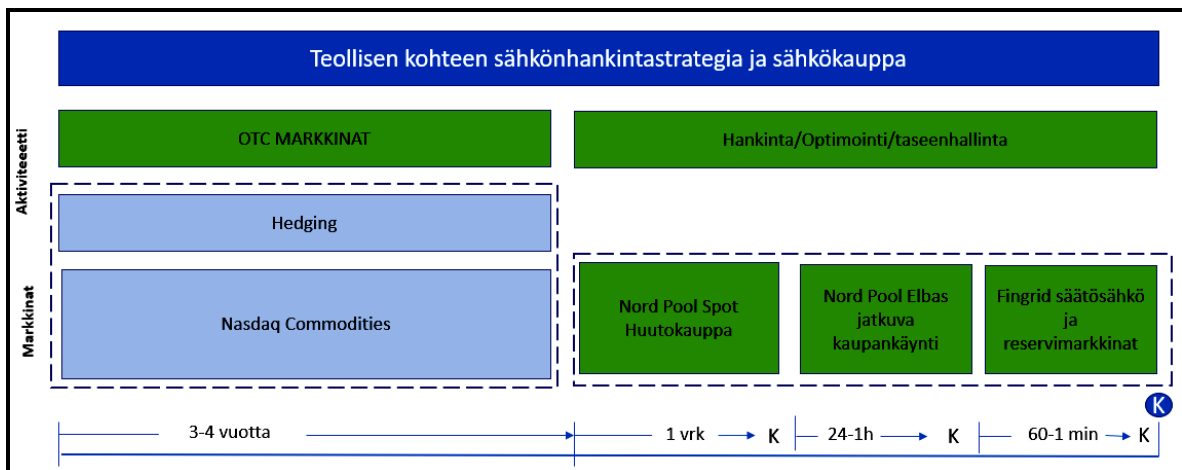
Kuva 27. Fingrid sähköjärjestelmän tila 11.05.2020. (Fingrid 2020j)

Kun tasesähkön hinnat kipuavat tuhansiin euroihin niistä voi aiheutua markkinoilla toimijalle nopeasti suuria tasesähkökustannuksia, jos sähkötase on ollut toimijan kohdalla ylössätötunnilla ennusteeseen nähden virheellinen (tuotanto on ollut pienempi tai kulutus on

ollut suurempi kuin ennustettu). Korkeita tasesähköhintoja ja yleensäkin tasesähköriskejä vastaan voi suojautua yksinkertaisesti ennustamalla oma tuotanto ja kulutus mahdollisimman tarkasti tarpeeseen nähden.

5. TEOLLINEN KOHDE SÄHKÖMARKKINOILLA

Teollisen kohteen sähkönhankinnan kokonaiskustannusten määräytymiseen voidaan pyrkiä vaikuttamaan hankinnan eri prosesseilla. Myös sähkönhankinnan sisäiset järjestelyt pitää olla kunnossa. Hankinta koostuu kokonaisuuksista siten, että ne vaikuttavat osittain toisiinsa. Avainkysymyksiä on löytää kohteelle sopiva kokonaisuus sähkönhankintamallista. Sähkön oston voidaan ajatella sisältävän suojaustoiminnot, spot-hankinnan sekä taseenhallinnan keinot. Taseenhallinta voidaan taas jakaa Elbas-kaupankäyntiin, erilaisiin portfoliomalleihin sekä avoimen toimittajan takaamaan tasesähköön. Myös reservimarkkinat on yksi teollisen kohteen mahdollisuus, jolla se voi osallistua markkinoille kysynnänjouston tai omien sähköntuotantolaitosten kautta. Outokumpu Tornio osallistuu tällä hetkellä sää-
tösähkömarkkinoille *mFRR:n* nopean häiriöreservin kautta tiettyjen prosessipaikkojen kulu-
tusta pudottamalla Fingridin hyväksymän säätötarjouksen jälkeen. Outokummulla ei ole omia sähköntuotantolaitoksia. Kuvassa 28 on esitetty eräs toimintamalli teollisen kohteen sähkönhankintakokonaisuudesta. Kuvassa esiintyvä K-kirjain tarkoittaa ”käyttöhetkeä”.



Kuva 28. Periaatekuva teollisen kohteen sähkönhankintamallista.

Kuvassa on esitetty vaaleansinisellä johdannaiskauppojen kautta tapahtuvat sähkön hinnan suojaus (hedging) sekä muut toiminnot. Johdannaiskauppojen tuotteet sekä niiden perustoimintaperiaatteet ovat esitelty luvussa 3.4.2.

Koska työn päätavoitteena on fyysisen sähkönhankinnan, ennustetarkkuuden ja sitä kautta tasehallinnan kehittäminen niin johdannaisia ei enää tässä työssä käsitellä sen tarkemmin.

Koska teolliset kohteet tietävät sähkön peruskulutustarpeensa vuosiksi eteenpäin niin sähkön perustarve hankitaan yleensä kahdenkeskeisiltä OTC-markkinoilta, jopa useita vuosia ennen käyttöhetkeä. Kun sähkön perustarve on saatu tyydytettyä niin seuraavaksi sähkön hinta suojataan pörssin pitkillä johdannaissovimuksilla. On tärkeä huomata, että johdannaistuotteilla kauppaa käyminen on finanssikauppaa eikä johda sähkön fyysiseen toimitukseen. Loppuosa fyysisestä sähkön hankinnasta, avoimen position osalta, hankitaan lopuksi Elspot-sähköä Nord Pool sähköpörssistä, kun sähkönkulutuksen ennusteet ovat tarkentuneet lähempänä käyttöhetkeä. (Partanen et al. 2020)

Nykyisin suuren kokoluokan teollinen toimija voi osallistua myös säätösähkö- ja reservimarkkinoille, joka tarkoittaa käytännössä sähkön myyntiä mutta joka voidaan nähdä myös osana sähkönhankintastrategiaa ja sähkökauppaa. Tämä toiminto on esitetty kuvassa 28 sivu 42 laatikossa ”Fingrid säätösähkö- ja reservimarkkinat”. Se kuinka paljon sähköä hankitaan kiinteillä sopimuksilla/johdannaisilla OTC-markkinoilta tai Nasdaqin Commodities markkinoilta ja kuinka paljon jätetään hankittavaksi spot-markkinoilta riippuvat teollisten toimijoiden omista sähkönhankintamalleista ja strategioista. Siihen voi vaikuttaa muun muassa toimijoiden sähkötarpeen volyymit, sähkön käytön ajallinen jakautuminen vuoden ja päivien jopa tuntien osalle, sähkökustannusten ennustettavuuden tärkeys, maksuajat, likviditeetti, riskien hallinta ja muut strategiset seikat. Osa teollisista toimijoista voi hankkia sähkön pelkästään spot-markkinoilta. Pääperiaatteena sähkömarkkinoilla toimijoilla, sähkön myyjillä ja kuluttajilla, on kuitenkin hankkia sähkö mahdollisimman edulliseen hintaan, mahdollisimman riskittömästi, oikealle ajalle ja oikealla määrällä.

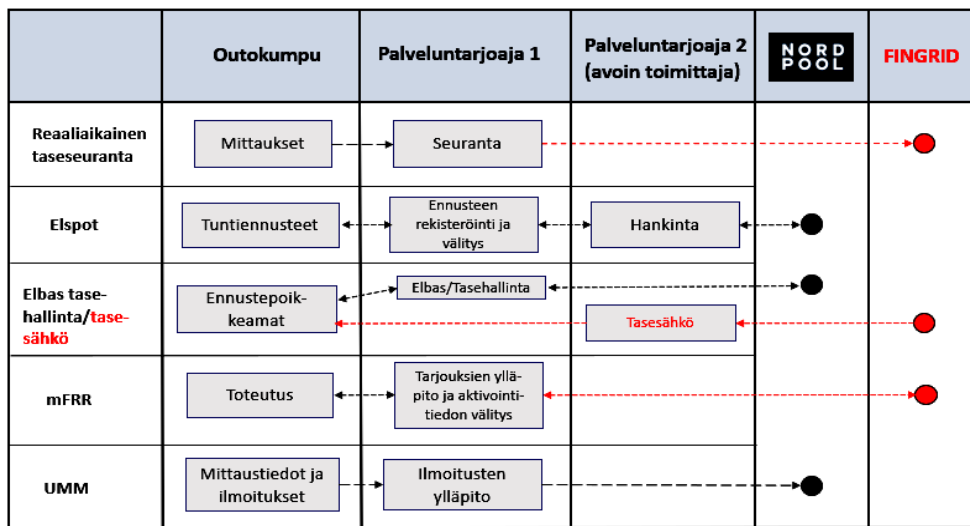
5.1 Outokumpu Tornion sähkönhankintapalveluiden rakenne

Outokumpu Tornion tehtaiden nykyinen sähkönhankinnan operatiivinen prosessi koostuu seuraavista osakomponenteista.

- Kulutusennusteen laatiminen päivittäistä spot-hankintaa varten huomioiden
 - päivittäinen kulutusennuste
 - peruskuormaennuste ja suurimpien kulutuskohteiden omat ennusteet
 - linjojen huoltoajat.
- Päivänsisäisen ennusteen tarkennus huomioiden
 - linjojen häiriötilanteet.

- Blokkitarjousten jättäminen palveluntarjoaja 2:n kautta
- UMM-markkinaviestin määrittäminen ja lähetys yhdessä palveluntuottajan kanssa
- mFRR markkinat:
 - tarjousten jättäminen mFRR markkinoille palveluntarjoajan kautta
 - mFRR toteutus aktivointipyynnöstä.

Outokumpu Oyj ostaa suuren osan sähkömarkkinoihin liittyvistä toiminnoista palveluntuotona. Palveluiden hankkimisen etuna kolmannelta osapuolelta voidaan nähdä olevan omien resurssien tehokas hyödyntäminen ydintoimintoihin, palvelun kilpailuttamisen tuoma kustannustehokkuus sekä nykyaikaisuus ja palveluun liittyvien työkalujen ja järjestelmien hyödyntäminen. Palveluntuottajien tehtävä on kehittää palvelujaan mahdollisimman asiakaslähtöisesti markkinoiden ja regulaatioiden määrittämissä raameissa ja mahdollisten uusien sähkömarkkinatuotteiden mahdollistaminen ja implementoiminen asiakasrajapintaan. Tällä varmistetaan asiakkaan kyky toimia sähkömarkkinoilla mahdollisimman tehokkaasti huomioiden asiakkaan tuotantolaitoksien ja prosessien mahdollisuudet. Kuvassa 29 on havainnollistettu Outokumpu Tornion sähkönhankintapalveluiden periaatteellinen rakenne ja siihen liittyvät toiminnalliset mekanismit.



Kuva 29. Outokummun sähkönhankintapalveluiden toiminnallinen rakenne.

Outokummun sähkönhankintapalveluissa on mukana tällä hetkellä kaksi palveluntarjoajaa. Palveluntarjoaja 1 keskittyy Tornion tehtaiden yhteydenpitoon, tiedonvaihtoon sekä tasehallintaan. Palveluntarjoaja 2 keskittyy spot-hankintaan sekä avoimeen sähkötoimitukseen.

5.2 Kulutusennusteen laadinta

Nykyisin kulutusennuste laaditaan kerran viikossa torstaisin palveluntarjoaja 1:n järjestelmään seuraavan viikon jokaiselle päivälle ja tunnille yksittäisistä kulutuskohteista (Ferrokromiuunit, Ferrokromi yhteiset, Kemin kaivos sekä Outokumpu Stainless valokaariuunit) sekä Outokumpu Stainless ”muut” summattavasta osuudesta, joka koostuu noin 105 MW:n suuruusluokan sähkötehosta. Kulutusennuste perustuu käytännössä tuotantolinjojen ajotilanteisiin ja seisokkitietoihin peruskulutuksen lisäksi. Ennuste lähetetään palveluntarjoajalle 1. Ennustetta päivitetään tarvittaessa Outokummun henkilöiden toimesta tuotantosastoilta saatavien tietojen avulla, mikäli ennusteeseen on tullut muutoksia. Ennusteeseen tulee muutoksia, kun tuotantolinjat muuttavat seisokki- ja huoltoaikoja sekä yllättävistä linjojen häiriöistä. Mikäli seisokki- ja huoltoaikojen muutos ennättää ennusteeseen ennen seuraavan päivän spot-hankintaa niin palveluntarjoaja 2 hankkii spot-sähkön uuden ennusteen mukaisesti. Käytännössä tällä toiminnolla tehdään siis ajantasaisista ennustetta seuraavalle spot-vuorokaudelle spot-hankintaa varten. Häiriötilanteissa ennustemuutokset ja niiden mahdollinen kesto ilmoitetaan puhelimella palveluntarjoaja 1:lle pääosin vuoromestareiden toimesta, jolloin kuluttamatta jäävä sähkö on mahdollista myydä Elbas-markkinoilla tai jättää tasesähkömarkkinoille. Ennusteen tekeminen ja päivitys on pitkälti manuaalinen prosessi. Sen tarkkuus ja ajantasaisuus ja sitä kautta tasesähkökustannukset riippuvat tämän manuaalisen työn laadusta. Ennustusprosessista voidaan tunnistaa seuraavia kehitettäviä asioita kuten:

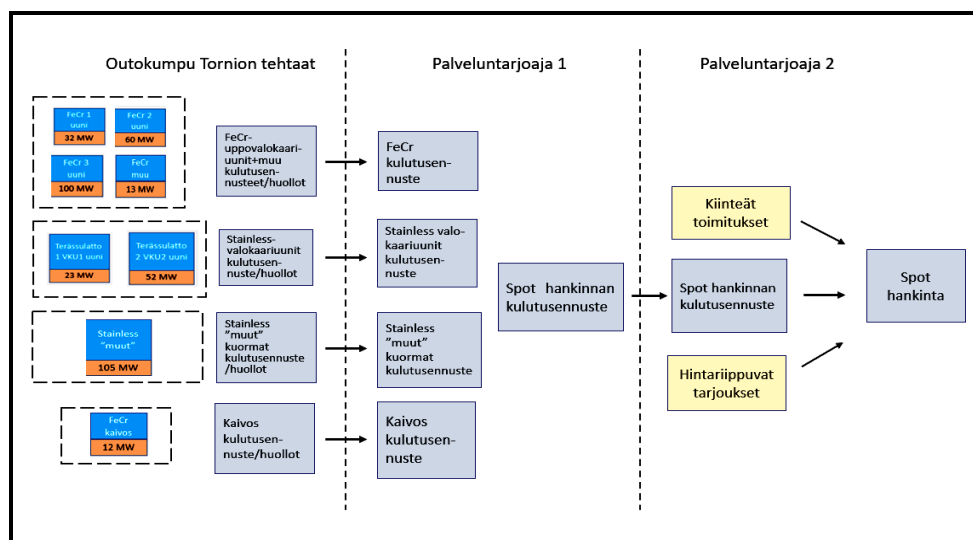
- henkilöriskin pienentäminen
- summaennusteen (Stainless ”muut”) pilkkominen pienempiin osiin
- ennusteprosessin automatisointi Outokummun päässä
- tasesähkökustannusten seuraaminen kohteittain
- varautuminen 15 minuutin taseeseen.

Henkilöriskiä voidaan pienentää automatisoinnilla, jolloin spot-ennusteen tekeminen tulee suurilta osin automaation kautta tehtaiden ja osastojen itse tekeminä. Tämä tarkoittaa erillisen EMS:n hankkimista jonka Outokumpu Tornio on hankkinut vuonna 2020. Koska Outokumpu Stainless ”muut” kulutuksessa on noin 105 MW summateho, joka koostuu useista erillisistä tehdasosastoista, on kustannusten kohdistaminen ja toiminnan kehittäminen vaikeaa. Yleisesti voidaan todeta toimintamallin kehittämisen olevan helpompaa silloin kun kustannuksia voidaan kohdentaa aiheuttamisperiaatteen mukaisesti yrityksen sisällä. Kun

summato 105 MW pilkottaa vähintään tehdasosastotasolle, tällöin tasesähkökustannukset on helpompi osoittaa sen aiheuttajille. Tämä kannustaa tehdasosastoja tarkempaan sähkönkulutusennustamiseen, joka käytännössä tarkoittaa tarkempaa huoltoseisokkien sekä linjojen ajotilanteiden ilmoittamista. Myös linjojen häiriötilanteissa vuoromestareiden kynnys ilmoittaa lyhyetkin tuotantokatkokset EMS-järjestelmään mataloitune.

5.3 Nykyinen Elspot-hankinnan prosessi

Kuvan 30 avulla voidaan havainnollistaa nykyisen spot-hankinnan prosessi.



Kuva 30. Elspot-hankinnan prosessi.

Sähkönkulutusennusteprosessi tulevalle viikolle lähtee liikkeelle ennustamalla sähkönkulutus eri tehdasosastojen prosessien ajotilanteet ja huollot huomioon ottaen. FeCr-sulattojen oppovalokaariuunit ottavat toimiessaan melko stabiilin kuorman ja seuraavan viikon ennusteeseen niiden kulutus ennustetaan sen hetkisen tehonkulutuksen perusteella pois lukien uunien viikkohuoltoseisokkiajat. Stainless valokaariuunien osalta ennuste tehdään keskituntitehoennusteena pois lukien suunnitellut viikkohuoltoseisokit. Stainless valokaariuunit ovat tyypillisiä panosprosesseja. Sulatusajat vaihtelevat riippuen romun laadusta, määrästä, romukorien lukumäärästä (yhteen sulatukseen voidaan panostaa yksi-kolme romukoria) ja useista muista prosessiteknisistä syistä. Myös sulatusten väliajat, kaadosta seuraavan sulatuksen alkuun, vaihtelevat riippuen muun muassa siitä joudutaanko uunia huoltamaan (massaus) sulatuksien välillä tai tuleeko muita ongelmia. Edellä mainituista syistä valokaariuunien kulutusennuste tehdään keskituntitehoennusteena. Keskituntitehoennuste

VKU 1:lle on noin 22 MW ja VKU 2:lle noin 52 MW silloin kun uunit ovat jatkuvassa tuotannossa. Kyseiset keskituntikulutusarviot on laskettu pitkiltä aikajaksoilta ja pitävät varsin hyvin paikkaansa, kun uunit ovat normaalituotannossa. Kuvassa 3 sivu 12 esiintyvä Stainless ”muut” kuormat summateho 105 MW pitää sisällään useita eri tehdasosastoja (terässulatot, kuumavalssaamon, kylmävalssaamo 1 ja RAP5). Summateho ennustetaan huomioimalla tehdasosastojen ajotilanteet ja seisokit. Kun tehtaan kulutusennuste seuraavalle viikolle on saatu näin manuaalisesti määritettyä, kopioidaan se järjestelmään ja lähetetään palveluntarjoaja 1:lle. Palveluntarjoaja 1 huolehtii, että ennustetta vastaava markkinaviesti (UMM, Urgent Market Message) tarvittaessa julkaistaan. Tämän jälkeen palveluntarjoaja 1 lähettää kulutusennusteen palveluntarjoaja 2:lle, joka ottaa huomioon ennusteen sekä kiinteät toimitukset spot-sähkön hankintamäärän laskennassa ja asettaa blokkitarjoukset markkinoille. Päivittäisen ennusteen osalta moni vaihe tehdään siis vielä kokonaan tai osittain käsin muokkaamalla huoltojen vaikutusta sähkönkulutuksen ennusteeseen ja lähettämällä se palveluntarjoaja 1:lle. Päivän sisällä (spot-hankinnan jälkeen) ennustetta ei normaalitilanteissa päivitetä tai lähetetä palveluntarjoajalle. Suurien tuotantohäiriöiden kohdalla ennustetta voidaan kuitenkin tarvittaessa päivittää. Suurien häiriöiden yhteydessä mahdollinen UMM tarpeellisuus arvioidaan yhteistyössä palveluntarjoaja 1:n ja Outokummun välillä. Palveluntarjoaja 1 vastaa viestin julkaisusta sähkömarkkinoille tiedoksi. UMM ilmoitus tehdään, kun sähkön kulutus poikkeaa normaalista kulutuksesta yli 100 MW (Fingrid 2014). UMM viesteissä on kyse sähkömarkkinoiden toiminnan läpinäkyvyydestä. UMM ilmoitus koskee myös sähköntuotantoa.

Elsport-hankinnassa on kuitenkin useita manuaalisia työvaiheita, joita voidaan automatisoida ja selkeyttää. Yleensäkin Tornion tehtaan sähkömarkkinoihin ja sähkönkulutukseen liittyvää tiedon hallintaa on syytä kehittää suuntaan, jossa Outokummulla olisi selkeä omistajuus dataan, laaja tähän dataan liittyvä tehokkuuden tarkastelu ja laaja käyttäjäkunta. Tähän tehtävään voidaan käyttää EMS-järjestelmää. Luvussa 6 käsitellään tarkemmin Outokumpu Tornion tulevaa EMS:n määrittämistä.

5.4 Nykyisen sähkönhankinnan toimintamallien kehityskohteet

Nykyisissä toimintamalleissa on tunnistettavissa selkeitä kehityskohteita. Niitä ovat kulutusennusteiden laadinta ja sitä kautta tarkempi spot-hankinta, joka taas vaikuttaa tasesähköriskien hallintaan. Lisäksi tasesähkökustannusten jakoa tehtaan sisällä ei tehdä aiheutta-

misperiaatteen mukaisesti. Kun edellä mainitut kehittämiskohteet ovat hallinnassa saadaan resurssitehokkaampi, muuttuviin tilanteisiin paremmin vastaava ja sitä kautta kustannussäästöjä tuottava malli. Taustalla vaikuttaa lisäksi vahvasti vuonna 2023 15 minuutin taseselvitysjaksoon siirtyminen, jonka markkina- ja regulaatiomuutoksien yksityiskohtia ei vielä tunneta tarkasti. Toimintamalleja voidaan kehittää karsimalla manuaalisia työvaiheita kulutusennusteiden laadinnassa, tarkentamalla ajantasaista kulutusennustetta sekä parantamalla jo olemassa olevien järjestelmien (tuotannonohjaus, tuotannon ennustus, kunnossapitojärjestelmä) integraatioita. Viemällä kustannukset aiheuttajalle tehtaan sisällä ja sitouttamalla osastoja asian kehittämiseen, pystytään toimintamallia viemään suuntaan, jossa toiminta sähkömarkkinoilla on tehokasta ja asioita kehitetään jatkuvasti. Sähkömarkkinoihin liittyvät kustannukset voitaisiin esimerkiksi kohdentaa tasejakson resoluutiolla tapahtuvan laskennan avulla aiheuttamisperiaatteen mukaisesti. Näin jokaiselle tuotantoyksikölle muodostuisi tietoisuus, miten paljon heidän toiminnastaan aiheutuu kustannuksia. Kun tietoa viedään riittävä määrä läpinäkyvästi tehdastasolle asti, luodaan seurattavuutta, jolloin yksiköt voivat tehdä päätöksiä asian parantamiseksi tehokkaasti ja perustellusti.

Kustannusten läpinäkyvää jakoa varten tarvitaan järjestelmä, jossa laskenta, seuranta ja tarvittavat tiedot ovat. Edellä mainitut kehityskohteet mahdollistuvat hankitun EMS:n avulla helpottaen ja tarkentaen Elspot-hankintaa sekä dynaamisen ennustemallin tekemisen ja sen lähettämisen markkinarajapintaan palveluntarjoajalle. Ennusteen ollessa jatkuvaa ja pitkälle automatisoitua, voidaan tasesähkön määrää ja siitä johtuvaa kustannusriskiä alkaa hallitsemaan tehokkaasti eri työkaluilla ja tasehallinnan keinoin. Lisäksi järjestelmätason hyvin määritellyt tiedonvaihdon rajapinnat ovat yhtenä edellytyksenä toimimiseen Fingridin reservimarkkinoilla. Sähkömarkkinoiden muutoksen painottuessa yhä lyhyempien aikajaksojen hallintaan ja kaupankäyntiin, pitää teollisen kohteen pystyä tekemään ennusteita lyhyemmällä aikahorisontilla ja päivittymään tiheämmällä aikaresoluutiolla. Toimintamallin kehittämiseen liittyvät osa-alueet voidaan listata seuraavasti:

- energianhallinjärjestelmän hankinta ja käyttöönotto (hankittu 06/2020) sisältäen
 - integraatio energianhallintajärjestelmään tuotannonsuunnittelusta
 - tarvittavat integraatiot tehtaan sisäisistä järjestelmistä
 - integraatiot tehtaan ulkopuolelle palveluntarjoajille
 - käyttöliittymät eri käyttäjätasolle (läpinäkyvyys).
- tasesähkötustannusten aiheuttamisperiaatteen mukainen jako tehtaan sisällä

- automaattisen ennusteen laskenta
- ennusteen siirto palveluntarjoajille
- käyttöliittymien määrittäminen
- tarvittavat järjestelmäkoulutukset

5.5 Teollisen toimijan kysynnänjousto

Kysynnän joustolla, puhutaan myös kulutusjoustosta, tarkoitetaan joko hetkellisen tehon pienentämistä tai kulutuksen siirtämistä markkinaehtoisesti toiseen ajankohtaan johtuen sähkön markkinahinnasta (Aalto et al. 2012). Markkinaehtoinen jousto tapahtuu pienentämällä sähkönkulutusta korkeiden sähköhintojen aikana, mikäli se on prosessiteknisesti mahdollista. On selvää, että tehdasta ei kannata pitää täysillä käynnissä, jos tarvittavan sähkön arvo on suurempi kuin sen avulla tehdyn tuotannon arvo. Tällöin teollinen toimija voi menetellä esimerkiksi siten, että jätetään ostamatta korkeahintaiset Elspot-tunnit ja yrittää hankkia vastaava määrä päivän sisäisiltä (Intra-Day) Elbas-markkinoilta halvemmalla. Mikäli Elbas-hankinta halvemmalla hinnalla ei onnistu, tai onnistuu osittain, voidaan kulutusta silloin vähentää seuraavana päivänä kalliiden sähköhintatuntien aikana hankkimatta jääneen sähkön määrän verran. Elspot-hintaan perustuvassa markkinaehtoisessa kysynnänjoustossa ei ole kyse reservimarkkinoille osallistumisesta vaan sähkönkulutuksen ja sitä kautta tuotannon mukauttamisesta vasten sähkön hintaa.

Toinen tapa teollisella kohteella osallistua kysynnänjoustoon on toimia Fingridin reservimarkkinoilla ja osallistua sitä kautta sähköverkon tehotasapainon ylläpitämiseen ja tarvittaessa tehuhiippujen leikkaamiseen. Fingridin reservimarkkinat on kuvattu luvussa 5.6. Sähköverkko ajautuu joskus epätasapainoon, jolloin omalla sähkökäytön joustolla voidaan auttaa verkon palautumista takaisin tasapainotilaan. Perinteisesti sähköverkon tehotasapainoa on pidetty yllä yksinkertaisesti lisäämällä tai vähentämällä sähköverkon tuotantoa. Osallistumalla näille markkinoille etukäteen sovitulla kapasiteetilla saadaan siitä kyseisen markkinapaikan mukainen korvaus. Markkinoille osallistutaan tekemällä sopimus Fingridin kanssa. Isolla teollisella tuotantolaitoksella, kuten Outokumpu Tornion tehtailla, voi olla huomattavia kulutuskohteita, joita voidaan tarvittaessa säätää ja jopa pysäyttää ilman merkittävää tuotannon menetystä. Oikein mitoitetulla ja oikeassa markkinapaikassa olevalla kysynnänjoustolla voidaan ansaita rahaa.

5.6 Teollisen toimijan mahdolliset kysynnänjouston markkinapaikat

Fingrid tarjoaa reservimarkkinoiden kautta tuotteita, joihin teollinen toimija voi tarvittaessa osallistua. Taulukossa 5 on lueteltu nämä tuotteet, tuotteiden ominaisuudet ja keskimääräiset korvaukset kapasiteetista vuoden 2020 hinnoin.

Taulukko 5. Reservien markkinapaikat, niiden toiminnalliset ominaisuudet sekä keskimääräiset korvaustasot vuonna 2020. (Fingrid 2020a, Fingrid 2020b)

	FFR Nopea taajuusreservi	FCR-D Taajuusohjattu häiriöreservi	FCR-N Taajuusohjattu käyttöreservi	aFRR Automaattinen taajuudenhallintareservi	mFRR Säätösähkömarkkinat	mFRR Säätökapasiteettimarkkinat
Sopimustyyppi	Tuntimarkkinat vain osalle tunneista riippuen verkon inertiasta	Vuosi- ja tuntimarkkinat	Vuosi- ja tuntimarkkinat	Tuntimarkkinat	Tuntimarkkinat	Viikkomarkkinat
Minimi tarjouskoko	Tarve riippuu verkon inertiasta sekä mitoitettavan vian suuruudesta	Min 1 MW	Min 0,1MW	Min 5MW	5 MW elektroninen aktivointi 10 MW manuaalinen aktivointi	5 MW elektroninen aktivointi 10 MW manuaalinen aktivointi
Aktivoituu	Suurissa taajuuspoikkeamissa pienen inertian tilanteissa	Suurissa taajuuspoikkeamissa. Voimalaitokset: useita kertoja vuorokaudessa. Relekytketyt tai vastaavalla tavalla pois kytkettävät kuormat: muutaman kerran vuodessa	Useita kertoja tunnissa. Paikallinen taajuusmittaus	Useita kertoja tunnissa. Fingrid aktivoi elektronisesti tarjouskokojen suhteessa 100% 2 min	Fingrid aktivoi reservin tarjouksien ja säätötarpeen mukaisesti tekniset reunaehdot huomioon ottaen joko soittamalla tai muulla sovitulla tavalla esim elektronisesti	Finfrid aktivoi reservin tarjouksien ja säätötarpeen mukaisesti tekniset reunaehdot huomioon ottaen joko soittamalla tai muulla sovitulla tavalla esim elektronisesti
Vaatus aktivoitumiselle	Ylösäättö Erittäin nopea tehovaste suurissa alitaajuushäiriöissä 1.3s/49.7Hz, 1.0s/49.6Hz, 0.7s/49.5Hz	Ylösäättö Voimalaitokset lineaarisesti 49.9-49.5 Hz. F=49.5Hz 5s 50%, 30s 100%. Relekytketyt tai vastaavalla tavalla poiskytkettävät kuormat 49,7Hz 5s, 49,6Hz 3s tai 49,5Hz 1s	Ylös/alas lineaarisesti 49.9Hz-50.1 Hz koko ajan. 0.1 Hz:n muutos 100% 3 min	Ylös/Alas. Pelkästään toisen suunnan voi myös tarjota	Erikseen ylös- ja alassäätötarjouksia 100% 15 min	Erikseen ylös- ja alassäätötarjouksia 100% 15 min
Keskimääräiset korvaustasot vuonna 2020	Noin 20-100€/MW,h	Noin 2€/MW,h vuosimarkkinoilla. Tuntimarkkinoilla noin kahdesta eurosta kymmeneen euroihin/ MW,h	Noin 13€/MW,h vuosimarkkinoilla ja kymmeniä euroja/MW,h tuntimarkkinoilla	Kymmeniä euroja/MW,h. Nykyisin vain osalle vuorokauden tunneista	Aina parempi kuin spot-hinta. Hinta voi nousta satoihin jopa tuhansiin euroihin	Noin 30-140€/MW,h

*Korvaustasojen hinnat ovat viitteellisiä. Tarkemmat ehdot ja hinnoitteluperiaatteet löytyvät Fingridin sivuilta.

Reservien markkinapaikat menevät osittain ristiin toisiinsa ja käyttötarkoitukseensa nähdessä. Taulukkoa hyväksi käyttäen voidaan kuitenkin tehdä perusanalyysi Tornion tehtailten sopivista joustoista.

FFR nopea taajuusreservi ylösäättöön. Sopii joustolle, joka kykenee joustamaan erittäin nopeasti verkon alitaajuustilanteissa. Sähkön tuotannossa tehon lisäys. Kulutuksessa kulutuksen vähentäminen. Käytännössä kuormien pitää joustaa noin yhdessä sekunnissa ja jouston kesto pitää olla vähintään yksi tunti. Se rajaa pois hitaammin säädettävät kuormat.

Markkinoille voisi osallistua esimerkiksi sopivalla irti kytkettävällä relekuormalla, akustolla tai nopeasti säädettävällä taajuusohjatulla kuormalla. Aktivointi paikallisesta taajuusmittauksesta. Mahdollisia tähän markkinapaikkaan sopivia kuormia ei löytynyt. Vaadittava taajuusvaste on niin nopea, että se rajaa käytännössä kaikki sopivat prosessikuormat sen ulkopuolelle koska ensinnäkin vaikutus itse prosessiin saattaa aiheuttaa arvaamattomia seurauksia, mikäli nopeasti pois pudotettava kuorma löytyisikin.

FCR-D taajuusohjattu häiriöreservi ylössäätöön. Sopii ylössäätöön kykenevälle joustolle. Tuotannossa tehon lisäys. Kulutuksessa kulutuksen vähentäminen. Jouston aikavaste on hitaampi kuin FFR:ssä. Joustavat kuormat voivat olla samoja kuin FFR:ssä. Joustavia kuormia voi löytyä enemmän taajuusohjattujen kuormien puolelta (löytyy enemmän prosessipaikkoja, jossa kuorman pudotus onnistuu hitaammin muttei niin nopeasti kuin FFR vaatisi). Aktivointi paikallisesta taajuusmittauksesta. Tähän markkinapaikkaan sopisi esimerkiksi ilmastointien ja puhaltimen tehojen vähentäminen. Tällaisia ei juurikaan löytynyt Outokumpu Tornion tapauksessa. Osin syy oli tekninen ja osin kustannuskysymys.

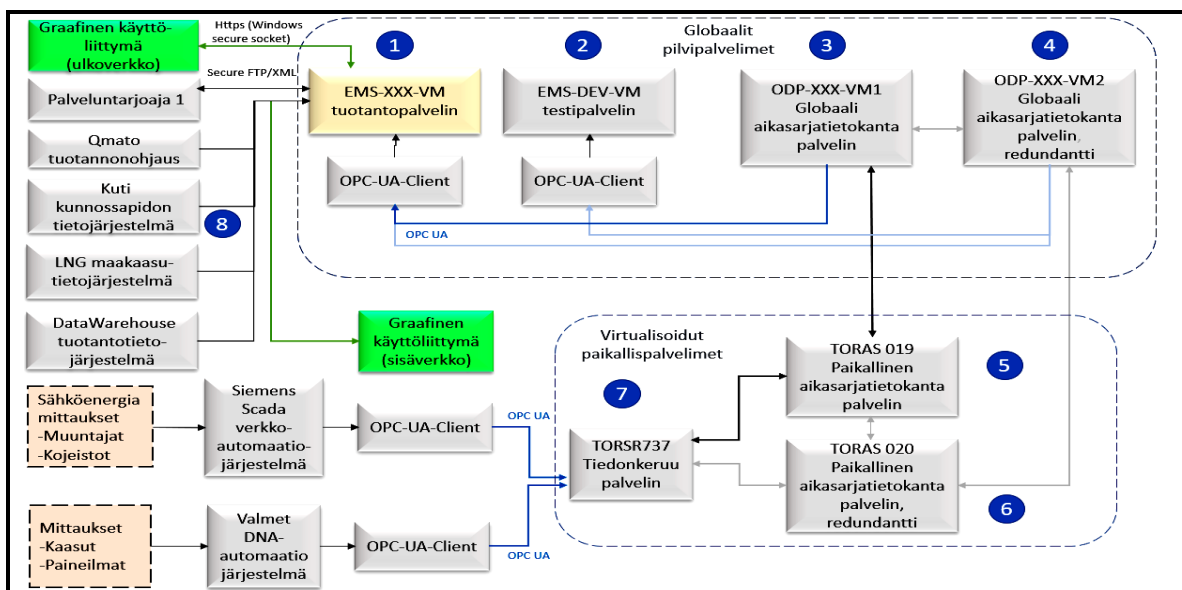
FCR-N taajuusohjattu käyttöreservi. Aktivointi paikallisesta taajuusmittauksesta. Vaatii ylös/alas säädettävyyden. Säättöjä tapahtuu useita kertoja tunnissa. Tälle markkinapaikalle voisi osallistua esimerkiksi FeCr-tehtaiden uppovalokaariuunit silloin kun tehdas käy jostakin syystä vajaakapasiteetilla (esimerkiksi ferrokromin markkinatilanteen takia). Käytännössä uunit olisivat tällaisessa tilanteessa ikään kuin vesivoimalaitoksia käyden vajaateholla säääten tarvittaessa ylös tai alas. Asia on syytä selvittää olisiko tällainen mahdollista prosessiteknisesti ja kuinka paljon tällaista kapasiteettia uuneista olisi löydettävissä.

aFRR automaattinen taajuudenhallintareservi. Joko ylös- tai alassäätö mahdollinen. Fingrid aktivoi reservin elektronisesti. Vaatii nopeat tietoliikenneyhteydet Fingridin ja tehtaan välille. Ei ole tänä päivänä sinänsä ongelma. Lisäksi tehtaan sisäiset tietoliikennejärjestelyt eri prosessipaikkojen välillä ovat jo olemassa. aFRR reservi menee päällekkäin käytännössä FCR-D:n ja FCR-N:n kanssa poiketen lähinnä aktivointitavasta. aFRR:n hankintaa tehdään normaalisti aamun tai illan tietyille tunneille. Aktivointi perustuu yhteispohjoismaisen taajuuden poikkeamiseen tietystä ikkunasta, jonka perusteella Fingrid lähettää tehonmuutossignaalin hyväksytyyn tarjouksen omaavalle kapasiteetin tarjoajalle. Tämä reservituote sopii Outokummulle mutta vaatii teknisiä selvittelyjä esimerkiksi sopivien tietoliikenneyhteyksien takia.

mFRR säätösähkömarkkinat ja **mFRR säätökapasiteettimarkkinat**. Joko ylös- ja tai alassäätö. Fingrid aktivoi kapasiteetin joko soittamalla tai muulla sovitulla tavalla hyväksytyn tarjouksen omaavalle kapasiteetin haltijalle. Kapasiteetin on oltava käytössä 100 % 15 minuutin sisällä aktivoinnista. mFRR aktivointiheys riippuu tarjotusta kapasiteetista ja hinnasta. Mikäli tarjottu hinta ja kapasiteetti asetetaan riittävän korkeaksi, aktivointi tapahtuu vain muutaman kerran vuodessa. Yleensä näin tapahtuu silloin kun verkosta putoaa iso tuotantolaitos alas, rajasiirto johdoissa on ongelmia tai tuulivoiman ennuste on paljon pielessä. Jos mFRR:ää tarjotaan pienemmällä ja lähempänä spot-hintaa olevilla hinnoilla aktivointeja tulee useammin. Käytännössä **mFRR** säätösähkömarkkinoiden ja **mFRR** säätökapasiteettimarkkinoiden ero on sopimustyyppien välillä jakautuen pelkästään tuntimarkkinoihin ja viikkomarkkinoihin katso taulukko 5 sivu 50. mFRR säätökapasiteettimarkkinat on kehitetty varmistamaan, että markkinoilla on mitoittavaa vikaa vastaava määrä reservikapasiteettia tarjolla myös Fingridin omien ja vuokravoimalaitosten ja huolto- ja korjauskeskeytyksissä. Toisin sanoen, jos Fingridin oma mFRR reservikapasiteetti ei ole syystä tai toisesta käytössä tai jokin näistä laitoksista pysähtyy kesken kaiken, hankitaan puuttuva osa silloin mFRR säätökapasiteettimarkkinoilta. Eli reservit on varmistettu tuplavarmistuksella. Outokumpu osallistuu jo nyt mFRR säätösähkömarkkinoille tietyllä teholla, jonka suuruutta ja tarjottavaa hintataso voisi tarkistaa.

6. EMS JÄRJESTELMÄ

Outokummulle hankitun energianhallintajärjestelmän yksi pääasiallisista tehtävistä on auttaa tehtaan Elspot kulutusennusteen automatisoinnissa, jolloin käsin tehtävä manuaalinen työ vähenisi. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että tehdasosastot kirjaavat jatkossa itsenäisesti linjojensa mahdolliset tuotantoseisokit, huollot sekä pidemmät häiriöajat Kuti-järjestelmään. Kuti-järjestelmästä tieto siirtyy automaattisesti EMS-järjestelmään. Tämä toiminto poistaisi nyt tällä hetkellä tehtaan kulutusennusteen tekijän tarpeettomat puhelinsoitot ja sähköpostiviestittelyt vuoromestareille ja käyttöinsinööreille. Toinen tärkeä tehtävä on ajantasaisen kulutuksen monitorointi ja jatkuvan kulutusennusteen laatiminen, jolloin voidaan puuttua sähkötaseen korjaamiseen nopeammin Elbas-markkinoilla. Järjestelmä voi tehdä automaattisista ennustusta havainnoimalla hetkellistä tehonkulutusta ja sen perusteella päätellä myydäänkö vai ostetaan sähköä seuraavalla tunnilla. EMS-järjestelmän hankinta auttaa myös tehtaan siirtymistä tulevaan 15-minuutin taseeseen ja sen aiheuttamiin toimintatapamuutoksiin. EMS-järjestelmään kuuluu myös tehtaan käyttämien kaasujen kuten häkäkaasun ja nestemäisen maakaasun (LNG), kaukolämmön sekä paineilman mittaus ja monitorointi. Niitä ei tässä työssä käsitellä. Kuvassa 31 on esitetty EMS-järjestelmän periaatekaavio sekä integraatiot tehtaan tuotanto- ja kunnossapitojärjestelmiin.



Kuva 31. EMS-järjestelmän toiminnallinen periaatekaavio sekä tietoliikennejärjestelyt.

Kuvan 31 sivu 53 numeroiden merkitykset.

1. EMS-XXX-VM tuotantopalvelin:

- Energiamonitorointi
- Energiaennusteet
- Laskennat ja raportointi
- Integraatio palveluntarjoaja 1 järjestelmään
- Integraatio terässulattojen Qmato-tuotannosuunnittelutietoihin
- Integraatio Kuti-kunnossapitotietojärjestelmään
- Integraatio Outokumpu DataWarehouse tuotantotietoihin
- Integraatio LNG maakaasutietoihin

2. EMS-DEV-VM

- Testipalvelin

3. ODP-XXX-VM1 Globaali primääri aikasarjatietokantapalvelin

- Yhdistää maakohtaiset aikasarjatiedot maailmanlaajuisesti
- Saa aikasarjatiedot NetSync/VtrinLINK tiedonsiirtoyhteyksien kautta

4. ODP-XXX-VM2 Globaali sekundäärinen (redundantti) aikasarjatietokantapalvelin

- Redundantti aikasarjatietokantapalvelin

5. TORAS019 Tornion paikallinen primääri aikasarjatietokantapalvelin

- Yhdistää Tornion tuotantoyksiköiden (FeCr, SMS, HRM, CRM1, CRM2 (RAP5) aikasarjatiedot
- Saa aikasarjatiedot NetSync/VtrinLINK tiedonsiirtoyhteyksien kautta tuotantoyksikkökohtaisilta tiedonkeruupalvelimilta

6. TORAS020 Tornion paikallinen sekundääri (redundantti) aikasarjatietokantapalvelin

- Redundantti aikasarjatietokantapalvelin

7. TORSR737 Tornion paikallinen tiedonkeruupalvelin

- Kerää energiatietoja OPC-integraatioiden kautta Valmet DNA sekä SCADA automaatiojärjestelmistä.
- Siirtää aikasarjatiedot NetSync/VtrinLINK tiedonsiirtoyhteyksien kautta TORAS019/020 palvelimille.
- Integraatio OPC UA clientin kautta Valmet DNA automaation OPC UA palvelimelle
- Integraatio OPC UA clientin kautta SCADA automaation OPC UA palvelimelle

8. Kuti kunnossapidon tietojärjestelmä

- Tehtaan kunnossapidon tietojärjestelmä
- Suunnitellut seisokit
- Häiriön hallinnat

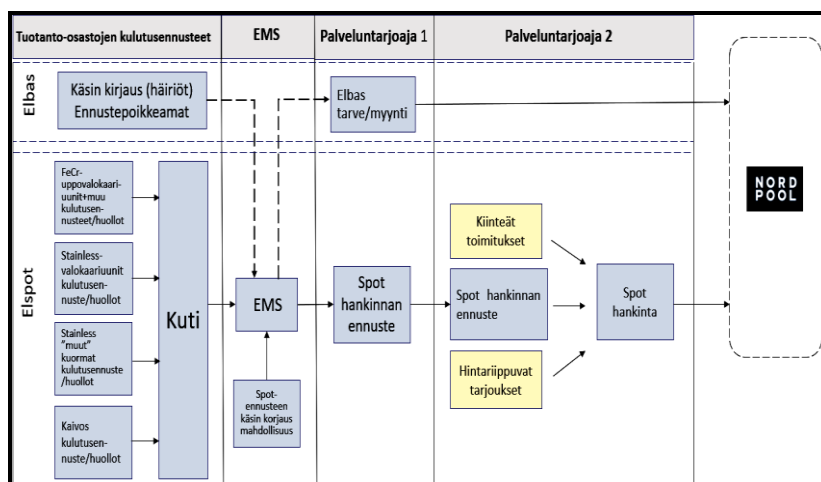
Keskeisin ja tärkein osa EMS:n toiminnallisuudesta tapahtuu EMS-XXX-VM tuotantopalvelimella. Palvelimelta on yhteys myös palveluntarjoaja 1:een, josta taas eteenpäin ovat rajapinnat palveluntarjoaja 2:een ja sitä kautta sähkömarkkinoille sekä Fingridille.

6.1 EMS kulutusennuste Elspot ja Elbas

Jatkossa kulutusennuste on syytä pyrkiä tekemään suoraan EMS-järjestelmään, jolloin erillisen kulutusennusteen tekeminen ja lähettäminen palveluntuottaja 1:lle jäisi pois. Ennusteen tekisivät tuotanto-osastot itse. Kulutusennusteen pohjana toimisi koko tehtaalla käytössä oleva Kuti-järjestelmä katso kuva 31 sivu 53 numero 8, johon tuotanto-osastot kirjaisivat itse seuraavan viikon linjojen käynti- ja huoltoajat, jolloin EMS voisi laskea kirjauksista kulutusennusteet ja tehdä spot viikkokulutusennusteen palveluntarjoaja 1:lle. Kuvassa 32 sivu 56 on esitetty Elspot- ja Elbas-ennusteiden tekeminen kaavioesityksenä EMS:n kautta. Koska linjojen käynti- ja huoltoajat saattavat muuttua viikkokulutusennusteen tekemisen jälkeen on tärkeää, että ne myös päivitetään tuotanto-osastojen toimesta. Tällöin ne voivat ehtiä seuraavan päivän spot hankintaan. Tämä tarkoittaa sitä, että tärkeä työkalu ajantasaisemman spot ennustamisen suhteen tulee olemaan Kuti-järjestelmä EMS-järjestelmän ohella. Stainless ”muut” kulutuksen sisällä on paljon kylmävalssaamo 1:llä olevia pieniä tuotantolinjoja, joiden käynti- ja huoltoajoja ei ole tarkasti määritelty Elspot viikkokulutusennusteeseen. Tarvittava sähkö ostetaan niitä varten pitkälti parhaan arvion

mukaisesti käyttäen hyväksi linjojen pitkäaikaisia keskituntitehoja. Kun näiden pienienkin linjojen kulutusennusteet jatkossa aggregoidaan ja niille määritellään kaikille ajantasaisimmat käynti- ja huoltoajat, tarkentuu myös Stainless ”muut” Elspot-kulutusennuste. Koska tuleva toimintatapa tulee olemaan uusi, varsinkin kylmävalssaamo 1 pienillä tuotantolinjoilla, vaatii se koulutusta ja opastusta keväällä 2021.

Kun jokin linja pysähtyy häiriöön, tai kulutusennustetta pitää korjata jostain muusta syystä, niin muuttunut ennuste on myös syytä viedä EMS:n kautta palveluntarjoaja 1:lle. Tällöin linjan kuluttamatta jäävän sähkön osuuden Elbas-myynti voidaan aloittaa viipymättä seuraaville käyttötunneille, jonka häiriön on arveltu kestävän. Samalla EMS järjestelmään jää aikaleimat tilanteesta, jolloin voidaan jälkikäteen tarkastella syntynyttä tilannetta ja tehdä siitä tarkempaa analyysiä. Nykyisin viestintä häiriötilanteissa palveluntarjoaja 1:lle tapahtuu vuoromestarin puhelinsoitolla mutta jatkossa siitä on syytä opetella eroon. Tämän takia jokaisessa tarvittavassa valvomossa ja vuoromestareiden toimistossa on syytä olla EMS:n käyttöliittymä, jonne häiriö saadaan kirjattua ja sitä kautta palveluntarjoaja 1:n tietoon mahdollisimman nopeasti. Häiriön ja sen keston voi jatkossa kirjata myös prosessipaikan operaattori. Usein operaattoreilla on paras käsitys häiriön tai huollon kestoajoista varsinkin, kun ne liittyvät itse prosessiin. Esimerkiksi kukkupanostukset, uunien massaukset ja muut huollot, tapin jatkamiset tai sekvenssien ja senkan odottelut. Kaikesta toiminnasta jää jälki myös EMS:n sisään aikaleimana, jolloin esimerkiksi häiriöön liittyvää ilmoittamisikäytäntöä ja sen oikea-aikaisuutta voidaan tarkastella ja analysoida myöhemmin ja kehittää sitä eteenpäin.

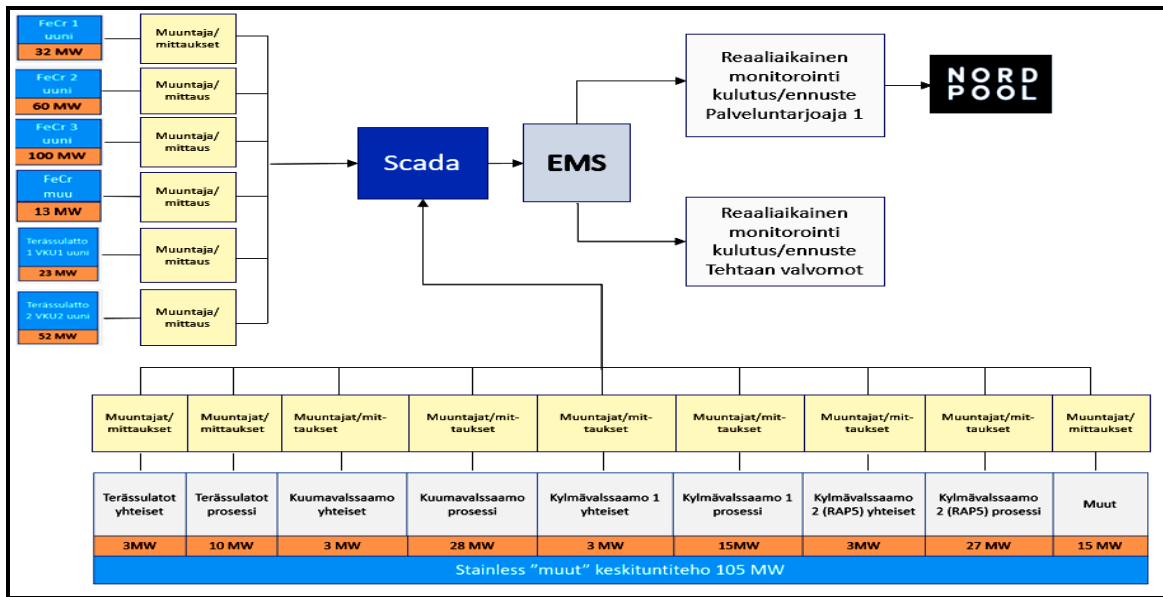


Kuva 32. EMS:n avulla tehtävän Elspot- ja Elbas-hankintamekanismin kuvaus.

6.2 EMS ajantasaisen kulutuksen seuraaminen ja automaattiennuste

EMS-järjestelmän avulla on mahdollista seurata jatkossa tehtaan sähkönkulutusta käytännössä ajantasaisesti linjakohtaisesti, jopa muuntajakohtaisesti, sekä tehdä jatkuvaa laskentaa sekä analyysyjä verrattuna spot-ennusteeseen. EMS-järjestelmän sisään on mahdollista rakentaa sisäisiä laskentaennustealgoritmeja, joiden avulla voidaan pystyä ennakoimaan seuraavan käyttötunnin ja vartin kulutusennuste. Sillä on tulevaisuudessa suuri merkitys, kun siirrytään kohti 15 minuutin taseselvitysjaksoja. Aikaisemmin tehtaan ns. ”pienet” kuormat, esimerkiksi kylmävalssaamo 1:n 20 linjaa, on ennustettu ja arvioitu pitkäaikaisten keskituntitehojen mukaan. Kuormat risteilevät yleensä niin, että niiden keskituntiteho pitkällä aikavälillä muotoutuu tietylle tasolle, joka viedään kulutusennusteeseen sellaisenaan. Tasehallinnan kannalta tulee jatkossa olemaan tärkeää se, että kaikki nämä pienetkin kuormat aggregoidaan ja niiden vaikutus tasehallinnassa otetaan huomioon. Aikaisemmin pienien kuormien risteilyä ja vaikutusta taseeseen ei ole juurikaan pystynyt seuraamaan muuten kuin jälkikäteen toteutuneiden kulutusten perusteella. EMS:n käyttöönoton jälkeen tilanne muuttuu. Jatkossa voidaan seurata kaikkien näiden ”pienien” kulutusten risteilyä ja muodostaa niistä tulevaa ennustetta. Yksi hankalimmista ennustettavista kulutuksista Outokumpu Tornion tehtailla onkin ollut Stainless ”muut” kulutus.

Stainless ”muut” kulutus pitää sisällään edellä mainitut kylmävalssaamon 1:n 20 tuotantolinjaa, RAP5, kuumavalssaamon sekä terässulattojen prosessi sekä yhteiset kulutukset. Kuvassa 37 sivu 62 on esitetty Stainless ”muut” kulutuksen vaihtelua verrattuna ennusteeseen aikavälillä 01.11–09.11 2020. Kuvasta voidaan todeta, että keskimääräinen kulutus asettuu kutakuinkin noin 100–105 MWh/h välille kyseisellä ajanjaksolla mutta tasehallinnan näkökulmasta katsottuna kulutuksessa on sekä oston ja myynnin puolella korkeita noin 20 MWh/h piikkejä. Kuvassa 33 sivu 58 on esitetty mittauksen järjestely EMS:n kautta. Stainless ”muut” kulutuskokonaisuus on pilkottu pienempiin osiin, jolloin päästään käsiksi paremmin sen sisällä risteileviin kuormiin mikä ei ole ollut ennen mahdollista. Koska kaikkien tuotantolinjojen jokaisesta muuntajasta on energiamittaus päästään sillä käsiksi linjakohtaisten huoltoseisokkien ja häiriön aikaisiin tehonkulutuksiin ja sitä kautta paremman ennusteen tekemiseen Elspot- ja Elbas-hankintaa varten. Kuvassa 33 mainittu reaaliaikaisen kulutuksen monitorointi tarkoittaa kolmen minuutin aikasarjoja, jolla tehonkulutus tullaan jatkossa esittämään tehtaan valvomoissa ja siirtämään palveluntarjoaja 1:lle.

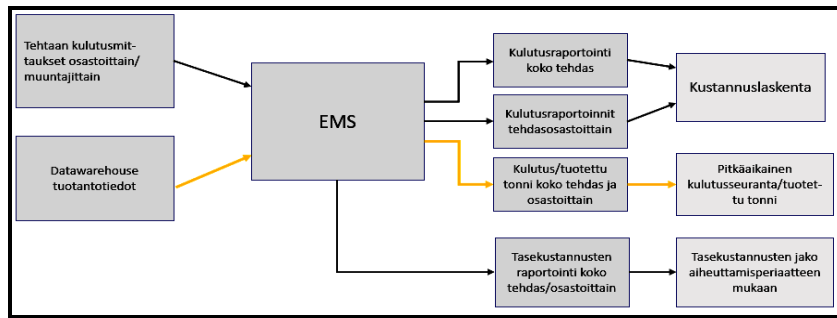


Kuva 33. EMS:n mittaukset ja niiden hyödyntäminen reaaliaikaisessa monitoroinnissa ja mahdollisessa Elbas-hankinnassa.

6.3 EMS raportointi

Tehtaan sähkönkulutusta raportoidaan päivä-, viikko-, kuukausi- ja vuositasolla hakemalla kulutukset palveluntarjoajan 1 tietokannoista ja luomalla niistä tarvittavat raportit käsin. EMS:n käyttöönoton myötä tämä käsin tehtävä raportointi voidaan automatisoida joko täysin tai niiltä osilta kuin se katsotaan tarpeelliseksi. Myös tehtaan kymmenien kustannuspaikkojen sähkönkulutukset ja niiden liittyvät raportoinnit voidaan tehdä automaattisesti poistaen käsin tehtävät selvittelyt ja raportoinnin.

EMS voi laskea ja raportoida myös sähkönkulutukset tuotetulle terästonnille. Niitä varten EMS hakee tuotantotiedot tehtaan datawarehouse-tuotantotietokannasta. Kulutus/tuotettu tonni on prosessien pitkäaikaista seuraamista varten. Pitkän aikavälin trendeissä on mahdollisuus havaita ja tunnistaa prosessiparametrien mahdolliset hitaat muuttumiset, jotka osaltaan voivat aiheuttaa sähkönkulutukseen hitaita muutoksia. Raportointia voidaan tehdä myös tehdasosastojen tasesähkökustannuksista ja jakaa ne osastoille aiheuttamisperiaatteen mukaisesti. Kuvassa 34 sivu 59 on esitetty eräs malli EMS-raportoinnin mahdollisuuksista.

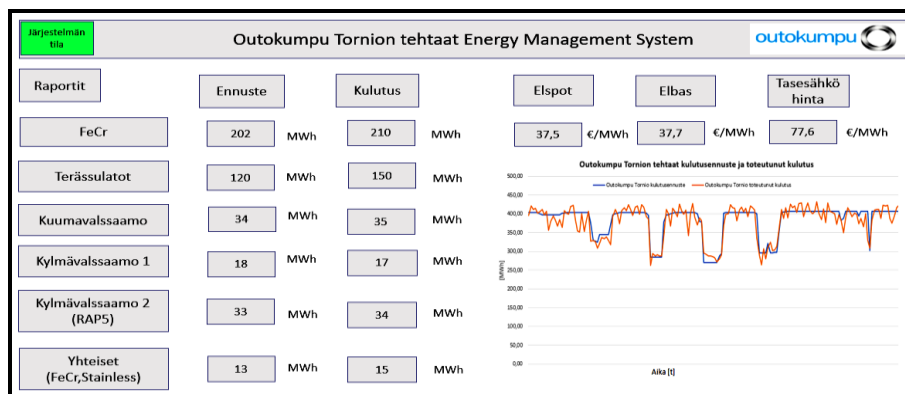


Kuva 34. EMS:n käyttäminen automaattisessa raportoinnissa.

6.4 EMS käyttöliittymät

Kuvassa 35 on esitetty malli, jolla EMS:n käyttöliittymät voisi toteuttaa. Kuvan esimerkki on käyttöliittymien päätasosta, josta pääsee eteenpäin ”syvemmälle” jokaiseen tehtaaseen tarvittaessa jopa muuntajakohtaiseen tarkasteluun. Päätasolla on nähtävillä koko tehdasalueen tehtaiden reaaliaikainen kulutus sekä ennuste, spot-hinta, viimeinen julkistettu tasesähkönhinta sekä piirtona koko tehtaan kulutus ja ennuste. Järjestelmän tilan väri indikoi järjestelmän toimintatilaa. Järjestelmän tila näytetään vihreällä, kun kaikki toimii oikein ja punaisella jos järjestelmä ei toimi oikein tai toimii vain osittain oikein. Kun järjestelmän tila on keltaisella, voidaan se määrittää esimerkiksi mittaus-signaalien puuttumisiksi. Järjestelmän tilan itsediagnosointi ja tilan esittäminen eri värein on tärkeää, jotta vikoihin voidaan puuttua nopeasti.

Elspot-, Elbas- ja tasesähkön hintojen ajantasaisen tiedon tuomisella tuotantoprosessien henkilöstön nähtäväksi voidaan saavuttaa hyötyjä. Kohteissa, joissa operaattorin toiminnalla on suurta merkitystä sähkönkulutukseen ja joissa sähkönkulutuksen vaihtelu on voimakasta, voidaan saada säästöjä aikaan tuomalla toiminnan aiheuttamat kustannukset läpinäkyvästi ja selkeästi esille.



Kuva 35. Esimerkki EMS:n sähkönkäytön päätason käyttöliittymästä.

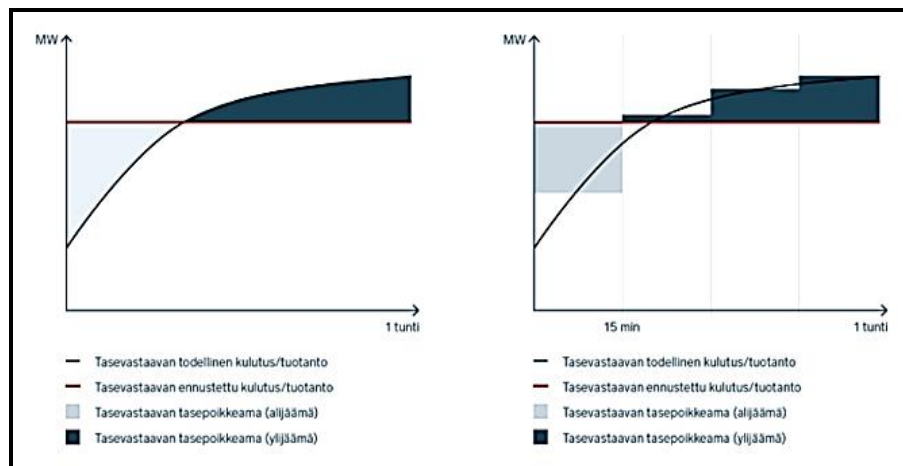
7. TUNNIN TASEESTA 15 MINUUTIN TASEESEEN

Energiasektori on voimakkaassa muutostilassa. Voidaan puhua jopa murroksesta. Elämme nyt tähän murrokseen liittyvää siirtymäkautta ja sen vaikutus kohdistuu koko yhteiskuntaan. Tarkoitus on päästä eroon fossiilisista polttoaineista, joten korvaava energiantuotanto on rakennettava voimakkaammin uusiutuvan energian varaan. Sähköenergiantuotannossa se tarkoittaa tuuli- ja aurinkovoiman kasvattamista. Samaan aikaan tuuli- ja aurinkovoiman, jotka ovat käytännössä joustamattomia energian tuotantomuotoja, volyymien kasvassa vähenee perinteinen säätökykyinen tuotanto. Tämä tarkoittaa sähkömarkkinamallien uudistamista sekä uusien sähkömarkkinatuotteiden luomista koska tapa, jolla sähköenergiaa tulevaisuudessa tehdään, tulee muuttumaan. Energian tuotannon ja kulutuksen tasapainotus täytyy toimia myös uudella sähköntuotantorakenteella markkinahintojen ohjaamana mahdollisimman kustannustehokkaasti. Näiden syiden vuoksi Euroopassa ja Pohjoismaissa Suomi mukaan lukien siirrytään kohti reaaliaikaisempia markkinoita ja lyhyempää taseselvitysjaksoa. Ideana lyhyemmässä tasejaksossa on se, että sähkökuluttajat ja tuottajat pyrkivät entistä tarkemmin ennustamaan kulutuksensa ja tuotantonsa, jolloin tehotasapainon poikkeamista aiheutuvat kustannukset jyvittyvät tarkemmin niille, jotka poikkeuttavat tehotasapainoa. Koska tasesähkön hinta poikkeaa lähes aina spot-hinnasta, on tasesähkökustannukset voimakas ajuri sähkömarkkinoilla toimijoille tehdä sähkönkulutuksen nusteensa mahdollisimman tarkasti. 15 minuutin taseselvitysjaksoon siirryttäessä tulee esiin myös ne tasepoikkeamat, jotka tunnin taseessa netottuvat eli kumoavat toisensa ollen kuitenkin merkityksellisiä itse tehotasapainon ylläpidossa. 15 minuutin selvitysjaksoon siirtyminen tuo markkinoille uusia tuotteita. Muun muassa pyrkimys on siihen, että Elbas-kauppaa voitaisiin käydä käyttövarttiin saakka Suomen sisällä (Heikka 2020). Toimittaessa yhteisillä markkinoilla ovat yhdenmukaiset säännöt tarpeen. Eurooppalaisen tasehallinnan suuntaviivat velvoittavat EU:n jäsenvaltioita siirtymään vuoden 2020 loppuun mennessä 15 minuutin taseselvitysjaksoon. (Fingrid 2020i, EU 2017/2195)

Tätä työtä kirjoitettaessa Ruotsin, Norjan, Tanskan ja Suomen kantaverkkoyhtiöt ovat hakenet lykkäystä edellä mainittuun aikatauluun siten, että 15 minuutin taseselvitysjakso astuisi voimaan vuoden 2023 toisella neljänneksellä.

Kuvassa 36 sivu 61 on havainnollistettu tunnin ja 15 minuutin taseen vaikutusmekanismit. Kuvassa esiintyvä vasemmanpuoleinen graafi kuvaa tilannetta tasevastaavan tunnin tasees-

sa. Tasevastaava voi olla tunnin sisällä reilusti yli- tai alijäämäinen, jos tunnin sisällä poikkeamat kumoavat toisensa. Tällöin olet toiminut sähkömarkkinoiden edellyttämällä tavalla etkä ole tehnyt tasevirhettä. Tasevastaavan hetkelliset suuretkin tasepoikkeamat maksavat muut sähkömarkkinoilla toimijat. Kuvassa esiintyvä oikeanpuoleinen graafi kuvaa tilannetta, jossa tasevastaavalla on samanlainen tuotanto- tai kuormitusprofiili kuin vasemmassa graafissa. Tällöin 15 minuutin taseessa ensimmäisellä vartilla tulee alijäämäinen tasepoikkeama ja kolmella viimeisellä vartilla ylijäämäiset tasepoikkeamat. Tasepoikkeamat ennustetusta tuotannosta tai kulutuksesta johtavat tasesähkön hankintaan, jotka aiheuttavat lähes poikkeuksetta tasesähkökustannuksia, joiden kustannusvaikutus riippuu sen hetkisestä ylös- tai alassäätötilanteesta ja tasesähkön hinnasta.



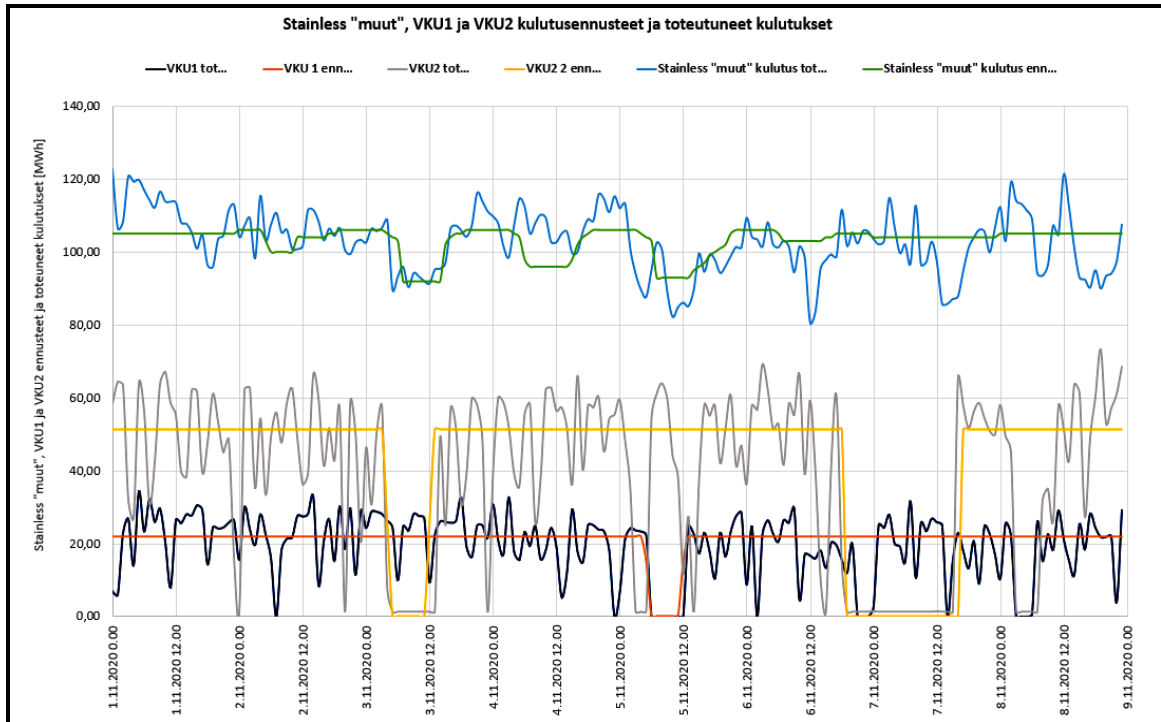
Kuva 36. Tunnin ja 15 minuutin taseselvitysjakson vaikutusmekanismit. (Fingrid 2020i)

7.1 Outokumpu Stainless Oy kulutusennuste ja toteutunut kulutus

Kuvassa 37 on esitetty Outokumpu Stainless ”muut” sekä VKU1 ja VKU2 ennustetut ja toteutuneet kulutukset ajanhetkeltä 01.11- 9.11.2020. Aikasarja koostuu autenttisesta tunnin resoluutiolla olevasta datasta. Kuvassa kaksi ylintä graafia on Stainless ”muut” ennuste ja toteutunut kulutus. Siitä voidaan päätellä kulutuksen vaihtelevan ennustettuun nähden huomattavasti tuntien välillä. Graafeista voidaan todeta myös, että kulutus on välillä useita tunteja suurempaa kuin on ennustettu ja päinvastoin.

Maksimissaan vaihtelut ovat +/- 20 MWh/h ennusteesta kuitenkin siten, että keskimääräinen keskituntiteho asettuu suurin piirtein ennusteen tasolle. Kuvan keskimäiset ja alimmat graafit kuvaavat VKU2 ja VKU1 ennustetta sekä kulutusta. Graafeista voidaan havaita, kuinka uunien tehonkulutus vaihtelee ennustettuun nähden niiden ollessa tuotannossa.

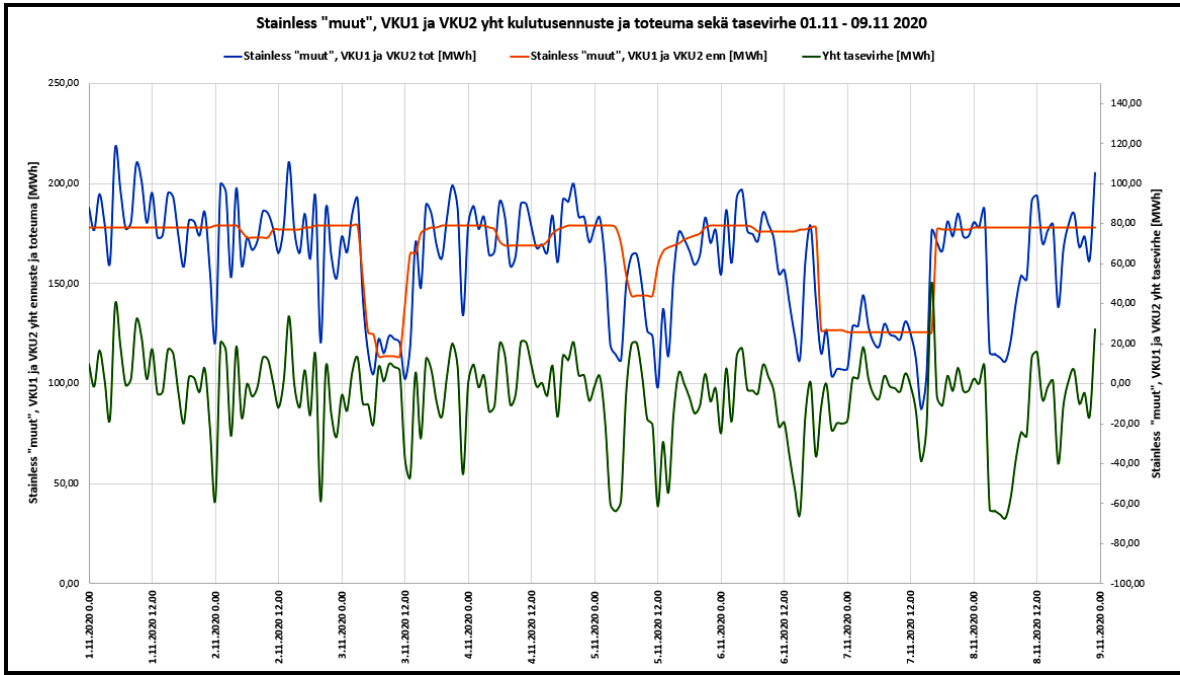
Piirto on tehty tuntitason aikasarjasta, joka tasoittaa uunien kulutuspiikkejä todellisuuteen nähden. Todellisuudessa uunien aiheuttama kuormitusvaihtelu tunnin sisällä on huomattavasti rajumpaa, kun sitä tarkastellaan sekunti ja minuuttitasolla.



Kuva 37. Outokumpu Stainless ”muut”, VKU1, VKU2 kulutusennusteet ja toteumat.

Kuvassa 38 sivu 63 on yhdistetty Stainless ”muut”, VKU1 ja VKU2 kulutukset ja kulutusennusteet sekä niiden yhteinen tasevirhe aikavälillä 01.11–09.11 2020 samaan kuvaan. Kuvassa näiden kolmen kulutuskohteen tehot risteilevät satunnaisesti. Kuvia 37 ja 38 vertaamalla voidaan päätellä, että suurimmat tasevirheet syntyvät, kun VKU1 ja VKU2 sulatussyklit käynnistyvät samaan aikaan sekä Stainless ”muut” kulutuksella on maksimikuormitus. Näin käy kuvassa 38 esimerkiksi kohdassa 01.11 noin klo 05:00. Tällöin tasevirhe on luokkaa 40 MWh/h. Kohdassa 05.11 noin klo 03:00 käy toisinpäin. Silloin VKU2 on seis ja Stainless ”muut” kulutus on pienimmillään, jolloin tasevirheeksi muodostuu noin -60 MWh/h.

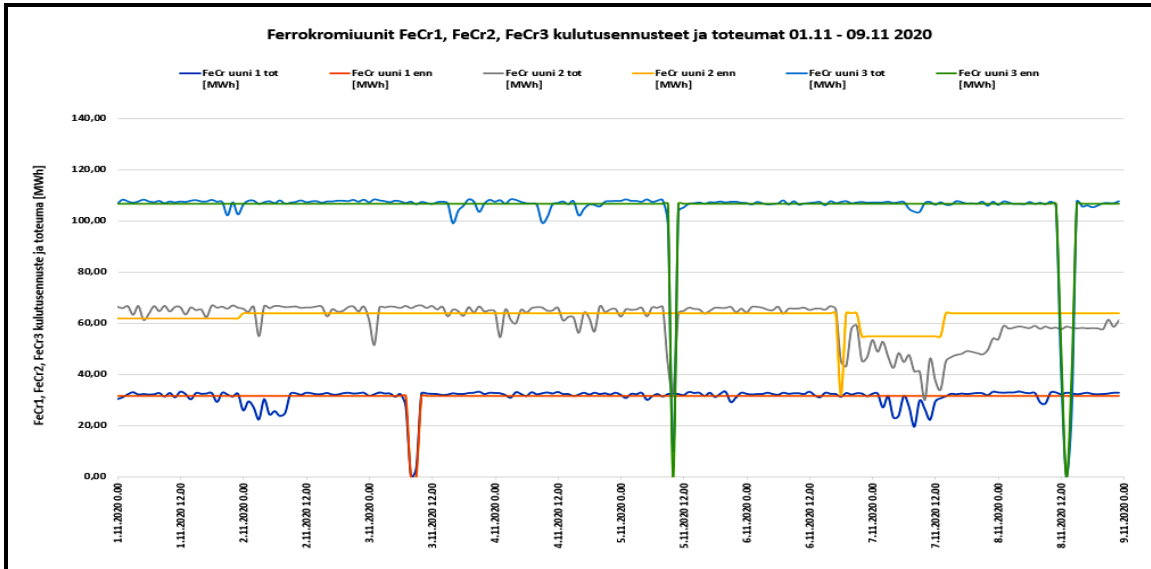
Kuvien 38 perusteella voidaan todeta myös, että Outokumpu Stainless Oy:n yhdistetty kulutus vaihtelee huomattavasti ennustettuun nähden. Dominoivin yksittäinen elementti on VKU2:n tehonvaihtelut.



Kuva 38. Stainless ”muu”, VKU1 ja VKU2 yhdistetty kulutus ja toteuma.

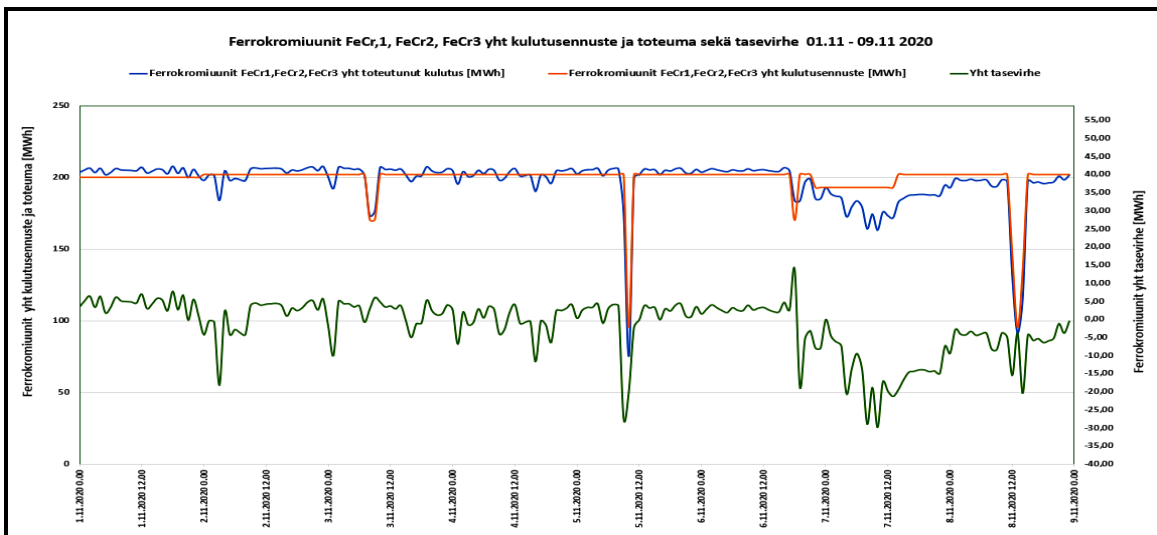
7.2 Outokumpu Chrome Oy:n kulutusennuste ja toteutunut kulutus

Kuvassa 39 sivu 64 on esitetty Outokumpu Chrome Oy:n uppovalokaariuunien kulutusennusteet ja toteutuneet kulutukset jokaiselta uunilta aikavälille 01.11–09.11 2020. Aikasarja koostuu autenttisesta tunnin aikaresoluutiolla olevasta datasta. Kuvasta voidaan päätellä uunien ottavan huomattavasti tasaisemmin kuormaa kuin Outokumpu Stainless Oy:n valokaariuunit VKU1 ja VKU2. Myös huoltoseisakeiden ajoitus on uuneilla tarkempaa. Prosessimielessä ferrokromiuunit ovat jatkuvatoimisia. Uuneissa on teho koko ajan päällä niin raaka-aineiden syötön kuin tyhjennyksien aikana. Kuvassa esiintyvät suuret tehopiikit alaspäin ovat uunien huoltoseisokkeja, jolloin tehot käytetään kokonaan pois. Kuvasta on huomattavissa myös, että FeCr 2 uuni on ottanut huonosti tehoa ennusteeseen nähden aikavälillä 06.11 klo 18:00–09.11 klo 00:00. Ennustetta on pyritty korjaamaan (keltainen graafi) muttei tarpeeksi. Kyseiset vaihtelut ovat ferrokromiuuneilla ominaisia ja niitä sattuu aika ajoin.



Kuva 39. Ferrokromiuunit FeCr1, FeCr2, FeCr3 kulutusennusteet ja toteutunut kulutus.

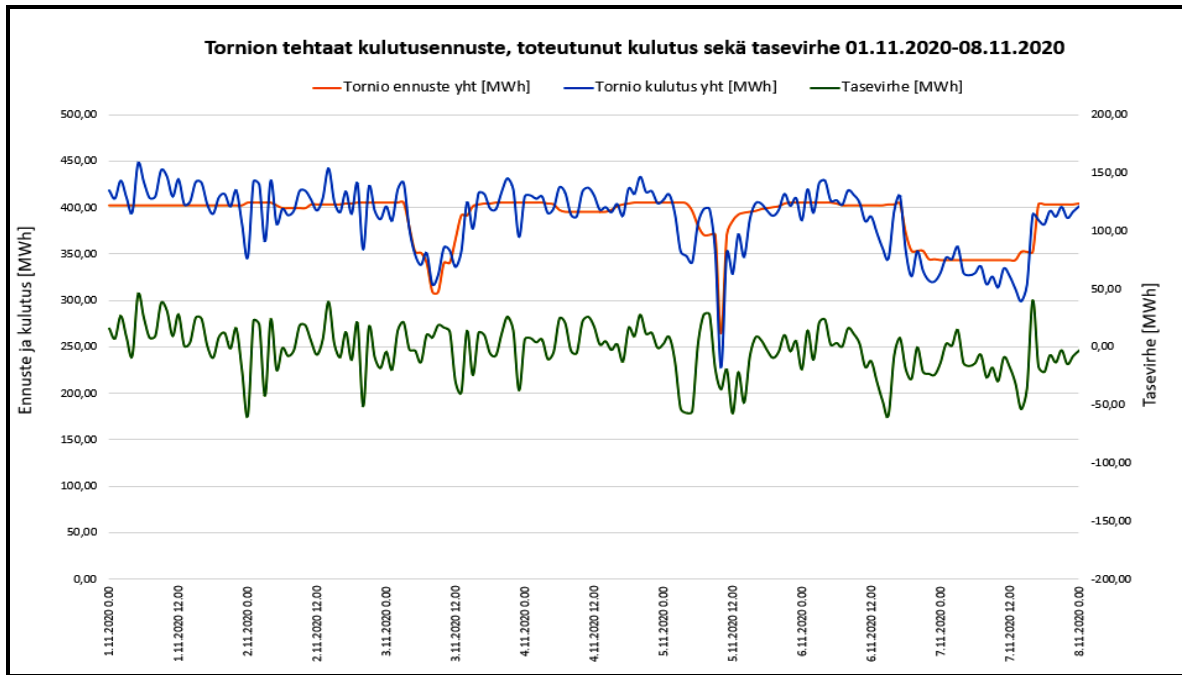
Kuvassa 40 on yhdistetty FeCr uunien kulutusennusteet ja toteutuneet kulutukset ja uunien yhteinen tasevirhe samaan kuvan. Kuvasta on huomattavissa, kuinka hyvin kulutusennuste pitää paikkaansa kulutukseen nähden, kunnes edellä mainittu FeCr2 uunin huono tehonotto aiheuttaa jakson lopulla tasevirheen kasvua. Ferrokromiuunit poikkeavat VKU1 ja VKU2 uuneista muun muassa siten, että niiden tehonotto muuttuu tuotantohäiriötilanteessa suhteellisen hitaasti, jolloin kulutusennusteeseen reagoiminen ja sen korjaaminen voidaan tehdä tarvittaessa Elbas-kaupankäynnillä.



Kuva 40. Ferrokromiuunit FeCr1, FeCr2, FeCr3 yhteensä kulutusennuste ja toteutunut kulutus sekä tasevirhe.

7.3 Outokumpu Tornion tehtaat kulutusennusteet ja toteutunut kulutus yhteensä

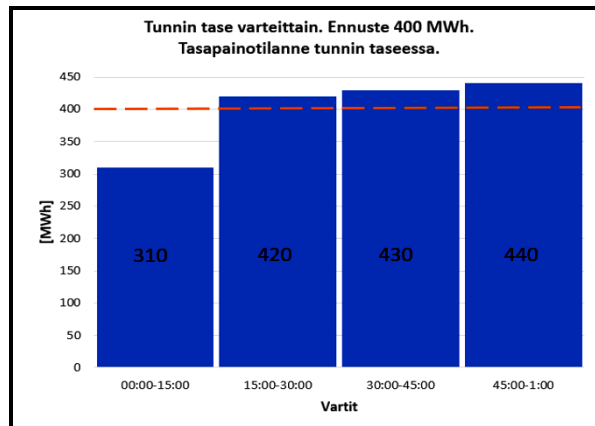
Kuvassa 41 on esitetty Tornion tehtaiden kokonaisennuste ja toteutunut kulutus 01.11.2020-08.11.2020. Aikasarja koostuu autenttisesta tunnin resoluutiolla olevasta datasta. Kuvaan on piirretty niin Outokumpu Stainless Oy:n kuin Outokumpu Chrome Oy:n kaikki kulutuskohteet. Tällöin koko tehdasalueen tehtaiden tehot risteilevät keskenään. Kuvasta voi havainnoida kokonaistasevirheen heilahtelevan maksimissaan amplitudiltaan noin 50 MWh/h nollan molemmin puolin. Kokonaisuutta katsottaessa suurimmat sähkötaseen poikkeamat voidaan katsoa tulevan pääosin Outokumpu Stainless Oy:n VKU1 ja VKU2 valokaariuuneista. FeCr1, FeCr2 sekä FeCr3 ottavat tehoa suhteellisen tasaisesti ja silloinkin kun niissä on jokin häiriö, niin niiden kulutusennusteisiin voidaan puuttua ja myydä kuluttamatta jäävä sähkö Elbas-markkinoille.



Kuva 41. Tornion tehtaat kulutusennuste, toteutunut kulutus ja tasevirhe.

7.4 Esimerkkilaskelma tasapainotilanne tunnin tase ja 15 minuutin tase

Kuvassa 42 sivu 66 on esitetty yhden käyttötunnin aikainen tilanne Outokummun näkökulmasta tasevastaavaan (palveluntarjoaja 2) päin. Kuvassa kulutus päättyy käyttötunnilla tasapainoon ennusteeseen nähden. Ennuste 400 MWh.



Kuva 42. Tunnin tase varteittain. Tasapainotilanne tunnin taseessa.

Tehdas on ollut tunnin ensimmäisellä vartilla 90 MW alle ennustetun. Seuraavissa varteissa taas 20 MW, 30 MW ja 40 MW yli ennustetun.

Nykyinen taselaskentamalli tasevirheestä yhdelle tunnille saadaan kuvan 42 arvoilla seuraavasti:

$$\text{Ennuste } 400 \text{ MWh} - \text{Toteuma } (310/4 + 420/4 + 430/4 + 440/4) \text{ MWh} = 0 \text{ MWh}$$

Ei tasevirhettä eikä tasesähkökustannuksia.

15 minuutin taseessa tasevirheet varteittain saadaan vastaavalla tavalla seuraavasti:

$$\text{Tasevirhe } (|-90/4| + |20/4| + |30/4| + |40/4|) \text{ MWh} = 45 \text{ MWh}$$

Tasevirheiden itseisarvojen summaksi tulee 45 MWh

Taulukkoon 6 on laskettu tasevirhetarkastelu ja tasesähkökustannukset käyttötunnille varteittain. Tarkastelussa tunti on asetettu yössäätötunniksi. Tasesähkön hinnaksi on oletettu 50 €/MWh. Volyyimimaksu on 0,5 €/MWh. On huomattava, että mittarit mittaavat oletusarvoisesti energian MWh:na, joten vartin energiankulutus pitää jakaa neljällä.

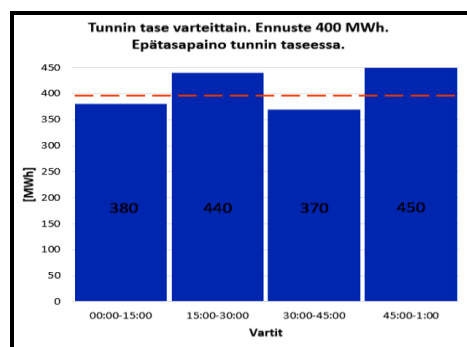
Taulukko 6. Tasesähkökustannukset ja volyyimimaksut kun tunnin tase päätty tasapainotilanteeseen, yössäätötunti, tasesähkönhinta 50 €/MWh, volyyimimaksu 0,5 €/MWh.

Vartin tasevirheet tunnille [MWh]	Vartin tasekustannukset [€]	Volyyimimaksu varteille [€]	Tasevirhe 1h [MWh]	Tasesähkökustannukset 1h [€]	Volyyimimaksu 1h [€]
Vartti 1	-122,5	1125	11,25	-22,5	0*50 €/MWh 0*0,5 €/MWh
Vartti 2	5	-250	2,5	5	
Vartti 3	7,5	-375	3,75	7,5	
Vartti 4	10	-500	5	10	
Yht	45	0	22,5	0	0

Kun tunnin taseessa päädytään tasapainotilanteeseen (varttien tasevirhe on netottunut nol-laksi) ei tule tasesähkökustannuksia. Myöskään 15 minuutin taseessa ei tule tasesähkökus-tannuksia koska kustannukset virtaavat varteittain ”sisään” ja ”ulos”. Tasesähkökustan-nusmielessä lopputulos tunnille on sama kuin tunnin taseessa. Volyyimaksuissa sen si-jaan tulee eroja. Esimerkin käyttötunti on päättynyt tasapainoon tunnin taseessa, joten vo-lyymimaksuja ei tule. Sen sijaan varteille tulee volyyimmaksuja käyttötunnille esimerkin lukujen mukaisesti yhteensä 22,5 €.

7.5 Esimerkkilaskelma epätasapainotilanne tunnin tase ja 15 minuutin tase

Kuvassa 43 on esitetty yhden käyttötunnin aikainen tilanne Outokummun näkökulmasta tasevastaavaan (palveluntarjoaja 2) päin. Kuvassa kulutus päättyy käyttötunnilla epätasa-painoon ennusteeseen nähden. Ennuste 400 MWh.



Kuva 43. Tunnin tase varteittain. Epätasapainotilanne tunnin taseessa.

Tehdas on ollut tunnin aikana vartilla 1 ja 3 alle ennustetun -20 MW ja -30 MW. Varteilla 2 ja 4 kulutus on ollut 40 MW ja 50 MW yli ennustetun.

Nykyinen taselaskentamalli tasevirheestä yhdelle tunnille saadaan kuvan 43 arvoilla seu-raavasti:

Ennuste 400 MWh -Toteuma $(380/4+440/4+370/4+450/4)$ MWh = 10 MWh.

Kokonaistasevirheeksi tulee käyttötunnille 10 MWh (kulutettu enemmän kuin ennustettu).

15 minuutin taseessa tasevirheet varteittain saadaan seuraavasti:

Tasevirhe $(|-20/4|+|40/4| +|-30/4| +|50/4|)$ MWh= 35 MWh

Tasevirheiden itseisarvojen summaksi tulee 35 MWh

Taulukkoon 7 on laskettu tasevirhetarkastelu ja tasesähkökustannukset käyttötunnille var-teittain. Tarkastelussa tunti on asetettu yössäätötunniksi. Tasesähkön hinnaksi on asetettu 50 €/MWh. Volyyimimaksu on 0,5 €/MWh. On huomattava, että mittarit mittaavat oletus-arvoisesti energian MWh:na, joten vartin energiankulutus pitää jakaa neljällä.

Taulukko 7. Tasesähkökustannukset ja volyyimimaksut kun tunnin tase päättyy epätasapainotilan-teeseen, yössäätötunti, tasesähkönhinta 50 €/MWh, volyyimimaksu 0,5 €/MWh.

Vartin tasevirheet tunnille [MWh]	Vartin tasekustannukset [€]	Volyyimimaksu varteille [€]	Tasevirhe 1h [MWh]	Tasesähkökustannukset 1h [€]	Volyyimimaksu 1h [€]	
Vartti 1	1-51	250	2,5	-5	10MWh*50 €/MWh 10MWh*0,5 €/MWh	
Vartti 2	10	-500	5	10		
Vartti 3	1-7,51	375	3,75	-7,5		
Vartti 4	12,5	-625	6,25	12,5		
Yht	35	-500	17,5	10	-500	5

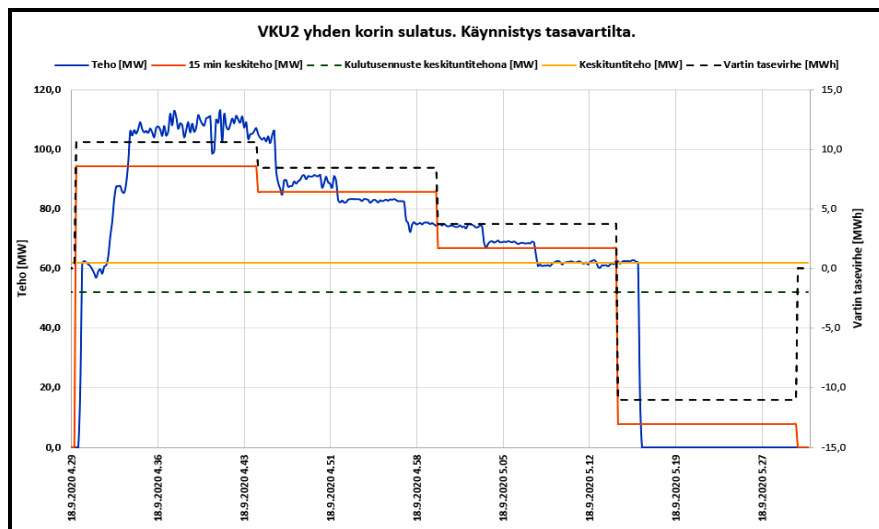
Taulukko osoittaa, että tunnin sisällä varttitaseissakin päädytään yhteenlaskettuna samaan tasesähkökustannukseen kuin tunnin taseessa. Varttitaseessa kustannukset virtaavat var-teit-tain ”sisään” ja ”ulos” mutta lopputulos tasesähkökustannusmielessä päättyy samaan kuin tunnin taseessa. Volyyimimaksuissa sen sijaan tulee eroja. Esimerkin käyttötunnilla kulutus on ollut 10 MWh ennustettua suurempaa, joten volyyimimaksu on tällöin 5 €. Varttien yh-teenlasketuksi volyyimimaksuksi tulee 17,5 €.

Jos tarkastelu tehdään asettamalla tunti alassäätötunniksi niin 15 minuutin tasesähkökus-tannukset eivät poikkeakaan silloinkaan tunnin tasesähkökustannuksista. Ainostaan volyyimi-maksut kasvavat suhteessa tunnin taseeseen.

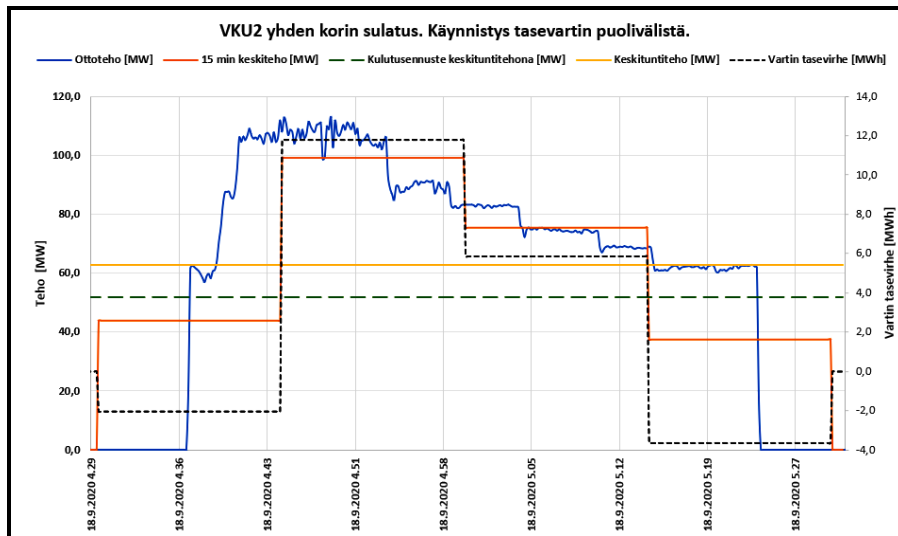
Edellä tehdyt tarkastelut pätevät vain, mikäli käyttötunnilla säädetään samaan suuntaan koko tunti. Eroja alkaa tulla vasta kun tunnin sisällä vaihtuu säätösuunta tai säätösuunta alkaa tunnin sisällä jollakin vartilla. Normaalisti sähköverkkoa säädetään aina samaan suuntaan useita tunteja ja saman tunnin sisällä vaihtuvat säätösuunnat ovat harvinaisia. Esimerkiksi vuonna 2020 83,4 % koko vuoden tunneista ei joko säädetty ollenkaan tai sää-dettiin samaan suuntaan tunnin sisällä. Luvussa 7.7 on laskettu autenttisesta kulutusdatasta tunti- ja varttitaseen kustannukset kuukauden ajalta. Luvun 7.7 laskenta antaa paremman kuvan kokonaisuudesta koska tällöin tuntien varteille kohdistuvat tällöin kaikki mahdolli-set kombinaatiot (onko ylös- vai alassäätö, miltä vartilta säätö alkaa, mille vartille säätö päättyy ja vaihtuuko säätösuunta tunnin sisällä).

7.6 VKU1 ja VKU2 tasesähkötarkastelut

Kuvissa 44 ja 45 on havainnollistettu VKU2 160 MVA:n valokaariuunin yhden korin sulatus silloin kun sulatus alkaa 15 minuutin tasevartin alusta ja vartin puolivälistä. Data on autenttista sulatusdataa. Kuvissa sininen graafi on VKU2 uunin ottoteho, oranssi on 15 minuutin keskiteho, keltainen on keskituntiteho, vihreä katkoviiva on kulutusennuste keskituntitehona sekä musta katkoviiva laskennallinen 15 minuutin tasevirhe jokaiselle vartille. Kuvista on pääteltävissä seuraavat asiat. Mikäli sulatus tahdistetaan alkamaan tasavartilta tuottaa se enemmän tasevirhettä varttitaseessa verrattuna tilanteeseen, jossa sulatus lähtee käyntiin varttitaseen puolivälissä. Kuvassa 42 (käynnistys tasavartilta) tasevirhe 15 minuutin jaksoissa on ensimmäisellä vartilla noin 11 MWh, toisella noin 9 MWh, kolmannella noin 4 MWh ja viimeisellä vartilla noin -11 MWh. Kuvassa 43 (käynnistys tasevartin puolivälistä) sen sijaan tasevirhe ensimmäisellä vartilla noin -2 MWh, toisella noin 11 MWh, kolmannella noin 6 MWh sekä viimeisellä vartilla noin -4 MWh. Koska toteutunut keskituntiteho sulatussyklille on 62 MW ja ennustettu keskituntiteho on 52 MW muodostuu tasevirheeksi tunnin taseessa $(62 \text{ MW} - 52 \text{ MW}) * 1 \text{ h} = 10 \text{ MWh}$. Näin ollen varttitaseessa tulee enemmän suhteellisesti tasevirhettä tuntia kohden koska virhe katsotaan vartin jaksoissa olettaen, että kulutus ennustetaan jatkossakin keskituntitehona (52 MW).

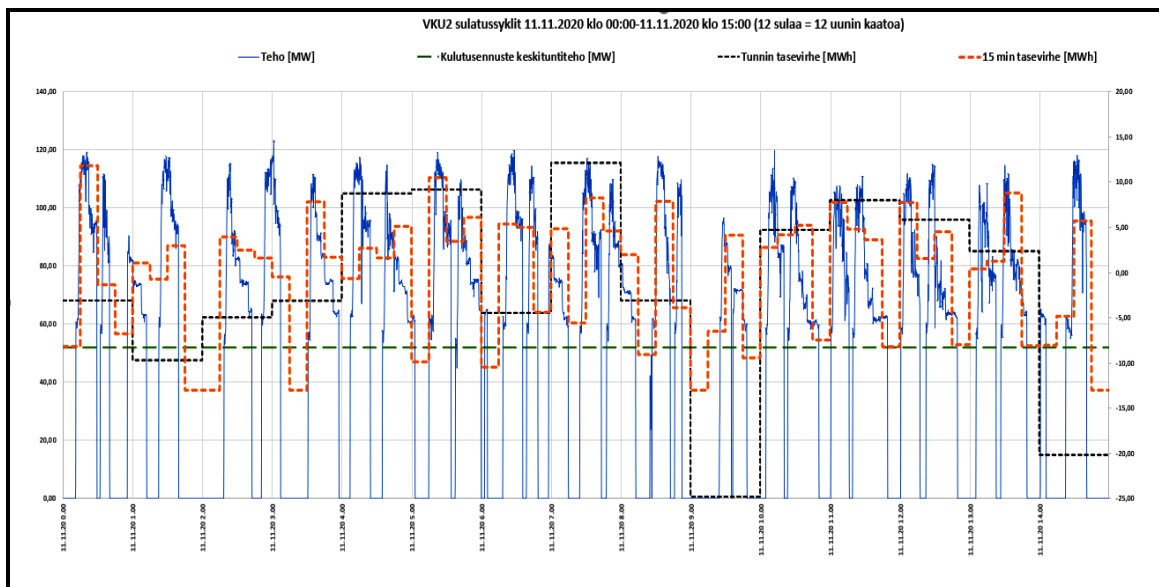


Kuva 44. VKU2 yhden korin sulatus. Käynnistys tasavartilta.



Kuva 45. VKU2 yhden korin sulatus. Käynnistys tasevartin puolivälistä.

Kuvassa 46 on havainnollistettu tunnin ja vartin tasevirheet VKU2 sulatusuunin 15 tunnin autenttisella tuotantojaksolla. Sininen on uunin ottama teho, vihreä katkoviiva on tunnin keskituntikulutusennuste (52 MW). Tunnin ja vartin keskitehoja ei ole piirretty kuvaan kuten kuvissa 44 ja 45, jotta kuvan havainnollisuus säilyy. Tuotantojakso käsittää 12 sulatusta. Osa sulatuksista on kahden korin sulatuksia.



Kuva 46. VKU2 15 tunnin tuotantojakso 12 sulatusta.

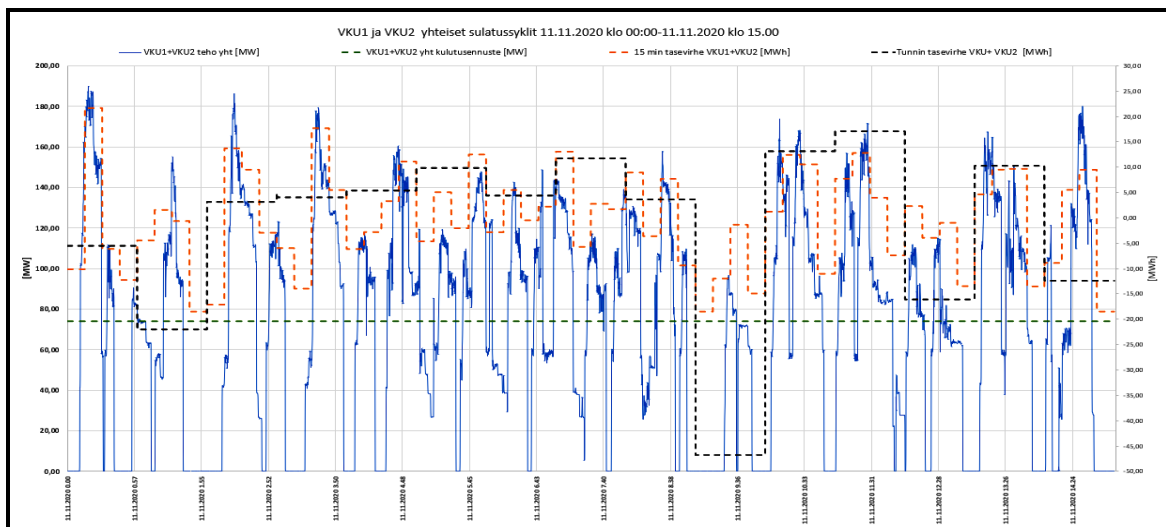
Kuvasta voidaan päätellä tilanteen muuttuvan tasevirheiden osalta, kun tarkastellaan pidempää tuotantojaksoa. Alla olevaan taulukkoon 8 on laadittu 15 tunnin tuotantojaksolle

tunnin ja vartin tasevirheet. Kuvan taulukosta voidaan päätellä, että tunnin tasevirhe muodostuu varteista siten, että vartit netottuvat ja kuvaavat lopulta tunnin tasevirhettä.

Taulukko 8. VKU2 tunnin ja vartin tasevirheet ja volyymimaksut 15 tunnin sulatusjaksossa.

TASEVIRHEET VKU2 TUNTITASE [MWh] JA VARTITASE [MWh] 15 TUNNIN SULATUSJAKSO (12 SULAA)								
Sulatusaika [h]	Tuntitase [MWh]	Varttitase [MWh]	Sulatusaika [h]	Tuntitase [MWh]	Varttitase [MWh]	Sulatusaika [h]	Tuntitase [MWh]	Varttitase [MWh]
1	-3,09	-8,2	6	9,18	-9,86	11	4,73	2,78
		11,8			10,49			4,17
		-1,3			3,46			5,24
		-6,8			6,11			-7,45
		1,1			-10,45			7,76
2	-9,68	-0,7	7	-4,45	5,38	12	8,00	4,81
		3,0			5,01			3,63
		-13,0			-4,38			-8,2
		-13,0			4,85			7,75
		3,9			-5,58			1,56
3	-4,96	2,5	8	12,13	8,26	13	5,85	4,52
		1,6			4,6			-7,98
		-0,5			1,99			0,4
		-13,0			-9,06			1,26
		7,8			7,89			8,8
4	-3,12	1,7	9	-3,07	-3,88	14	2,37	-8,1
		-0,7			-13,00			-8,03
		2,7			-6,49			-4,83
		1,6			4,14			5,71
		5,1			-9,43			-13,00
5	8,76		10	-24,78		15	-20,15	
Yht	29,61	99,95	Yht	53,61	134,31	Yht	41,10	115,98
Volyymimaksut tunnin taseessa taulukon arvoilla 0.5€/MWh sulatusjakso 15 tuntia							yht	62,2 €
Volyymimaksut vartin taseessa taulukon arvoilla 0.5€/MWh sulatusjakso 15 tuntia							yht	175,1 €

Kuvaan 47 on piirretty VKU1 ja VKU2 sulatusuunien yhteinen 15 tunnin sulatussykli. Tällöin sulatusuunien tehot risteilevät kummankin valokaariuunin osalta satunnaisesti.



Kuva 47. VKU 1 ja VKU2 tunnin ja 15 minuutin jaksojen tasevirheet.

Taulukkoon 9 sivu 72 on laadittu VKU1 ja VKU2 15 tunnin tuotantojaksolle tunnin ja vartin tasevirheet. Taulukosta voidaan päätellä, että tunnin tasevirhe muodostuu varteista siten, että vartit netottuvat ja kuvaavat lopulta tunnin tasevirhettä vastaavasti kuten edellisessä taulukossa 8. Tarkasteltaessa taulukoiden 8 ja 9 keskeisiä eroja niin huomataan volyymimaksujen keskinäisen suhteen pienevän vartti ja tuntitaseen välillä. Se johtuu risteilevien tehojen lisääntymisestä.

Taulukko 9. VKU1 ja VKU2 yhteiset tunnin ja vartin tasevirheet sekä volyymimaksut 15 tunnin sulatusjaksossa.

TASEVIRHEET VKU1+VKU2 YHTEINEN TUNNITASE [MWh] JA VARTTITASE [MWh] 15 TUNNIN SULATUSJAKSOT								
Sulatusaika [h]	Tuntitase [MWh]	Varttitase [MWh]	Sulatusaika [h]	Tuntitase [MWh]	Varttitase [MWh]	Sulatusaika [h]	Tuntitase [MWh]	Varttitase [MWh]
1	-5,52	-10,1	6	9,85	-4,63	11	13,13	1,21
		21,7			5,05			12,42
		-6,1			-2,04			10,54
		-12,3			12,49			-11,04
2	-22,02	-4,4	7	4,38	-2,83	12	17,07	7,72
		1,6			5,49			12,8
		-0,6			-0,49			3,96
		-18,5			2,21			-7,4
3	3,13	-17,1	8	11,72	13,05	13	-16,09	2,31
		13,7			-5,73			-3,94
		9,5			2,76			-0,98
		-2,9			1,71			-13,48
4	4,04	-6,0	9	3,63	8,94	14	10,27	4,64
		-14,0			-3,62			9,5
		17,7			7,69			9,66
		5,5			-9,36			-13,53
5	5,37	-6,2	10	-46,78	-18,50	15	-12,41	-8,9
		-2,8			-11,99			5,52
		3,3			-1,36			9,74
		11,1			-14,93			-18,50
Yht	40,08	185,02	Yht	76,36	134,87	Yht	68,97	167,79
Volyymimaksut tunnin taseessa taulukon arvoilla 0.5€/MWh, sulatusjakso 15 tuntia							yht	98,8 €
Volyymimaksut vartin taseessa taulukon arvoilla 0.5€/MWh, sulatusjakso 15 tuntia							yht	243,8 €

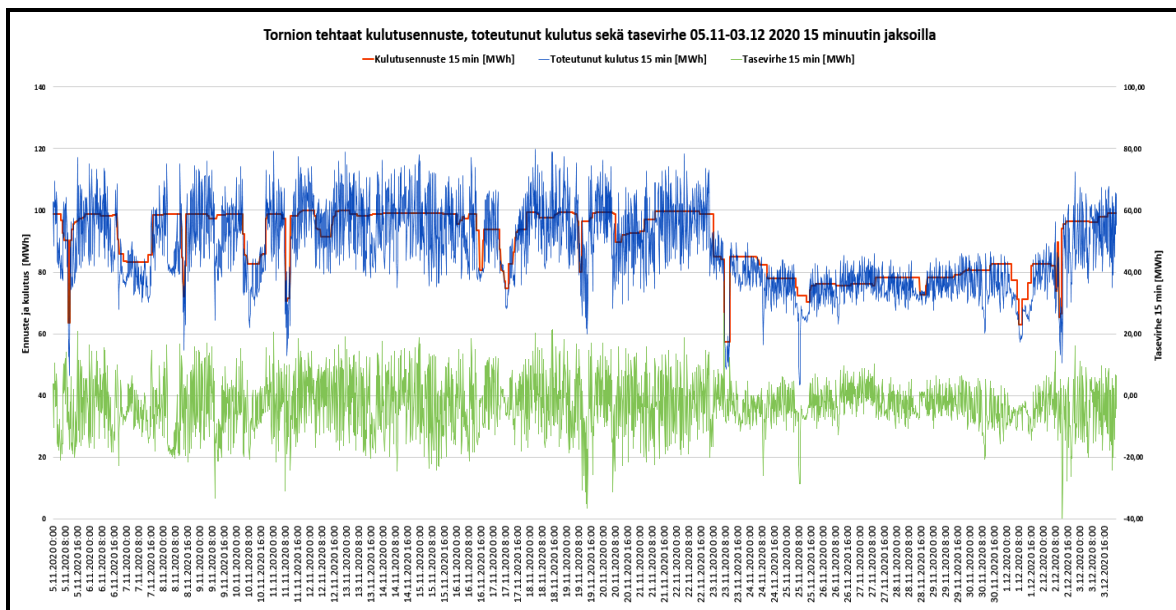
Edellä oleva tarkastelu valokaariuunien VKU1:n ja VKU2:n osalta osoittaa, että edullisinta olisi käynnistää uuni sulatussyklille vartin puolivälistä. Se tuottaisi vähemmän tasevirhettä kuin käynnistäminen vartin alussa. Asia pätee vain yhden korin sulatukselle. Tarkastelu osoitti myös, että risteilevien tehojen lisääntyessä myös volyymimaksujen suhde pienenee tunnin ja varttien välillä. Taulukot osoittavat, että varttien tasevirheet netottuvat tunnin sisällä kuvaten lopulta tunnin tasevirhettä. Tällä on suuri merkitys kun määritetään varttitasesähkökustannuksia verrattuna tunnin tasesähkökustannuksiin. Toisin sanoen tasesähkökustannukset eivät muutu siirryttäessä tunnin taseselvitysajaksosta 15 minuutin taseselvitysajakseen muuten kuin volyymimaksujen osalta silloin kun tunnille säädetään koko ajan samaan suuntaan ja tasesähkön hinta on jokaisella vartilla sama kuin tunnin tasesähköhintana. Silloin ei ole juurikaan merkitystä miltä kohtaa tunnin sisällä sulatukset alkavat tai päättyvät tasesähkökustannuksien näkökulmasta. Luvussa 7.7 on testattu Tornion tehtaiden autenttisella kuukauden toteutuneella kulutuksella 15 minuutin taseselvitysajakseen kustannusvaikutukset verrattuna tunnin taseselvitysajakseen. Tällöin laskennassa on mukana myös tunnin sisälle päättyvät ja tunnin sisältä alkavat sekä tunnin sisällä vaihtuvat säätösuunnat ja sekä kaikki tehdasalueella risteilevät tehot.

7.7 Koko Tornio kulutus ja ennuste sekä tasesähkökustannukset

Kuvassa 48 sivu 73 on esitetty Tornion tehtaiden kokonaiskulutus ja ennuste sekä tasevirhe 15 minuutin aikasarjana ajanjaksolle 05.11–03.12 2020. 15 minuutin aikasarjat on muodostettu palveluntarjoaja 1 tallettamista kolmen minuutin toteutuneista aikasarjoista. Piirtoon

on tahdistettu kulutusennuste yhden tunnin aikaresoluutiolla. Kolmen minuutin aikasarjat on ladattu palveluntarjoaja 1 palvelimelta päivä kerrallaan. Kolmen minuutin aikasarjan data ei ollut hyvälaatuista. Datasta puuttui kolmen minuutin aikaleimojen kohdalta toteutuneita kulutuksia jonkin verran, joten niitä piti paikata. Puuttuneet toteutuneet kulutukset olivat kuitenkin pääteltävissä edeltävien kolmen minuutin toteumista hyvin.

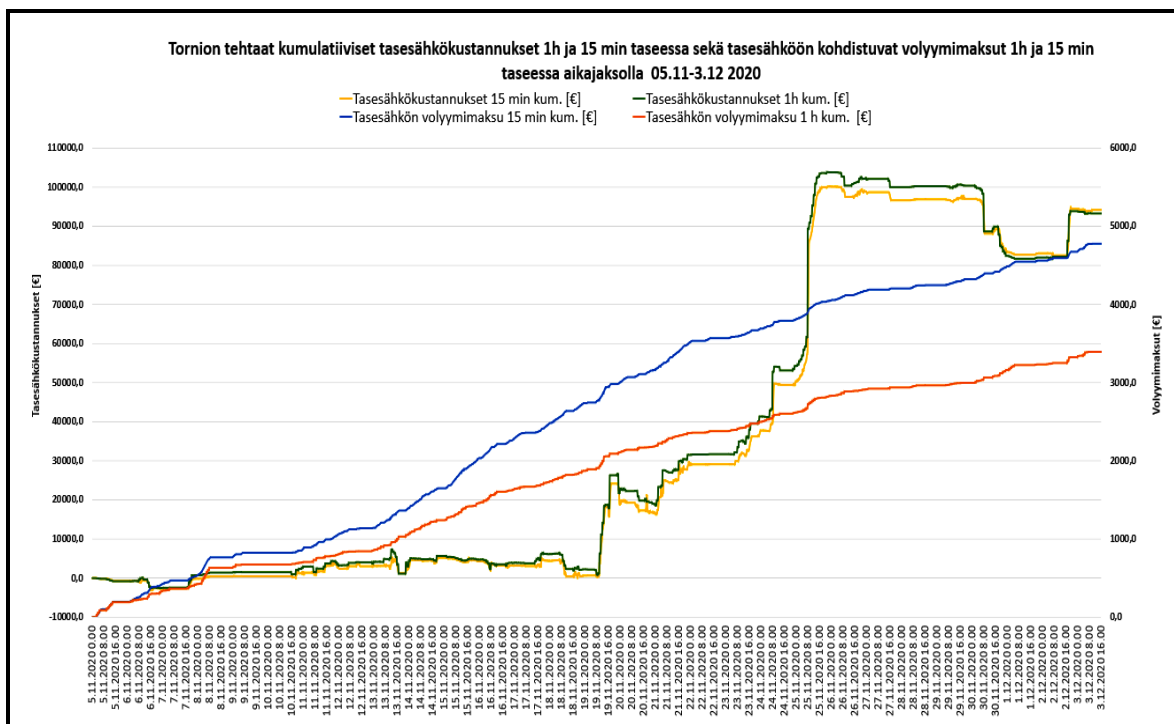
Kuvasta voidaan huomioida, että toteutuneen kulutuksen amplitudi on korkea vaihdellen keskimäärin noin +/- 20 MWh/15min ennusteen molemmin puolin. Kuvasta on huomattavissa myös VKU2:n selkeä vaikutus toteutuneen kulutuksen amplitudivaihteluun. VKU2 pysähtyy vuosihuoltoseisokkiin 22.11 2020, jolloin kokonaiskulutuksen amplitudi pienee huomattavasti. Uuni lähtee tuotannolle 03.12.2020, jolloin amplitudivaihtelu palaa vuosihuoltoseisokkia edeltävälle tasolle. Kuvasta on huomioitavissa myös se, että vuosihuoltoseisokin aikana sähkönkulutus on ennustettu liian suureksi. Myös viikkohuoltojen aikana, esimerkiksi 10.11.2020, kulutus ennustetaan lähes poikkeuksetta liian suureksi.



Kuva 48. Tornion tehtaas kulutusennuste, toteutunut kulutus sekä tasevirhe 15 min jaksolla 05.11-03.12 2020.

Kuvassa 49 sivu 74 on laskettu Tornion tehtaas kumulatiiviset tasesähkösäätökustannukset sekä tasesähkösäätöön kohdistuvat volyymimaksut tahdistettuna samaan kaavioon yhden tunnin ja tulevan 15 minuutin tasemallin vertailuna aikajaksolle 05.11-3.12 2020. Data on autenttista. 15 minuutin säätösunnat on laskettu Fingridin julkaiseman varttisarjan aktivoitujen ylös- ja alasäätötehojen avulla (Fingrid 2020l, Fingrid 2020m). Varttisarjojen julkaiseminen on aloitettu Fingridin toimesta vuoden 2018 joulukuusta lähtien. Tuntitason

säätösuunnat on saatu palveluntarjoaja 1 datasta. 15 minuutin tasesähköhintana on käytetty sille tunnille muodostunutta oikeaa tasesähköhintaa. Volyyimmaksun hinta on laskelmissa 0,5 €/MWh. Kuvasta voidaan huomata tasesähkökustannuksien muuttuvan samassa suhteessa (keltainen ja vihreä graafi) oli kysessä tunnin tai 15 minuutin taseselvitysjakso. Hetkittäin graafit eroavat hieman toisistaan joka johtuu siitä, että 15 minuutin säätö ei ala tasatunnilta eikä pääty tasatuntiin tai säätösuunta vaihtuu tunnin sisällä. On huomattava, että tasesähkökustannukset päätyvät tarkasteltavalla aikajaksolla noin 90000 € plussalle. Varsinkin jakson loppupuolella tasesähköstä tulee rahaa takaisin joka kertoo siitä, että sähköä on kulutettu vähemmän kuin ennustettu ja on ollut sopivasti ylössäätösuuntia. Jakson loppupuolella, 22.11 eteenpäin, kuumavalssaamo ja terässulatto 2 sekä VKU 2 ovat pysähtyneet vuosihuoltoseisokkiin. Tämä vaikeuttaa selkeästi päivittäistä spot sähkönhankinnan arvioimista koska sähkönkulutus arvioidaan selkeästi tällöin liian suureksi. Yliennustaminen johtuu käytännössä risteilevien tehojen vähenemisestä, jolloin sähkönkulutuksen ennustaminen tulee vaikeammaksi.



Kuva 49. Tornion tehtaas kumulatiiviset tasesähkökustannukset ja volyyimmaksut tunnin ja 15-minuutin taseessa autenttisella kulutusdatalla testattuna.

Kun tarkastellaan volyyimmaksujen kehittymistä tällöin yhden tunnin taseessa kumulatiivinen volyyimmaksu päättyy noin 3400 euroon (punainen graafi) kun 15 minuutin taseen kumulatiivinen volyyimmaksu päättyy noin 4700 euroon (sininen graafi).

Prosentuaalisesti 15 minuutin taseessa volyymimaksut ovat noin 38% suuremmat mutta kustannusmielessä ero (noin 1300 €) kuukauden aikajaksolla on todella pieni ja merkityksetön ajatellen sähkön käytön volyymia ja siitä aiheutuvia kokonaiskustannuksia. Tulosten perusteella, Outokumpu Tornion tehtaiden kulutusprofiililla, siirtyminen tunnin taseesta 15 minuutin taseeseen ei aiheuta juurikaan muutosta tasesähkön hankinta- ja volyymikustannuksiin.

Kuvan 49 laskenta perustuu taulukon 10 sivu 76 säätösuuntiin. Taulukkoon on laskettu aikajaksolle 05.11.-03.12.2020 säätösuunnat tunneittain sekä tunnin sisälle osuneiden säätösuuntien muuttuminen varteittain. Kun tarkastellaan taulukon koko aikajakson tuntien (696 h) säätösuuntia ”**Kaikki erilaiset tunnit yhteensä**” osiota niin 82,2 % (44,5 % + 16,8 % + 20,8 %) kaikista aikajakson tunneista eli 572 tuntia (310 h + 117 h + 145 h) mennään ilman säätöä tai säätö on samaan suuntaan joko ”ylös” tai ”alas” koko tunnille. 17,8 % tunneista (124 h) on sellaisia jolla säätö alkaa tunnin sisällä joltakin vartilta tai loppuu tunnin sisällä jollekin vartille tai säätösuunta vaihtuu tunnin sisällä. Taulukon yläosassa on laskettu näille 124 tunnille, joilla säätösuunta muuttuu tunnin sisällä, sisäisille varteille kohdistuneet ”ylös” ja ”alas” säädöt kappalemäärittäin ja prosenttiosuuksittain. Esimerkiksi taulukon 10 tapahtuma 0->Down ja siihen liittyvät laskennat (merkattu taulukkoon keltaisella) tarkoittavat, että meneillään olevan käyttötunnin vartin yksi (1) säätösuunta on ollut ”alas” edellisen tunnin viimeisen vartin ollessa ilman säätösuuntaa. Näitä tapahtumia on ollut 124 tunnin sisällä yhteensä 14 kappaletta 230:stä tapahtumasta prosenttiosuuden ollessa 6,1 %. Säätösuunnan vaihtuminen Down->Up ja Up->Down tunnin sisällä vaikuttaa olevan Fingridin vartisarjadatan mukaan prosentuaalisesti harvinaisin tapahtuma. Näitä tapahtumia on yhteensä 3,9 %. Taulukon 10 perusteella voidaan todeta, että kyseisellä aikajaksolla (05.11.-03.12.2020) 82,2 % kaikista käyttötunneista ovat tunteja, joissa varttien tasesähkökustannukset netottuvat samaksi kuin tunnin tasesähkökustannukset jos tasesähkön hinta on sama kaikilla varteilla. Eroa alkaa syntymään niillä tunneilla joilla vartit alkaa tunnin sisältä, vartit päättyy tunnin sisälle tai säätösuunta vaihtuu tunnin sisällä tai tasesähkön hinta vaihtelisi varteittain. Tällöin kustannusero varttitaseen ja tunnin taseen välillä riippuu siitä millainen oman sähkötaseen tila kohdistuu kyseiselle vartille. Toisin sanoen 15 minuutin taseessa tunnin sisälle sattuva varttikombinaatio voi joko tuoda rahaa ja toisaalta se voi viedä rahaa.

Kuukauden aikajaksolla tarkasteltuna kustannusero kuitenkin tasoittuu kun tunnin sisällä olevat vartit netottavat toinen toisensa. Kuva 49 osoittaa sen koska kuukauden (05.11.-03.12) laskennassa varttitaseen ja tunnin taseen tasesähkökustannukset päätyvät lähes samaan suuruusluokkaan. Taseiden kustannuserot ovat siis marginaaliset. Koska varteille ei ole olemassa vielä varttitasehintoja laskenta on tehty oletuksella, että varteilla on sama tasesähkön hinta kuin tunnin taseessa. Laskennassa käytetty tunnin tasesähköhintaa on jokaiselle käyttötunnille määrätynyt todellinen hinta. Koska tunnin tasesähköhintaa kuvaa kullekin käyttötunnille aktivoitujen säätötehojen hintaa niin on syytä olettaa, että varttihinnatkin ovat lähellä tai samat kuin tunnin hinta koska aika vaikea on olettaa säätötehojen ja sitä kautta varttihintojen muuttuvan tunnin sisällä huomattavasti. Toisaalta vaikka varttihinnat muuttuisivatkin tunnin sisällä huomattavasti niin kustannusmielessä oleellista on oman sähkötaseen tila, joka kohdistuu näille varteille. Kuvan 49 kulutusdataa testattiin myös siten, että kuukauden ajalle asetettiin jokaiselle säätövirtille oma hintansa. Jokaisen vartin hintaa poikkeutettiin satunnaisesti +/- 10 % tunnin hinnasta. Saatu tulos ei muuttunut. Tasesähkökustannukset kumuloituivat samoiksi myös tällä tavalla tarkasteltuna.

Taulukko 10. Säätösuunnat tunneittain sekä tunnin sisälle osuneiden säätösuuntien muuttuminen varteittain aikavälillä 05.11-03.12.2020.

Vartti	Min	0->DOWN	0->UP	DOWN->0	DOWN->UP	UP->0	UP->DOWN	YHT
Vartti 1	0	14	16	32	2	35	3	102
Vartti 2	15	14	21	7	4	1	0	47
Vartti 3	30	20	10	11	0	9	0	50
Vartti 4	45	13	3	8	0	7	0	31
YHT		61	50	58	6	52	3	230
Vartti	Min	0->DOWN	0->UP	DOWN->0	DOWN->UP	UP->0	UP->DOWN	YHT
Vartti 1	0	6,1 %	7,0 %	13,9 %	0,9 %	15,2 %	1,3 %	44,3 %
Vartti 2	15	6,1 %	9,1 %	3,0 %	1,7 %	0,4 %	0,0 %	20,4 %
Vartti 3	30	8,7 %	4,3 %	4,8 %	0,0 %	3,9 %	0,0 %	21,7 %
Vartti 4	45	5,7 %	1,3 %	3,5 %	0,0 %	3,0 %	0,0 %	13,5 %
YHT		26,5 %	21,7 %	25,2 %	2,6 %	22,6 %	1,3 %	100,0 %
Kaikki erilaiset tunnit yhteensä								
EI SÄÄTÖÄ	310	44,5 %	Tunnit, jotka alusta loppuun ilman säätöä					
UP	117	16,8 %	Tunnit, jotka alusta loppuun UP-säädöllä					
DOWN	145	20,8 %	Tunnit, jotka alusta loppuun DOWN-säädöllä					
1 h:n sisällä muutos	124	17,8 %	Tunnin sisällä alkavat ja päättyvät tai vaihtuvat säädöt (0, 15, 30 tai 45 min)					
YHTEENSÄ	696	100 %	Kaikki tunnit yhteensä					

Koska taulukossa 10 on tarkasteltu säätösuuntia vain noin kuukauden ajalta aikaväliltä 05.11-03.12.2020 niin vertailun vuoksi taulukossa 11 sivu 77 säätösuuntia on tarkasteltu koko vuoden 2020 osalta vastaavalla tavalla kuten edellä. Taulukosta voidaan havaita, että vuoden aikajaksollakin varttien väliset säätösuuntien muutokset tunnin sisällä ja tunneille joille ei kohdistu säätöä tai säädetään koko tunti yhteen suuntaa joko ”ylös tai ”alas” ovat

prosentuaalisesti suurin piirtein samat verrattuna taulukon 10 säätösuuntiin. Esimerkiksi tuntimäärien prosenttiosuudet, joilla ei säädetä sekä säädetään täysien tuntien ajan joko ”ylös” tai ”alas”, kasvavat hiukan 83,4 %:iin ja tunnit joiden sisällä tapahtuu säätöjä pienenevät 16,6 %:iin verrattuna taulukon 10 vastaaviin (82,2%, 17,8%) prosenttiosuuksiin. Toisin sanoen säätösuuntien suhteet toisiinsa nähden pysyvät prosentuaalisesti käytännössä samanlaisina tarkasteltiin niitä kuukauden tai vuoden aikajaksossa. Tästä voidaan päätellä, että kuukauden aikavälin autenttisella datalla testattu tasesähkökustannustarkastelu tuottaisi myös vuoden autenttisella kulutusdatalla testattuna mitä suuremmalla todennäköisyydellä vastaanvanlaisen tuloksen eli tehtaan tunnin ja 15 minuutin tasesähkökustannukset päätyisivät samalle tasolle. Tämä kannattaa kuitenkin testata kun EMS:n käyttöönoton myötä saadaan luotettavaa kolmen minuutin kulutusdataa pidemmältä aikaväliltä.

Taulukko 11. Säätösuunnat tunneittain sekä tunnin sisälle osuneiden säätösuuntien muuttuminen vuonna 2020.

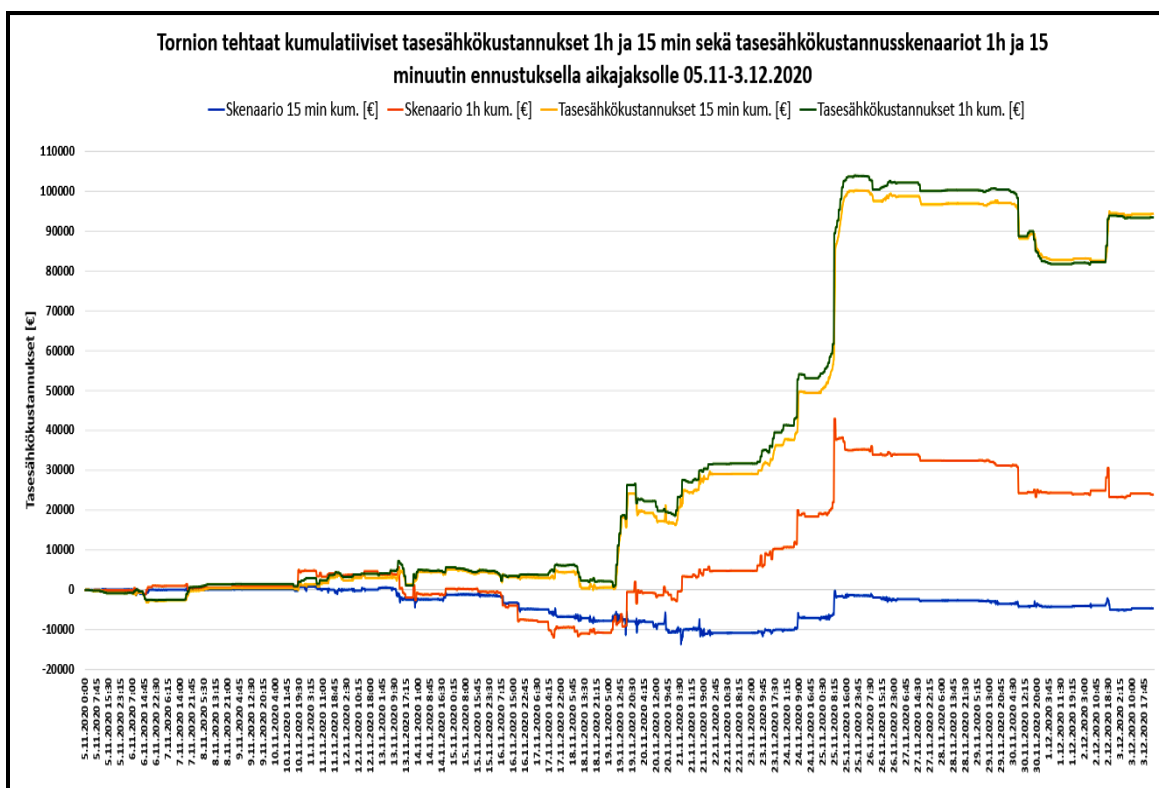
Vartti	Min	0 -> DOWN	0 -> UP	DOWN -> 0	DOWN -> UP	UP -> 0	UP -> DOWN	YHT
Vartti 1	0	237	213	368	13	500	13	1344
Vartti 2	15	114	195	104	18	6	0	437
Vartti 3	30	219	168	121	17	89	2	616
Vartti 4	45	167	74	107	4	92	1	445
YHT		737	650	700	52	687	16	2842
Vartti	Min	0 -> DOWN	0 -> UP	DOWN -> 0	DOWN -> UP	UP -> 0	UP -> DOWN	YHT
Vartti 1	0	8,3 %	7,5 %	12,9 %	0,5 %	17,6 %	0,5 %	47,3 %
Vartti 2	15	4,0 %	6,9 %	3,7 %	0,6 %	0,2 %	0,0 %	15,4 %
Vartti 3	30	7,7 %	5,9 %	4,3 %	0,6 %	3,1 %	0,1 %	21,7 %
Vartti 4	45	5,9 %	2,6 %	3,8 %	0,1 %	3,2 %	0,0 %	15,7 %
YHT		25,9 %	22,9 %	24,6 %	1,8 %	24,2 %	0,6 %	100,0 %
Kaikki erilaiset tunnit yhteensä								
EI SÄÄTÖÄ	3801	43,3 %	Tunnit, jotka alusta loppuun ilman säätöä					
UP	1358	15,5 %	Tunnit, jotka alusta loppuun UP-säädöllä					
DOWN	2167	24,7 %	Tunnit, jotka alusta loppuun DOWN-säädöllä					
MUUTOS	1458	16,6 %	Tunnin sisällä alkavat ja päättyvät tai vaihtuvat säädöt (0, 15, 30 tai 45 min)					
YHTEENSÄ	8784	100 %	Kaikki tunnit yhteensä (huom! karkausvuosi)					

7.8 Skenaario koko Tornio kulutus ja ennuste sekä tasesähkökustannukset

Kuvassa 50 sivu 78 on esitetty Tornion tehtaiden kumulatiiviset tasesähkökustannukset 1h ja 15 minuutin taseessa (vihreä ja keltainen graafi) sekä tasesähkökustannusskenaariot 1h:n ja 15 minuutin ennustuksella (punainen ja sininen graafi). Ennusteet on rakennettu käyttäen oletuksia ”tämän tunnin todellinen kulutus on seuraavan tunnin ennuste” sekä ”tämän vartin todellinen kulutus on seuraavan vartin ennuste”. Toisin sanoen Elbas-kauppaa ruvetaan käymään ennen seuraavan vartin alkua sen hetkisen kulutuksen perusteella verrattuna Elspot-kulutuseennusteeseen. Outokummun kulutusprofiililla se tarkoittaa vilkasta Elbas ostoja ja myyntiä. Laskelmissa oletetaan Elbas sähköä olevan tarjolla niin ostoon kuin

myyntiinkin eli markkinoilla on likviditeettiä. Lisäksi oletuksena on, että Elbas-hinta ei poikkea spot-hinnasta. Kulutusdata on samaa ja samalta aikajaksolta kuin luvussa 7.7 käytetyissä laskelmissa. Tällä yksinkertaisella ennustemallilla voidaan näyttää toteen, että aktiivisella Elbas kaupalla tasesähkökustannukset saadaan painumaan lähelle nolaa. Kun tasesähkökustannukset kulkevat lähellä nolaa tarkoittaa se samalla myös sitä, että tehtaan sähkötasekin kulkee lähellä tasapainotilaa. Laskentamalli ei ota huomioon sitä tosiasiaa, kuten jo edellä mainittiin, että toisinaan Elbas-hinta poikkeaa spot-hinnasta. Tällöin ennustemallissa, jolla tulevaisuudessa Elbas-sähköä tullaan ostamaan, pitää olla älykkyyttä huomioimalla muun muassa edellä mainittu Elbas-hinta verrattuna Elspot-hintaan pyrittäessä kohti optimikustannuksia tavoiteltaessa sähkötaseen tasapainotilaa. Tarkasteltaessa kuvan 50 kustannuksia niin ilman ennustusta tunnin ja 15 minuutin tasesähköstä tulee takaisin noin 90000 euroa (vihreä ja keltainen graafi, vastaavat graafit ovat myös kuvassa 49). Kun käytetään ennustemallia ”tämän tunnin toteutunut kulutus on seuraavan tunnin ennuste” (punainen graafi) päädytään noin 20000 euroon ja ennustemallilla ”tämän vartin kulutus on seuraavan vartin ennuste” päädytään lähelle tasapainotilaa (sininen graafi).

Tulokset ovat tulkittavissa kahdella tapaa. Automaattinen ennustaminen pienentää mahdollisia tasesähkökaupan tuloja mutta samalla altistus tasesähkökustannusriskille pienenee, kun sähkötase on oikealla tasolla varsinkin korkeiden tasesähköhintojen aikana.



Kuva 50. Tornion tehtaas kumulatiiviset tasesähkökustannukset 1h ja 1 min sekä tasesähkökustannusskenaariot 1h ja 15 min ennustuksella aikajaksolle 05.11-3.12.2020.

7.9 Arvio tulosten luotettavuudesta

Luvun 7.7 ja 7.8 laskennat perustuvat Outokumpu Tornion aikavälin 05.11-03.12.2020 kolmen minuutin toteutuneen kulutuksen aikasarjaan. Aikasarja on yhdistetty ja jaettu 15 minuutin ja tunnin jaksoiksi vertailun mahdollistamiseksi. 15 minuutin säätösuunnat on saatu Fingridin julkaiseman varttisarjan aktivoitujen ylös- ja alassäätötehojen avulla (Fingrid 2020l, Fingrid 2020m). Säätösuunnat (ylös/alas) on synkronoitu edellä mainittuun 15 minuutin ja tunnin aikasarjaan. Tunnin säätösuunnat ja tasesähkön hinnat tunneittain on saatu palveluntarjoaja 1 datasta ja synkronoitu edelleen koko kokonaisuuteen. Koska alkuperäinen kolmen minuutin aikasarja kuukauden jaksolle käsittää noin 14000 riviä niin virheitä voi olla aikasarjojen käsittelyssä, kaavavirheissä sekä useiden aineistojen synkronoinnissa keskenään. Virheet on pyritty eliminoimaan kattavalla ja huolellisella tarkastamisella sekä arvioimalla saatujen tulosten järkevyyttä. Toinen virhettä aiheuttava lähde oli kolmen minuutin aikasarjan huonolaatuisuus. Aikaleimojen kohdalta puuttui sieltä täältä tehoarvoja. Niitä pystyi kuitenkin päättämään puuttuvien aikaleimojen edellisien ja jälkeisten aikaleimojen tehoarvojen avulla.

8. LOPPUTULOKSET JA YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää millä keinoilla tehdasintegraatin Elspot-kulutusestusta sekä Elbas-myyntiä/hankintaa voidaan parantaa ja automatisoida. Lisäksi työn tavoitteena oli löytää uusia mahdollisia kysynnänjouston mahdollisuuksia sekä tutkia vuonna 2023 toisen neljänneksen aikana tulevan 15 minuutin taseselvitysjakson vaikutuksia tasesähkökustannuksiin. Odotusarvona oli, että 15 minuutin taseselvitysjakso tulee lisäämään tasesähkökustannuksia. Tutkimuskysymyksiin pystyttiin vastaamaan kattavasti.

Elspot-kulutusestus ja Elbas-myynti/hankinta

Tehtaalle hankitun EMS-järjestelmän voidaan nähdä olevan erinomainen työkalu niin tarkemmassa Elspot-kulutusestuksen laadinnassa kuin Elbas-sähköhankinnassa äkillisissä kulutusestuksen muutoksissa, kuten tehtaassa häiriötilanteissa sekä tulevan 15 minuutin taseselvitysjakson tullessa myös automaattisessa ennustamisessa. Työssä kehitettiin malli, jossa tehtaassa ja tehtaiden sisällä olevat pienetkin tuotantolinjat ilmoittavat itse seuraavan viikon käynti- ja huoltoaikansa sekä syöttävät ne EMS-järjestelmään. Kun Elspot-kulutusestusta saadaan tarkennettua ja Elbas-hankintaa nopeutettua niin samalla parannetaan tehtaassa sähkötasetta. EMS mahdollistaa myös automaattiraportit vähentäen niihin tällä hetkellä käsin tehtävää työtä ja käsin tehtävässä työssä aiheutuvia mahdollisia virheitä.

Työssä tunnistettiin pahimmat tasevirhettä aiheuttavat kulutuskohteet. Ne ovat valokaariuunit VKU1 ja VKU2. Uunit ovat tyypillisiä panosprosesseja. Se tekee niistä erittäin ongelmallisia tehon ennustamisen suhteen. Hetkittäin uunit ottavat nimellistehonsa ja kaatojen välissä ne eivät ota tehoa ollenkaan. Kaatojen väliajat ennen seuraavan sulatuksen alkamista vaihtelevat niin paljon, että niitä ei voi synkronoida sulatusprofiiliensa mukaan tunnin taseeseen puhumattakaan 15 minuutin taseesta. Mikäli näin tehtäisiin niin tällöin uuneja pitäisi ajaa tavallaan sähkömarkkinoiden ehdoilla, jota ei voi nähdä tarkoituksenmukaisena ja tehokkaana ratkaisuna. Se tarkoittaisi uuneille lisää odottelua ja sitä kautta tehollisen käyntiajan pienemistä. Odottelu ja pysäyttely vaarantaisi lisäksi koko terässulaton tuotantoketjun joustavan toiminnan. Koska tuleva 15 minuutin taseselvitysjakso mahdollistaneekin Elbas-hankinnan seuraavan käyttövärtin alkuun asti niin yksi mahdollisuus voi-

si olla Elbas-sähkönhankinnan aloittaminen, kun uuni starttaa sulatukseen ja näin korjattaisiin tasetta ikään kuin seuraavasta vartista eteenpäin. Tässäkin toimintamallissa on omat vaaransa. Kuvitellaan tilanne, että molemmat uunit starttaisivat sulatussykleihinsä samaan aikaan ja Elbas-sähkönhankinta käynnistyisi seuraavalle vartille. Tullessa käyttövartille uuneille tulisikin jokin häiriö yhtä aikaa. Sähköt olisi hankittu mutta kulutus olisi nolla. Syntyisi iso tasevirhe. Siitä syystä edellä mainittua toimintamallia ei voi nähdä tehokkaana ja oikeana ratkaisuna. Yksi vaihtoehto voisi olla sähkövarastojen käyttö tasaamaan kuormitusvaihtelua. Akkuvarastot ovatkin kehittyneet ja niiden hinnat ovat laskeneet mutta tasattava teho on niin suuri, ettei akustoa voi nähdä tässä tapauksessa järkevänä vaihtoehtona jos yksin siitä muodostuvan hinnankin puolesta.

Tornion tehtaiden sähkönkulutus koostuu useista tehtaista sekä osastoista. Koska tämän kokonaisuuden sisällä tehot risteilevät monimutkaisesti niin paras toimintamalli olisi tarkastelujen perusteella tehtaan sähkönkulutuksen dynaaminen ennustaminen yhtenä kokonaisuutena (katso luku 7.8 kuva 50 sivu 78). Esimerkiksi FeCr3 uuni edustaa noin ¼ osa tehtaan kokonaiskulutuksesta ja on siten osaltaan vaikuttavassa asemassa risteilevien tehojen suhteen. Vaikka FeCr3 uunin ominaiskulutus on suhteellisen tasaista niin välillä senkin kulutus poikkeaa ennustetusta huomattavasti. Tällöin uunin ennustepoikkeamalla on vahva vaikutus koko tehtaan ennustepoikkeamaan. Koska risteilevät tehot tavallaan tukevat toinen toisiansa tehtaan sisällä niin kokonaiskulutuksen ennustamisella voidaan saavuttaa parempi lopputulos kuin ennustamalla kokonaiskulutuksen sisällä yksittäisien kohteiden kulutusta kuten esimerkiksi VKU2.

Kappaleessa 7.8 testattiin yksinkertaista ennustemallia ”tämän hetken kulutus on seuraavan vartin ennuste” autenttista kulutusdataa hyödyntäen kuukauden aikajaksolla, millaiset tasesähkökustannukset olisivat 15 minuutin jaksoissa. Tälläkin ennustemallilla kyettiin todentamaan, että aktiivisella Elbas-kaupankäynnillä sähkötase voidaan saada lähelle tasapainotilaa. Paras ratkaisu työssä tehtyjen havaintojen ja tarkastelujen perusteella olisi tehdä EMS:n sisään koneoppimismalli, jolla ruvettaisiin tekemään dynaamista ennustemallia. Syöteinä malliin sisään otettaisiin tehtaiden kulutuskohteet, ajo-tilanteet, häiriötilanteet ja niiden kestot, sulatus-tilanteet, sulatusprofiilit ja tuotantoennusteet. Saadun lopputuloksen perusteella hankittaisiin/myytäisiin sähkö Elbas-markkinoilla palveluntoimittajan Elbas-robotteja käyttäen.

Elbas-myyntille/ostolle voisi asettaa hintarajoja, joilla kauppvoja tehtäisiin. Tämä toimintamalli on vielä tulevaisuutta mutta on vaikea nähdä millä muulla tavalla monimutkaisen teollisuuskompleksin tasesähköhankintaa voisi parantaa ilman automatisointia varsinkin, kun taseselvitysjakso muuttuvat 15 minuuttiin. Toimintamallin käyttöönotto tarkoittaisi myös sitä, että Elbas-markkinoiden likviditeetti tulisi kasvaa, jotta markkinoilta voisi ostaa ja myydä seuraavan käyttövärtin alkuun saakka. Tämän hetken arvioiden mukaan on kuitenkin näkyvässä, että Elbas-likviditeetti tulee kasvamaan ja kauppaa voidaan ehkä käydä seuraavan värtin alkuun asti siirryttäessä 15 minuutin taseselvitysjaksoon. Voidaan todeta, että VKU1 ja VKU2 uuneille on jatkossakin ostettava sähkö keskituntitehona mutta se millä määrällä sitä tullaan jatkossa ostamaan, riippuu EMS:n sisään rakennettavasta enustemallista ja sen toimivuudesta sekä Elbas-markkinoiden kehittymisestä.

Kysynnän jousto

Työssä käytiin läpi myös tehtaan kysynnänjouston mahdollisuudet ja reservimarkkinatuotteiden läpikäynti. Aiheeseen liittyi useita palavereja Outokummun prosessin sekä sähkön oston asiantuntijoiden kanssa, joissa kysynnän jouston mahdollisia paikkoja kartoitettiin. Kartoituksen tuloksena ei löytynyt uusia potentiaalisia paikkoja, mFRR:n lisäksi, joilla voisi markkinoille osallistua. Syyt olivat osittain teknisiä ja osittain kustannuseräisiä mahdollisiin saavutettaviin hyötyihin nähden.

Tunnin ja 15 minuutin tasesähkökustannusten vertailu

Työssä tarkasteltiin tulevan 15 minuutin taseselvitysjakson kustannuksia verrattuna nykyiseen tunnin taseselvitysjaksoon. Tarkasteltava aineisto oli noin kuukauden jakso tehtaan tehonkulutuksen ja ennusteen autenttista aikasarjaa kolmen minuutin resoluutiolla. Aikasarja pilkottiin tunnin jaksoiksi sekä siihen synkronoitiin tunnin taseselvitysjakson kustannukset toteutuneilla tunnin ylös- ja alassätötiedoilla ja näille tunneille kohdistuneilla tasesähköhinnoilla. Toteutuneen kuukauden kulutuksen kolmen minuutin aikasarja pilkottiin lisäksi 15 minuutin jaksoiksi ja vertailtiin sitä 15 minuutin ylös- ja alassätöihin. 15 minuutin toteutuneet säädöt saatiin Fingridin sivuilta. Fingridin sivuilla oleva 15 minuutin data on aktivoituja ylös- ja alassätötehoja varteittain, joista pystyi muodostamaan vartille kohdistuneet säätösuunnat. Koska 15 minuutin ylös- ja alassätötunnilla ei ole olemassa vielä tasesähköhintoja käytettiin hintana aina sille tunnille muodostunutta tunnin toteutunutta hintaa.

Tarkastelu osoitti, että Outokumpu Tornion kuormitusprofiililla siirryttäessä tunnin taseselvitysjaksosta 15 minuutin taseselvitysjaksoon ei tuo lisäkustannuksia. Lisäkustannukset tulevat volyymikustannuksista ja ne ovat marginaalisia verrattuna tehtaan kokonais-sähkönkäytön volyymiin. Luotettavampi lopputulos tasesähkökustannusvertailussa olisi saatu, jos tarkastelun olisi pystynyt tekemään autenttisella vuoden kulutusdatalla. Kolmen minuutin aikasarja oli saatavilla vuoden ajalta mutta se oli huonolaatuinen. Aikaleimoista puuttui tehoarvoja sieltä täältä pitkiäkin aikajaksoja. Työssä käytettyä kuukauden aikasarjaakin piti paikkailla, jotta sen sai käyttökelpoiseksi. Työssä kuitenkin osoitettiin, että sää-tösuuntien keskinäiset prosentuaaliset suhteet pysyvät samanlaisina tarkasteltiin niitä sitten kuukauden tai vuoden aikajaksossa. Siitä voidaan vetää johtopäätös, että vuoden tarkaste-lujaksollakin päädyttäisiin tunnin ja vartin tasesähkökustannuksissa suurin piirtein samoi-hin kustannuksiin, mikäli Outokummun kuormitusprofiili säilyy jatkossakin samanlaisena. Tasesähkökustannusvertailu on syytä vielä varmistaa toisella laskennalla, kun EMS:stä saadaan jatkossa luotettavaa kolmen minuutin aikasarjaa pidemmältä ajalta.

Jatkotoimenpiteet

Kaikkein paras strategia jatkossakin on pyrkiä ennustamaan kulutus mahdollisimman tarkasti. Tällöin ei tarvitse miettiä tasesähkökustannuksia ja -riskejä. Sähkömarkkinat muut-tuvat koko ajan ja mikään ei takaa sitä, etteikö esimerkiksi volyymimaksut tai tasesähköstä maksettavat hinnat voisivat nousta merkittävästi tulevaisuudessa. Tämän vuoksi Outo-kummun on jatkossa panostettava tarkempaan sähkönkulutuksen ennustamiseen niin Elspot-markkinoilla kuin taseen korjaukseen Elbas-markkinoilla sekä dynaamisen ennus-temallin kehittämiseen. Hyvä työkalu näitä varten tulee olemaan EMS-järjestelmä sekä sen sisään rakennettu dynaaminen ja toimiva ennustealgoritmi.

LÄHTEET

- Aalto et al. 2012 Aalto, A., Honkasalo, N., Järvinen, P., Jääskeläinen, J., Rai-ko, M., Sarvaranta, A. (2012). Loppuraportti ”mistä lisäjous-toa sähköjärjestelmään?”. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.10.2020]. Saatavilla:
https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoa_sahkojarjestelm aan_loppuraportti_28_11_2012.pdf
- Alatalo 2020 Alatalo, P. Site Manager, Aurora Infrastructure Oy. 2020. Haastattelu liittyen diplomityön aihepiiriin 18.08.2020.
- Anttila 2020 Anttila, J. Team Manager, Gasum Oy. 2020. Teams palaveri liittyen 15 min taseselvitykseen 10.09.2020.
- ELFI 2020 Suomen sähkökäyttäjät ry. 2020. Sähkön hinnan muodos-tuminen. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.10. 2020]. Saatavilla: <https://www.elfi.fi/sahkomarkkinat/sahkon-hinta/>
- eSett 2020a eSett Oy. 2020. Balance responsible parties. [Verkkodoku-menti]. [Viitattu 17.12.2020]. Saatavilla:
<https://opendata.esett.com/brp>
- eSett 2020b eSett Oy. 2020. Pohjoismaisen taseselvityksen käsikirja. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.12.2020]. Saatavilla:
https://www.esett.com/wp-content/uploads/2020/09/nbs_kasikirja_suomi_2.5.pdf
- EU 2017/2195 European Commission Regulation 2017. Establishing a guideline on electricity balancing. [Verkkodokumentti]. [Vii-tattu 11.10.2020]. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R2195&from=EN>

- Fingrid 2014 Fingrid Oyj. 2014. Sähkömarkkinatiedon julkaisuun liittyvän asetuksen sovellusohje. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.12.2020]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/sahkomarkkinainformaatio/markkinatiedon-sovellusohje.pdf>
- Fingrid 2018 Fingrid Oyj. 2018. Tarjousalueiden yhtenäisyys vuonna 2018. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.12.2020]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyytilastoja-sahkomarkkinoiden-yhtenaisyydesta/tarjousalueiden-yhtenaisyyys/#2008>
- Fingrid 2020a Fingrid Oyj. 2020. Reservivelvoitteet ja hankintakanavat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.12.2020]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservivel-voitteet-ja-hankintakanavat>
- Fingrid 2020b Fingrid Oyj. 2020. Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 28.12.2020]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>
- Fingrid 2020c Fingrid Oyj. 2020. Säättö sähkömarkkinoiden säännöt. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.12.2020]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/kuvat/valokuvat/hankkeet/saatosahkomarkkinasopimus-liite-1--saatosahkomarkkinat.pdf>
- Fingrid 2020d Fingrid Oyj. 2020. Kaksi- ja yksihintajärjestelmä. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.12.2020]. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/kaksi--ja-yksihinta-jarjestelma/>

Fingrid 2020e	Fingrid Oyj. 2020. Ylös- ja alassäätöhinnat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavilla: https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/?selected_datasets=244
Fingrid 2020f	Fingrid Oyj. 2020. Yleiset tasehallinnan ehdot. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/tas-esahkokauppa-ja-taseselvitys/liite-1-osa-1-fingrid-oyjn-yleiset-tasehallinnan-ehdot-.pdf
Fingrid 2020g	Fingrid Oyj. 2020. Tasemallin kuvaus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.12.2020]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/tasemallin-kuvaus/
Fingrid 2020h	Fingrid Oyj. 2020. Tasepalvelumaksut. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.12.2020]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/maksut/
Fingrid 2020i	Fingrid Oyj. 2020. 15 minuutin taseselvitysjakso. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.12.2020]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/
Fingrid 2020j	Fingrid Oyj. 2020. Sähköjärjestelmän tila. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 15.12.2020]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/
Fingrid 2020k	Fingrid Oyj. 2020. Taseselvitys. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.12.2020]. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/

- Fingrid 2020l Fingrid Oyj. 2020. Aktivoitu alassäättöteho. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.12.2020]. Saatavilla:
<https://data.fingrid.fi/dataset/aktivoitu-alassaatoteho>
- Fingrid 2020m Fingrid Oyj. 2020. Aktivoitu ylössäättöteho. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.12.2020]. Saatavilla:
<https://data.fingrid.fi/dataset/aktivoitu-ylossaatoteho>
- Fingrid 2020n Fingrid Oyj. 2020. Paljon uutta reservirintamalta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavilla:
<https://www.fingridlehti.fi/paljon-uutta-reservirintamalta/>
- Fingrid 2020o Fingrid Oyj. 2020. Energinet osallistuu pohjoismaiseen taseselvitykseen ja siirtyy eSett Oy:n osakkaaksi. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 01.01.2020]. Saatavilla:
<https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2019/energinet-osallistuu-pohjoismaiseen-taseselvitykseen-ja-siirtyy-esett-oy-n-osakkaaksi/>
- Heikka 2020 Heikka, J. Sähkömarkkina-asiantuntija. Fingrid Oyj. 2020. Puhelinkeskustelut 07.12.2020 ja 15.2.2021 liittyen tulevaan 15 minuutin taseselvitysjaksoon ja Elbas-kaupankäyntiin.
- Kolehmainen 2016 Kolehmainen, M. 2016. Palvelutuottajan Elbas-kaupankäynnin kehittäminen tasekustannusten minimoimiseksi perustuen säätösähkön hinnan odotusarvoon. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.12.2020]. Saatavilla:
<https://core.ac.uk/download/pdf/196556391.pdf>
- Korpinen et al. 2020 Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T., Falck, E. Yliaalto-opus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.10.2020]. Saatavilla:
<http://leenakorpinen.com/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

- Laine 2011 Laine, J. 2012. Tasehallinnan kehittäminen Suomen sähkömarkkinoilla. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto (LUT). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.10.2020]. Saatavilla:
<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/69362/nbnfi-fe201104121437.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Luolahti 2015 Luolahti, P. 2015. Sähkön hinnan suojaus pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Diplomityö. Tampereen yliopisto. Pro gradututkielma. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.10.2020].
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/96764/gradu07231.pdf;jsessionid=EB090BF85B608B8811A20CFA8606D9?sequence=1>
- Makkonen 2014 Makkonen, I. 2014. Päästökauppa ja sen vaikutus sähkön hintaan. Tutkimus. Suomen maataloustieteellisen seura. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.10.2020]. Saatavilla:
http://www.smts.fi/MTP_julkaisu_2014/Posterit/221Makkonen_Paastokauppa_ja_sen_vaikutukset_sahkon_hintaan.pdf
- Market Insider 2020 Markets insider. 2020. CO₂ European emission allowances. Prices. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.10.2020]. Saatavilla:
<https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-european-emission-allowances>
- Nasdaq 2021 Nasdaq 2021. Electricity Price Area Differentials (EPAD). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.02.2020]. Saatavilla:
<https://www.nasdaq.com/solutions/electricity-price-area-differentials-epad>
- Nord Pool 2020a Nord Pool. 2020. Intra-day prices. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 18.10.2020]. Saatavilla:
<https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Intraday/>

	Market-data1/Market-data1/Overview/?dd=FI&view=table
Nord Pool 2020b	Nord Pool. 2020. Day-ahead prices. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.11.2020]. Saatavilla: https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Hourly/?view=table
Nord Pool 2020c	Nord Pool. 2020. Day-ahead volumes. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 29.12.2020]. Saatavilla: https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Volumes/
Nord Pool 2020d	Nord Pool. 2020. Bidding areas. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.12.2020]. Saatavilla: https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Bidding-areas/
Outokumpu Oyj 2019a	Outokumpu Oyj. 2019. Tehtaan esittelykalvot. Yrityksen sisäinen dokumentti. Saatavilla tarvittaessa Outokumpu Oyj:stä.
Outokumpu Oyj 2019b	Outokumpu Oyj. 2019. Tehtaan esittelykalvot. Yrityksen sisäinen dokumentti. Saatavilla tarvittaessa Outokumpu Oyj:stä.
Partanen et al. 2020	Partanen J., Annala S., Lassila J., Honkapuro S. 2020. Sähkömarkkinat vuoden 2020 luentosarjan opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto (LUT). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 02.11.2020]. Saatavilla: https://moodle.lut.fi/pluginfile.php/241286/mod_resource/content/1/S%C3%A4hk%C3%B6markkinat-opetusmoniste%202020%20-%20julkaisu%20versio.pdf

- Partanen 2020a Partanen, J. 2020. Sähkömarkkinat luentosarjan vuoden 2020 opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto (LUT). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.11.2020]. Saatavilla: <https://moodle.lut.fi/pluginfile.php/18719/course/section/9221/Sahkomarkkinat-johdanto%202020.pdf>
- Partanen 2020b Partanen, J. 2020. Sähkömarkkinat luentosarja 2020. Luento 21.09.2020. Lappeenrannan teknillinen yliopisto (LUT)
- Rothovius et al. 2013 Rothovius, T., Nikkinen, J., Sihvonen, A., Klemola, A. 2013. Johdannaisten hyödyntäminen energiayhtiön liiketoiminnassa. Vaasan yliopiston julkaisuja ja raportteja. ISBN 978-952-476-509-1.[Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.11.2020]. Saatavilla: https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/7921/isbn_978-952-476-509-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Röntynen 2020 Röntynen, V. Energy Specialist, Physical Market, Gasum Oy. 2020. Sähköposti 30.11.2020
- Sihvonen 2015 Sihvonen, T. 2015. Sähkönmyyntiyhtiöiden riskienhallinnan haasteet ja kehittäminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto (LUT). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.02.2021]. Saatavilla: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/117716/Diplomity%C3%B6n%20raportti%2019.11.2015%20to%20PDF.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- TEM 2017 Työ- ja elinkeinoministeriö. 2017. Energian kulutus ja sähkön hinta metalliteollisuudessa. ISBN: 978-952-327-203-3. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 23.11.2020]. Saatavilla: http://copperalliance.fi/uploads/2017/03/tem_15_2017.pdf

TEM 2019

Työ- ja elinkeinoministeriö.2019. Sähköntuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 23.11.2020]. Saatavilla:

<https://tem.fi/documents/1410877/2132100/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019/8d83651e-9f66-07e5-4755-a2cb70585262/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotannon+skenaariolaskelmat+vuoteen+2050+%E2%80%93selvitys+22.2.2019.pdf>

Tilastokeskus 2020

Tilastokeskus.2020. Energian hinnat. ISSN=1799-7884.1. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 30.12.2020]. Saatavilla:
https://www.stat.fi/til/ehi/2020/01/ehi_2020_01_2020-06-11_kuv_006_fi.html

Vakkilainen&Kivistö 2020

Vakkilainen, E., Kivistö A. Sähkön tuotantokustannusvertailu 2017. Tutkimusraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto (LUT). ISBN 978-952-335-123-3. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 30.12.2020]. Saatavilla:
https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143861/S%c3%a4hk%c3%b6n%20tuotantokustannusvertailu_ok.pdf?sequence=2&isAllowed=y