



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# **Bilansienergia hindade lühiajaline prognoosimine tehismärvivõrkudega**

**Elektroenergeetika õppekava**

**Kõrgepingetehnika õppetool**

**Magistritöö**

Õppetooli juhataja	prof	J. Valtin
Juhendaja	prof	J. Valtin
Konsultandid		P. J. Pikk
Lõpetaja		M. Andresen

**Tallinn 2015**

## **Töö kaitsmine**

Lõputöö on kaitsstud ..... 2015 ahindele .....

Kaitsmiskomisjoni esimees (nimi ja allkiri)\_\_\_\_\_

# **Autorideklaratsioon**

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev): \_\_\_\_\_

# Lõputöö kokkuvõte

*Autor:* Mari Andresen

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* BILANSIENERGIA HINDADE LÜHIAJALINE PROGNOOSIMINE  
TEHISNÄRVIVÕRKUDEGA

*Kuupäev:* 27.05.2015

98 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Energeetikateaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika instituut

*Õppetool:* Kõrgepingetehnika õppetool

*Töö juhendaja:* prof Juhan Valtin

*Töö konsultant:* Peeter-Jass Pikk

*Sisu kirjeldus:*

Käesolevas magistritöös uuritakse bilansienergia hindade kaks tundi ette prognoosimise võimalikkust tehisnärvivõrkude mudeliga. Hindade modelleerimine teostatakse 2015. aasta aprilli kuu kohta ning eesmärgiks on mudeli väljundina võimalikult täpselt ennustada bilansienergia hindade suundasid võrreldes NPS hindadega. Mudeli teiseks eesmärgiks on ekstreemsete hindade korral anda vastav hinnasignaal. Magistritöö koosneb viiest osast. Töö esimeses osas antakse ülevaade kasutatavatest prognoosimeetoditest. Töö teises osas antakse ülevaade bilansienergia hindade kujunemisest ning teostatakse hindade analüüsid kahel perioodil: alates 2013. aasta algusest kuni 2015. aasta märtsi lõpuni ning 2015. aasta 1. kvartali hindade põhjal. Töö kolmandas peatükis analüüsitakse, kuidas mõjutavad Eesti ning Baltikumi summaarne eabilanss bilansienergia hindasid ning nende kujunemist. Samuti analüüsitakse, kuidas Eesti elektrisüsteemi ühendatud tuuleparkide toodang ja tuule kiirus mõjutavad bilansienergia hindade kujunemist. Bilansienergia hindade modelleerimiseks on tarvis prognoosida Eesti elektrisüsteemi ja Baltikumi summaarne eabilanss kaks tundi ette. Erinevaid prognoosimise võimalusi rakendatakse magistritöö neljandas osas. Parimad valitud mudeleid rakendatakse bilansienergia hindade prognoosimudelid. Töö viimases, viiendas osas käsitletakse bilansienergia hindade prognoosimist ning prognoositulemusi. Mudeli tulemuste hindamiseks prognoositakse bilansienergia hindu ka reaalsete Eesti ja Baltikumi eabilansside korral ning võrreldakse tulemusi esialgse mudeliga. Selgus, et esialgne mudel ei andnud soovitud tulemusi kuid süsteemide eabilansside prognoositulemuste parandamisel paraneksid ka mudeli tulemused.

*Märksõnad:* bilansienergia, bilansienergia hind, Nord Pool Spot, prognoosimine, tehisnärvivõrgud, GRNN, MLFN, libisev keskmine

# Summary of the diploma work

*Author:* Mari Andresen

*Kind of the work:* Master's Thesis

*Title:* SHORT-TERM FORECASTING OF BALANCING ENERGY PRICES WITH THE APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

*Date:* 27.05.2015

98 pages

*University* Tallinn University of Technology

*Faculty:* Faculty of Power Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering

*Chair:* Chair of High Voltage Engineering

*Tutor of the work:* prof Juhan Valtin

*Consultant:* Peeter-Jass Pikk

*Abstract:*

The aim of this paper is to forecast balancing energy prices two hours ahead using Artificial Neural Networks. The simulation covers the period of April 2015 by using the historical market data available. The purpose is to predict balancing energy prices direction in order to assess whether the prices are higher or lower than the NPS price at the same hour. Another objective of the model is to predict extreme prices, to provide a signal when the price falls to either end of the extreme, i.e., it is very high or very low compared to the NPS price. In the first part of the paper, a short overview of the forecasting methods is given. The second part of the thesis provides an outline for formation of balancing energy prices. Additionally, analyses of historical prices are made in two periods – firstly, starting from January 2013 to the end of March 2015, and secondly, from January to March 2015. The third chapter concentrates on assessment of factors that have an impact on balancing energy prices, for instance, the Estonian and Baltic States imbalances, wind speed and planned wind parks production. In order to forecast balancing energy prices, Estonian and Baltic States imbalances prediction is also needed. Thus, in section four, multiple models are tested and the most suitable ones selected. It is displayed how such models are used for predicting Estonian and Baltic States imbalances two hours ahead. The last section of the work – the fifth part – addresses the methods used for forecasting balancing energy prices. Prices are predicted by measuring the imbalances of the forecasted systems against real ones to compare the models' results. The outcome of the work indicates that the initial model does not give expected results; however, by improving the prognosis of systems imbalances, the model results could be potentially improved.

*Key words:* Balancing energy, balancing energy prices, Nord Pool Spot, forecasting, artificial neural networks, GRNN, MLFN, moving average

# Sisukord

<b>Lõputöö ülesanne.....</b>	<b>8</b>
<b>Lühendite loetelu .....</b>	<b>9</b>
<b>Eessõna .....</b>	<b>10</b>
<b>Sissejuhatus .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Aegridade analüüs .....</b>	<b>14</b>
1.1. Tehisnärvivõrgud .....	15
1.2. Libiseva keskmise meetod .....	20
1.3. Otsustuspuu.....	21
<b>2. Bilansienergia hinna analüüs.....</b>	<b>23</b>
2.1. Bilansienergia hindade kujunemine .....	23
2.2. Bilansienergia hindade analüüs 01.2013-03.2015 .....	26
2.3. Bilansienergia hindade analüüs 01.2015-03.2015 .....	29
<b>3. Bilansienergia hinna mõjutavad tegurid .....</b>	<b>33</b>
3.1. Andmete korrastus .....	33
3.2. Vahelduvvoolu saldo suuna mõju bilansienergia hindadele .....	33
3.3. Balti riikide saldo suuna mõju bilansienergia hindadele .....	38
3.4. Vvsaldo ja Balti saldo ühine mõju bilansienergia hindadele .....	41
3.5. Tuule kiiruse ja toodangu mõju bilansienergia hindadele .....	45
3.6. Tulemused ja järeldused .....	49
<b>4. Vvsaldo ja Balti saldo prognoos .....</b>	<b>51</b>
4.1. Andmete ettevalmistamine .....	51
4.2. Tulemuste hindamise alused .....	52
4.3. Närvivõrgu mudelid.....	53
4.4. Libiseva keskmise mudelid.....	58
4.5. Hübriidmudel .....	61
4.6. Parima mudeli valik .....	61
<b>5. Bilansienergia hinna modelleerimine .....</b>	<b>64</b>
5.1. Närvivõrgu sisendid.....	64
5.2. Närvivõrgu treenimine ja prognoosimine .....	65
5.3. Bilansienergia hinna prognoosi tulemused .....	67
5.4. Bilansienergia hinna prognoosi tulemused tegelike vvsaldo ja Balti saldo väärtustega.....	73

5.5.	Tulemused.....	79
5.6.	Järeldused .....	82
<b>Lõputöö kokkuvõte.....</b>		<b>84</b>
<b>Kasutatud kirjandus .....</b>		<b>87</b>
<b>Lisad.....</b>		<b>90</b>
L.1.	Kuude ja aastate keskmised NPS , bilansienergia ostu- ja müügihinnad .....	91
L.2.	Vvsaldo närvivõrkude treenimise tulemused .....	92
L.3.	Balti saldo närvivõrkude treenimise tulemused.....	93
L.4.	Vvsaldo närvivõrkude testimise tulemuste graafiline kujutis.....	94
L.5.	Balti saldo närvivõrkude testimise tulemuste graafiline kujutis perioodil .....	95
L.6.	Vvsaldo libiseva keskmiste mudelite testimise tulemuste graafiline kujutis.....	96
L.7.	Balti saldo libiseva keskmiste mudelite testimise tulemuste graafiline kujutis.....	97
L.8.	Bilansienergia hindade saabumiskuupäevad aprillis 2015 .....	98

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Bilansienergia hindade lühiajaline prognoosimine tehisnärvivõrkudega</b>
Üliõpilane:	<b>Mari Andresen, 132252AAVM</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>prof Juhan Valtin</b>
Õppetool:	<b>Kõrgepingetehnika</b>
Õppetooli juhataja:	<b>prof Juhan Valtin</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>27.05.2015</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppetooli juhataja (allkiri)

## Teema põhjendus:

Bilansihaldusettevõtte suurimad kulud tulenevad bilansijuhtimisest – eabilansi katmiseks tehtavatest kulutustest. Oluliseks teemaks bilansihalduritel on tarbimise ja tootmise prognoosimine ja selle täpsus, millest tulenevalt kulud tekivad. Üheks eabilansi vähendamise võimaluseks on kasutada päevasisest turgu Elbas, kus järgmise päeva kauplemine algab kell 15:00 ning sulgub tund enne konkreetse tunni algust. Ülejäänud eabilanss tuleb arveldada süsteemioperaatoriga bilansienergia hindade alusel, mis avalikustatakse alles päevi hiljem. Ajalooliselt on bilansienergia hinnad varieerunud väga suurtes ulatustes (3,11 EUR/MWh kuni 279 EUR/MWh), moodustades antud tunnil maksimaalse hinnaerinevuse NPS börsihinna ja bilansienergia hinna vahel 203 EUR/MWh. Teades ette ekstreemsete bilansienergia hindadega tunde, saaks bilansihaldur uuendada antud tunni portfelli prognoosi ning päevasisesel turul portfell tasakaalu viia. Antud viisil oleks võimalik vältida kõrgete bilansienergia hindade korral bilansienergia ostmist.

## Töö eesmärk:

Antud magistritöö eesmärgiks on koostada mudel, mis prognoosib bilansienergia hindasid kaks tundi ette ning ekstreemsete bilansienergia hindade korral annab vastava signaali. Oluline pole mitte niivõrd täpselt prognoosida hinna väärtus, kui bilansienergia hindade suund (kõrgem või madalam NPS hinnast). Sellisel juhul on võimalik kontrollida portfelli prognoosi ning vajadusel teha korrekture, vältimaks suurt eabilanssi antud tunnil.



## **Lahendamisele kuuluvate ülesannete loetelu:**

- Aegridade analüüsi metoodikate ülevaade
- Mis on bilansienergia hind ning kuidas see kujuneb?
- Bilansienergia hindade analüüs
- Bilansienergia hinda mõjutavad tegurid
- Bilansienergia hinna lühiajalise prognoosimudeli koostamine

## **Lähteandmed:**

Töö tulemuste saavutamiseks analüüsitakse erinevaid arvandmeid ning ajalooliste seoste alustel koostatakse põhimõtted, bilansienergia hindade prognoosimudeli koostamiseks. Andmete analüüsiks kasutatakse tabelarvutusi ning VBA makrosid, Palisade NeuralTools ja StatTools lisasid Excelis.

## **Lõputöö konsultandid:**

---

Peeter-Jass Pikk (allkiri, kuupäev)

## Lühendite loetelu

- ANN2013** – Närvivõrgu mudel, mis kasutab vvsaldo ja Balti saldo väärtuste prognoosimiseks andmeid alates 2013. aasta algusest
- ANN2014** – Närvivõrgu mudel, mis kasutab vvsaldo ja Balti saldo väärtuste prognoosimiseks andmeid alates 2014. aasta algusest
- ANN2015** – Närvivõrgu mudel, mis kasutab vvsaldo ja Balti saldo väärtuste prognoosimiseks andmeid alates 2014. aasta algusest
- BEM** – Bilansienergia müügihind
- BEO** – Bilansienergia ostuhind
- GRNN** – Närvivõrgu tüüp (Generalized Regression Neural Nets)
- Kaal2** – Kaalutud libiseva keskmise mudel, mis kasutab väärtuse arvutamiseks viimase kahe tunni väärtusi
- Kaal3** – Kaalutud libiseva keskmise mudel, mis kasutab väärtuse arvutamiseks viimase kolme tunni väärtusi
- Kesk2** – Aritmeetilise libiseva keskmise mudel, mis kasutab väärtuse arvutamiseks viimase kahe tunni väärtusi
- Kesk3** – Aritmeetilise libiseva keskmise mudel, mis kasutab väärtuse arvutamiseks viimase kahe tunni väärtusi
- MAE** – Keskmise absoluutviga
- MLFN** – Närvivõrgu tüüp (Multilayer Feedforward Network)
- NPS** – Nord Pool Spot börsihind
- NPS-BEM** – NPS hinna ja bilansienergia müügihinna vahe
- NPS-BEO** – NPS hinna ja bilansienergia ostuhinna vahe
- RMSE** – Ruutkeskmise viga
- Vvsaldo** – Eesti elektrisüsteemi tegeliku vahelduvvoolu saldo ja planeeritud vahelduvvoolu saldo vahe

## Eessõna

Magistritöö teemapüstitus „Bilansienergia hindade lühiajaline prognoosimine tehisnärvivõrkudega“ sai valitud koostöös lõputöö konsultandiga, lähtudes Baltikumi uue avatud tarne lepingu ning bilansienergia hindade aktuaalsusest bilansihaldusettevõtte igapäevases töös. Samuti oli teema valikul oluline osa ka autori isiklikul huvil mõista bilansienergia hindade kujunemist, sõltuvust teistest teguritest ning prognoositavust. Töö raames lahendatavad küsimused omavad ka autori igapäevatoos kesksed rollid.

Töö autor avaldab tänud juhendajale prof Juhan Valtinile ning Peeter-Jass Pikkale, kes abistasid andmete kogumise ning praktiliste nõuannetega. Erinevad arutelud olid suureks abiks magistritöö koostamisel.

Lõputöö autori alaline elukoht asub lõputöö kaitsmise ajal Tallinnas.

Kõik lõputööd puudutavad küsimused, kommentaarid ja teated palun edastada e-posti aadressile: [mariandresen@gmail.com](mailto:mariandresen@gmail.com)

## Sissejuhatus

Elektrituru avanemisest tulenevalt tekkis vajadus bilansihaldurite järele, kes aitavad süsteemioperaatoril, Eleringil, Eesti elektrisüsteemi bilanssi tagada. Elering vastutab süsteemihaldurina Eesti elektrisüsteemi bilansi tagamise ja bilansihaldurite bilansside selgitamise eest. Bilansihaldurid omakorda vastutavad enda portfelli bilansi tagamise eest. Täna tegutseb Eestis bilansihaldurina 8 ettevõtet (lisaks Eleringile), kelle portfellidesse on kogu Eesti tarbimine ja tootmine koondatud. Suurimad neist on Eesti Energia AS, Baltic Energy Services OÜ ja Elektrum Eesti OÜ, kelle portfellidesse kuulub kokku 84% (2015. aasta veebruari seisuga) Eesti turuosast.

Vastavalt elektrituru toimimise põhimõtetele peab iga turuosaline tagama, et tema poolt võrku antud ja/või ostetud elektrienergia kogus oleks igal kauplemisperioodil võrdne tema poolt võrgust võetud ja/või müüdud elektrienergia kogusega. Kuna praktikas pole turuosalisel igatunniselt selleks võimelised, peab neist igatühele olema ühe tarnijaga leping, millega tagatakse puudujääva elektrienergia müük ja üle jääva energia ost ehk nn. avatud tarne. Sellist avatud tarnijat, kellel on omakorda avatud tarne leping süsteemihalduriga, nimetatakse bilansihalduriks. [1].

Bilansihaldurid prognoosivad oma portfellis olevate klientide tarbimist/tootmist ning vastavalt sellele teevad igapäevaselt Nord Pool Spot (NPS) elektribörsile oma ostu- ja müügipakkumised. Klientide tarbimine/tootmine ei ole alati lihtsasti prognoositav ning tegelikku tarbimist/tootmist võivad mõjutada paljud raskesti ennustatavad tegurid, nagu näiteks avariid elektrijaamades või tootmisüksustes, ilm (temperatuur, tuul, päikeseline või pilvine ilm), tootmisvõimsuste suurendamine, puudulik kommunikatsioon jne.

Kuna praktikas pole võimalik igatunniselt täpset tarbimist/tootmist prognoosida, siis vahe planeeritud ja mõõdetud tarnete vahel tuleb katta vastavalt bilansienergiat ostes või müües. Teadaoleva eabilansi korral (näiteks plaaniväline hooldus) on võimalik puudu või üleolev kogus kuni kaks tundi enne tarneperioodi algust päevasisesel elektriturul, Elbasil, kaubelda vastavalt seal kujuneva hinnaga. Eeliseks on teadaolev tarne hind Elbasil, mille kaudu on võimalik hinnariski maandada, teadmata, milliseks kujuneb antud tunni bilansienergia hind.

Ettenägematu asjaolusid juhtub, näiteks puhub prognoositust tugevam tuul ning seetõttu toodavad ka tuuleelektrijaamad planeeritavast enam. Sellisel juhul on tekkinud eabilanss planeeritud ja tegeliku toodangu vahel. Bilansihalduril on kaks võimalust antud olukorras käitumiseks:

- **Passiivne tegutsemine** – mille korral ei võeta eabilansi vähendamiseks midagi ette ning ostetakse/müüakse bilansienergiat. Säilib risk osta kõrgete/müüa madalate bilansienergia hinnaga. Samuti säilib võimalus vastupidiseks, osta madalate/ müüa kõrgete hindadega.
- **Aktiivne tegutsemine** – mille korral bilansihaldur kaupleb uue toodangu prognoosi alusel puudu või üleoleva koguse päevasisesel turul, vähendades seejuures bilansienergia ostu/müüki. Kuna bilansienergia hinnad pole ette teada, siis maandab bilansihaldur antud tegevusega riski kõrgete bilansienergia ostu-/madalate bilansienergia müügihindade ees.

Bilansienergia hinnakujundus peaks motiveerima bilansihaldureid võimalikult täpselt oma bilanssi planeerima. Parima motivatsiooni selleks tekitab vastav bilansienergia hinnakujundus, mil bilansienergia on kõige kallim hind energia eest antud tunnil. Seda lähenemist praktiseerib näiteks Leedu, kus bilansienergia ostuhind on alati kallim ning bilansienergia müügihind alati odavam kui NPS hind. Eesti elektriturul praktikas pole see aga alati nii, üldjuhul bilansienergia ostuhind ei erine palju müügihinnast ning on oluliselt kõrgemad või madalamad NPS hinnast. Käesoleva töö raames jõutakse selgusele, kas on võimalik lühiajaliselt ette prognoosida bilansienergia hindade kujunemist.

Antud magistritöö eesmärgiks on koostada mudel, mis prognoosib bilansienergia hindasid kaks tundi ette ning annab ekstreemsete bilansienergia hindade korral vastava signaali. Oluline pole niivõrd täpselt prognoosida hinna väärtus, kui bilansienergia hindade suund (kõrgem või madalam NPS hinnast). juhul on võimalik kontrollida portfelli prognoosi ning vajadusel teha korrekture vältimaks suurt eabilanssi antud tunnil. Töö eesmärgi saavutamiseks on autor püstitanud järgnevad uurimisülesanded:

- Aegridade analüüsi meetodikate ülevaade
- Mis on bilansienergia hind ning kuidas see kujuneb?
- Bilansienergia hindade analüüs
- Bilansienergia hinda mõjutavad tegurid
- Bilansienergia hinna lühiajalise prognoosimudeli koostamine

Töö tulemuste saavutamiseks analüüsitakse erinevaid arvandmeid ning koostatakse ajalooliste seoste alustel põhimõtted bilansienergia hindade prognoosimudeli koostamiseks. Andmete analüüsiks kasutatakse tabelarvutusi ning VBA makrosid, Palisade NeuralTools ja StatTools lisasid Excelis.

Käesolev magistritöö on struktureeritud viide suuremasse jaotusesse. Töö esimeses peatükis kirjeldatakse põgusalt erinevaid aegridade analüüsi võimalusi. Lähtudes eelnevalt tehtud

uuringutele ja artiklitele on välja valitud kaks prognoosimeetodit ning üks loogikameetod. Kirjeldatakse pikemalt tehisnärvivõrkude olemust ning kahe erineva närvivõrgu (MLFN ja GRNN), libiseva keskmise ning otsustuspuu meetodeid ning tööpõhimõtteid, mida rakendatakse töö eesmärgi saavutamiseks.

Töö teises osas tuuakse välja Eesti bilansienergia hinna teoreetiline kujunemine; analüüsitakse bilansienergia ajaloolisi hindasid ning võrreldakse neid NPS hindadega. Töö kolmandas osas analüüsitakse bilansienergia hindu mõjutavaid tegureid, eesmärgiga kasutada neid bilansienergia hindade modelleerimisel. Analüüsitakse, kuidas mõjutavad bilansienergia hindasid ning hindade kujunemist Eesti ning Baltikumi summaarne eabilanss ning analüüsitakse tuule kiiruse ja planeeritud tuule toodangu seost bilansienergia hindadega.

Magistritöö neljandas peatükis koostatakse Eesti ja Baltikumi eabilansside kaks tundi ette prognoosimiseks kolm närvivõrgu mudelit, neli libiseva keskmise mudelit ning hübriidmudel kahest parimast eelnevalt nimetatud mudelist. Parimat mudelit rakendatakse eabilansside prognoosimiseks ning bilansienergia hindade mudelis sisenditena.

Töö viies osa keskendub bilansienergia hindade prognoosimisele. Selgitatakse mudeli koostamist ning prognoosimise põhimõtteid. Hindasid prognoositakse kaks tundi ette ning vastavalt otsustuspuul kujutatud loogika algoritmile, annab mudel „väga madal hind“, „madal hind“, „kõrge hind“, „väga kõrge hind“ signaali. Mudeli täpsuse hindamiseks võrreldakse saadud tulemusi tegelike hindadega. Tulemuste analüüsimisel pööratakse suuremat tähelepanu just bilansienergia hinna suuna prognoosimise täpsusele (võrreldes antud tunni börsi hinnaga), ning kontrollitakse, kas mudel suudab väga madalate ja väga kõrgete hindade korral märguande õigesti anda. Koostatakse ka alternatiivne mudel, kus kasutatakse tegelikult kujunenud süsteemide eabilansse. Kahe mudeli tulemuste võrdlemine on üks võimalustest prognoosimudeli kitsaskohtade leidmiseks.

# 1. Aegridade analüüs

Aegrida on mingi näitaja arvuliste väärtuste jada ning iseloomustab näitaja taset vastavatel ajamomentidel või perioodidel. Tavaliselt on andmed registreeritud võrdsete intervallidega. Aegrida on olemuselt pidev, kuid tinglikult diskreetne. [2]

Aegridade analüüsi meetodeid on erinevaid. Põhiline erinevus andmekaevandamise ja traditsioonilise statistika vahel, lähtudes toimimise loogikast, on see, et formaalne järeldav statistika on juhitud oletustest – formaliseeritakse hüpotees ning kontrollitakse seda teatud etteantud olulisuse nivool. Andmekaevandus toimib aga vastupidiselt, juhitud avastustest – mustrid ja hüpoteesid genereeritakse andmetest automaatselt. Teisisõnu, andmekaevandust juhivad pigem andmed ning statistilist analüüsi inimesed. [3]

Üldjuhul prognoosi meetodid on jaotatud kolme peamiseks gruppi [4]:

- Hinnanguline prognoos – põhineb subjektiivsel hinnangul, intuitsioonil, sise- või mõne muu olulise info kasutamine;
- Ühedimensiooniline meetod – prognoos ja selle täpsus sõltub ainult ühe muutuja oleviku ja mineviku väärtustes ning omavad lineaarset trendi;
- Mitmedimensiooniline meetod – kus prognoositava muutuja väärtus sõltub (vähemalt osaliselt) ühest või enamast teisest aegrea väärtusest.

*Vector autoregressive (VAR)* ja *vector error correction (VEC)* mudelid on enamlevinud mitmedimensioonilise meetodi alla kuuluvad mudelid. Antud mudelid eeldavad oleviku ja mineviku väärtuste ning muutuja ja sõltuvate väärtuste vahel lineaarset seost. [4] Küll aga tegelikkuses on harva aegread ainult lineaarses seoses. Seetõttu vaadeldakse antud töös rohkem mittelineaarset seost eeldavaid tehnikaid, nagu näiteks andmekaevandamist.

Andmekaevandamise tehnikad (*data mining techniques*) on kasulikud lahendamaks paljusid erinevaid probleeme, mis on seotud suurte andmemahitudega. Analüüsitud andmete vahelised korrelatsioonid, reeglid, mustrid jne, aitavad analüütikul teha parimaid otsuseid, sealhulgas analüüsida ja prognoosida vajalikke näitajaid.

Andmekaevandamise tehnikad on laialdaselt ja väga edukalt kasutatud paljudes erinevates valdkondades, nagu finants [5], majandus [4], turunduses [6], meditsiinis [7], energeetikas [8] [9] jne.

Andmekaevandamise laialdasemalt kasutatavad tehnikad on [10]:

- Otsustuspuu (*decision tree*);

- PCA (*principal component analysis*);
- Regressiooni analüüs;
- Tehisnärvivõrgud.

Teadaolevalt pole eelnevalt laialdaselt bilansienergia hinna või selle suuna prognoosimiseks teaduslikke mudeleid rakendatud. Poola süsteemioperaatori poolt avaldatud artiklis [11] võrreldi küll erinevaid prognoosi meetodeid päev-ette, kuu ette ja aasta ette nõudluse prognoosimiseks, ja süsteemi talitluse ning bilansi tasakaalustamise võimalikkuse hindamiseks, aga antud meetodid keskendusid siiski nõudluse prognoosimisele, mitte bilansienergia kujunemise või hinna prognoosimisele.

Küll aga on uuritud ja analüüsitud erinevaid mudeleid erinevatest majandusvaldkondadest. Nafta hinna prognoosimisel [4] on ANN mudel andnud usaldusväärsemaid ja täpsemaid tulemusi kui eelnevalt kirjeldatud VAR ja VEC mudelid. Samuti on närvivõrude kasutamine olnud edukas lühiajalise elektrienergia tarbimise prognoosimisel jaotusvõrkudes [12], kui ka päikesepaneelide elektrienergia tootmise [8] ja hüdroelektrijaamade tootmise ja vee juurdevoolu [13] prognoosimiseks.

Närvivõrkude eelistena on välja toodud võime andmete paralleeltöötlemisele ning oskust teha üldisi üldistusi andmetes [4]. Mitmedimensiooniline modelleerimine võimaldab kasutada mitte-lineaarseid ja parameetrilisi aegridu sisenditena. [9] Olgugi, et mahukate andmemassiivide treenimine võib olla ajamahukas, aga kui närvivõrk on treenitud, siis väljundite genereerimine/prognoosimine toimub väga kiiresti.

Antud töös keskendutakse peamiselt tehisnärvivõrkude rakendamisele. Närvivõrkude tulemusi võrreldakse libiseva keskmise meetodi rakendamisel saadud tulemustega. Otsustuspuu meetodit rakendatakse viimases staadiumis, lõpliku hinnangu andmiseks.

## 1.1. Tehisnärvivõrgud

Närvivõrgud on tehisintellekti meetod, mis võimaldab tekitada mittelineaarse sõltuvuse sisend- ja väljundmuutujate vahel. Närvivõrgu toimimise põhimõte on sarnane kesknärvisüsteemiga, koosnedes paljudes omavahel seotud neuronitest. [14]

Närvivõrgud on reaalse maailma statistilised mudelid, mis ehitatakse üles parameetrite häälestamise abil. Need parameetrid, tuntud kui kaalud (*weights*), kirjeldavad mudelit, mis moodustub sisendite (*inputs*) ja väljundite (*outputs*) vaheliste seoste kaardistamise teel. Parameetrite häälestamine õigetele väärtustele – treenimine (*training*) – viiakse läbi sooritades mudelis katseid erinevate sisendite ja väljundite paaride vaheliste kaalude kohandamise teel. Kaale



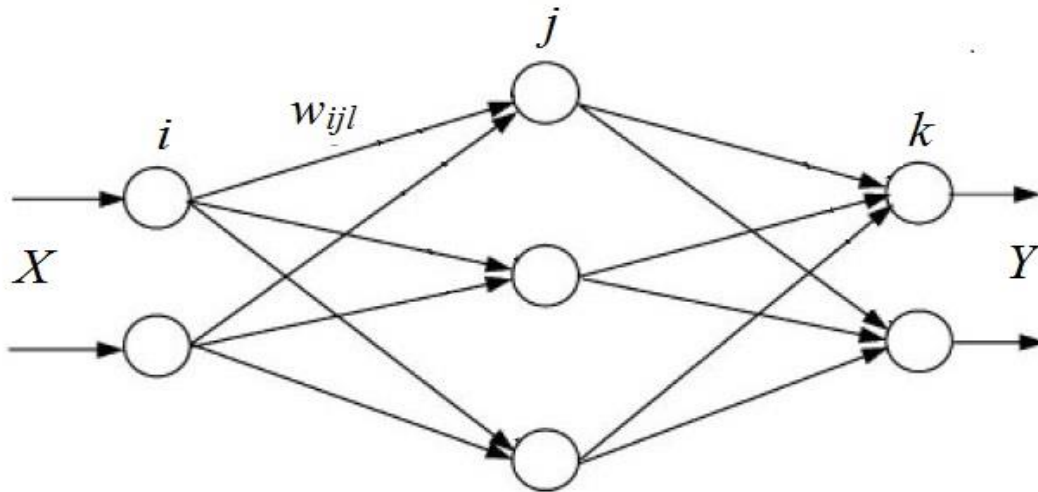
kohandatakse, et vähendada viga mudeli poolt ennustatava väärtuse ja tegeliku väärtuse vahel. Hetkel, mil kaalud on määratletud, on mudel võimeline tootma väärtusi väljunditele, millede sisenditel puudusid vastavad väljundi väärtused. Siinjuures ei viita mudel enam algselt tema treenimisel osalenud andmetele kui ta on juba treenitud, selle tõttu on see mudel funktsiooniline kokkuvõtte treeningandmetest. [14, 15]

Neuronite asetuse ja käitumise järgi võib närvivõrkudel olla mitmeid konfiguratsioone. Närvivõrgud jagunevad kaheks tüübiks: otsesuunatud ja rekurentsed (tagasisidega). Otsesuunatud võrgu neuroni väljund võib olla seotud ainult järgmisel kihil oleva neuroni sisendiga. Tagasisidega ehk rekurentsetes võrkudes neuroni väljund võib olla ühendatud nii järgmise kihi neuronite sisenditega kui ka eelmiste kihtide neuronite sisenditega. [16]

Antud töös käsitletakse närvivõrkude süsteemina kõige levinumat ja universaalsemat närvivõrkude tüüpi, milleks on mitmekihiline otsesuunatud preseptron võrk, ehk MLFN (*Multilayer Feedforwrd Network*), mõningates allikates viidatud kui MLP [15] (*Multilayer perseptron Networks*).

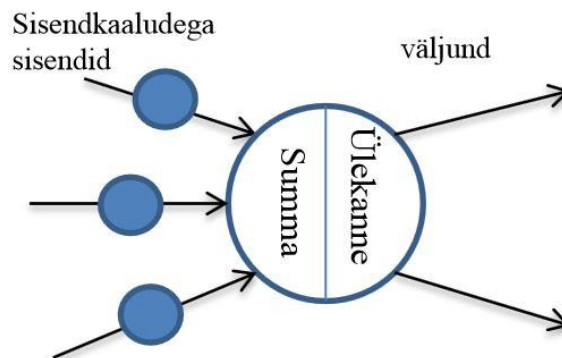
Otsesuunatuks nimetatakse närvivõrku, milles iga neuroni väljund võib olla seotud ainult järgmisel kihil oleva neuroni sisendiga. Mitmekihiline preseptron (*multilayered perceptron*) on kõige levinum otsesuunatud võrk. Neuronid paiknevad kihiti. Närvivõrk võib koosneda suvalisest arvust neuroneist ja närvivõrgu kihtidest. Iga kihi iga neuroni väljund on seotud järgmise kihi iga neuroni ühe sisendiga. ("igauks igäuhega" printsiibi järgi). [16]

Joonisel 1.1 on kujutatud närvivõrgu struktuuri kolme kihi varjatud elementidega. Mitmekihilises preseptronis on alati vähemalt üks sisendkiht ( $X$ ), vähemalt üks väljundkiht ( $Y$ ), ülejäänud kihid ( $i, j, k$ ) on peidetud kihid. Peidetud kihtide sisendid ja väljundid ei ole otseselt seotud väliskeskkonnaga. Selle kihi neuronid saavad informatsiooni eelmise kihi neuronite väljunditest, teisendavad seda ja annavad edasi järgmise kihi neuronite sisenditele. Väljundkihi neuronite ülesanne on arvutada võrgu väljundid. [16]



Joonis 1.1. Närvivõrgu baasstruktuur kolme kihi varjatud elementidega

Erineva kihi neuronid on omavahel ühendatud, sama kihi neuronite vahel ühendus aga puudub. Iga neuron kasutab ülekandefunktsiooni, töötlemaks sisend või sisendid väljundiks. Neuronite omavahelised ühendused on eri kaaludega, mida võetakse arvesse summeerimisel ja väljundi andmisel. [17] Neuronit iseloomustav pilt on toodud joonisel 1.2.



Joonis 1.2. Närvivõrgu neuron [17]

Iga neuroni sisend korrutatakse läbi vastava kaalukoefitsiendiga ( $W_{ij}$ ) kus  $i$  täht tähistab selle neuroni sisendit,  $j$ - neuroni järjekorra number ja teine tähis antud neuroni väljundit. Kaalutud neuroni sisendid summeeritakse ja lisandatakse neuroni nihe  $\theta_{ij}$ . Nendest summadest arvutatakse vaadeldava kihi kõikide neuronite väljundid. Need väljundid on järgmise kihi neuronite sisenditeks. Ja nii edasi kuni väljundkihi neuronite väljundväärtused moodustavad närvivõrgu väljundvektori. [16]

Järgnevalt on toodud kahekihilise närvivõrgu võrrand, millel on  $n$  sisendit,  $m$  väljundit ja  $k$  neuronit ühel peidetud kihil. [16]

$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$  on närvivõrgu sisendvektor;

$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}$  on väljundvektor;

$W_1 = \begin{bmatrix} w_{111} & \cdots & w_{n11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{1k1} & \cdots & w_{nk1} \end{bmatrix}$  on peidetud kihi kaalukoefitsientide maatriks;

$\Theta_1 = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{k1} \end{bmatrix}$  on peidetud kihi nihete veektor;

$W_2 = \begin{bmatrix} w_{112} & \cdots & w_{k12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{1m2} & \cdots & w_{km2} \end{bmatrix}$  on väljund kihi kaalukoefitsientide maatriks;

$\Theta_2 = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{m2} \end{bmatrix}$  on väljund kihi nihete veektor;

$F_1$  on peidetud kihi neuronite aktiveerimisfunktsioon;

$F_2$  on väljund kihi neuronite aktiveerimisfunktsioon.

Kahekihilise pertseptroni matemaatiline funktsioon avaldub kujul [16]:

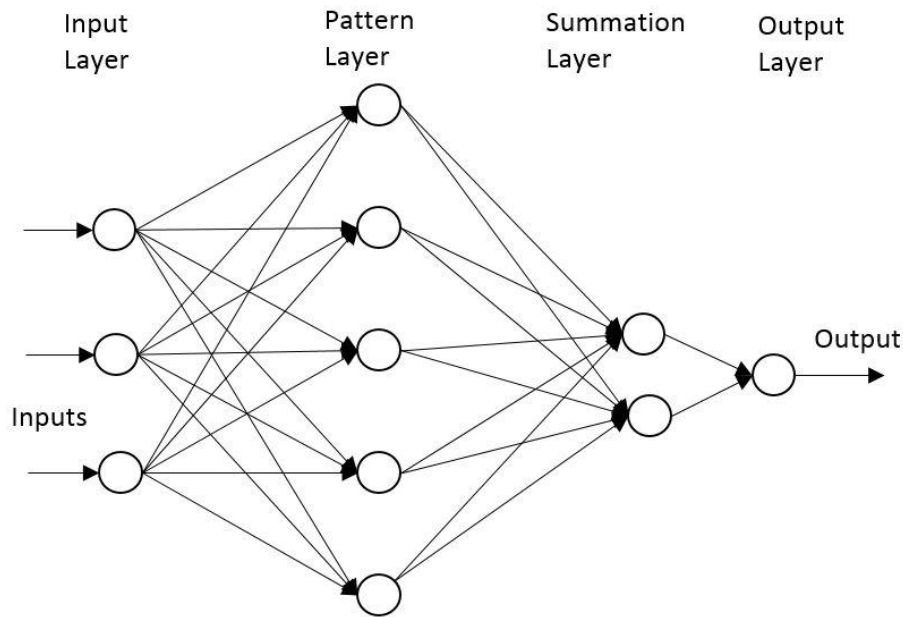
$$Y = F_2 \left( W_2 \left( \underbrace{F_1(W_1 X + \Theta_1)}_{\substack{\text{esimese kihi väljund} \\ \text{närvivõrgu väljund}}} \right) + \Theta_2 \right) \quad (1.1)$$

Närvivõrgu sisendid  $x_1 \dots x_n$  on funktsiooni (1.1) argumendid, kaalukoefitsiendid ja nihked on selle funktsiooni parameetrid, järelikult, (1.1) on funktsioon  $n \cdot k + k \cdot m + k + m$  parameetritega ja nende parameetrite muutmise muutub ka närvivõrgu funktsioon. [16]

Närvivõrgud suudavad hinnata, milline informatsioon on oluline väljundi leidmiseks ning milline mitte. Närvivõrgu treenimisel annavad suurema kaalu need sisendid, mis mõjutavad väljundit rohkem, ning väiksema kaalu nõrgema seosega sisendid. Närvivõrgu treenimise eesmärgiks on määrata maatriksite  $W_1$  ja  $W_2$  väärtused, mis annaksid võimalikult väikse erinevuse soovitud ja tegeliku väljundi vahel. Kui vea määr on langenud soovitud piiridesse, närvivõrk on muutunud stabiilseks, loetakse treenimine edukaks ning väärtused  $W_1$  ja  $W_2$  antud treeningandmete korral määratuks.

Alternatiivseks võimaluseks arväärtuste prognoosimisel MLFN närvivõrgule on GRNN (*Generalized Regression Neural Nets*) tüüpi võrk. Ennustamiseks tuleviku väärtust, GRNN mudel teostab mitte lineaarse funktsiooni ajalooliste andmete „kaardistamise“ [18].

GRNN on närvivõrgu arhitektuur, mis suudab lahendada mingit ülesannet andes umbkaudse hinnangu lahendite tõenäosuslikku jaotusfunktsiooni alusel. Antud närvivõrgu tüüp ei nõua korduvat treenimist, nagu seda vajavad tagasisidega võrgud. GRNN annab ligikaudse hinnangu funktsioonile sisend ja väljundvektorite vahel, koostades funktsiooni hinnangu otse treeningandmetesse.[19] Kolme sisendmuutujaga võrgu struktuur on kujutatud (eeldades, et on vaid viis treening võimalust) joonisel 1.3.



Joonis 1.3. GRNN närvivõrgu arhitektuur [19]

Nagu näha joonisel 1.3, GRNN mudel koosneb neljast kihist: sisendkiht (*input layer*), mustri kiht (*pattern layer*), liitmiskiht (*summation layer*) ja väljundkiht (*output layer*). Sisendkihi suurus sõltub otseselt sisendite arvust. Sisendkiht on ühenduses musti kihiga, kus iga neuron esindab teatud treening mustrit ja selle väljundit. Mustri kiht on ühenduses liitmiskihiga, kus kasutatakse kas ühte või summeeritud ühikut eelnevast kihist. Liitmiskiht ja väljundkihi koostöös normaliseeritakse väljund väljundkihis.

Võrgu treenimisel kasutatakse nii peidetud kui ka väljundkihis radiaal- ja lineaarseid aktiveerimisfunktsioone. Iga mustri kihi sõlm on ühenduses kahe neuroniga liitmiskihis:  $S$ - ja  $D'$ -liitmiskihi neuroniga (*summation neuron*).  $S$ -liitmiskihi neuron summeerib mustri kihi kaalutud väljundid ning  $D'$ -liitmiskihi neuron arvutab mustri kihi olevate neuronite kaalumata väljundeid. Väljundkiht jaotab iga  $S$ -liitmiskihi neuroniga väljundi vastavalt iga  $D'$ -liitmiskihi neuronile, saades nii prognoositava väärtuse  $Y_i$  [20]:

$$Y_i = \frac{\sum_{i=1}^M y_i \cdot \exp[-D'(x, x_i)]}{\sum_{i=1}^M \exp[-D(x, x_i)]} \quad (1.2)$$

, kus  $M$  tähistab treeningmustrite arvu ning Gaussi  $D'$  funktsioonis (1.1.2) avaldub kujul [19]:

$$D'(x, x_i) = \sum_{k=1}^m \left( \frac{x_k - x_{ik}}{\sigma} \right)^2 \quad (1.3)$$

$y_i$  on kaal mustrikihi ja  $S$ -liitmiskihi  $i$ -nda neuroni vahel,  $m$  on elementide arv sisendvektoris,  $x_k$  ja  $x_{ik}$  on vastavalt  $x$  ja  $x_i$   $j$ -ndas element.  $\sigma$  tähistab GRNN võrgu üldistatud esitlust. Üldjuhul suurem  $\sigma$  väärtus viitab paremale võrgu esitlusele: optimaalne väärtus määratletakse katse eksitusmeetodil katsete (*trial*) ja vigade (*errors*) kaudu. [19]

GRNN võrgu peamiseks eeliseks on kiire õppimisvõime. Tagasisidega võrkudega võrreldes pole GRNN mitte ainult kiirem, vaid ka suudab täpsemini arvutada. [21, 18]

Närvivõrkude arvutustehnikal on mõned olulised erinevused programmeeritud käitumise suhtes. Järgnevas tabelis on välja toodud olulisimad erinevused närvivõrkude ja programmeeritud arvutustehnika vahel.

*Tabel 1.1. Närvivõrkude arvutustehnika erinevused programmeeritud käitumisest [14]*

<b>Programmeeritud lähenemine</b>	<b>Närvivõrkudel arvutades lähenemine</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Järgib programmi sisestatud reegleid</li> <li>• Lahendus formuleeritakse</li> <li>• Ei suuda üldistada</li> <li>• Puudub veatolerantsus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Õpib sisestatud andmetelt</li> <li>• Reeglid pole kasutajale nähtavad</li> <li>• Võimaldab üldistada</li> <li>• Suudab andmetest eristada müra</li> </ul>

Lisaks on närvivõrkude eelisteks statistiliste eelduste puudumine, sest muutujad ei pea vastama normaaljaotuse tingimustele. Nõrkusena võib välja tuua närvivõrkude vähese intuiivsuse – see, kuidas võrk tulemusteni jõuab, jääb sageli varjatuks. [17]

Antud töös on kasutatud Palisade [22] poolt pakutavat NeuralTools6 närvivõrkude programmi Excelis kasutamiseks. Programmi tarkvara litsentsi on kasutatud Baltic Energy Services OÜ litsentsi ulatuses.

## **1.2. Libiseva keskmise meetod**

Praktikas võib esineda selliseid aegridu, mis tasemed ei varieeru trendi ümber märkimisväärselt, kuid siiski pole võimalik trendi esitada mingi matemaatilise funktsioonina. Sellisel juhul kasutatakse trendi ligikaudsete väärtuste leidmiseks aegridade silumist nn. Libiseva keskmisega. Libiseva keskmise meetodil on mõningaid positiivseid omadusi, kuid ka mitmeid puudusi, mistõttu seda meetodit kasutatakse suhteliselt harva. [2]

Eristatakse kahte moodust: silumine lihtsa keskmisega ja silumine kaalutud keskmisega. Esimese puhul seisneb uue aegrea moodustamises, mille liikmed on esialgse aegrea liikmeteks aritmeetilisteks keskmisteks [2]:

$$y_t = \frac{1}{2m+1} \sum_{p=-m}^m y_{t+p} \quad (t = m+1, \dots, T-m) \quad (1.4)$$

kus silmusperiood hõlmab  $2m+1$  aegrea taset.

Silumine kaalutud keskmisega seisneb sellisel aritmeetilistest keskmistest koosneva aegrea leidmises, kus silumisperioodi keskmistel liikmetel on suurem kaal kui äärmistel liikmetel. Tavaliselt konstrueeritakse aegrea  $2m+1$  liikme põhjal mingi polünoom, mille abil määratakse trendi väärtus silumisperioodi keskpunktis. [2]

Libiseva keskmise meetodil on mõningaid positiivseid omadusi, mis tingivad selle kasutamist juhul kui  $f(t)$  on küllaltki sile funktsioon [2]:

1. Arvutustööd on suhteliselt lihtsad ja ei nõua eriti võimsat arvutuskäiku;
2. Aegrea pikendamisel on lihtne leida täiendavaid trendi väärtusi;
3. Libisev keskmine annab aegrea liikmetele kõige lähedasema joone trendiks, sest valitakse parim trend lühikese ajavahemiku kohta.

Tähtsamad puudused, mis tingivad libiseva keskmise vähest kasutamist praktikas [2]:

1. Ei määrata väikese parameetrite arvuga trendi, seega pole võimalik trendi parameetrite usalduspiiride leidmine;
2. Trend on alati esialgsest aegreast lühem  $2m-1$  perioodi võrra, kusjuures aegrida lüheneb nii algusest kui lõpust. See teeb võimatuks hinnata trendi kohta püstitatud hüpoteeside kehtivust.

Libiseva keskmise meetod on sobiv aegrea üldiseks kirjeldamiseks ja esialgsete hüpoteeside püstitamiseks aegreas sisalduvate seaduspärasuste kohta. [2]

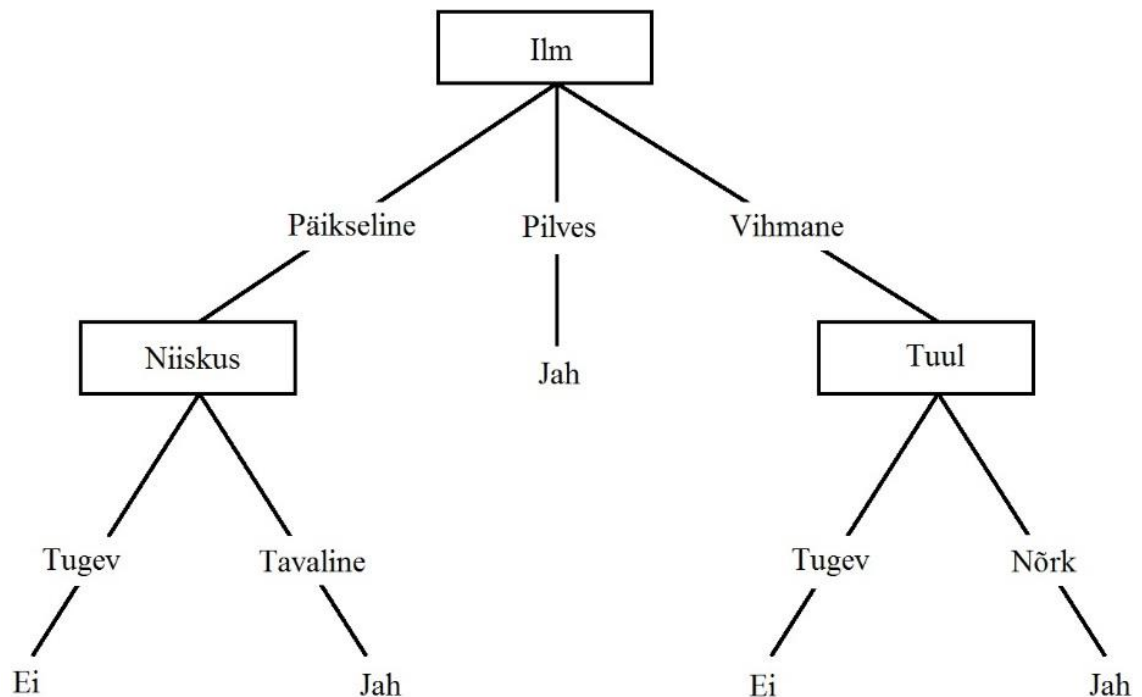
### 1.3. Otsustuspuu

Otsustuspuu on ülesehituslikult graafik või mudel, mis kajastab loogilist arutluskäiku probleemi üle otsustamiseks või käitumisstrateegia valikul koos tõenäoliste tagajärgedega. See koosneb sõlmedest (*node*) ja harudest (*branche*). Sõlmesid on kolme liiki [23]:

1. **Otsuste sõlmpunktid** (*decision node*) – valitakse parima oodatava väärtusega haru. Otsustamise sõlmest lähtuvad otsustamise harud, mis vastavad erinevatele

valikuvõimalustele. Valikud peavad olema üksteist välistavad ja moodustama täieliku süsteemi (kõik valikuvariandid peavad olema kajastatud).

2. **Juhuslik sündmus** (*event node*) – realiseerub juhuslik sündmus etteantud tõenäosusega. Sündmuse sõlmest hargnevad harud kirjeldavad erinevaid võimalikke juhuslikke sündmusi. Sündmused peavad moodustama täieliku süsteemi (üksteist välistavad, tõenäosuste summa peab olema üks).
3. **Lõppsõlm** (*terminal node*) – igale lõppsõlmale vastab lõppväärtus, mis iseloomustab konkreetset stsenaariumi (otsuste ja juhuslike sündmuste järgnevus esimesest otsustussõlmest lõppsõlmeni)



Joonis 1.4. Otsustuspuu näide

Joonisel 1.4 on kujutatud otsustuspuu näide küsimusele „Kas minna golfi mängima?“. Golfi mängimiseks mängib olulist rolli ilm, mis on kujutatud esimese otsuse sõlmepunktina. Harudena on kolm valikut, kas ilm on päikeseline, pilves või vihmane, mis on juhuslikud sündmused. Vastavalt olukorrale juhatab valitud haru järgmise otsustuspunktini, mis läbi juhusliku sündmuse lõppsõlmeni, mis antud juhul on „jah“ või „ei“.

Mudeli peamine eelis on algoritmiliselt lihtne kasutamine. Otsustuspuu aitab mõelda probleemi tegelikkuse üle, mõelda süstemaatilisemalt, struktureerida ja jagada probleem hoomavateks osadeks. Otsustuspuu abil on lihtne anda probleemi eeldused ja hinnangud edasi ka teistele. Probleemid võivad tekkida siis, kui puu kujundamisel on rakendatavaid eeldusi valesti mõistetud (osad alternatiivid on kõrvale jäetud, olulisi aspekte on alahinnatud või tõenäosused on valesti arvutatud).

## 2. Bilansienergia hinna analüüs

Antud peatükis kirjeldatakse täpsemalt, mis asi on bilansienergia ning kuidas selle hind kujuneb. Koostatud on bilansienergia hindade analüüs, mõistmaks, kuidas on bilansienergia hinnad ajalooliselt muutunud. Aru saamaks, millist mõju avaldas Eesti elektrisüsteemi avatud tarnija vahetus bilansienergia hindadele, vaadeldakse analüüsimisel kahte perioodi: alates 2013. aasta algusest kuni 2015. aasta märtsi lõpuni ning kolme kuud 2015. aastal.

### 2.1. Bilansienergia hindade kujunemine

Bilansienergiaks nimetatakse elektrienergiat, mida bilansi hoidmise eesmärgil ostab ja müüb süsteemihaldur bilansihalduriga sõlmitud bilansilepingu alusel. [24]

- Kui bilansi selgitamise tulemusena on bilansihalduri bilanss mis tahes kauplemisperioodil negatiivne, loetakse, et süsteemihaldur on sellel kauplemisperioodil müünud bilansihaldurile bilansienergiat, mis on vaja bilansihalduri bilansi hoidmiseks sellel kauplemisperioodil (st. Süsteemihaldur müüb bilansienergiat; tegelik tarbimine on osutunud prognoositust suuremaks või tootmine väiksemaks) [24]
- Kui bilansi selgitamise tulemusena on bilansihalduri bilanss mis tahes kauplemisperioodil positiivne, loetakse, et süsteemihaldur on sellel kauplemisperioodil ostanud bilansihaldurilt bilansienergiat, mis on vaja bilansihalduri bilansi hoidmiseks sellel kauplemisperioodil (st. Süsteemihaldur ostab bilansienergiat; tegelik tarbimine on osutunud prognoositust väiksemaks või tootmine suuremaks) [24]

Süsteemihalduriga seotud dokumentatsioonis ja andmetes nimetatakse bilansienergia ostu- ja müügihindasid vastavalt süsteemioperaatori seisukohast, kas tema müüb või ostab bilansienergiat. Selguse mõttes käsitletakse edaspidi bilansienergia ostu-ja müügihinda bilansihalduri vaatepunktist lähtuvalt.

**Bilansienergia ostuhind (BEO)** – hind, millega bilansihaldur ostab negatiivse eabilansi korral süsteemihaldurilt bilansienergiat.

**Bilansienergia müügihind (BEM)** – hind, millega bilansihaldur müüb positiivse eabilansi korral süsteemihaldurile bilansienergiat.

Kuni 2014.aasta lõpuni omasid Baltikumi süsteemihaldurid erinevaid lepinguid süsteemi eabilansi katteks. Alates 2015. aasta omavad Baltikumi süsteemihaldurid aga ühist avatud tarne lepingut. Uue avatud tarne lepingu sõlmimisel ei muutunud Eesti sisemaine bilansienergia hinnametoodika. Muutus ainult süsteemiväline referentshind. [25]



Kulude jaotus ning süsteemide avatud tarne hind kujuneb järgmiselt [26]:

- Baltikumi summaarne eabilansi kulu, mis arveldatakse süsteemivälise avatud tarnija INTER RAO Lietuva'ga, jaotatakse Baltikumi süsteemihaldurite vahel proportsionaalselt süsteemide vahel, kelle eksimus oli samas suunas kogu Baltikumi eabilansiga;
- Kui Baltikumi elektrisüsteemidest vähemalt ühe elektrisüsteemi eabilanss on vastassuunas teistele ehk tasakaalustab kogu summaarset Baltikumi eabilanssi, siis ostab või müüb vastav süsteemihaldur teistele Baltikumi süsteemihalduritele oma eabilansi Baltikumi Elspot hinnapiirkondade aritmeetilise keskmise hinna alusel;
- Iga Baltikumi elektrisüsteemi jaoks kujuneb lõplik piiriülene avatud tarne hind kaalutud keskmisena kahest eelmisest komponendist – osakaal süsteemivälise avatud tarnija kuludest ning osakaal Baltikumi siseselt saldeeritud kuludest.

Eesti riigisisese bilansienergia hinna arvutamise aluseks on [27]:

- Eesti elektrisüsteemi avatud tarne hinnad;
- Reguleerimistarnete hinnad;
- Bilansienergia hinna arvutamise ühtne meetodika.

Elektrisüsteemi avatud tarne referentshinna määrab süsteemi avatud tarnija, mis pole avalikult kättesaadav informatsioon. Kujunev bilansiperioodi tegelik hind tuleneb vastavalt eelnevalt kirjeldatud kulude jaotusest Baltikumi elektrisüsteemide vahel.

Bilansienergia hinna arvutamisel võetakse arvesse kõiki reguleerimistarneteid, mis on tehtud Eesti elektrisüsteemi bilansi tagamiseks ning ei võeta arvesse muid süsteemihalduri reguleerimistarnete müüke/oste (vastu kaubandus ja reguleerimisteenuste vahendus teistele süsteemihalduritele), mis ei ole tehtud süsteemi bilansi tagamise eesmärgil. [28]

Vastavalt konkurentsiameti poolt kinnitatud „Bilansienergia hinna arvutamise ühtne meetodika“ [24] kohaselt kujundab süsteemihaldur bilansienergia hinna selliselt, mis võimaldab:

1. katta reguleerimisvõimsuse ostuks tehtud põhjendatud kulutused (RR);
2. katta bilansi selgitamiseks tehtud põhjendatud kulutused (BS);
3. katta bilansienergia kulud bilansienergia ostuks bilansihaldurilt (BEO);
4. katta kulutused seoses süsteemi ülesreguleerimisega (ÜR);
5. katta bilansienergia ostuks ja müügiks kasutatava reguleeritava vara kapitali kulu (KK);
6. tagada põhjendatud tulukuse (PT).

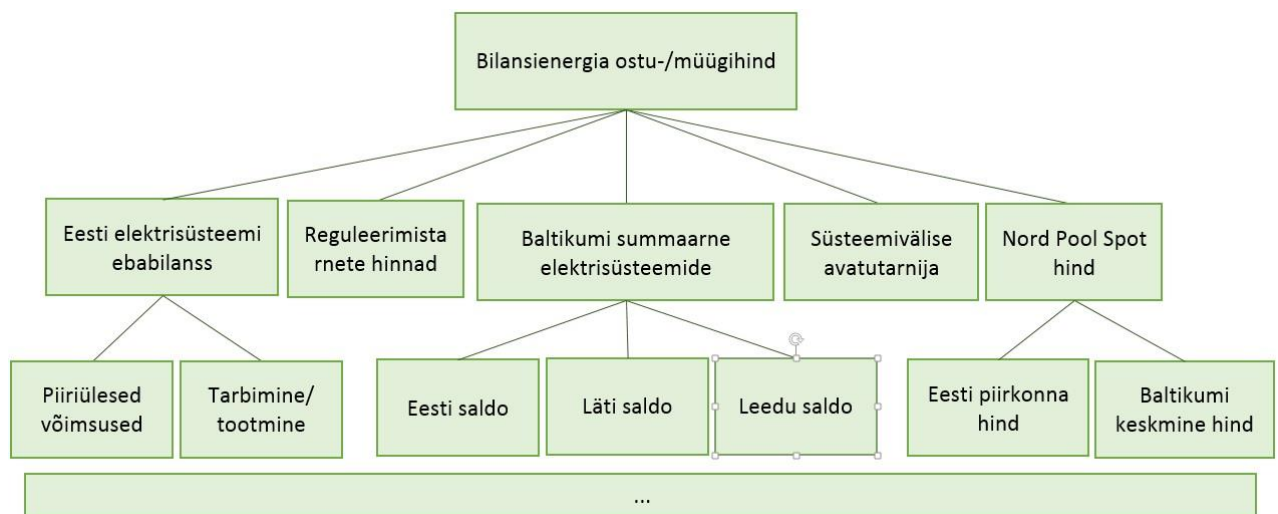
Bilansienergia hinda lülitatavatest kuludest arvatakse maha süsteemi alla reguleerimisel saadav tulu (AR). Bilansienergia hinna kujundamise aluseks on printsiip, mille kohaselt igal

majandusaastal on süsteemihalduri äritulu võrdne ärikulude ja põhjendatud tulukuse summaga [24]:

$$BEM = RR + BS + BEO + \ddot{U}R + KK + PT - AR \quad (2.1)$$

Süsteemihaldur vastavalt ostab ja müüb süsteemi bilansi tagamiseks elektrienergiat ning reguleerimisvõimsust tehnilis-majanduslikult soodsamalt pakkujalt, tagades sealjuures turuosaliste võrdse kohtlemise. [24]

Bilansienergia hind sõltub väga paljudest asjaoludest ning kõiki komponente ning mõjutegureid pole ette teada, kuid põhilised hinda mõjutavad tegurid on kujutatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1. Bilansienergia hindade kujunemine

Ehk siis kujunev bilansienergia hind sõltub:

- Süsteemivälise avatud tarnija referentshinnast avatud tarnele
- Baltikumi summaarsest eabilansist
- Eesti elektrisüsteemi eabilansi suunast võrreldes Baltikumi eabilansi suunaga
- Baltikumi Elspot hinnapiirkondade aritmeetilisest keskmisest hinnast
- Reguleerimistarvete hinnast
- bilansienergia hinna arvutamise ühtne meetodika.

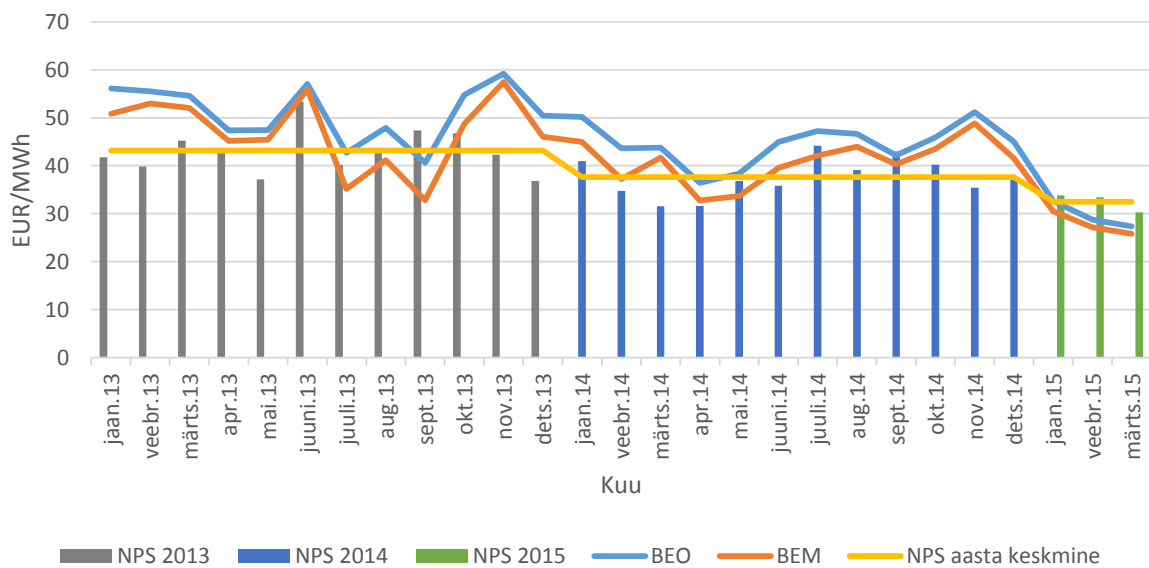
Järgnevalt on teostatud bilansienergia hindade analüüs alates 2013. aasta algusest kuni 2015. aasta märtsi lõpuni. Antud perioodi algus on valitud põhjusel, et siis avanes ka Eesti elektriturg täielikult ning seetõttu kirjeldab antud periood hästi bilansienergia hindasid avatud turu olukorras. Teisalt on analüüsitud bilansienergia hindasid 2015. aasta kolmel kuul, mõistmaks, kas ning mil määral on süsteemi avatud tarnija muutus mõjutanud bilansienergia hindasid.

Antud töö keskset rolli omavad tunnid, kus nii bilansienergia ostu- kui ka müügihind on NPS Eesti piirkonna hinnast kõrgemad või mõlemad madalamad. Mõnevõrra vähem pööratakse tähelepanu tundidele, mil NPS hind jääb bilansienergia hindade vahele.

## 2.2. Bilansienergia hindade analüüs 01.2013-03.2015

Bilansienergia hindade analüüsimisel võetakse võrdlevaks näitajaks NPS Eesti piirkonna hind. Analüüsitakse, kuidas bilansienergia hinnad on aastate jooksul ning kuude lõikes muutunud võrreldes NPS hinnaga.

Joonisel 2.2 on kujutatud vaadeldava perioodi kuude keskmisi NPS, BEO ja BEM hindasid. Vastav hindade tabel on esitatud lisas (L.1). Võrdlusena on toodud NPS aasta keskmised hinnad. Nagu jooniselt näha, siis NPS hinnad on küll kuude lõikes suuresti varieeruvad, kuid aastate keskmiselt langevas trendis. Bilansienergia hindasid jälgides, on näha, et aastatel 2013-2014 on 17-1 kuul 24-st nii bilansienergia ostu- hind kui ka müügihind olnud kõrgemad NPS hinnast, vaid kahel kuul madalamad ning viiel kuul on jäänud NPS keskmine hind BEO ja BEM hindade vahele.



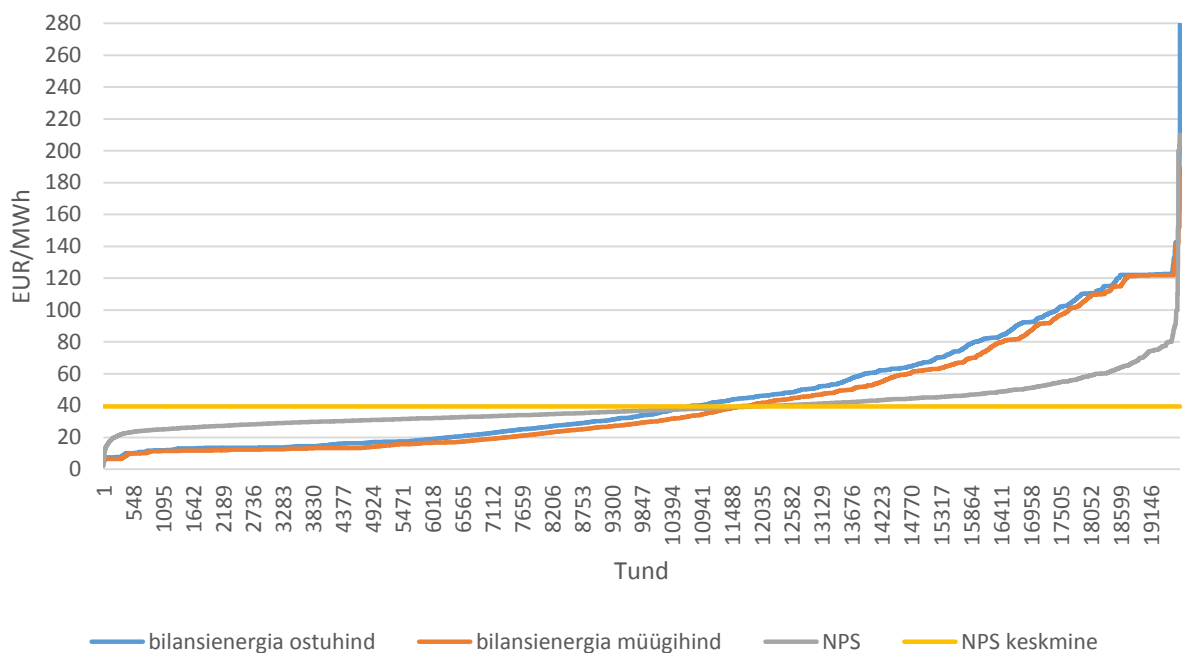
Joonis 2.2. Ajaloolised kuu keskmised NPS, BEO, BEM hinnad

2013. aasta keskmine NPS hind oli 43,14 EUR/MWh, BEO hind oli keskmiselt 7,96 EUR/MWh ja BEM hind keskmiselt 3,79 EUR/MWh võrra kallim, moodustades aasta keskmisteks hindadeks vastavalt 51,10 ja 46,93 EUR/MWh.

2014. aasta keskmine NPS hind oli 37,61 EUR/MWh. Vahe NPS, BEO ja BEM hinna vahel oluliselt ei muutunud, moodustades BEO ja BEM hinnad vastavalt 7,04 ja 3,27 EUR/MWh kallimaks. Keskmine BEO hind 2014. aastal oli 44,65 EUR/MWh ja keskmine BEM 40,88 EUR/MWh.

Erinevalt kahest eelnevast aastast, on 2015. aasta esimese kvartali bilansienergia hinnad olnud oluliselt madalamad. Esimese kolme kuu keskmine BEO hind oli 29,6 EUR/MWh ja BEM 27,86 EUR/MWh. NPS keskmine hind on võrreldes eelnevate aastatega oluliselt langenud, olles 32,5 EUR/MWh. Madalamad hinnad olid vaid 2014. aasta märtsis ja aprillis kevadise suurvee ajal.

Joonisel 2.3 on kujutatud bilansienergia ja börsi hindade kestvusgraafikuid. Antud perioodil on suurimad hinnaerinevused just kõrgemate hindade korral. Kõrgeim NPS hind oli 210 EUR/MWh, kõrgeim BEO oli 279,39 EUR/MWh ning BEM 189,50 EUR/MWh (Tabel 2.1).



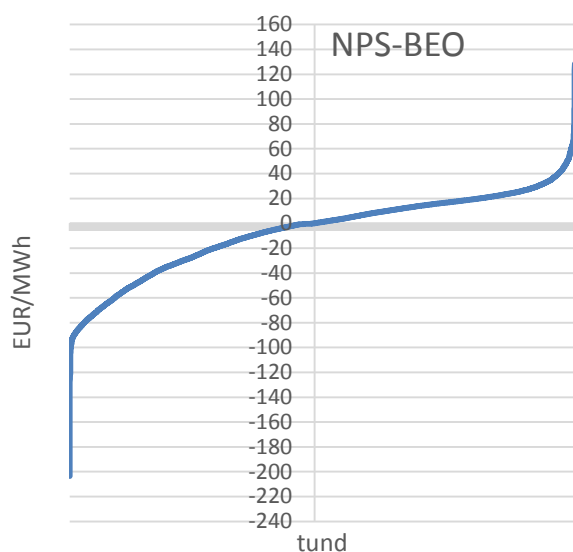
*Joonis 2.3. 2013-2015. aastate BEO, BEM, NPS hindade kestvusgraafikud*

Kuigi vaid 40,8% tundidest olid nii BEO kui ka BEM hinnad kõrgemad NPS hindadest, siis keskmiselt olid BEO ja BEM hinnad vastavalt 6,36 ja 2,64 EUR/MWh kohta kallimad kui NPS hinnad. Seda just seetõttu, et bilansienergia hinnad on väga volatiilsed ning varieerusid suuresti madalate ja kõrgete hindade vahel, mida näitab ka joonis 2.3. NPS hinnad on ajalooliselt olulisemalt stabiilsemad kui BEO ja BEM hinnad ning ei varieeru päeva siseselt nii suures ulatuses, seda näitab ka tabel 2.1.

*Tabel 2.1. Hindade statistilised näitajad perioodil 01.2013-.03.2015*

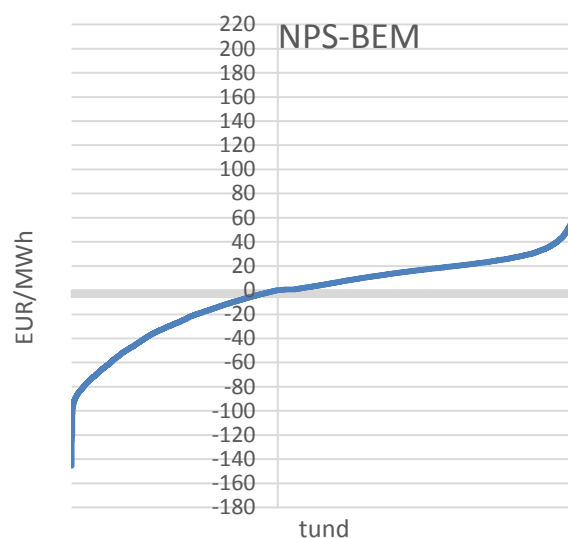
	<b>BEO</b>	<b>BEM</b>	<b>NPS</b>
<b>Keskmine</b>	45,87	42,15	39,51
<b>MIN</b>	4,51	3,11	1,95
<b>MAX</b>	279,39	189,50	210,08
<b>MOD</b>	13,60	13,40	45,09
<b>MED</b>	33,81	29,25	36,78
<b>max erinevus NPSiga</b>	203,40	187,70	-

Järgnevalt vaadeldakse NPS ja bilansienergia hinna erinevusi. Joonistel 2.4 ja 2.5 on kujutatud NPS ja bilansienergia hindade erinevuste kestvusgraafikuid. 51%-l tundidest oli NPS hind BEO ning 59% tundidest BEM hindadest kõrgem.



Joonis 2.4. NPS-BEO hindade

kestvusgraafik perioodil jaanuar 2013 –  
märts 2015



Joonis 2.5. NPS-BEM hindade

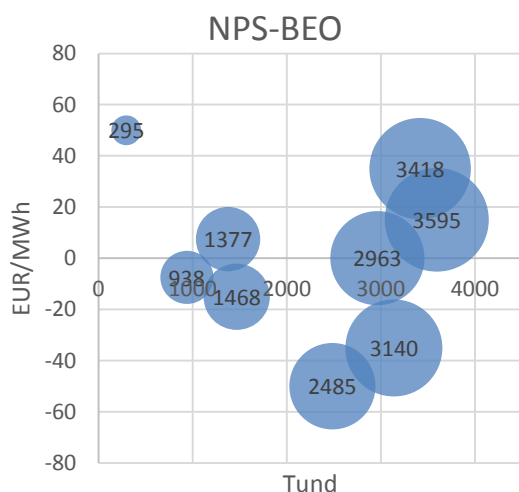
kestvusgraafik perioodil jaanuar 2013 –  
märts 2015

Mõistmaks, millises suurusjärgus on bilansienergia hindade erinevused võrreldes NPS hindadega, on jaotatud NPS-BEO ja NPS-BEM hinnad üheksasse vahemikku, mis on välja toodud tabelis 2.2. Tabelis on esitatud tundide arvud, mitmel tunnil börsi ja bilansienergia hinna vahe jäi antud vahemikku ning antud vahemiku protsentuaalne osakaal kõikidest tundidest.

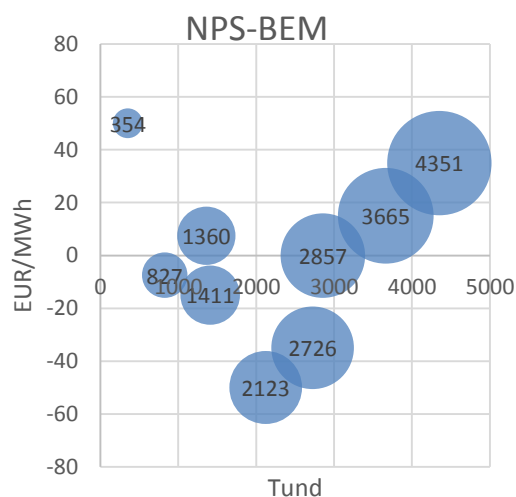
Tabel 2.2. Tundide arvud ja osakaalud millal NPS-BEO ja NPS-BEM hindade vahed jäid ettemääratud vahemikku

Vahemik (EUR/MWh)		NPS-BEO		NPS-BEM	
alates	kuni	tundide arv	osakaal	tundide arv	osakaal
<-50		2485	13%	2123	11%
-50	-20	3140	16%	2726	14%
-20	-10	1468	7%	1411	7%
-10	-5	938	5%	827	4%
-5	5	2963	15%	2857	15%
5	10	1377	7%	1360	7%
10	20	3595	18%	3665	19%
20	50	3418	17%	4351	22%
>50		295	1%	354	2%
Kokku		19679	100%	19674	100%

Joonised 2.6 ja 2.7 kujutavad endast tabeli 2.2 graafilist kujutlust. Nagu jooniselt näha, siis kõige rohkem tunde NPS-BEO korral langeb vahemikku, kus bilansienergia hinnad on vahemikus 10-20 EUR/MWh odavamad kui NPS hind. BEM hinna korral suurusjärgult esimene hindade vahemik, mil bilansienergia hinnad on NPS hindadest 20-50 EUR/MWh võrra madalamad. Antud vahemikku langes 22% tundidest. Nii BEO kui ka BEM hindade korral oli kõige vähem tunde, mil NPS hind oli bilansienergia hinnast rohkem kui 50 EUR/MWh võrra kallim. Nii NPS-BEO kui ka NPS-BEM korral jäi hindade erinevus +/-5 EUR/MWh 15% tundidest.



Joonis 2.6. Tundide arvud, mil NPS-BEO jäid etteantud vahemikku



Joonis 2.7. Tundide arvud, mil NPS-BEM jäid etteantud vahemikku

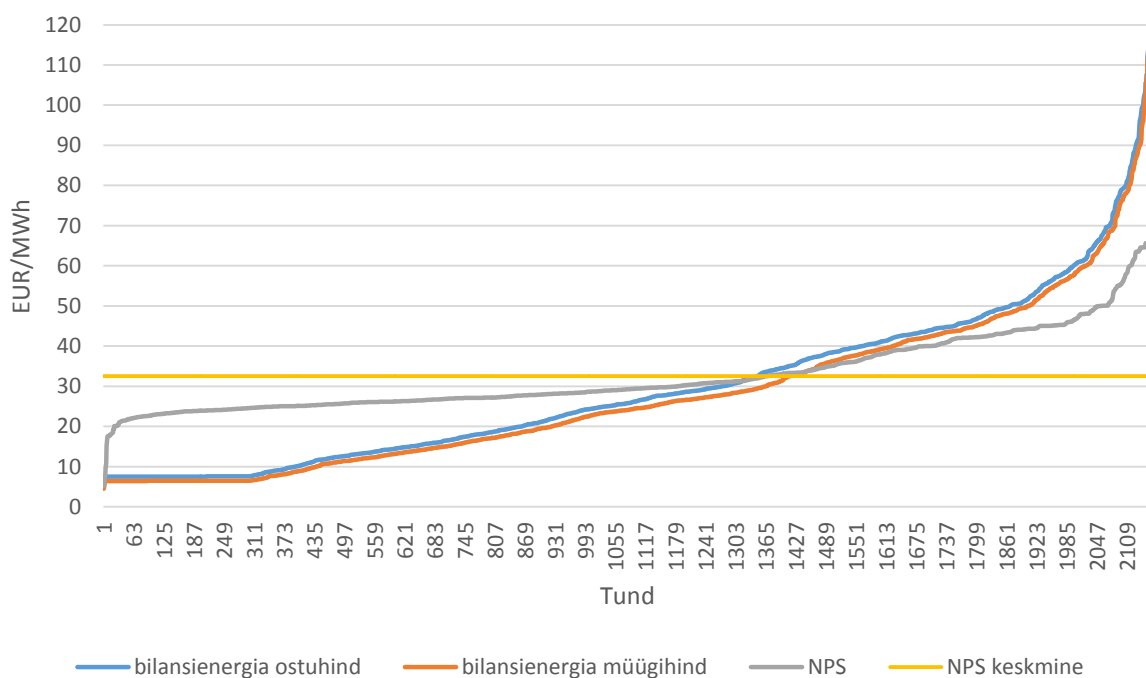
Eelneva analüüsi põhjal saab väita, et ajalooliselt on NPS ja bilansienergia hindade vahelised erinevused väga suured, jäädes vahemikku -203,4 kuni 187,7 EUR/MWh.

Kuigi kolm kuud on vähe, et teha lõplikke järeldusi süsteemi avatud tarne hinna kujunemise meetoodika mõju kohta, siis annab arusaama, et bilansienergia hindade kujunemise meetoodika on muutunud ning hinnad on olnud pigem madalamad kui eelmistel aastatel. Samuti on bilansienergia hindade ja NPS hindade vaheline erinevus vähenenud. Seetõttu vaadeldakse järgmises peatükis lähemalt vaid 2015. aasta bilansienergia hindasid.

### 2.3. Bilansienergia hindade analüüs 01.2015-03.2015

2015. aasta esimese kvartali NPS ja bilansienergia hindade kestvusgraafik on kujutatud joonis 2.8. Täpselt 50% tundidest on bilansienergia ostuhind konkreetsel tunnil olnud madalam kui NPS hind. BEM hind on olnud 65,4% kordadest NPS hinnast madalam. Seega 746 tunnil, 34,6% juhtudest on nii BEO kui ka BEM olnud NPS hinnast madalamad.

2015. aasta esimeses kvartalis oli keskmine NPS EE piirkonna hind 32,50 EUR/MWh kohta. Keskmine BEO hind oli 29,60 EUR/MWh ja BEM hind 27,86 EUR/MWh, mis teeb keskmiselt bilansienergia hinna vastavalt 2,90 ja 4,64 EUR/MWh võrra NPS hinnast soodsamaks. Keskmise bilansienergia ostu ja – müügihinna erinevus on 1,74 EUR/MWh.

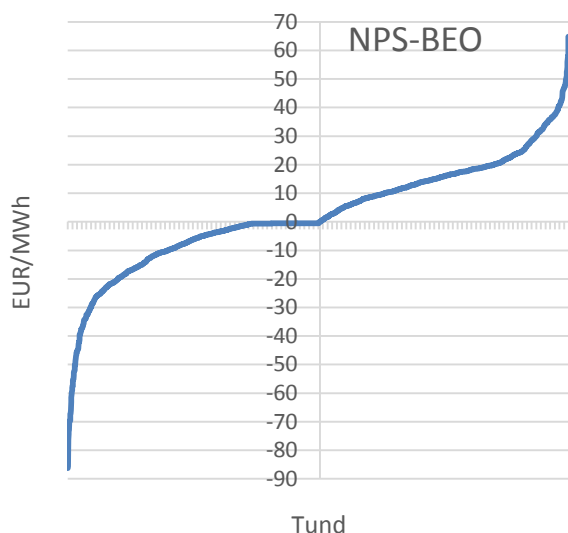


Joonis 2.8. 2015. aasta 1. kvartali BEO, BEM ja NPS hindade kestvusgraafikud

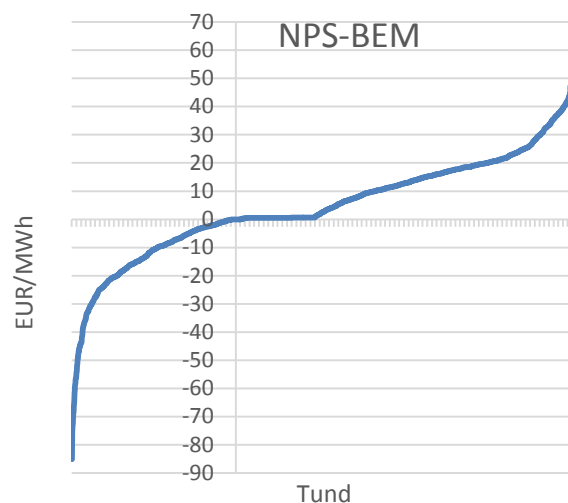
Madalaimad bilansienergia hinnad oli 3. jaanuaril tunnil 04-05, mil BEO oli 5,80 ja BEM 4,49 EUR/MWh. Kõrgeimad bilansienergia hinnad olid 19. jaanuaril tunnil 06-07, vastavalt 122,19 ja 120,99 EUR/MWh.

Keskmiselt on BEO ja BEM hindade vaheline erinevus 1,74 EUR/MWh, suuremad erinevused tulevad olukordades, kui süsteemioperaator on teinud süsteemi tasakaalustamiseks reguleerimistarneid. 2015 aasta maksimum hindade erinevus oli 10. jaanuaril tunnil 14-15, mil BEO ja BEM hindade erinevus oli 91,24 EUR/MWh. Ideaaljuhul on BEO ja BEM hindade vaheline erinevus olnud 1 EUR/MWh.

Järgnevalt vaadeldakse NPS ja bilansienergia hinna erinevusi. Joonistel 2.9 ja 2.10 on kujutatud NPS ja bilansienergia hindade erinevuse kestvusgraafikuid. 51% tundidest oli NPS hind oli BEO hinnas kõrgem ning 59% tundidest BEM hindadest kõrgem..



Joonis 2.9. NPS-BEO hindade  
kestvusgraafik



Joonis 2.10. NPS-BEM hindade  
kestvusgraafik

Mõistmaks, millises suurusjärgus on bilansienergia hindade erinevused võrreldes NPS hindadega, on jaotatud NPS-BEO ja NPS-BEM hinnad üheksasse vahemikku, mis on välja toodud tabelis 2.3. Tabelis on esitatud tundide arvud, mitmel tunnil NPS ja bilansienergia hinna vahe jäi antud vahemikku ning antud vahemiku protsentuaalne osakaal kõikidest tundidest.

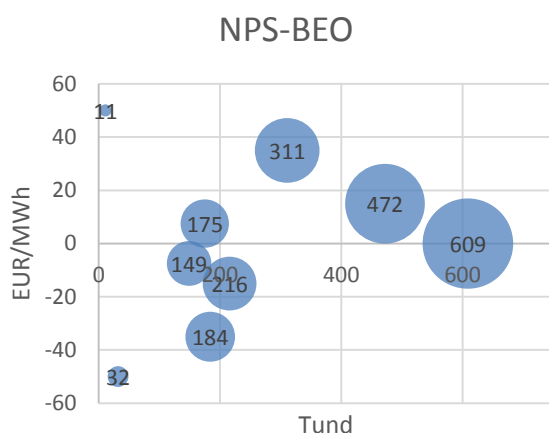
Tabel 2.3. Tundide arvud ja osakaalud millal NPS-BEO ja NPS-BEM hindade vahed jäid ettemääratud vahemikku

Vahemik (EUR/MWh)		NPS-BEO		NPS-BEM	
alates	kuni	tundide arv	osakaal	tundide arv	osakaal
<-50		32	1%	25	1%
-50	-20	184	9%	168	8%
-20	-10	216	10%	173	8%
-10	-5	149	7%	137	6%
-5	5	609	28%	632	29%
5	10	175	8%	163	8%
10	20	472	22%	479	22%
20	50	311	14%	369	17%
50+		11	1%	13	1%
<b>Kokku:</b>		2159	100%	2159	100%

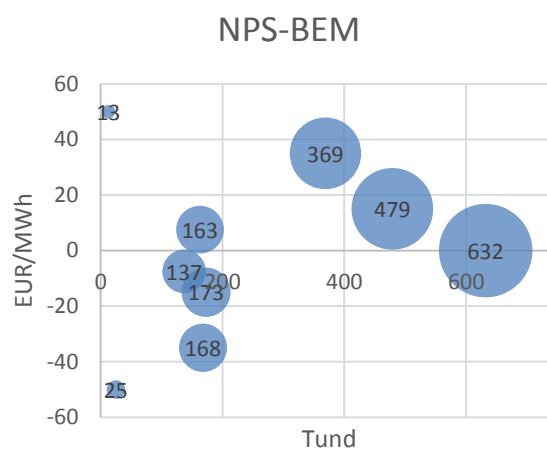
Joonised 2.11 ja 2.12 kujutavad endast tabeli 2.3 graafilist kujutlust. Nagu joonistel näha, siis kõige rohkem tunde nii NPS-BEO kui ka NPS-BEM korral langeb vahemikku, kus bilansienergia hinnad on +/- 5 EUR/MWh erinevad kui NPS hind, mis näitab bilansienergia hindade lähenemist NPS hinnale. Suurusjärgult teine hindade vahemik on nii BEO kui ka BEM korral, kus NPS hind on



bilansienergia hindadest 10-20 EUR/MWh kallim. Tunnid, mil bilansienergia hinnad erinevad NPS hindadest rohkem kui 50 EUR/MWh, moodustavad vaid 1% kõikidest tundidest.



Joonis 2.11. Tundide arvud, mil NPS-BEO jäid etteantud vahemikku



Joonis 2.12. Tundide arvud, mil NPS-BEM jäid etteantud vahemikku

Erinevalt eelnevas peatükis aastate võrdluses välja toodule, on 2015. aasta BEO, BEM ja NPS hindade vahel suurimad erinevused madalamate hindade korral. Seda tõendab ka tabel 2.4, kus on välja toodud erinevad statistilised näitajad võrreldavate perioodide kohta..

Tabel 2.4. BEO, BEM, NPS hindade (EUR/MWh) statistilised näitajad

	01.01.13-31.03.15			01.01.15-31.03.15		
	BEO	BEM	NPS	BEO	BEM	NPS
<b>Keskmine</b>	45,87	42,15	39,51	29,60	27,86	32,50
<b>MIN</b>	4,51	3,11	1,95	5,80	4,49	5,09
<b>MAX</b>	279,39	189,50	210,08	122,19	120,99	75,00
<b>MOD</b>	13,60	13,40	45,09	7,50	6,50	26,08
<b>MED</b>	33,81	29,25	36,78	25,79	24,05	29,25

Peale miinimum hindade, on kõik näitajad langenud. Kui perioodil 2013-03.2015 oli kõige enam esinenud BEO ja BEM hinnad 13,6 ja 13,4 EUR/MWh, siis 2015. aasta esimeses kvartalis olid vastavad hinnad 7,5 ja 6,5 EUR/MWh. Ka hindade mediaanväärtused on alanenud 25,79 ja 24,05 EUR/MWh peale, mis näitab, et madalamaid hindasid esineb rohkem kui kõrgeid hindasid. Võrreldes peatükis 2.2 käsitletud perioodiga, on 2015 aasta bilansienergia hinnad kujunenud rohkem NPS hinna lähedale, tundide osakaal, mil bilansienergia hinnad erinevad NPS hindadest vähem kui 5 euro võrra on tõusnud 15%-lt 28%-le. Seega saab väita, et Eesti elektrisüsteemi avatud tarnija vahetus ning Baltikumi ühise avatud tarne piirkonna loomine on alandanud bilansienergia hindasid ning toonud nad börsihindadele lähemale.

### 3. Bilansienergia hinda mõjutavad tegurid

Antud peatükis vaadeldakse peatükis 2.1 olulisemaid välja toodud bilansienergia hinna mõjutavaid tegureid. Uuritakse milliseid andmeid on vaja bilansienergia hinna prognoosimiseks. Antud analüüs tehakse 2015. aasta esimese kvartali andmete alusel. On olukordi, kus vvsaldo ja/või Balti saldo ei selgita, miks bilansienergia hind kujunes oodatust erinevaks, seetõttu vaadeldakse kas põhjus võis tuleneda tuule kiirusest või tuule toodangust.

#### 3.1. Andmete korrastus

Igas süsteemis leidub vigu, ka esineb ebakvaliteetseid ja puudulikke andmeid andmebaasides. Bilansienergia hinda mõjutavate tegurite puhul on eemaldatud tunnid, mil osad andmed on puudu, vältimaks nende andmete mõju analüüsi tulemustes ning hiljem prognoosi mudeli koostamisel.

Bilansienergia hinda mõjutavate tegurite analüüsist on välja jäetud 35 tundi:

- 25.01.2015 23:00, kuna puuduvad planeeritud vahelduvvoolu- ja süsteemi saldod;
- 9 tundi perioodil 07.02.2015 02:00-11:00, kuna puuduvad tegelikud tarbimise, tootmise, vahelduvvoolu- ja süsteemi saldo andmed;
- 29.03.2015 tund 06:00, puudu Leedu planeeritud tarbimine ja tootmine;
- 24 tundi päeval 30.03.2015, kuna puudu Läti planeeritud tarbimine.

Kokku jääb analüüsiks 2124 tundi.

#### 3.2. Vahelduvvoolu saldo suuna mõju bilansienergia hindadele

Elering avaldab igapäevaselt oma kodulehel [29] andmed planeeritud ja tegeliku vahelduvvoolu saldo (3.1) kohta. Mõõtühikuks on MW.

$$\begin{aligned} \text{Vahelduvvoolu saldo} &= \text{tootmine} - \text{tarbimine} - \text{Estlink} \\ &= \text{EELV piiriandmed} \end{aligned} \quad (3.1)$$

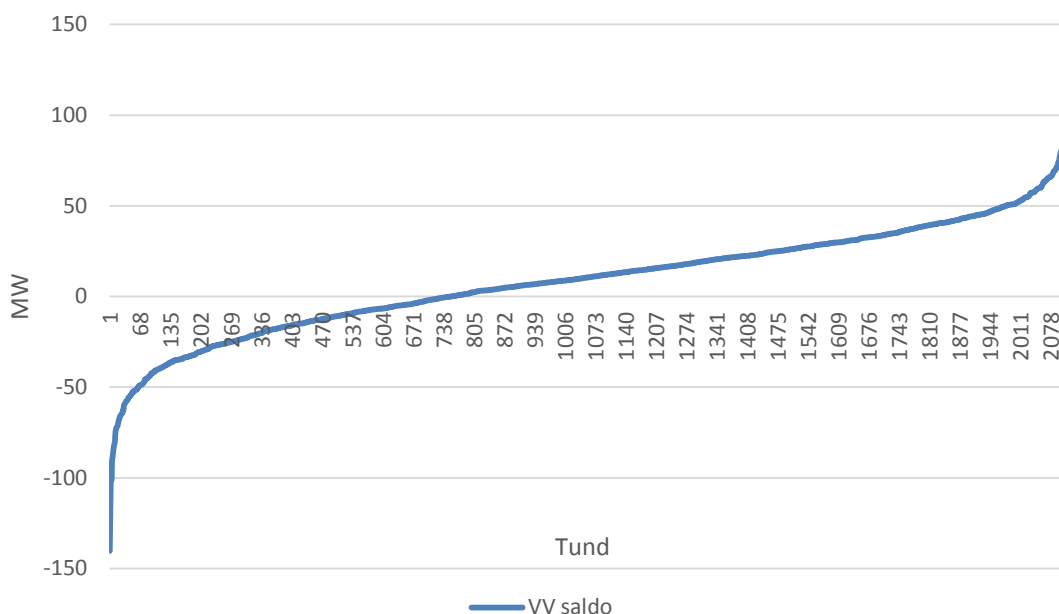
Antud töös käsitletakse vvsaldot (3.2) kui vahet planeeritud ja tegeliku vahelduvvoolu saldo vahel, ehk:

$$\begin{aligned} \text{vvsaldo} &= \text{Tegelik vahelduvvoolu saldo} \\ &\quad - \text{planeeritud vahelduvvoolu saldo} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Vvsaldo näitab kui palju erineb tegelikult kujunenud vahelduvvoolu saldo planeeritud saldost. Kuna vahelduvvoolu saldo ise sõltub nii sisemisest tarbimisest ja tootmisest kui ka Estlink ühendusest Soomega, siis ka vvsaldo kujunemine on otseselt seotud antud väärtuste planeeritud ning tegelikult kujunenud suurustest.

Kui mõni turuosaline teostab lisatarneid, kas siis päevasisesel turul või kahepoolsete lepingutega teiste turuosalistega, saadetakse uus bilansiplaan, kus kajastatakse kõik muudatused. Selle alusel uuendatakse süsteemi planeeritud tarbimist/tootmist ning muutub ka planeeritud vahelduvvoolu saldo.

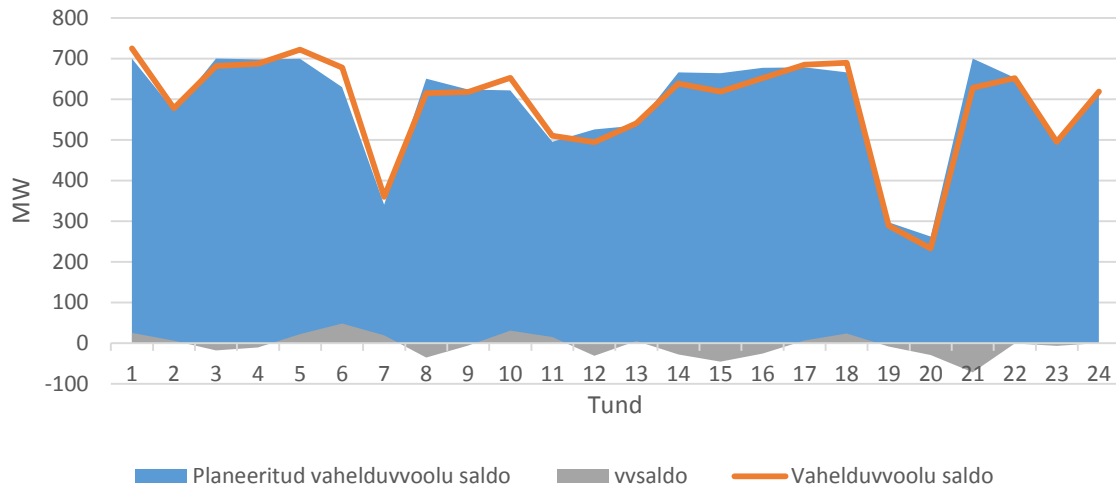
Kui vvsaldo on negatiivne ( $<0$ ), siis süsteem on ülejäägis, kui vvsaldo on positiivne ( $>0$ ), siis süsteem on puudujäägis.



*Joonis 3.1. Vvsaldo kestvusgraafik 2015 aasta 1. kvartalis*

Vaadeldaval perioodil kõige suuremad erinevused planeeritud ja tegeliku vahelduvvoolu saldo vahel on olnud 5. märtsil tunnil 21, mil planeeritud saldo ületas tegelikku 140,3 MW võrra. Vastupidine olukord oli 23. veebruaril, mil planeeritud vahelduvvoolu saldo oli tegelikust 144,2 MW alla prognoositud. Nagu ka jooniselt 3.1 näha, siis tunde, mil vvsaldo on positiivne, on rohkem kui tunde, mil vvsaldo on negatiivne. Vastavalt nimetatule on positiivse saldoga tunde 1370 ja negatiivse saldoga tunde 754. Mitte ühelgi tunnil ei võrdu planeeritud ja tegelik saldo kW täpsusega. Väikseim erinevus oli 3. märtsil tunnil 23, mil erinevus oli 55 kW. Keskmise vvsaldo väärtus oli 9,34 MW, mis tähendab, et keskmiselt ületab vaadeldaval perioodil tegelik vahelduvvoolu saldo planeeritud vahelduvvoolu saldod 9,34 MW võrra.

Näitlikustamise mõttes on joonisel 3.2 kujutatud 3. aprilli 2015 planeeritud-, tegelikku vahelduvvoolu saldod ja vvsaldod. Antud juhul on vvsaldo positiivne 11 tunnil. Suurim erinevus on tunnil 05-06, kus puudujääk on 48,2 MW ning kõige täpsem on prognoos tunnil 23-24, kus erinevus on kõigest 0,055 MW (Tabel 3.1).



Joonis 3.2. 03.03.2015 planeeritud, tegelik vahelduvvoolu saldo ning vvsaldo

Vvsaldo suunda võrreldakse bilansienergia hindade ja NPS hindade vahega. Ehk, kas bilansienergia hind on võrreldes NPS hinnast madalam või kõrgem. Ühikuks EUR/MWh.

$$NPS - BEO = NPS \text{ hind} - \text{Bilansienergia ostu hind} \quad (3.3)$$

$$NPS - BEM = NPS \text{ hind} - \text{Bilansienergia müügi hind} \quad (3.4)$$

Kui  $NPS-BEO/NPS-BEM$  on positiivne, siis NPS hind on kõrgem kui bilansienergia hind, vastasel juhul on NPS hind madalam bilansienergia hinnast.

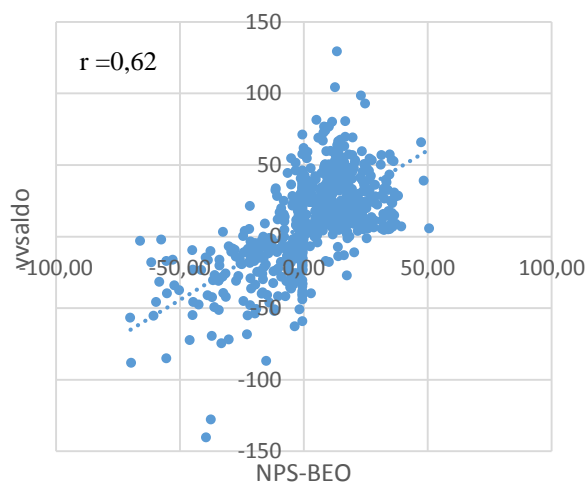
Kahe muutuja vahelist lineaarse seose tugevust ning suunda väljendab korrelatsioonikordaja  $r$  [30]:

$$r = CORREL(X, Y) = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y} \quad (3.5)$$

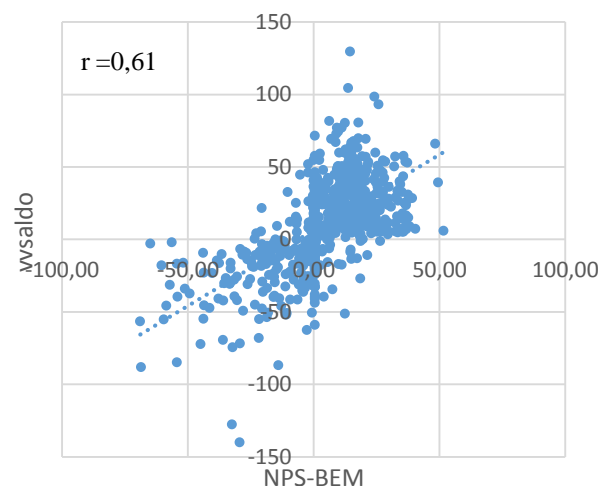
kus  $n$  on korreleeruvate suuruste  $X$  ja  $Y$  väärtuste  $x_i$  ja  $y_i$  paride arv,  $\bar{x}$  ja  $\bar{y}$  aritmeetilised keskmised ning  $\sigma_x$  ja  $\sigma_y$  vastavad standarthälbed.

2015. aasta esimeses kvartalis oli korrelatsioon  $-r$  (3.5) vvsaldo ja BEO-NPS hindade vahel 0,62, mis näitab kahe muutuja vahelist sõltuvust. Sarnaselt on ka korrelatsioon 0,61 vvsaldo ja BEM-NPS hindade vahel. Vastavad korrelatsiooni graafikud on kujutatud joonistel 3.3 ja 3.4.

Nagu ka peatükis 2 analüüsitud, ei erine BEO ja BEM hinnad teineteisest väga palju ning kujunevad sarnaselt, seetõttu on ka korrelatsioonid NPS-BEO, NPS-BEM ja vvsaldo vahel väga sarnased.

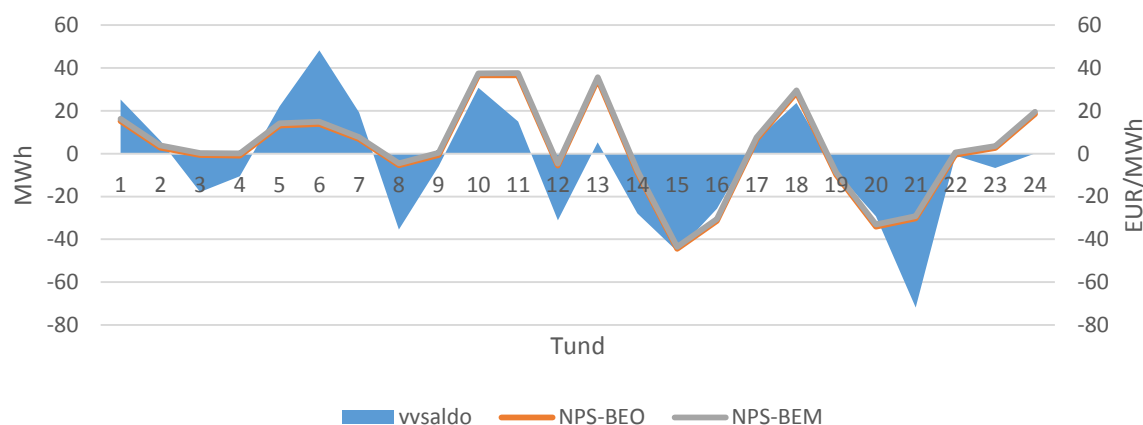


Joonis 3.3. Korrelatsioon vvsaldo ja NPS-BEO hindade vahel



Joonis 3.4. Korrelatsioon vvsaldo ja NPS-BEM hindade vahel

Järgneval joonisel 3.5 on kujutatud 3. märtsi 2015 vvsaldot ning NPS-BEO ja NPS-BEM suundade muutusi. Graafikult on näha, eelnevalt välja toodud korrelatsioon, ehk NPS ja bilansienergia hindade vahe suund liigub sarnaselt vvsaldo suunale. Antud juhul vvsaldo ja NPS-BEO/BEM vaheline korrelatsioon on mõlemal juhul 0,8. Näitajate suund ei ühtinud NPS-BEO puhul vaid tunnil 23. NPS-BEM puhul oli suuna erinevus viiel tunnil (Tabel 3.1).



Joonis 3.5. 03.03.2015 vvsaldo, NPS-BEO ja NPS-BEM

Tabelis 3.1 on välja toodud eelnevate jooniste arvulised väärtused. Samuti on ülevaatlikkuse mõttes tähistatud erinevate värvidega analüüsitavaid väärtuste suunad. Kui vvsaldo on positiivne, ehk süsteem on ülejäägis ning kui NPS-BEO/NPS-BEM on positiivsed väärtused, ehk bilansienergia hinnad on madalamad kui NPS hinnad, siis antud lahtrid on tähistatud punasega. Vastasel juhul (negatiivsete väärtuste korral) rohelisega.

Tabel 3.1. 03.03.2015 kuupäeva vvsaldo BPS-BEO ja NPS-BEM suundade võrdlus

Tund	Planeeritud vahelduvvoolu saldo (MW)	Vahelduvvoolu saldo (MW)	Vvsaldo (MW)	BEO (EUR/MWh)	BEM (EUR/MWh)	NPS (EUR/MWh)	NPS-BEO (EUR/MWh)	NPS-BEM (EUR/MWh)
00 - 01	700,00	725,26	25,26	8,71	7,71	23,88	15,17	16,17
01 - 02	571,70	577,72	6,02	20,67	19,67	23,51	2,84	3,84
02 - 03	700,00	682,09	-17,91	23,43	22,43	22,74	-0,69	0,31
03 - 04	697,90	687,34	-10,56	23,30	22,30	22,36	-0,94	0,06
04 - 05	699,50	721,60	22,10	9,27	8,27	22,35	13,08	14,08
05 - 06	629,70	677,91	48,21	9,29	8,29	23,19	13,90	14,90
06 - 07	340,50	359,72	19,22	20,36	19,36	27,13	6,77	7,77
07 - 08	650,50	615,06	-35,44	46,18	45,18	40,72	-5,46	-4,46
08 - 09	623,80	617,87	-5,93	42,77	41,77	42,20	-0,57	0,43
09 - 10	621,70	652,45	30,75	7,50	6,50	44,02	36,52	37,52
10 - 11	495,30	510,28	14,98	7,50	6,50	44,07	36,57	37,57
11 - 12	525,70	494,56	-31,14	49,68	48,68	44,05	-5,63	-4,63
12 - 13	535,30	540,57	5,27	7,50	6,50	42,20	34,70	35,70
13 - 14	666,00	638,07	-27,93	38,55	37,55	29,57	-8,98	-7,98
14 - 15	664,00	618,42	-45,58	73,50	72,50	29,01	-44,49	-43,49
15 - 16	677,20	651,47	-25,73	66,62	65,62	35,12	-31,50	-30,50
16 - 17	678,40	684,94	6,54	26,01	25,01	32,62	6,61	7,61
17 - 18	666,10	689,77	23,67	7,50	6,50	36,04	28,54	29,54
18 - 19	297,20	288,83	-8,37	53,94	52,94	44,10	-9,84	-8,84
19 - 20	262,20	232,93	-29,27	79,16	78,16	45,08	-34,08	-33,08
20 - 21	700,00	628,13	-71,87	61,17	60,17	30,93	-30,24	-29,24
21 - 22	652,70	651,81	-0,89	27,19	26,19	26,69	-0,50	0,50
22 - 23	502,00	495,29	-6,71	23,70	22,70	26,30	2,60	3,60
23 - 00	619,00	619,06	0,05	7,50	6,50	26,03	18,53	19,53

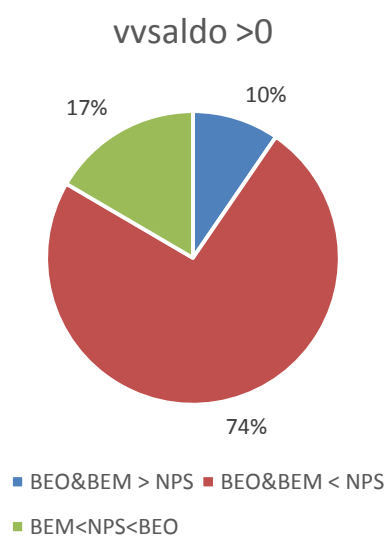
Tabeli põhjal on näha, et tundidel, mil NPS-BEM suund ei ühtinud vvsaldo suunaga, on bilansienergia hinnad sarnased NPS hinnale. NPS hind jääb antud tundidel BEO ja BEM hinna vahele. Peatüki 2.1 kohaselt peaks antud tundidel Eesti elektrisüsteemi saldo olema vastassuunas Baltikumi summaarse eabilansiga. Järgnevalt vaadeldakse, kuidas on ajalooliselt seotud olnud vvsaldo suund ja bilansienergia hindade suund võrreldes NPS hinnaga (Tabel 3.2).

Tabel 3.2. Bilansienergia hindade kujunemine (tundide arv ja osakaal) vastavalt vvsaldo suunale

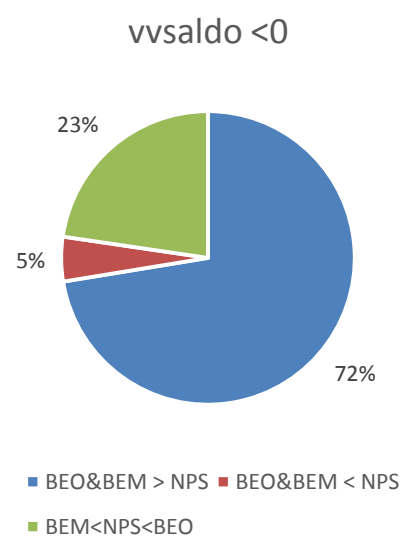
vvsaldo	BEO&BEM > NPS		BEO&BEM < NPS		BEM<NPS<BEO		Kokku	
	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	tunde	osakaal
vvsaldo >0	131	10%	1012	74%	227	17%	1370	65%
vvsaldo <0	546	72%	37	5%	171	23%	754	35%
							2124	100%

2015. aasta esimeses kvartali andmete põhjal saab öelda, et:

- Kui vvsaldo  $>0$  (Joonis 3.6), siis:
  - 74% juhtudes olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hinnast madalam;
  - 17% juhtudest jäi NPS hind BEO ja BEM hindade vahele või oli võrdne NPS hinnaga;
  - 10% juhtudest olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hindadest kõrgemad.
- Kui vvsaldo  $<0$  (Joonis 3.7), siis:
  - 72% juhtudest olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hinnast kõrgemad;
  - 23% juhtudest jäi NPS hind BEO ja BEM hindade vahele;
  - Vaid 5% juhtudest oli NPS hind madalam BEO ja BEM hindadest.



Joonis 3.6. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo on positiivne



Joonis 3.7. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo on negatiivne

Kuigi kirjanduse põhjal loetakse võrdlemisi tugevaks seoseks korrelatsioonikordajat alates väärtusest 0,7, loetakse antud töös vvsaldo suuna ja NPS ja bilansienergia hindade vahe suundade vahel tugevaks seoseks. Esineb erandeid, kuid need on põhjendatavad teiste näitajatega, mida uuritakse järgnevatel peatükkides lähemalt.

### 3.3. Balti riikide saldo suuna mõju bilansienergia hindadele

Balti riikide saldo on saadud ja arvutatud süsteemioperaatorite kodulehekülgedelt [29, 31, 32, 33] saadava avaliku info alusel. Erinevalt Eesti süsteemioperaatorist, ei avalda Läti ja Leedu süsteemioperaatorid süsteemide saldosisid, vaid ainult planeeritud tarbimise või planeeritud tarbimise ja tootmise andmeid. Läti süsteemioperaator avaldab vaid planeeritud tarbimise andmeid, seetõttu eeldatakse antud töös, et planeeritud tootmise ja tegeliku tootmise saldo on null.

Sellest tulenevalt saadakse Balti riikide saldo järgmiselt:

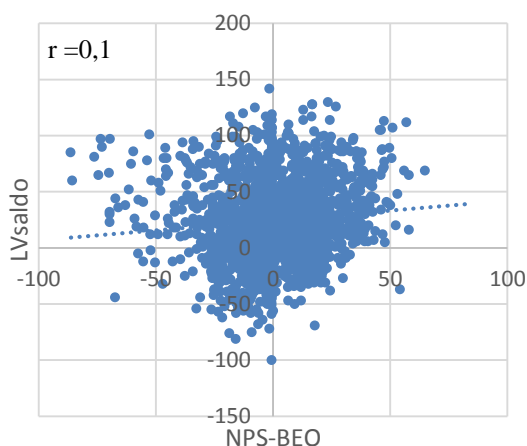
$$\text{Balti saldo} = \text{vvsaldo} + \text{LVsaldo} + \text{LTsaldo} \quad (3.6)$$

$$\text{LVsaldo} = -(\text{tarbimine} - \text{planeeritud tarbimine}) \quad (3.7)$$

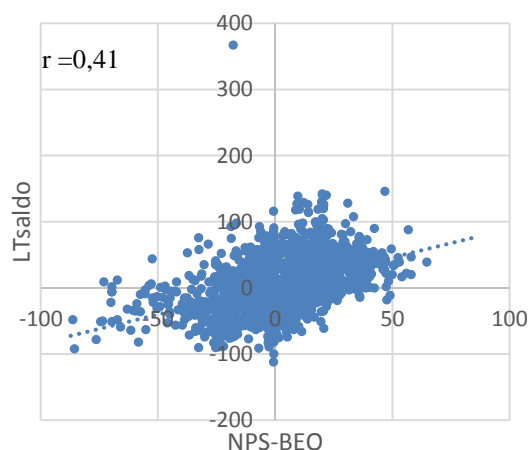
$$\begin{aligned} \text{LTsaldo} = & (\text{tootmine} - \text{tarbimine}) \\ & - (\text{planeeritud tootmine} - \text{planeeritud tarbimine}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Sarnaselt vvsaldole, kui Balti saldo on negatiivne, on Baltikumi süsteem ülejäägis ning kui Balti saldo on positiivne, on süsteem puudujäägis.

Läti ja Leedu saldote eraldi vaadates ja võrreldes NPS-BEO/NPS-BEM hindadega, ei anna vastavad andmed olulist lisandväärtust, kuna seos nende vahel puudub. Korrelatsioon LVsaldo ja NPS-BEO vahel (Joonis 3.8) on 0,1 ja LTsaldo ja NPS-BEO vahel (Joonis 3.9) 0,41.



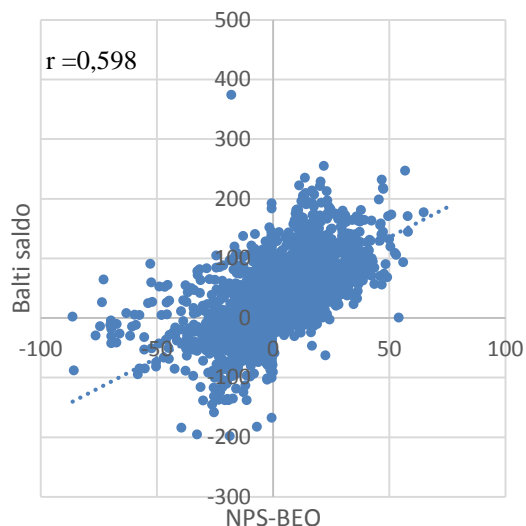
Joonis 3.8. Korrelatsioon NPS-BEO ja LVsaldo vahel



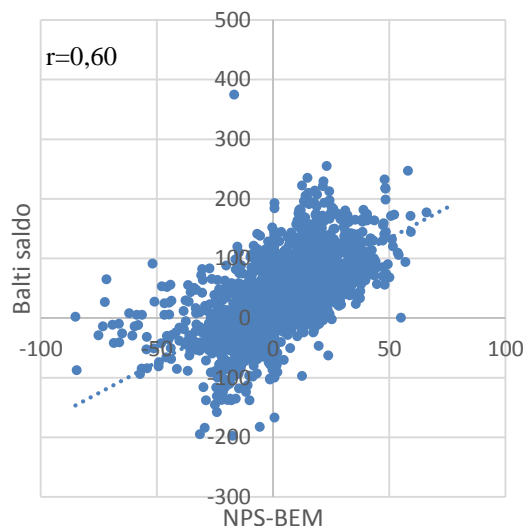
Joonis 3.9. Korrelatsioon NPS-BEO ja LTsaldo vahel

Küll aga leidub seos Balti saldo ja NPS-BEO/NPS-BEM andmete vahel. Korrelatsioon Balti saldo ja NPS-BEO (Joonis 3.10) vahel on analüüsitaval perioodil 0,598 ja Balti saldo ja NPS-BEM (Joonis 3.11) vahel 0,60.





Joonis 3.10. Korrelatsioon NPS-BEO ja Balti saldo vahel



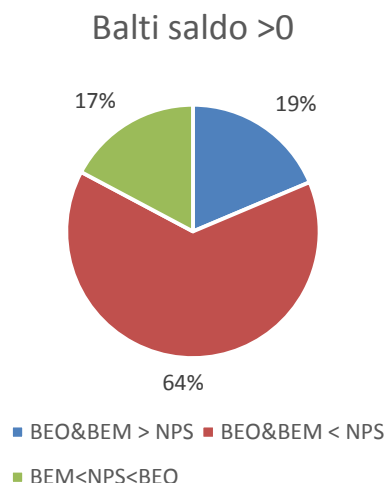
Joonis 3.11. Korrelatsioon NPS-BEM ja Balti saldo vahel

Järgnevalt vaadeldakse, kuidas on ajalooliselt seotud olnud vvsaldo suund ja bilansienergia hindade suund võrreldes NPS hinnaga (Tabel 3.3).

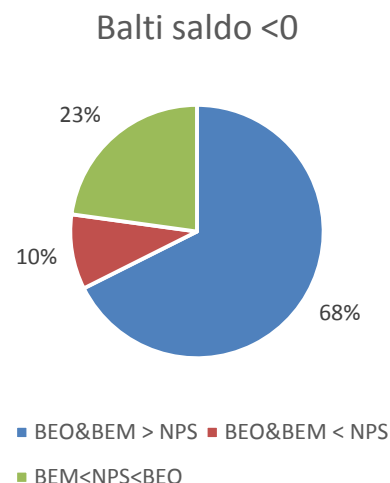
Tabel 3.3. Bilansienergia hindade kujunemine (tundide arv ja osakaal) vastavalt Balti saldo suunale

balti saldo	BEO&BEM > NPS		BEO&BEM < NPS		BEM<NPS<BEO		Kokku	
	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	tunde	osakaal
balti saldo >0	289	19%	994	64%	267	17%	1550	73%
balti saldo <0	388	68%	55	10%	131	23%	574	27%
							2124	100%

- Kui Balti saldo >0 (Joonis 3.12), siis:
  - 64% juhtudes olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hinnast madalamad;
  - 19% juhtudest olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hindadest kõrgemad;
  - 17% juhtudest olid NPS hind bilansienergia hindade vahel.
- Kui Balti saldo <0 (Joonis 3.13), siis:
  - 68% juhtudest olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hindadest kõrgemad;
  - 23% juhtudest olid NPS hind bilansienergia hindade vahel;
  - 10% juhtudes olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hinnast madalamad.



*Joonis 3.12. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui Balti saldo on positiivne*

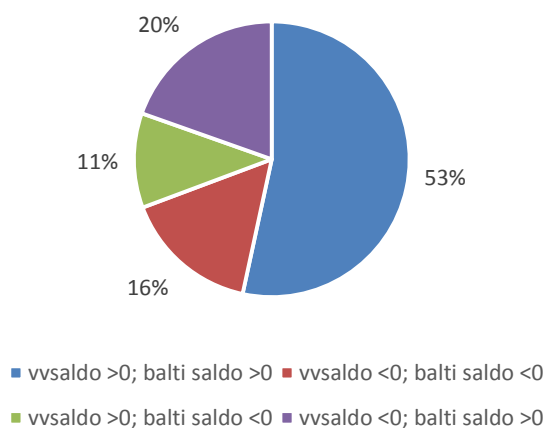


*Joonis 3.13. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui Balti saldo on negatiivne*

Analüüsid vvsaldot ja Balti saldot eraldi bilansienergia hinna kujunemisel, saab väita, et mõlemad tegurid kannavad olulist rolli bilansienergia hinna suuna kujunemisel. Järgnevalt vaatleme, kuidas mõjutavad vvsaldo ja Balti saldo bilansienergia kujunemist samaaegselt.

### 3.4. Vvsaldo ja Balti saldo ühine mõju bilansienergia hindadele

Joonisel 3.14 on välja toodud osakaalud, kuidas jagunesid vvsaldo ja Balti saldo vastavalt positiivsele või negatiivsele suunale. Vastavate osakaalude numbrilised väärtused on esitatud tabelis 3.4.



*Joonis 3.14. Vvsaldo ja Balti saldo jagunemine vastavalt nende suundadele*

53%-l analüüsitud tundidest olid vvsaldo ja Balti saldo mõlemad positiivsed. 16% tundidest olid mõlemad negatiivsed; vvsaldo oli  $>0$  ja Balti saldo oli  $<0$  11% tundidest ning vvsaldo oli  $<0$  ja Balti saldo  $>0$  20% analüüsitud tundidest.

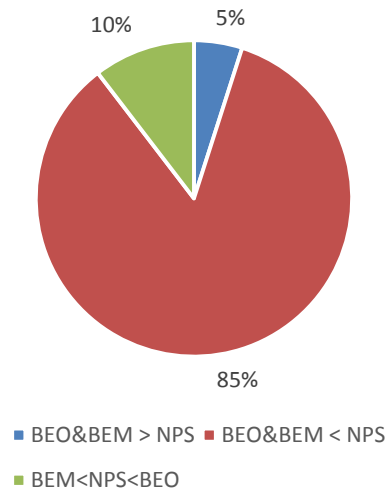
*Tabel 3.4. Bilansienergia hindade kujunemine (tundide arv) vastavalt vvsaldo ja balti saldo suundadele*

	BEO&BEM > NPS		BEO&BEM < NPS		BEM<NPS<BEO		Kokku		
	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	tunde	osakaal	
<b>vvsaldo <math>&gt;0</math>; balti saldo <math>&gt;0</math></b>	56	5%	960	85%	118	10%	1134	53%	
<b>vvsaldo <math>&lt;0</math>; balti saldo <math>&lt;0</math></b>	313	93%	3	1%	22	7%	338	16%	
<b>vvsaldo <math>&gt;0</math>; balti saldo <math>&lt;0</math></b>	75	32%	52	22%	109	46%	236	11%	
<b>vvsaldo <math>&lt;0</math>; balti saldo <math>&gt;0</math></b>	233	56%	34	8%	149	36%	416	20%	
							<b>Kokku:</b>	2124	100%

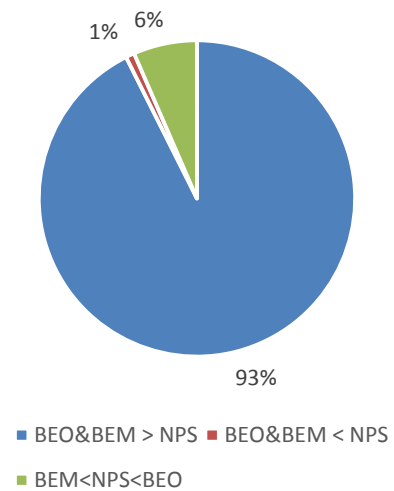
Järgnevalt on analüüsitud, kuidas käitusid bilansienergia hinnad eelpool kirjeldatud olukordades. Numbrilised väärtused on esitatud tabelis 3.5.

- Kui vvsaldo  $>0$  ja Balti saldo  $>0$  (Joonis 3.15), siis:
  - 85% juhtudes olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hinnast madalamad;
  - 10% juhtudest jäi NPS hind BEO ja BEM hindade vahele või oli võrdne bilansienergia hinnaga;
  - 5% juhtudest olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hindadest kõrgemad.
- Kui vvsaldo  $<0$  ja Balti saldo  $<0$  (Joonis 3.16), siis:
  - 93% juhtudest olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hindadest kõrgemad;
  - 7% juhtudest jäi NPS hind BEO ja BEM hindade vahele või oli võrdne bilansienergia hinnaga;
  - Vaid 1% juhtudes olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hinnast madalamad.

vvsaldo &gt;0 balti saldo &gt;0



vvsaldo &lt;0 balti saldo &lt;0

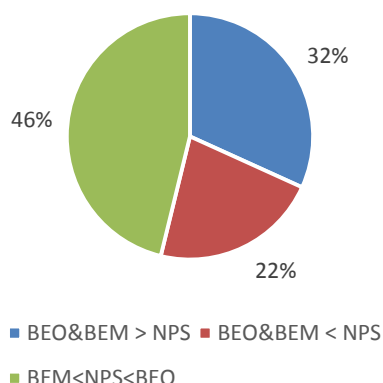


*Joonis 3.15. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo ja Balti saldo on positiivne*

*Joonis 3.16. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo ja Balti saldo on negatiivne*

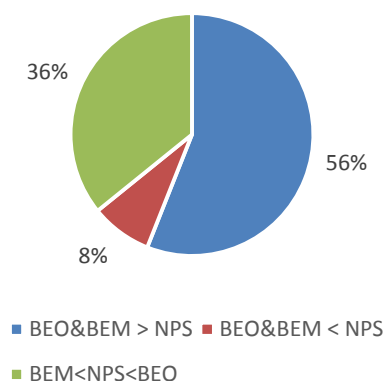
- Kui vvsaldo>0 ja Balti saldo<0 (Joonis 3.17), siis:
  - 32% juhtudest olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hinnast kõrgemad
  - 46% juhtudest jäi NPS hind BEO ja BEM hindade vahele
  - 22% juhtudest oli NPS hind madalam BEO ja BEM hindadest
- Kui vvsaldo<0 ja Balti saldo>0 (Joonis 3.18), siis:
  - 56% juhtudest olid nii BEO kui ka BEM hinnad NPS hinnast kõrgemad
  - 36% juhtudest jäi NPS hind BEO ja BEM hindade vahele
  - Vaid 8% juhtudest oli NPS hind madalam BEO ja BEM hindadest

vvsaldo &gt;0 balti saldo &lt;0



*Joonis 3.17. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo on positiivne ja Balti saldo on negatiivne*

vvsaldo &lt;0 balti saldo &gt;0



*Joonis 3.18. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo on negatiivne ja Balti saldo on positiivne*

Antud analüüsi tulemustena leidis kinnitust peatükis 2.1 väidet, et bilansienergia hind kujuneb Baltikumi elektrisüsteemi eabilansist sõltuvalt. Küll aga sõltub Eesti bilansienergia hinnad rohkem Eesti elektrisüsteemi eabilansi suunast ning Baltikumi samasuunaline eabilansi suund pigem toetab bilansienergia vastava suunalist kujunemist.

*Tabel 3.5. Bilansienergia hindade suundade tõenäosused vvsaldo ning balti saldo suundade korral*

	BEO&BEM > NPS		BEO&BEM < NPS		BEM < NPS < BEO	
<b>vvsaldo &gt;0</b>	10%	5%	74%	85%	17%	10%
<b>balti saldo &gt;0</b>	19%		64%		17%	
<b>vvsaldo &lt;0</b>	72%	93%	5%	1%	23%	7%
<b>balti saldo &lt;0</b>	68%		10%		23%	
<b>vvsaldo &gt;0 balti saldo &lt;0</b>	32%		22%		46%	
<b>balti saldo &gt;0 vvsaldo &lt;0</b>	56%		8%		36%	

Kokkuvõtvalt saab öelda, et (Tabel 3.5):

- 53% kõikidest juhtudest on nii vvsaldo kui ka balti saldo suund positiivne. Antud juhtudel 85% tõenäosusega on BEO ja BEM hinnad madalamad kui NPS hinnad;
- Kõigest 16% juhtudest olid nii vvsaldo kui ka balti saldo suunad negatiivsed ning 96% tõenäosusega olid ka BEO ja BEM hinnad kõrgemad kui NPS hinnad;

- 31% juhtudest, kui vvsaldo ja balti saldo suunad erinesid teineteisest, ei ole ükski hindade analüüsitud suundadest teistest ülekaalukalt üle. Vaid juhul kui balti saldo  $<0$  ja vvsaldo  $>0$ , oli 56% juhtudes BEO ja BEM hinnad NPS hinnast kõrgemad. Ning vaid 8% juhtudest jäi bilansienergia hinnad NPS hinnast alla. Vastupidises olukorras olid osakaalud suhteliselt ühtlaselt jaotunud gruppide vahele, seega statistiliselt ei saa eriti kindla täpsusega öelda, mis suunas bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega jääksid.

### 3.5. Tuule kiiruse ja toodangu mõju bilansienergia hindadele

Antud peatükis analüüsitakse, kas ja kuidas Eesti elektrisüsteemi ühendatud tuuleparkide toodang mõjutab bilansienergia hindade kujunemist. Vvsaldo kujunemises on eelnevalt juba arvestatud ka tuuleparkide planeeritud ja tegelikku toodangut, kuid antud peatükis vaatleme lähemalt, kas tuule kiiruse ja tuuleparkide planeeritud toodangu jälgimine annab täiendavaid teadmisi bilansienergia hinna kujunemisest. Samaaegselt arvestatakse juba eelnevas peatükis välja toodud seoseid bilansienergia hindade ning vvsaldo ja Balti saldo suundade vahel.

Analüüsitakse olukordi, kus on:

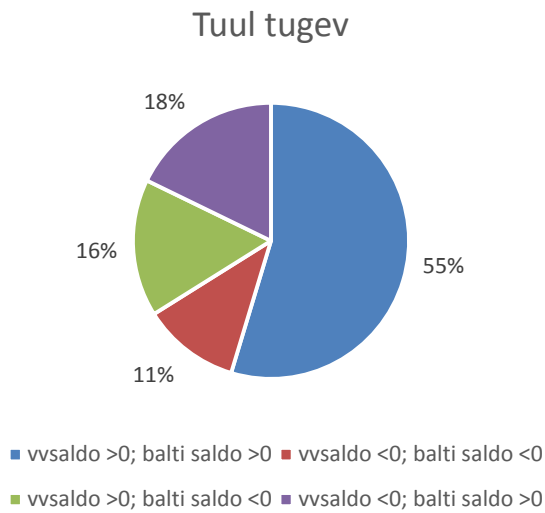
1. **Tugev tuul** – planeeritud tuule toodang on suurem kui 70% installeeritud võimsusest või tuule kiiruse prognoos on suurem kui 15 m/s;
2. **Nõrk tuul** – Planeeritud tuuleparkide toodang on väiksem kui 10% installeeritud võimsusest või tuule kiirus on madalam kui 5 m/s.

Esimesel juhul on olukord, kui tuule kiirus on suur ning tuuleparkide planeeritud toodang on maksimumi lähedal – on oht tuulikute välja langemisele ning süsteemis tekib hetkeliselt puudujääk. Teisel juhul on aga olukord vastupidine. Tuuletoodangu prognoos on madal ning tuulikud töötavad minimaalse koormusega. Ebahütlase nõrga tuule korral tuulikud seiskuvad ning tuule tõustes läheb aega, et tuuletoodang tuulekiirusele vastavaks kasvaks.

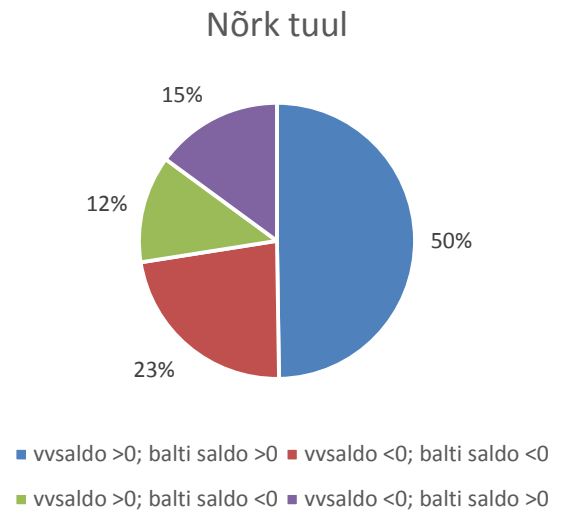
Eleringi tootmispiisavuse aruande [34] järgi oli 2014 aastal installeeritud tuuleparkide võimsus 301MW. Seega toodangu ülemiseks piiriks on seatud 70% juures 210MWh ja alumiseks piiriks 10% juures 30 MWh. Maksimum tuule toodang 2015. aasta esimeses kvartalis oli 16. jaanuaril tunnil 12-13, mil toodeti kokku 274,296 MWh. See on ka maksimum toodang alates 2013. aasta algusest.

Analüüsi kolme teenuspakkuja (DMUHR, WeatherTech, YR) poolt avaldatud tuule kiiruse andmeid 90m kõrgusel ning võrreldi antud teenuspakkujate tuulekiirusi tuuletoodanguga. Kõige suurem korrelatsioon ( $r = 0,85$ ) oli DMUHR tuulekiirusi kasutades. WeatherTech tuule kiiruse

korral oli korrelatsioon 0,67 ja YR korral 0,77. Suurima seose tõttu, valiti analüüsiks kasutamiseks just DMUHR andmed.



*Joonis 3.19. Tugeva tuulega tundide jaotus vastavalt vvsaldo ja Balti saldo suunale*



*Joonis 3.20. Nõrga tuulega tundide jaotus vastavalt vvsaldo ja Balti saldo suunale*

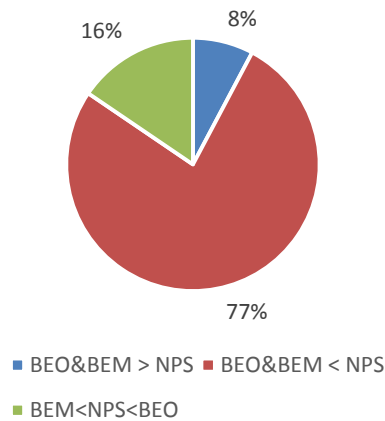
### Tugev tuul

Vastavalt eelnevalt määratud kriteeriumitele oli tugeva tuulega tunde 236, neist 55% esinesid olukordades, kus nii vvsaldo kui ka Balti saldo olid positiivsed. Ülejäänud 45% tundide jaotused on esitatud joonisel 3.19. Tugevaimad seosed saldode ja hindade vahel on olukordades, kus nii vvsaldo kui ka Balti saldo on samasuunalised. Vastassuunaliste olukordade puhul suurt seost hindade kohta välja tuua ei saa. Seetõttu nendele antud peatükis tähelepanu ei pöörata. Vastavad andmed on esitatud tabelis 3.6.

- Juhul kui vvsaldo >0 ja Balti saldo >0 (Joonis 3.21), siis 77% tõenäosusega on tugeva tuule korral bilansienergia hinnad madalamad kui NPS hinnad;
- Kui vvsaldo <0 ja Balti saldo <0 (Joonis 3.22), siis 85% juhtudest on bilansienergia ostu- ja müügihinnad NPS hindadest kallimad.

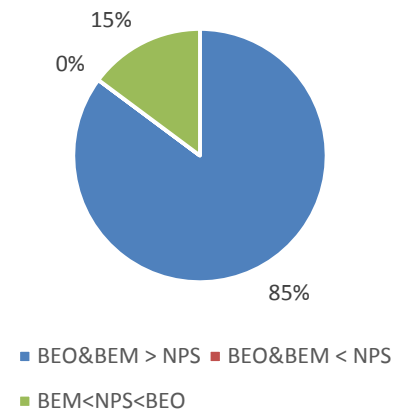
Sealjuures ülejäänud 15% juhtudest jäi NPS hind BEO ja BEM hindade vahele.

vvsaldo &gt;0; balti saldo &gt;0



Joonis 3.21. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo ja balti saldo on positiivne tugeva tuule korral

vvsaldo &lt;0; balti saldo &lt;0



Joonis 3.22. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo ja balti saldo on negatiivne tugeva tuule korral

Tabel 3.6. Tundide arvud ja osakaalud, mil tugeva tuule korral vastava vvsaldo ja Balti saldo suuna korral NPS hind on bilansienergia hindadest on kõrgemad, madalamad või bilansienergia hindade vahel

Tugev tuul	BEO&BEM > NPS		BEO&BEM < NPS		BEM < NPS < BEO		Kokku	
	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	tunde	osakaal
vvsaldo >0; balti saldo >0	10	8%	99	77%	20	16%	129	55%
vvsaldo <0; balti saldo <0	23	85%	0	0%	4	15%	27	11%
vvsaldo >0; balti saldo <0	12	32%	4	11%	22	58%	38	16%
vvsaldo <0; balti saldo >0	19	45%	4	10%	19	45%	42	18%
<b>Kokku:</b>							236	100%

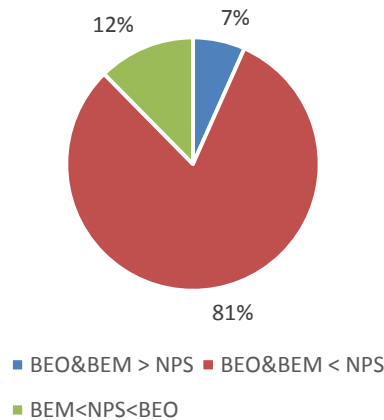
### Nõrk tuul

Nõrga tuulega tunde oli kokku 422. Sarnaselt tugeva tuulega olukorrale, oli ka nõrga tuule korral, oli 50% tundidest olukordades, kus nii vvsaldo kui ka Balti saldo olid positiivsed. Ülejäänud 50% tundide jaotused on toodud joonisel 3.20. Tugevaimad seosed saldode ja hindade vahel on olukordades, kus nii vvsaldo kui ka Balti saldo on samasuunalised. Vastassuunaliste olukordade puhul suurt seost hindade kohta välja tuua ei saa. Seetõttu nendele antud peatükis tähelepanu ei pöörata. Vastavad andmed on esitatud tabelis 3.7.

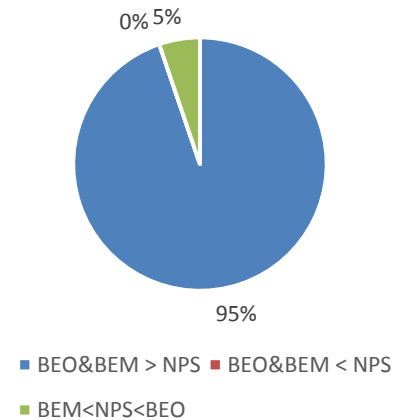


- Juhul kui vvsaldo >0 ja Balti saldo >0 (Joonis 3.23), siis 81% tõenäosusega on tugeva tuule korral bilansienergia hinnad madalamad kui NPS hinnad;
- Kui vvsaldo <0 ja Balti saldo <0 (Joonis 3.24), siis 95% juhtudest on bilansienergia ostu- ja müügihinnad NPS hindadest kallimad ning ülejäänud 5%-l olukordadest jäi NPS hind BEO ja BEM hindade vahele.

vvsaldo &gt;0; balti saldo &gt;0



vvsaldo &lt;0; balti saldo &lt;0



Joonis 3.23. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo ja balti saldo on positiivne nõrga tuule korral

Joonis 3.24. Bilansienergia hinnad võrreldes NPS hindadega kui vvsaldo ja balti saldo on negatiivne nõrga tuule korral

Tabel 3.7. Tundide arvud ja osakaalud, mil nõrga tuule korral vastava vvsaldo ja Balti saldo suuna korral NPS hind on bilansienergia hindadest on kõrgemad, madalamad või bilansienergia hindade vahel

Nõrk tuul	BEO&BEM > NPS		BEO&BEM < NPS		BEM < NPS < BEO		Kokku	
	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal	Tunde	osakaal
vvsaldo >0; balti saldo >0	14	7%	170	81%	26	12%	210	50%
vvsaldo <0; balti saldo <0	91	95%	0	0%	5	5%	96	23%
vvsaldo >0; balti saldo <0	17	32%	14	26%	22	42%	53	13%
vvsaldo <0; balti saldo >0	32	51%	3	5%	28	44%	63	15%
<b>Kokku:</b>							422	100%

### 3.6. Tulemused ja järeldused

Antud peatükis vaadeldi vvsaldo ning Balti saldo mõju bilansienergia hindade kujunemisel. Samuti analüüsiti, kas bilansienergia hindade kujunemisel on seost tuule kiiruse ja tuuleparkide toodanguga. Analüüsi käigus vaadeldi, kas kujunenud bilansienergia hinnad on NPS hindadest kõrgemad või madalamad.

Selgus, et vvsaldo, mis kujutab endast Eesti elektrisüsteemi tegeliku ja planeeritud vahelduvvoolu saldo erinevust, mõju on analüüsitud näitajatest kõige suurem. Kui vvsaldo on positiivne, siis süsteem on puudujäägis ning vvsaldo negatiivse väärtuse korral on süsteem ülejäägis ning bilansienergia hinnad on NPS hindadest madalamad. Seda teooriat toetab ka muutujate vaheline vastastikune seos ehk korrelatsioon. Korrelatsioon vvsaldo ja NPS-BEO ning NPS-BEM hindade vahel oli vastavalt 0,62 ja 0,61, mis näitab kahe suuruse vahelise seose olemasolu ning positiivset suunda – ühe suuruse kasvades teine suurus samuti kasvab. Sellest saab järeldada, et kui vvsaldo on positiivne, siis ka NPS-BEO ja NPS-BEM väärtused on positiivsed, ehk bilansienergia hinnad on NPS hindadest madalamad ning negatiivse vvsaldo korral on bilansienergia hinnad NPS hindadest pigem kõrgemad.

Kolme kuu analüüsi põhjal, saab öelda, kui vvsaldo  $>0$ , siis 74% tõenäosusega on bilansienergia hinnad antud tunnil NPS hinnast madalamad. Kui vvsaldo  $<0$ , siis 72% tundidest olid bilansienergia hinnad NPS hindadest kõrgemad.

Balti saldo, mis näitab Baltikumi summaarset eabilanssi, omab samuti bilansienergia hindadele mõju. Korrelatsioon Balti saldo ja NPS-BEO ning NPS-BEM hindade vahel oli mõlemal juhul 0,60, mis näitab bilansienergia hindade kujunemisel vvsaldole sarnast mõju. Kolme kuu analüüsi põhjal, saab öelda, kui Balti saldo  $>0$ , siis 64% tõenäosusega on bilansienergia hinnad antud tunnil NPS hinnast madalamad. Kui Balti saldo  $<0$ , siis 68% tundidest olid bilansienergia hinnad NPS hindadest kõrgemad.

Ka vvsaldo ja Balti saldo ühisanalüüsi tulemustest selgus, et mõlema suuruse samasuunalise esinemise korral bilansienergia teatud suuna esinemise tõenäosus kasvas. Kui nii vvsaldo kui ka Balti saldo olid negatiivsed, siis 93% tõenäosusega olid bilansienergia hinnad NPS hindadest kõrgemad. Kui vvsaldo ja Balti saldo olid samaaegselt positiivse väärtusega, siis 85% tõenäosusega oli ka bilansienergia hinnad NPS hindadest madalamad.

Planeeritud tuule toodang sisaldub planeeritud vahelduvvoolu saldo suuruses. Tuule kiiruse ja toodangu mõju bilansienergia hindade kujunemisel annab täiendavat infot, kas bilansienergia hinnad on NPS hinnast pigem kõrgemad või madalamad. Juhul kui vvsaldo ja Balti saldo suunad on positiivsed, on bilansienergia hinnad nii tugeva kui ka nõrga tuulega olukordades NPS

hindadest pigem madalamad. Tugeva tuule ja suure toodangu korral 77% juhtudest ning nõrga tuule ja madala toodangu korral 81% juhtudest. Kui vvsaldo ja Balti saldo on negatiivsed, siis tugeva tuule korral 85% juhtudest bilansienergia hinnad on NPS hinnast kõrgemad ning nõrga tuule korral 95% juhtudest. Seega juba eelnevalt analüüsitud vvsaldo ja Balti saldo suundade infole lisades tuule info, kinnitab see tõenäosuslikku bilansienergia hindade suuna kujunemist. Küll aga ei anna tuule kiiruse ja toodangu vaatlemine ilma saldode vaatlemiseta piisavalt informatsiooni, et selle alusel bilansienergia hindade suunda ennustada.

Tuule kiirust ja planeeritud tuuleparkide toodangut saab kasutada bilansienergia hindade prognoosimudeli koostamisel. Jaotades tunnid vastavalt tuule kiirusele ja toodangule kategooriatesse, koostab mudel iga kategooria sees eraldi seoseid ning oskab tänu sellele ka täpsemini prognoosida.

## 4. Vvsaldo ja Balti saldo prognoos

Bilansienergia hinna prognoosimiseks kaks tundi ette, on vaja prognoosida ka vvsaldo ja Balti saldo suurused 2 tundi ette. Parima prognoosi välja selgitamiseks koostatakse kolm mudelit tehisnärvivõrkudel, neli libiseva keskmise mudelit ning hübriidmudel parimast närvivõrkude ja libiseva keskmisest mudelist (Joonis 4.1).



*Joonis 4.1. Vvsaldo ja Balti saldo prognoosimiseks rakendatavad mudelid*

Kolmest meetodist valitakse parima tulemusega mudel, mida rakendatakse edasi bilansienergia hindade prognoosimisel peatükis 5.

### 4.1. Andmete ettevalmistamine

Andmebaas närvivõrgu treenimisel koostati avaliku informatsiooni alusel. Valimi mahuks on võetud ajaliselt periood 01.01.2013 – 28.02.2015.

Vvsaldo andmete treenimisel närvivõrkudel on välja jäetud 63 tundi puuduvate andmete tõttu:

- 24 tundi kuupäeval 25.08.2013
- 31.08.2013 tund 02:00
- 24 tundi kuu päeval 24.02.2014
- 30.04.2014 tund 09:00
- 20.07.2014 23:00
- 27.07.2014 23:00
- 10.09.2014 23:00
- 25.01.2015 23:00
- 9 tundi kuupäeval 7.02.2015 2:00-11:00

Balti saldo treenimisel on lisaks eelpool mainitud tundidele eemaldatud 8, kokku 71 tundi:

- 2 tundi 1.01.2013 00:00-02:00
- 31.03.2013 5:00
- 8.09.2013 2:00
- 16.09.2013 2:00
- 30.03.2014 02:00 ja 06:00
- 22.05.2014 7:00

Kokku jäi vvsaldo andmete valimisse 18 873 ning Balti saldo valimisse 18 865 tundi, mida kasutatakse närvivõrkude mudelite treenimisel ja parima mudeli valikul.

Treenitud närvivõrkude ja libiseva keskmiste mudelite prognoosi täpsuse testimiseks on jäetud 743 tundi perioodil 01.03.2015-31.03.2015, antud perioodi prognoosi tulemusi hinnatakse, võrreldakse teiste mudelitega ning valitakse parimad mudelid, mida kasutatakse saldode prognoosimiseks bilansienergia hinna modelleerimisel.

## 4.2. Tulemuste hindamise alused

Prognoosimudelite tulemuste hindamine on oluline parima mudeli valiku tegemiseks. Mudelite prognoosi väärtusi võrreldakse tegelike väärtustega. Prognoosimudeleid hinnatakse madala keskmise absoluutvea (4.1) ja ruutkeskmise vea (4.2) järgi ning saldo suuna prognoosimise täpsuse järgi (4.3). [4]

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |A_i - P_i|}{N} \quad (4.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - P_i)^2}{N}} \quad (4.2)$$

Saldo suuna prognoosi tulemuste hindamisel kasutatakse suuna prognoosi täpsust (4.3). Hindamaks millist saldo suunda mudel paremini prognoosib (positiivset või negatiivset), on vastavalt prognoosi tulemusest on väärtused jaotatud TP (*true positive*), TN (*true negative*), FP (*false positive*), FN (*false negative*). [35]

Tabel 4.1. Tulemuste maatriks vastavalt prognoosi suunale [35]

Tegelik vs prognoos	Positiivne väärtus (P)	Negatiivne väärtus (N)
Positiivne väärtus (P)	Õige positiivne väärtus (TP)	Vale negatiivne väärtus (FN)
Negatiivne väärtus (N)	Vale positiivne väärtus (FP)	Õige negatiivne väärtus (TN)

Vastavalt Tabel 4.1 esitatud maatriksile:

- TP – positiivne saldo prognoositud positiivsena;
- FP – positiivne saldo prognoositud negatiivsena;
- TN – negatiivne saldo prognoositud negatiivsena;
- FN – negatiivne saldo prognoositud positiivsena.

Suuna täpsus (4.3) annab ülevaate, kui suure tõenäosusega prognoosib mudel saldo suunda õigesti.

$$Suund_{\%} = \frac{\text{\textit{õigete tabamuste arv}}}{\text{\textit{valimi maht}}} = \frac{\sum_{i=1}^N (TP + TN)}{\sum_{i=1}^N (P + N)} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Kuna suuna täpsus ei anna head ülevaadet, millist saldo suunda antud mudel täpsemini prognoosida suudab, siis ülevaatlikkuse mõttes on mudelite prognoosi tulemusi võrdlevates tabelites esitatud ka Posit. (4.4). ja Negat. (4.5) väärtused, kuid parima mudeli valikul neid ei arvestata.

Posit. tulemus näitab mudeli võimet prognoosida saldo positiivne suund positiivsena. Antud väärtus väljendab protsentuaalselt kui suure tõenäosusega prognoosis mudel positiivse tulemuse õigesti.

$$Posit. \% = \frac{\text{\textit{õige positiivne prognoos}}}{\text{\textit{positiivne saldo}}} = \frac{\sum_{i=1}^N TP}{\sum_{i=1}^N (TP + FP)} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

Negat. tulemus näitab mudeli võimet prognoosida negatiivne saldo suund negatiivsena. Antud väärtus väljendab protsentuaalselt kui suure tõenäosusega prognoosis mudel negatiivse tulemuse õigesti.

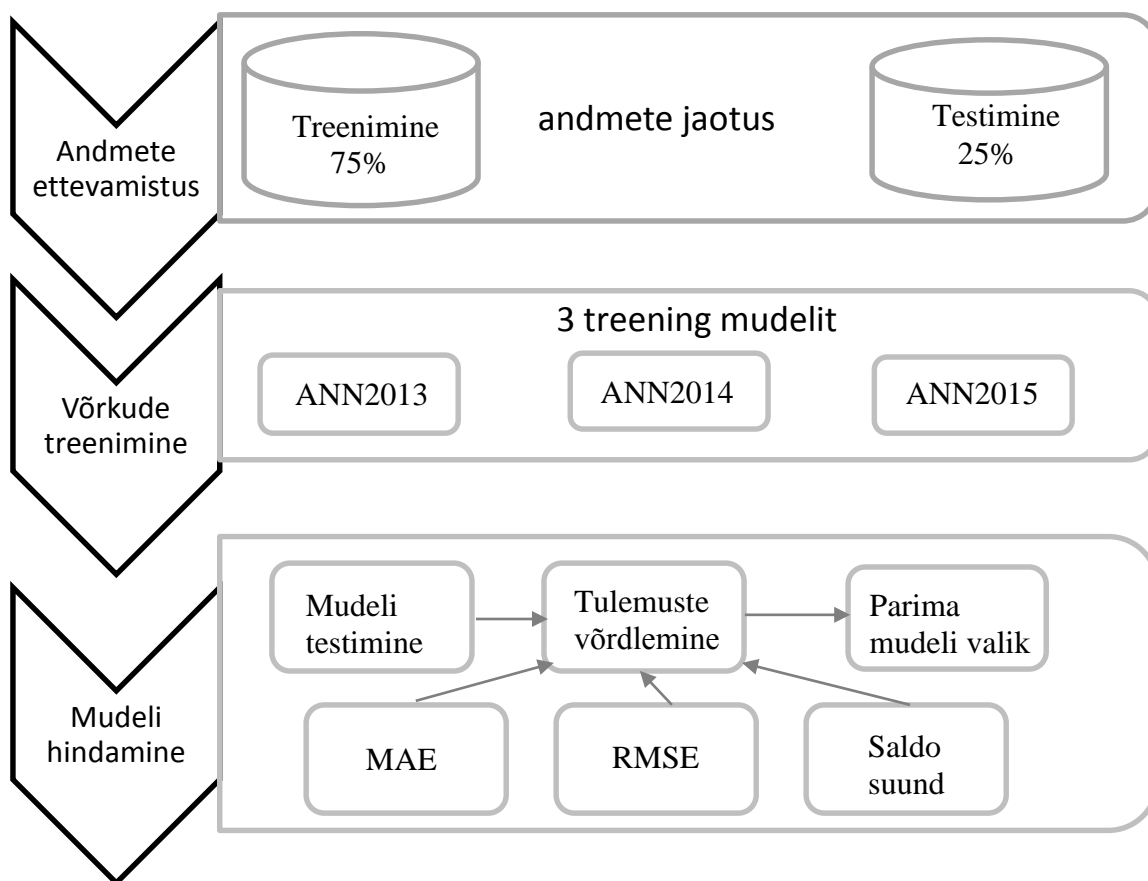
$$Negat. \% = \frac{\text{\textit{õige negatiivne tabamus}}}{\text{\textit{negatiivne saldo}}} = \frac{\sum_{i=1}^N TN}{\sum_{i=1}^N (TN + FN)} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

### 4.3. Närvivõrgu mudelid

Joonisel 4.2 on kujutatud närvivõrgu mudeli rakendamise protsessi, mis on jaotatud kolme ossa:

1. Andmete ettevalmistus;
2. Võrkude treenimine;
3. Mudeli tulemuste hindamine ja parima mudeli valik.

Andmete ettevalmistamise etapis, korrastatakse mudelisse sisestatavaid andmeid. Mudelid on arendatud kahes faasis: treenimine ja testimine. Treenimise all mõistetakse mudeli ehitamist või arendamist kasutades ajaloolisi andmeid. Treenimise ajal testimise käigus katsetatakse mudelit uute, treenimata andmetega, määramaks mudeli täpsust prognoosimisel. Treenitakse üldjuhul suuri massiive andmeid ning testimine moodustab mingi protsendi treenitavatest andmetest. Antud juhul on määratud treenimise osakaaluks 75% ja testimiseks 25% andmetest.



Joonis 4.2. Närvivõrgumudeli rakendamise protsess

Andmete treenimiseks on koostatud kolm erinevat mudelit: ANN2013, ANN2014 ja ANN2015. Kõigi kolme mudeli sisendid on samad (vt 4.3.1), kuid erinevad andmete mahu poolest (Tabel 4.2). Kõikide mudelite treeningperiood lõppeb 28.02.2015, kuid algusperiood on erinev. ANN2013 mudelis on andmed alates 2013 aasta algusest, ANN2014 puhul alates 2014 aasta algusest ning ANN2015 puhul on kasutatud vaid jaanuari ja veebruari andmeid 2015. aastal. Valimitest on eemaldatud tunnid, mis on välja toodud peatükis 4.1.

Tabel 4.2. Vvsaldo ja Balti saldo närvivõrgu mudelid ja valimi mahud

	ANN2013	ANN2014	ANN2015
<b>Vvsaldo</b>	18 873	10 138	1 406
Treenimine (75%)	14 155	7 604	1 055
Testimine (25%)	4 718	2 535	352
<b>Balti saldo</b>	18 865	10 135	1 406
Treenimine (75%)	14 149	7 601	1 054
Testimine (25%)	4 716	2 534	352

Vältimaks olukorda, kus närvivõrgu prognoosimise täpsust kontrollitakse andmete pealt, mida võrk on eelnevalt „näinud“, ehk õppimiseks kasutanud, siis treenitud mudelite prognoosi täpsust testitakse 2015. aasta märtsi andmete alusel. Tulemuste ja prognoosi täpsuse hindamisel

kasutatakse peatükis 4.2 välja toodud arvutusi ning parimate tulemustega mudelit kasutatakse võrdluses libiseva keskmise parima mudeliga ning hübriidmudeli koostamisel. Antud kolmest mudelist valitakse omakorda parim mudel bilansienergia hindade prognoosimiseks.

Järgnevates punktides vaadeldakse täpsemalt milliseid närvivõrkude sisendeid vastava prognoosi mudelite juures kasutatakse, antakse ülevaade andmete treenimise ning treeningtulemuste kohta. Tulemusi võrreldakse ning valitakse välja parimate tulemustega võrk.

#### **4.3.1. Närvivõrkude sisendid**

Vvsaldo ja Balti saldo närvivõrkude mudelite sisenditeks on valitud:

- Nädalapäev (1 – esmaspäev; 2 – teisipäev; 3 – kolmapäev; 4 – neljapäev; 5 – reede; 6 – laupäev; 7 – pühapäev);
- Tund (0-23, kus tunni number tähistab tunni algust);
- Planeeritud saldo (sisaldab andmeid planeeritud tarbimise ja tootmise kohta);
- Saldo T-3 (prognoositavale tunnile 3h eelnev saldo väärtus);
- Saldo T-2 (prognoositavale tunnile 2h eelnev saldo väärtus).

Vastavalt tabelis 4.2 olevatele valimimahtudele koostatakse mõlema saldo jaoks kolme erineva ajalise perioodiga närvivõrku, mida treenitakse ja testitakse parima võrgu valimiseks.

#### **4.3.2. Närvivõrkude treenimine**

Närvivõrgu treenimiseks ja testimiseks kasutati Palisade NeuralTools 6 tarkvara Excelis. Selleks, et käsitletava tarkvaraga närvivõrke kasutada, tuleb andmed esitada viisil, et ridades on esitatud erinevad muutujad ning tulpades on antud muutujate ajalised väärtused.

Närvivõrgu treenimisfunktsiooni valikul kasutati ühekordselt parima võrgu otsimise (*Best Net Search*) funktsiooni. NeuralTools testib erinevaid konfiguratsioone ning valib välja parima testimise tulemustega võrgu. Antud funktsiooni ajamahukuse tõttu teostati parima võrgu otsimine vaid vvsaldo 2015 aasta andmete põhjal.

Parima võrgu mudel teostas modelleerimised kuuel erineval moel: lineaarne prognoos, GRNN mudel, ning kahe kuni viie kihiga MLFN mudelid. Mudeli sobivuse hindamise kriteeriumiks on esitatud RMSE väärtus. Tabelis 4.3 on näha, et kõige väiksem ruutkeskmise viga on GRNN võrgul. Antud võrgu eeliseks MLFN võrkude ees on ka lühikene treenimise ajaline kestvus. Antud 2149 tunni korral vaid kuus sekundit.



Tabel 4.3. Parima võrgu otsimise tulemused

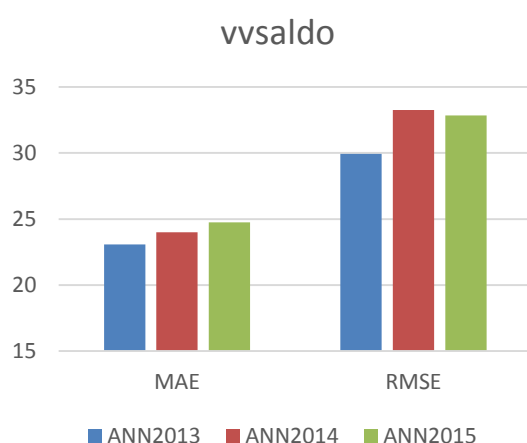
Best Net Search			
	RMS Error	Training Time	Reason Training Stopped
Linear Predictor	29,77	00:00:00	Auto-Stopped
GRNN	29,05	00:00:06	Auto-Stopped
MLFN 2 Nodes	29,45	01:01:00	Auto-Stopped
MLFN 3 Nodes	29,55	01:02:00	Auto-Stopped
MLFN 4 Nodes	29,17	01:10:00	Auto-Stopped
MLFN 5 Nodes	29,37	01:18:35	Auto-Stopped

Parima võrgu treenimise tulemuste põhjal teostatakse ka kõik ülejäänud võrkude treenimised GRNN meetodit kasutades. Vvsaldo treenimise tulemuste kokkuvõte on toodud lisas (L.2) ja Balti saldo treenimise kokkuvõte lisas (L.3).

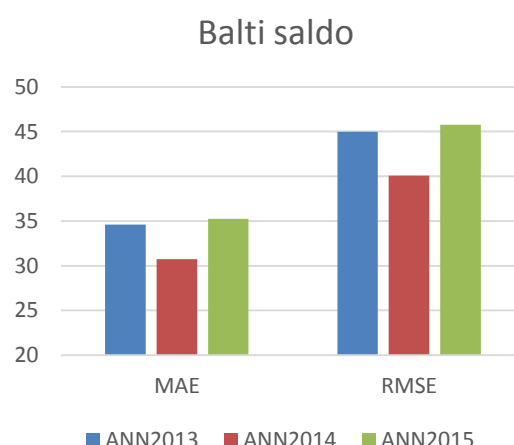
### 4.3.3. Parima närvivõrgu leidmine

Erinevate närvivõrkude esmaseks analüüsiks ning võrdluseks kasutatakse närvivõrgu poolt genereeritud väljundväärtuste ning tegelike väärtuste vahet, mis kujutab endast viga, mil määral erineb teatud ajaperioodil prognoositud väärtus tegelikust väärtusest. Vigade keskmisi absoluutvigu ning ruutkeskmisi vigu võrreldes erinevate närvivõrkude vahel, on võimalik teha järeldusi parima närvivõrgu treeningperioodi pikkuse kohta. Suuna prognoosi täpsus näitab mitmel protsendil tundidest suutis närvivõrk prognoosida õige suuna.

Lisades (L.6 ja L.7) olevatel joonistel on esitatud tegelikud vvsaldo ja Balti saldo ning ANN2013, ANN2014, ANN2015 mudelite prognoositud saldod märtsiks 2015.



Joonis 4.3. Vvsaldo närvivõrkude testimise MAE ja RMSE väärtused

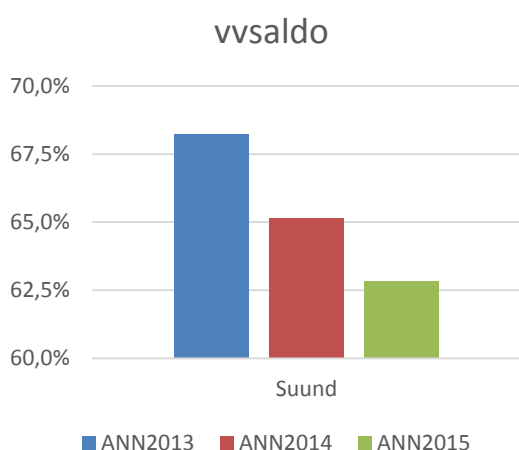


Joonis 4.4. Balti saldo närvivõrkude testimise MAE ja RMSE väärtused

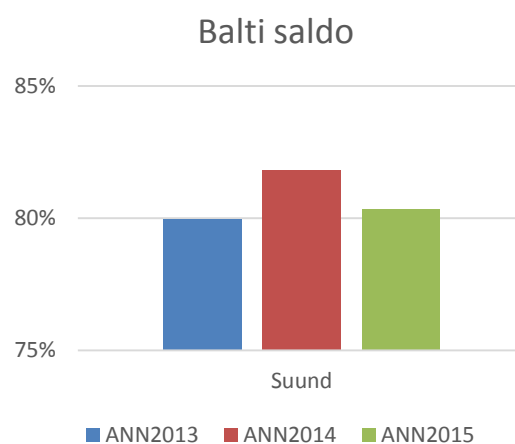
Joonistel 4.3 ja 4.4 on esitatud vvsaldo ja Balti saldo testimise tulemuste vigade võrdlevad graafikud. Vastavad arvulised väärtused on esitatud tabelites 4.4 ja 4.5.

Vvsaldo testimisel andsid kõik kolm mudelit väga erinevad tulemused. Madalaim keskmine absoluutviga (23,06) oli ANN2013 mudelil, kus treeningperiood algas 2013. aastast ning halvim (24,74) tulemus oli ANN2015 mudelil, kus treeningperioodiks kasutati andmeid alates 2015. aastast. Ka ruutkeskmist viga hinnates, andis parima tulemuse (29,94) ANN2013 mudel. Saldo suuna suutis ANN2013 mudel prognoosida 68% täpsusega (Joonis 4.5).

Balti saldo testimisel olid tulemused parima ja halvima mudeli vahel suuremate erinevustega kui vvsaldo korral. Madalaim keskmine absoluutviga (30,75) oli ANN2014 mudelil ning halvim tulemus (35,25) oli ANN2015 mudelil. Ka ruutkeskmist viga hinnates andis parima tulemuse (40,08) ANN2014 mudel. Saldo suuna suutis ANN2014 mudel prognoosida 82% täpsusega (Joonis 4.6).



*Joonis 4.5. Närvivõrkude vvsaldo suuna täpsuse prognoos testimisel*



*Joonis 4.6. Närvivõrkude Balti saldo suuna täpsuse prognoos testimisel*

Nagu näha tabelites 4.4 ja 4.5, siis nii vvsaldo kui ka Balti saldo puhul suudavad närvivõrgu mudelid prognoosida täpsemini positiivseid saldo suundasid kui negatiivseid. Vvsaldo puhul oli parim tulemus ANN2014 võrgu korral, mil positiivne saldo suund prognoositi 84% juhtudest õigesti. Negatiivse saldo prognoosi täpsused jäid vvsaldo puhul kõik alla 40%, parim neist oli ANN2013 täpsusega 38%. Balti saldo puhul andis parima tulemuse positiivse saldo prognoosimisel ANN2015 mudel, täpsusega 95%. Negatiivse saldo prognoosimisel jäid tulemused vahemikku 44%-63%, parima neist saavutas ANN2013 mudel.

Tabel 4.4. vvsaldo mudelite testimise tulemused 2015 märts

vvsaldo	ANN2013	ANN2014	ANN2015
MAE	23,06	23,99	24,74
RMSE	29,94	33,24	32,85
Suund	68%	65%	62%
Posit.	83%	84%	81%
Negat.	38%	28%	26%

Tabel 4.5. Balti saldo mudelite testimise tulemused perioodil 2015 märts

Balti Saldo	ANN2013	ANN2014	ANN2015
MAE	34,60	30,75	35,25
RMSE	44,97	40,08	45,75
Suund	80%	82%	80%
Posit.	86%	90%	92%
Negat.	63%	56%	44%

Vvsaldo puhul on valitud parimaks närvivõrgu mudeliks ANN2013, mis kasutas andmeid kogu valimi ulatuses, st alates 2013. aastast. Balti saldo puhul osutus aga täpseima prognoosi ja saldo suuna prognoosimiseks mulde ANN2014.

#### 4.4. Libiseva keskmise mudelid

Põhjusel, et süsteemide saldod on väga stohhastilised aegread ning ainult avalikku infot kasutades on äärmiselt keeruline väga täpselt ette prognoosida, kas tegelik saldo kahe tunni pärast tuleb planeeritust kõrgem või madalam. Alternatiiviks närvivõrkudele koostatakse antud töös vvsaldo ja Balti saldo prognoosimiseks nelja libiseva keskmise meetodit, kus prognoos tehakse ülejäägmiseks tunniks ( $t+2$ ):

- **Kaal3** – Kaalutud libisev keskmine kolme viimast tundi kasutades;
- **Kaal2** – Kaalutud libisev keskmine kahte viimast tundi kasutades;
- **Kesk3** – Aritmeetiline libisev keskmine kolme viimast tundi kasutades;
- **Kesk2** – Aritmeetiline libisev keskmine kahte viimast tundi kasutades.

Kaal3 mudeli puhul kasutatakse tunde jooksvat tundi ( $t$ ), eelmist tundi ( $t-1$ ) ja üle-eelmist tundi ( $t-2$ ). prognoositav tund  $t+2$  kujuneb vastavalt valemile:

$$Kaal3_{t+2} = \frac{0,5 \cdot (t - 2) + 1 \cdot (t - 1) + 1,5 \cdot t}{3}, \quad (4.6)$$

kus kõige suurem kaal on jooksval tunnil ning kõige väiksem kaal üle-eelmisel tunnil.

Sarnaselt Kaal3 mudelile kujuneb ka Kaal2 mudel, erinevusega, et kasutatakse tunde  $t-1$  ja  $t$ . Prognoositav tund  $t+2$  kujuneb vastavalt valemile:

$$Kaal2_{t+2} = \frac{0,5 \cdot (t - 1) + 1,5 \cdot t}{2}, \quad (4.7)$$

suurem kaal endiselt jooksval tunnil.

Kesk3 ja Kesk2 mudelid on koosnevad tavalisest aritmeetilise keskmise arvutamisest, erinevus seisneb vaid liikmete arvus. Prognoositav tund  $t+2$  kujuneb vastavalt valemitele:

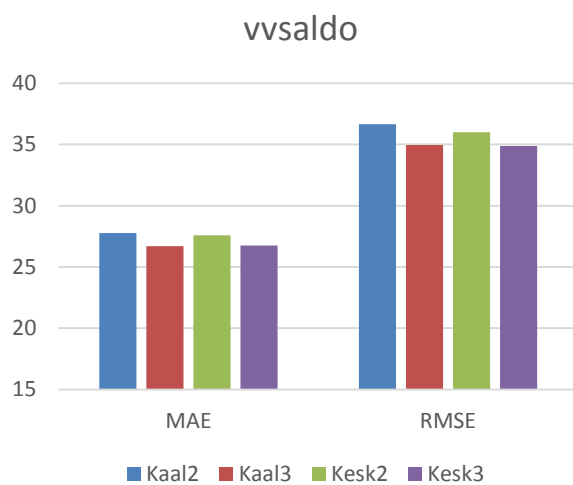
$$Kesk3_{t+2} = \frac{(t-2) + (t-1) + t}{3} \quad (4.8)$$

$$Kesk2_{t+2} = \frac{(t-1) + t}{2} \quad (4.9)$$

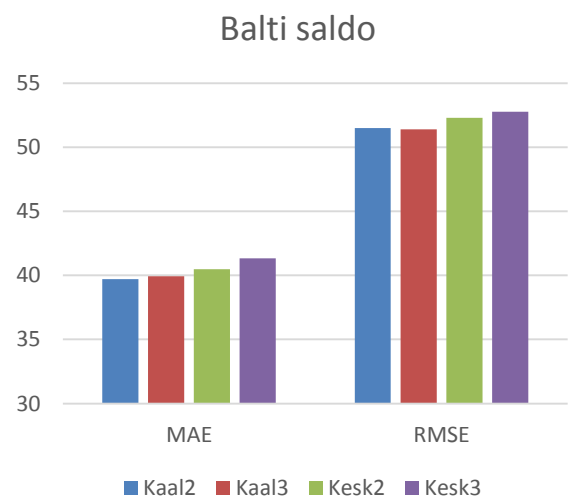
Vastavalt valemitele on koostatud testprognoosid ning nende tulemuste võrdluse põhjal tegelike andmetega valitakse parim mudel.

#### 4.4.1. Mudelite võrdlus ja parima mudeli valik

Parim mudel valitakse testperioodi (01.03.2015-31.03.2015) kohta tehtud prognooside alusel. Tulemuste võrreldavuse jaoks võrreldakse vigade MAE, RMSE ja saldo suuna prognoosi täpsusi. Lisades (L.8 ja L.9) olevatel joonistel on esitatud tegelikud vvsaldo ja Balti saldo ning nelja libiseva keskmiste mudelite prognoositud saldod testperioodil 01.01.2015 – 31.03.2015. Joonistel 4.7 ja 4.8 on esitatud vvsaldo ja Balti saldo libiseva keskmiste mudelite tulemuste (MAE ja RMSE) võrdlevad graafikud. Vastavad arvulised väärtused on esitatud tabelites 4.6 ja 4.7.

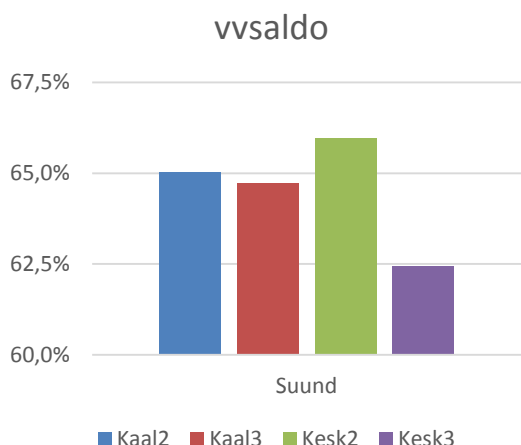


Joonis 4.7. Vvsaldo libiseva keskmise mudelite MAE ja RMSE väärtused

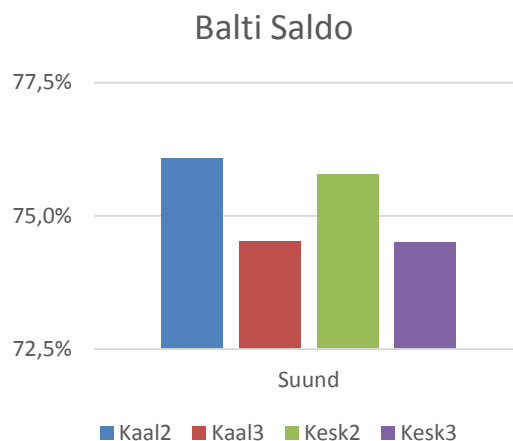


Joonis 4.8. Balti saldo libiseva keskmise mudelite MAE ja RMSE väärtused

Vvsaldo mudelitega prognoosimisel andsid sarnased tulemused Kaal2 ja Kesk2 ning Kaal3 ja Kesk3 mudelid. Madalaim keskmine absoluutviga (26,70) oli Kaal3 mudelil, ning halvim tulemus (27,78) oli Kaal2 mudelil. Ka ruutkeskmist viga hinnates, olid eelnevalt mainitud mudelite paaride tulemused sarnased, parima tulemuse (34,87) andis Kaal3 mudel. Saldo suuna suutsid 66% täpsusega prognoosida Kesk2 mudel, nii Kaal2 kui ka Kaal3 mudelite täpsus oli 65% (Joonis 4.9).



Joonis 4.9. Vvsaldo libiseva keskmise mudelite vvsaldo suuna prognoosi täpsus



Joonis 4.10. Balti saldo libiseva keskmise mudelite vvsaldo suuna prognoosi täpsus

Balti saldo prognoosimisel libiseva keskmiste meetoditega oli madalaim keskmine absoluutviga (39,71) mudelil Kaal2 ning madalaim ruutkeskmine viga (51,41) Kaal3 mudeli korral. Kõige kehvemaid tulemusi tulid MAE (44,69) ja RMSE (60,32) järgi Kesk3 mudeliga. Saldo suuna suutis 76% täpsusega prognoosida nii Kaal2 kui ka Kesk2 mudel (Joonis 4.10).

Nagu näha tabelites 4.6 ja 4.7, siis nii vvsaldo kui ka Balti saldo puhul suudavad libiseva keskmise mudelid prognoosida täpsemini positiivseid saldo suundasid kui negatiivseid. Vvsaldo puhul jäid kõik tulemused vahemikku 74-77%, parim neist oli Kesk2 mudeli korral. Negatiivse saldo prognoosi täpsused jäid vvsaldo puhul kõik alla 46%, parim neist oli Kaal2 täpsusega 45%. Balti saldo puhul positiivse suuna prognoosimisel olid kõik neli libiseva keskmise mudelit väga sarnase täpsusega, prognoosides saldo positiivseks 84-85% tõenäosusega. Negatiivse saldo prognoosimisel jäid tulemused vahemikku 42%-47%, parima neist saavutas Kaal2 mudel ning halvima Kesk3 mudel.

Tabel 4.6. Vvsaldo libiseva keskmise mudelite tulemused perioodil 2015 märts

vvsaldo	Kaal2	Kaal3	Kesk2	Kesk3
MAE	27,78	26,70	27,60	26,76
RMSE	36,65	34,87	36,01	34,94
Suund	65%	65%	66%	62%
Posit.	75%	76%	77%	74%
Negat.	45%	41%	44%	39%

Tabel 4.7. Balti saldo libiseva keskmise mudelite tulemused perioodil 2015.märts

Balti Saldo	Kaal2	Kaal3	Kesk2	Kesk3
MAE	39,71	39,94	40,48	41,33
RMSE	51,50	51,41	52,29	52,76
Suund	76%	75%	76%	75%
Posit.	85%	84%	85%	85%
Negat.	47%	43%	46%	42%

Vvsaldo puhul on valitud parimaks libiseva keskmise mudeliks Kaal3 ning Balti saldo puhul osutus aga madalaima MAE ja täpsema saldo suuna prognoosimiseks mudel Kaal2.

#### 4.5. Hübriidmudel

Hübriidmudel koostatakse eelnevalt valitud parima närvivõrgu mudeli ja parima libiseva keskmise mudeli alusel, kus hübriidmudeli väärtus on aritmeetiline keskmine eelnevate mudelite tulemustest:

$$vvsaldo_{t+2} = \frac{vvsaldo_{t+2_{ANN}} + vvsaldo_{t+2_{libisev}}}{2}, \quad (4.10)$$

kus:  $vvsaldo_{t+2}$  – hübriidmudelil vvsaldo prognoos ajahetkel  $t+2$ ;

$vvsaldo_{t+2_{ANN}}$  – närvivõrkude mudelil vvsaldo prognoos ajahetkel  $t+2$ ;

$vvsaldo_{t+2_{libisev}}$  – libiseva keskmise mudelil vvsaldo prognoos ajahetkel  $t+2$ .

Sarnaselt vvsaldole kujuneb Balti saldo hübriidmudeli korral vastavalt valemile:

$$alti\ saldo_{t+2} = \frac{Balti\ saldo_{t+2_{ANN}} + Balti\ saldo_{t+2_{libisev}}}{2}, \quad (4.11)$$

kus:  $Balti\ saldo_{t+2}$  – hübriidmudelil vvsaldo prognoos ajahetkel  $t+2$ ;

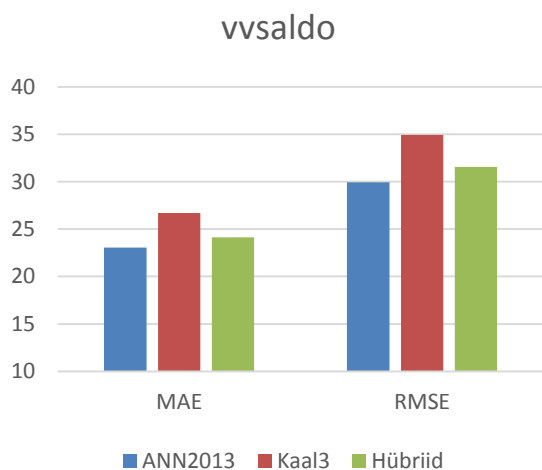
$Balti\ saldo_{t+2_{ANN}}$  – närvivõrkude mudelil vvsaldo prognoos ajahetkel  $t+2$ ;

$Balti\ saldo_{t+2_{libisev}}$  – libiseva keskmise mudelil vvsaldo prognoos ajahetkel  $t+2$ .

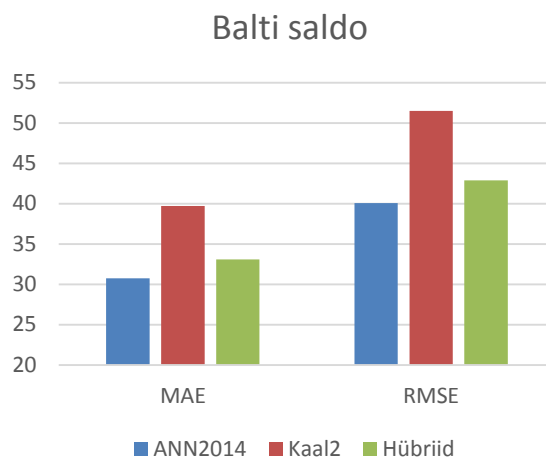
Vvsaldo puhul koosnev hübriidmudel ANN2013 ja Kaal3 mudelist ning Balti saldo korral on hübriidmudelis kasutatavateks ANN2014 ja Kaal2 mudelid. Hübriidmudeli prognoosi tulemused on esitatud peatükis 4.6, kus neid võrreldakse juba eelnevalt valitud parimate närvivõrkude ja libiseva keskmiste mudelitega.

#### 4.6. Parima mudeli valik

Joonistel 4.11 ja 4.12 on esitatud vvsaldo ja Balti saldo parima närvivõrgu, parima libiseva keskmise ja hübriidmudeli tulemuste (MAE ja RMSE) võrdlevad graafikud. Vastavad arvulised väärtused on esitatud tabelites 4.8 ja 4.9.



*Joonis 4.11. Vvsaldo parima närvivõrgu, libiseva keskmise ja hübriidmudeli MAE ja RMSE väärtused*

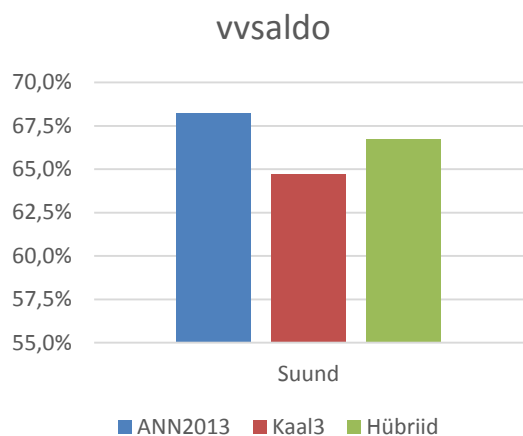


*Joonis 4.12. Balti saldo parima närvivõrgu, libiseva keskmise ja hübriidmudeli MAE ja RMSE väärtused*

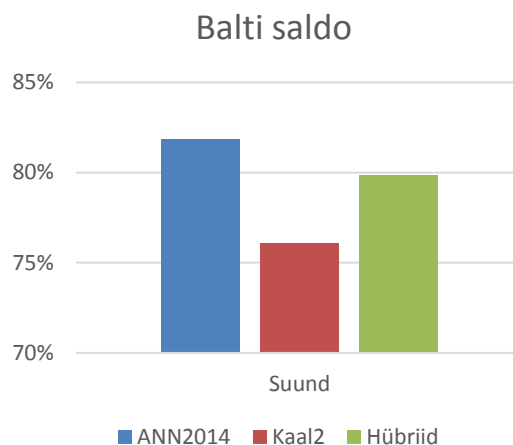
Vvsaldo prognoosimisel andis parimad tulemused närvivõrkude mudel ANN2013, mille korral keskmine absoluutveiga oli 23,06 ja ruutkeskmine viga 29,94. Kõige kehvema tulemuse andis libiseva keskmise mudel Kaal3 keskmise absoluutveaga 26,70 ja ruutkeskmise veaga 34,94. Ka saldo prognoosimisel andis parima tulemuse närvivõrkude mudel, mis suutis saldo suuna prognoosida 68% täpsusega (Joonis 4.13).

Balti saldo prognooside võrdlemisel parima närvivõrgu ANN2014, libiseva keskmise, Kaal2, ja hübriidmudeligas andis sarnaselt vvsaldole parimad tulemused närvivõrkude mudel keskmise absoluutveaga (30,75) ja ruutkeskmise veaga (40,08). Libiseva keskmise mudel, Kaal2, oli antud valikus kõige kehvemat tulemustega, MAE 39,71 ja RMSE 51,50. Saldo suuna suutis 82% täpsusega prognoosida närvivõrkude mudel ANN2014 (Joonis 4.14)

Tabelites 4.8 ja 4.9 on välja toodud lisaks eelnevalt välja toodud MAE, RMSE ja saldo suuna näitajatele ka positiivse ja negatiivse suuna prognoosi täpsused mõistmaks kumba suunda mudelid paremini prognoosida suudavad. Vvsaldo puhul andis parima positiivse suuna täpsuse 83% ANN2013 mudel ning negatiivse suuna täpsuse korral oli parimaks Kaal3 mudel täpsusega 41%. Balti saldo puhul suutsid ANN2014 ja hübriidmudel positiivse saldo suuna 90% tõenäosusega prognoosida, negatiivse saldo korral andis parima tulemuse ANN2014 mudel, täpsusega 56%.



*Joonis 4.13. Vvsaldo parima närvivõrgu, libiseva keskmise ja hübriidmudeli vvsaldo suuna prognoosi täpsus*



*Joonis 4.14. Balti saldo parima närvivõrgu, libiseva keskmise ja hübriidmudeli Balti saldo suuna prognoosi täpsus*

*Tabel 4.8. Vvsaldo parima närvivõrgu, libiseva keskmise ja hübriidmudeli Balti saldo suuna prognoosi täpsus*

VVSALDO	ANN2013	Kaal3	Hübriid
MAE	23,06	26,70	24,13
RMSE	29,94	34,94	31,56
Suund	68%	65%	67%
Posit.	83%	76%	80%
Negat.	38%	41%	39%

*Tabel 4.9. Balti saldo närvivõrgu, libiseva keskmise ja hübriidmudelite tulemuste võrdlus*

Balti Saldo	ANN2014	Kaal2	Hübriid
MAE	30,75	39,71	33,07
RMSE	40,08	51,50	42,88
Suund	82%	76%	80%
Posit.	90%	85%	90%
Negat.	56%	47%	50%

Põhjused, et närvivõrkude ja libiseva keskmiste mudelite tulemuste erinevused varieerusid üsna suures ulatuses, siis ei andnud hübriidmudel parimat tulemust vaid jäi kõikides võrreldud näitajates närvivõrkude ja libiseva keskmise tulemuste vahele.

Vastavalt eelpool mainitud tulemustele osutusid parimateks vvsaldo ja Balti saldo prognoosideks närvivõrkudel koostatud mudelid. Bilansienergia hinna modelleerimisel kasutatakse vvsaldo prognoosimiseks ANN2013 mudelit ning Balti saldo korral ANN2014 mudelit.



## 5. Bilansienergia hinna modelleerimine

Bilansienergia hinda mõjutavaid tegureid uurides selgus, et kõige enam mõjutavad hinna kujunemist Eesti vahelduvvoolu saldo ning Baltikumi elektrisüsteemide summaarne saldo. Saldo suurus (vahe tegeliku ja planeeritud vahel) ei määranud nii suur rolli kui suund – positiivne või negatiivne. Lisaks mõjutavad hinna kujunemist ka tunnid, kus on väga tugev või väga nõrk tuul. Vvsaldo ja Balti saldo andmed, mis sõltuvad nii planeeritud kui tegelikest andmetest, pole ette teada ning neid tuleb prognoosida. Seetõttu on jaotatud bilansienergia hinna prognoosimine kahte ossa:

1. Vvsaldo ja Balti saldo prognoosimine - valitakse parim prognoosimudel närvivõrkude ja libiseva keskmise meetodite vahel. Parima mudeli tulemusi rakendatakse bilansienergia hinna prognoosimiseks närvivõrkudel;
2. Bilansienergia hinna prognoosimine ning hinnahäire rakendamine.

Peatükis 4 leiti sobivaimad prognoosimudelid vvsaldo ja Balti saldo prognoosimiseks, mida omakorda kasutatakse bilansienergia hindade prognoosimudelites. Järgnevates alapunktides keskendutakse bilansienergia hinna prognoosimisele. Siinjuures kasutatakse eelnevates töö osades välja käidud seisukohti ning teooriaid.

Antud magistritöö eesmärgiks ei ole bilansienergia hinna suuruse väga täpne prognoosimine, vaid ennustada bilansienergia hinna suund ning selle läbi prognoosida ekstreemseid olukordi, kus bilansienergia hind on väga kõrge või väga madal. Mudel loetakse õnnestunuks, ehk toimivaks kui ta suudab prognoosida 70% bilansienergia hinna suundadest, võrreldes NPS hinnaga, õigesti. Sealjuures andnud ekstreemse hinna signalidest 70% on õiged signaalid.

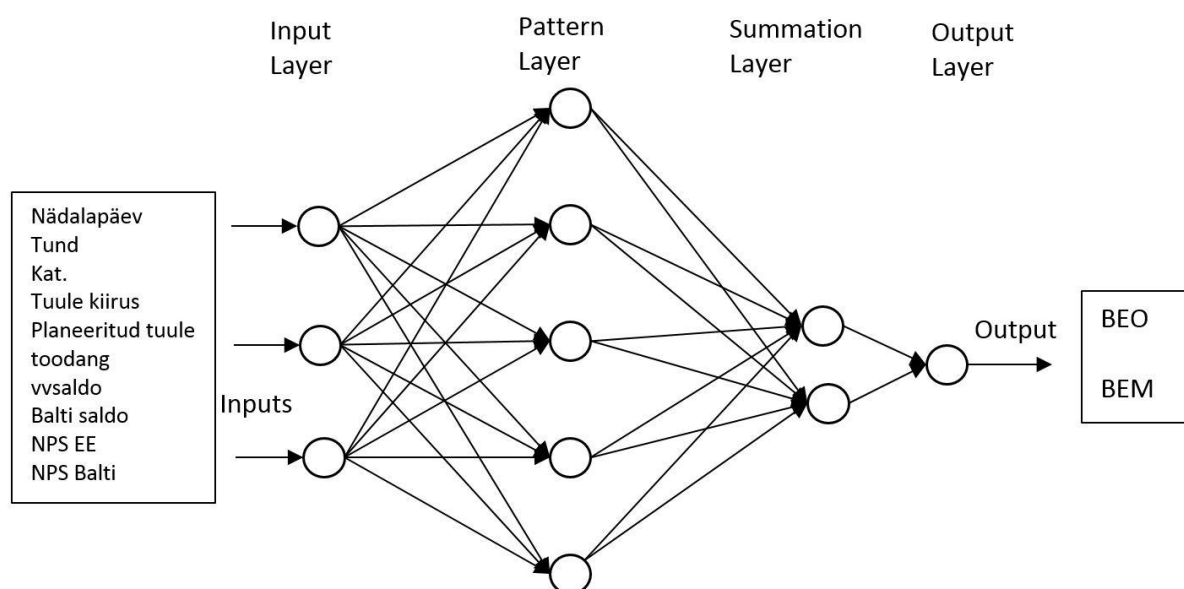
### 5.1. Närvivõrgu sisendid

Joonis 5.1 on graafiline kujutis bilansienergia hindade prognoosimiseks kasutatava GRNN mudeli arhitektuurist koos kasutatavate sisendite ja väljunditega. Sisendite valikul on lähtutud arusaamast, et bilansienergia hind erinev tööpäevade ning nädalapäevade lõikes, samuti on kasutatud peatükis 3 bilansienergia hinda mõjutavate tegurite analüüsi tulemustest.

Bilansienergia hindade prognoosimiseks kasutatakse järgmisi sisendeid.:

- Nädalapäev (1 – esmaspäev; 2 – teisipäev; 3 – kolmapäev; 4 – neljapäev; 5 – reede; 6 – laupäev; 7 – pühapäev);
- Tund (0-23, kus tunni number tähistab tunni algust);
- Kategooria (kat.), lähtuvalt tuule kiirusest ja toodangust;

- N- nõrk (planeeritud tuule toodang on väiksem kui 30 MWh või tuule kiirus on väiksem kui 4m/s);
- K- keskmine (planeeritud tuule toodang on vahemikus 30-210 MWh või tuule kiirus on vahemikus 4-15 m/s);
- T- Tugev (planeeritud tuule toodang on suurem kui 210 MWh või tuule kiirus suurem kui 15 m/s);
- Tuule kiirus (DHMUR);
- Planeeritud tuule toodang;
- Vvsaldo prognoos ANN2013 mudeli põhjal;
- Balti saldo prognoos ANN2014 mudeli põhjal;
- NPS EE ja Baltikumi keskmine NPS hind;



Joonis 5.1. GRNN närvivõrgu arhitektuur bilansienergia hindade prognoosimisel

Närvivõrgu väljunditeks on prognoositavad bilansienergia ostu- ja müügihind.

## 5.2. Närvivõrgu treenimine ja prognoosimine

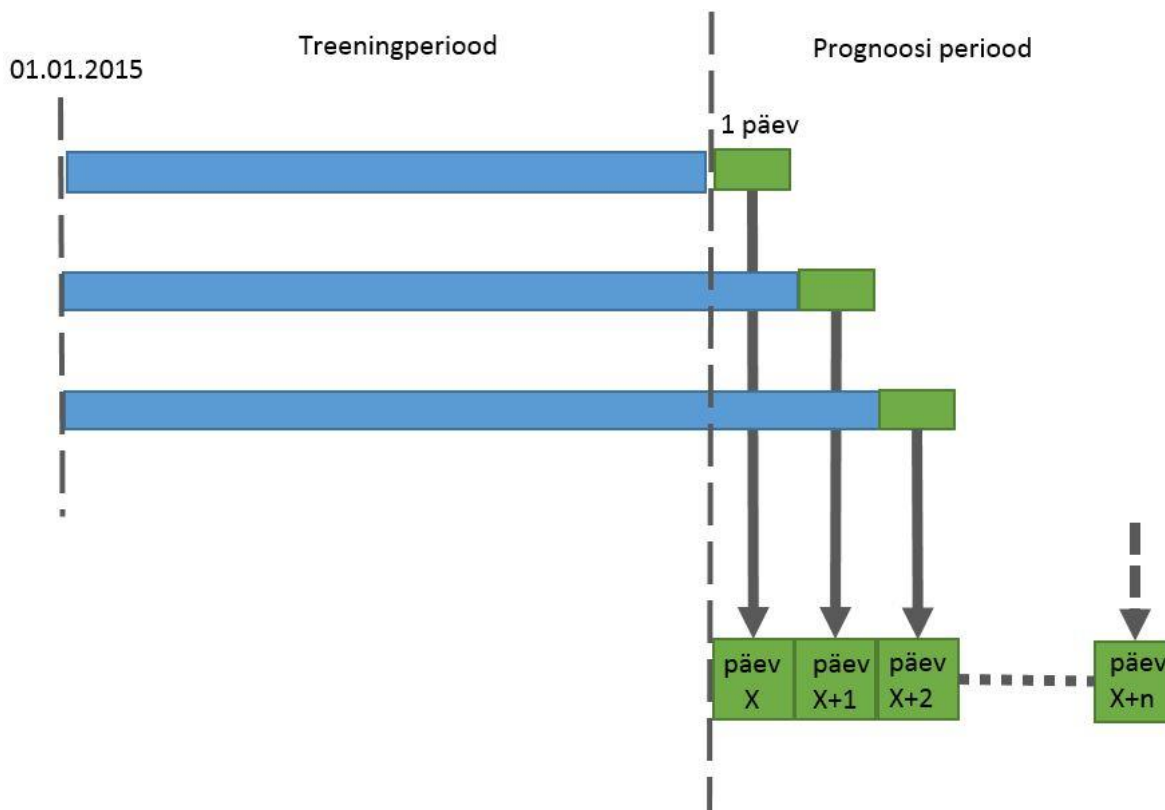
Bilansienergia hindade prognoosimudelite treenimiseks kasutatakse andmeid alates 1. jaanuarist 2015. Alates sellest kuupäevast omavad Baltikumi süsteemihaldurid ühist avatud tarne lepingut ning senine bilansienergia hindade kujunemine, võrreldes varasemaga, on muutunud (vt peatükis 2). Prognooside tegemisel vaadeldakse ühte päeva korraga ning iga tund tehakse prognoos ülejäägmiseks tunniks.

Prognooside tegemisel lähtutakse kahest aspektist:

- Hinna prognoosimisest, milleks kasutati treenitud närvivõrku;

- Kõrge ja madala hinnahäire andmisest, milleks kasutati otsustuspuu loogikat.

Bilansienergia hindade prognoosimisel on lähtunud põhimõttest, et mida rohkem andmeid närvivõrgul treenimiseks on, seda paremaid seoseid, ning seeläbi ka prognoose, suudab võrk luua. Seetõttu treenitakse närvivõrk uute bilansienergia hindade laekumisel iga kord uuesti. Antud lähenemist kirjeldab joonis 5.2.



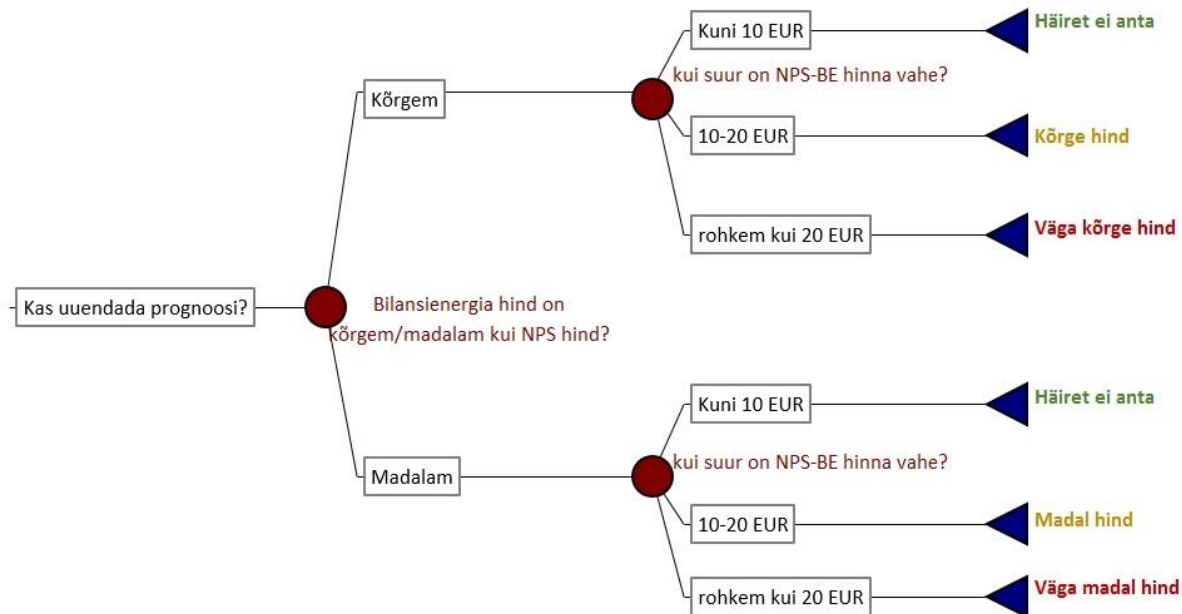
Joonis 5.2. Bilansienergia hindade prognoosimudelite treeningalgoritm

Uute bilansienergia hindade avaldamisel treenitakse võrk uuesti, et järgmise päeva hindade prognoosimisel võetaks arvesse ka viimati avaldatud hindasid. Kokku teostati nii bilansienergia ostu- kui ka müügihindade prognoosimiseks 20 närvivõrgu treenimist (kokku 40).

Süsteemihaldur avaldab bilansienergia ostu- ning müügihindad oma veebilehel kauplemisperioodide lõikes samale kauplemisperioodile järgneval ülejärgmisel tööpäeval kella 16.30-ks [25]. Seetõttu teostati uus treenimine iga päeva hommikul ning kasutati antud päeva hindade prognoosimiseks uut, ühe päeva võrra suuremat andmebaasi. Lisas (L.8) on välja toodud aprilli kalender, kuhu on märgitud vastava kuupäeva juurde, mis päeva bilansienergia hinnad antud päeval saabusid, ning kuni mis päeva andmetega antud päeva prognoosimiseks närvivõrk treenitud oli.

Kasutades närvivõrku, prognoositakse bilansienergia hinnad ning sõltuvalt antud tunni NPS ja prognoositud hinnast kasutatakse joonisel 5.3 olevat loogikat hinnahäire andmisel. Hinnahäire

antakse, kui NPS ja bilansienergia hinna erinevus on rohkem kui 10 EUR/MWh („madal hind“ või „kõrge hind“). Juhul, kui prognoositav hind erineb NPS hinnast rohkem kui 20 EUR/MWh, antakse hinnahäire („väga madal hind“ või „väga kõrge hind“) ekstreemsete bilansienergia hindade kohta.

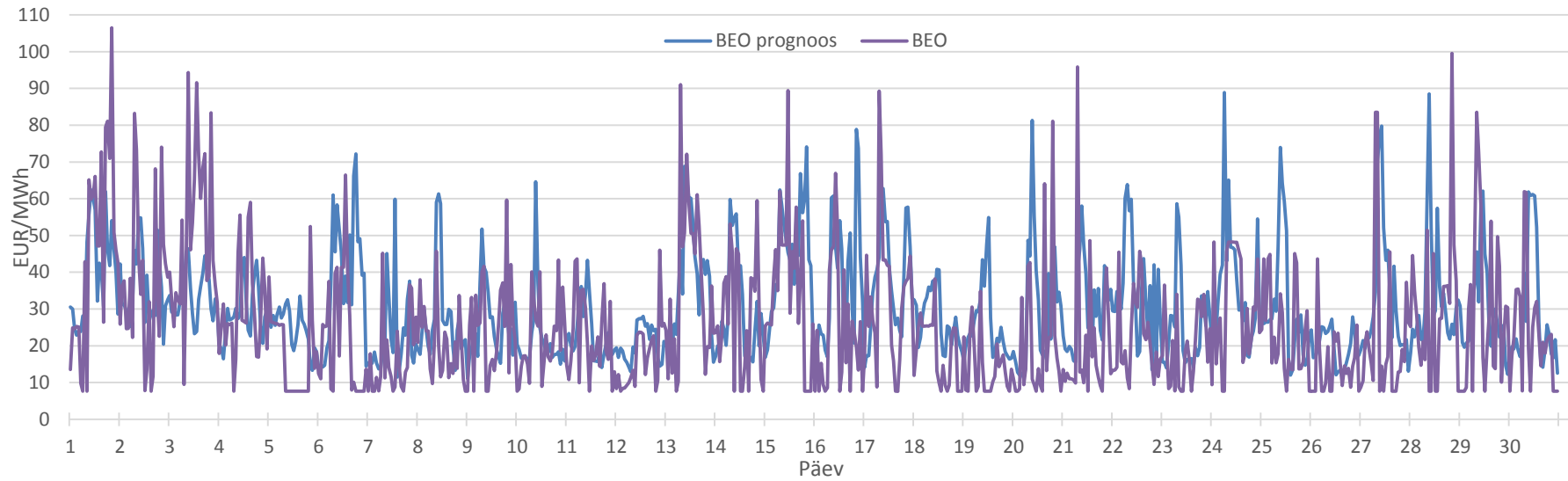


Joonis 5.3. Hinnahäire andmise aluseks olev loogika

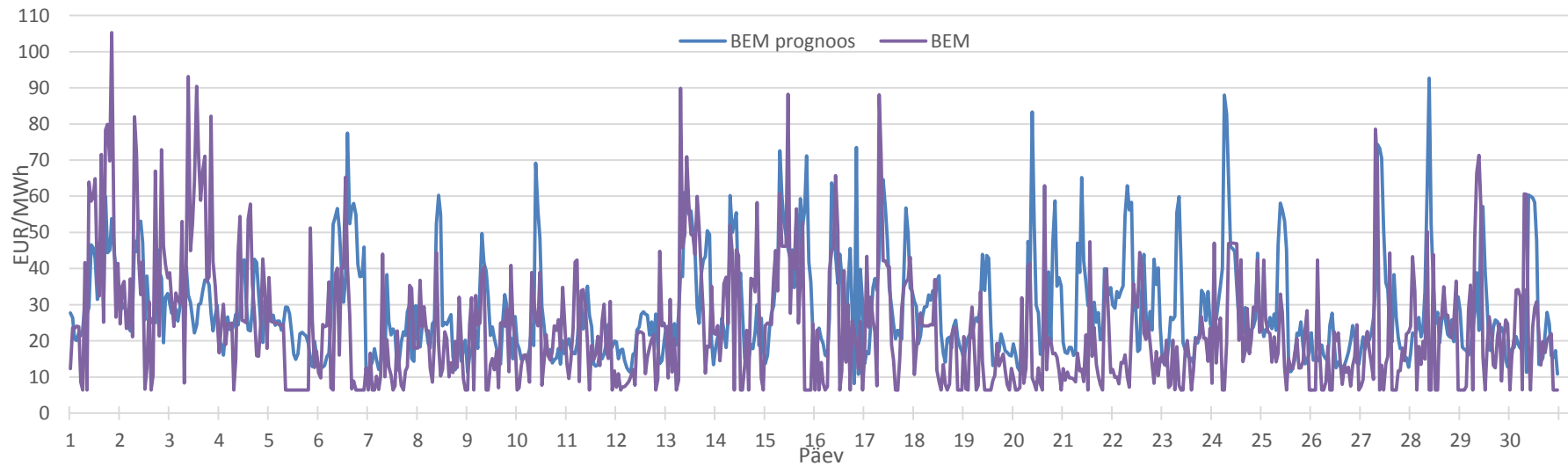
Kõrgete hindade korral tuleb eelkõige kontrollida portfellis olevate klientide tarbimist, et vältida olukorda, kus elekter ostetakse kalli bilansienergia hinnaga, aga klient maksab NPS hinda. Madalate bilansienergia hinnahäire korral tuleb eelkõige kontrollida portfellis olevate tootjate prognoosi, vältimaks olukorda, kus kliendile makstakse NPS hinda toodetud MWh eest, kuid eabilansi tõttu müüakse antud kogus süsteemioperaatorile madala bilansienergia hinnaga.

### 5.3. Bilansienergia hinna prognoosi tulemused

Joonisel 5.4 on kujutatud närvivõrgu poolt genereeritud bilansienergia ostuhinnad ning joonisel 5.5 bilansienergia müügihinnad võrrelduna tegelike hindadega. Kuigi joonistelt on näha, et närvivõrk ei suuda täielikult tabada bilansienergia hindasid, siis liigub prognoos siiski enam-vähem samas suunas tegelike väärtustega.

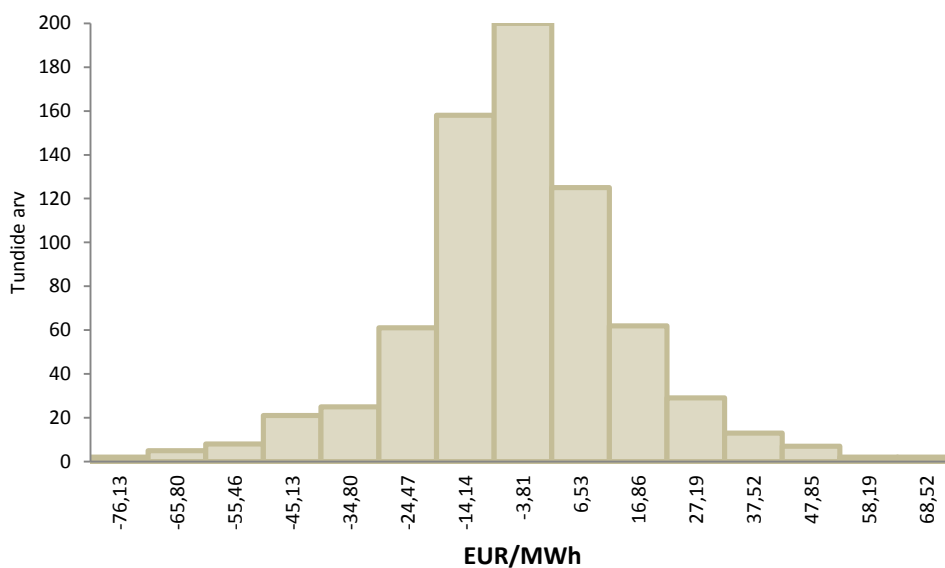


*Joonis 5.4. Prognoositud ja tegelikult kujunenud bilansienergia ostuhinnad aprillis 2015*

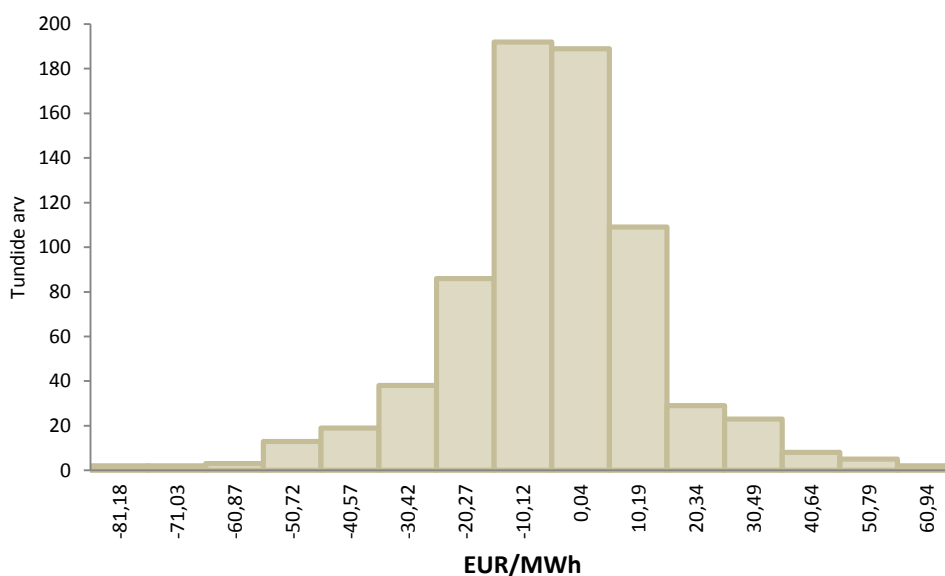


*Joonis 5.5. Prognoositud ja tegelikult kujunenud bilansienergia müüghinnad aprillis 2015*

Joonisel 5.6 on kujutatud tegelike bilansienergia ostuhindade ning joonisel 5.7 bilansienergia müügihindade vigade histogramm võrrelduna prognoositud hindadega



*Joonis 5.6. Bilansienergia ostuhindade prognoosivigade histogramm*



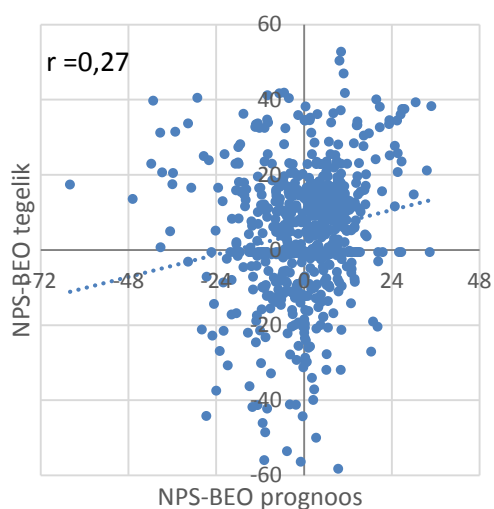
*Joonis 5.7. Bilansienergia müügihindade prognoosivigade histogramm*

Histogrammidelt on näha, et vead jaotuvad normaaljaotuse järgi, seetõttu pole ka põhjust järeldada, et treenitud närvivõrgu tulemused võiksid kuskil suunas kallutatud olla. Karakteristikutelt on näha, et vead erinevad mõlemal puhul väga suurtes vahemikes. BEO puhul vahemikus -76,13 kuni 68,52 ning BEM hindade korral vahemikus -81,18 kuni 60,94 EUR/MWh. Tabelis 5.1 on välja toodud närvivõrgu poolt prognoositud väärtuste keskmine absoluutviga, ruutkeskmine viga ning täpsus bilansienergia hinna suuna prognoosimisel.

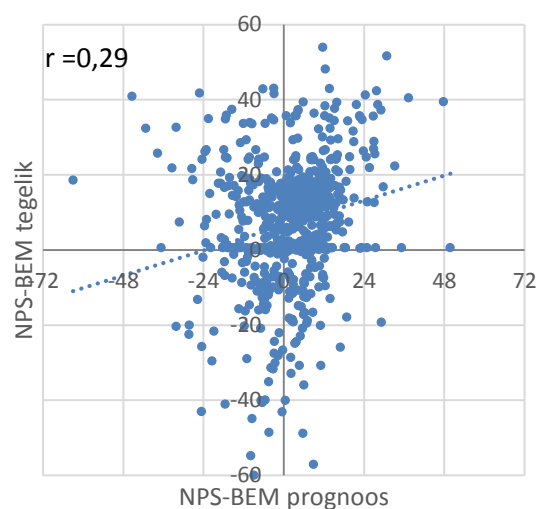
Tabel 5.1. BEO ja BEM prognooside tulemused

	BEO	BEM
<b>MAE</b>	14,74	14,00
<b>RMSE</b>	3,84	3,74
	<b>NPS-BEO</b>	<b>NPS-BEM</b>
<b>Suund</b>	60,1%	63,2%
<b>Posit. (BE hind madalam)</b>	66,2%	84,4%
<b>Negat. (BE hind kõrgem)</b>	52,6%	30,4%

Bilansienergia ostuhinna suunda, võrreldes NPS hinnaga, suutis närvivõrk prognoosida 60,1% täpsusega, müügihinna suunda aga 63,2% täpsusega. Joonistelt 5.8 ja 5.9 on näha, et kõige paremini suutis närvivõrk prognoosida olukordi, kus NPS hind on kõrgem kui bilansienergia hind (posit.). Bilansienergia ostuhinna puhul suutis võrk 66,2% ning BEM puhul 84,4% tõenäosusega NPS hinnast madalamad bilansienergia hinnad õigesti prognoosida. Tunde, kus NPS-BEO oli negatiivne, ehk NPS hind oli madal bilansienergia hinnast, suutis võrk ligi pooltel, 53% juhtudest õigesti prognoosida, NPS-BEM puhul aga vaid 30% juhtudest.



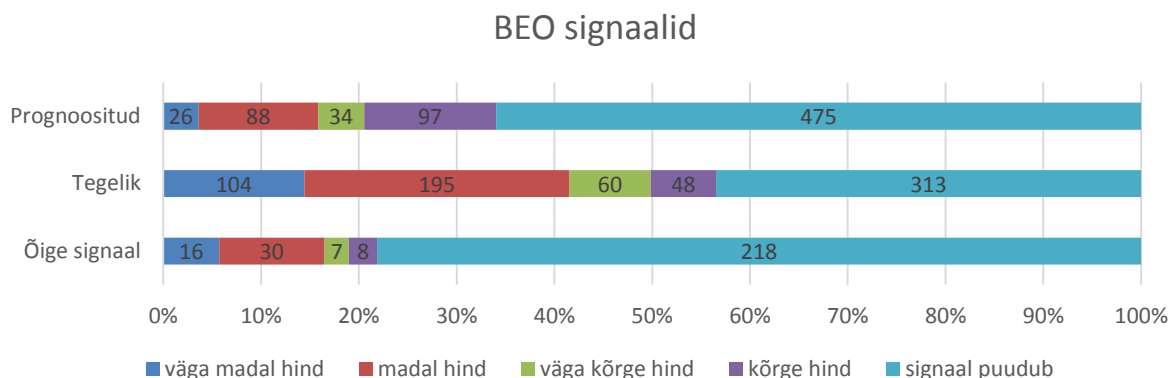
Joonis 5.8. BEO hinna prognoosi suund  
võrreldes tegeliku BEO suunaga



Joonis 5.9. BEM hinna prognoosi suund  
võrreldes tegeliku BEO suunaga

Korrelatsioon prognoositud ja tegelike bilansienergia hindade vahel kujunes 0,27 ning müügihindade vahel 0,29, mis näitab muutujate vaheliste seoste puudumist. Ka keskmised absoluutvead (14,74 ja 14,00) näitavad suurt eksimust hindade prognoosimisel.

Järgnevalt vaatleme mudeli edastatud hinnahäireid võrdleme neid tegelikult kujunenud häiretega. Joonistel 5.10 ja 5.11 on näha, et nii bilansienergia ostu- kui ka müügihinna korral, on prognoositud ja tegelike hinnahäirete osakaalud sarnased.



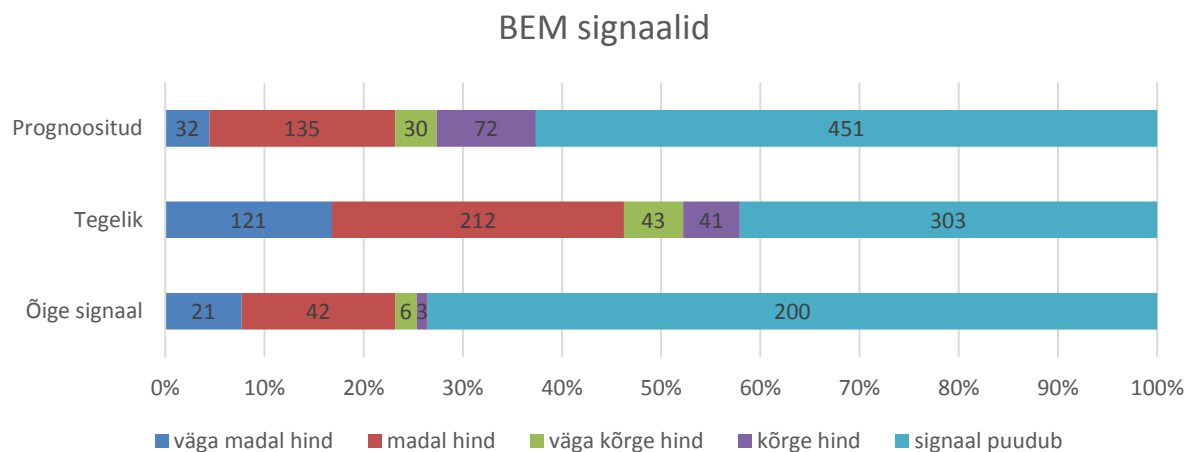
*Joonis 5.10. Prognositud bilansienergia ostuhindade signaalide osakaal võrdluses tegelikult kujunenud signaalide osakaaluga*

Bilansienergia ostuhinna (Tabel 5.2) korral andis mudel 16 korral „väga madal hind“ signaali, neist 16-nel korral oli signaal õige. Mudel suutis anda vaid 15% tegelikult kujunenud signaalidest õigesti, prognositud häiretest 62% osutusid korrektseteks. Signaali „madal hind“ andis mudel 88 korral ning neist 30 olid õiged. Mudel suutis anda 15% madala hinna signaalidest õigesti, prognositud signaalidest 34% olid õiged. 34 korral andis mudel „väga kõrge hind“ signaali, neist 7-el korral oli signaal õige. Mudel suutis anda vaid 12% tegelikult kujunenud signaalidest ning 21% prognositud signaalidest õigesti. Signaali „kõrge hind“ andis mudel 97 korral ning neist vaid 8 olid õiged. Mudel suutis anda õigesti 17% kõrge hinna signaalidest, prognositud signaalidest 8% olid õiged.

*Tabel 5.2. Bilansienergia ostuhinna prognoositud, tegelike ning õigete signaalide arvud ja osakaalud*

BEO	Prognositud signaal	Tegelik signaal	Õige signaal	prognoosist	tegelikest
<b>väga madal hind</b>	26	104	16	62%	15%
<b>madal hind</b>	88	195	30	34%	15%
<b>väga kõrge hind</b>	34	60	7	21%	12%
<b>kõrge hind</b>	97	48	8	8%	17%
<b>signaal puudub</b>	475	313	218	46%	70%





*Joonis 5.11. Prognositud bilansienergia müügihindade signaalide osakaal võrdluses tegelikult kujunenud signaalide osakaaluga*

Bilansienergia müügihinna (Tabel 5.3) korral andis mudel 32 korral „väga madal hind“ signaali, neist 21-nel korral oli signaal õige. Mudel suutis anda 17% tegelikult kujunenud signaalidest õigesti, prognoositud häiretest 66% osutusid korrektseteks. Signaali „madal hind“ andis mudel 135 korral ning neist 42 olid õiged. Mudel suutis anda 20% kujunenud madala hinna signaalidest õigesti, prognoositud signaalidest 31% olid õiged. 30 korral andis mudel „väga kõrge hind“ signaali, neist 6-el korral oli signaal õige. Mudel suutis anda 14% tegelikult kujunenud signaalidest ning 20% prognoositud signaalidest õigesti. Signaali „kõrge hind“ andis mudel 72 korral ning neist vaid 3 olid õiged. Mudel suutis anda õigesti vaid 7% kujunenud kõrge hinna signaalidest, prognoositud signaalidest 4% olid korrektsed.

*Tabel 5.3. Bilansienergia müügihinna prognoositud, tegelike ning õigete signaalide arvud ja osakaalud*

BEM	Prognositud signaal	Tegelik signaal	Õige signaal	prognoosist	tegelikest
<b>väga madal hind</b>	32	121	21	66%	17%
<b>madal hind</b>	135	212	42	31%	20%
<b>väga kõrge hind</b>	30	43	6	20%	14%
<b>kõrge hind</b>	72	41	3	4%	7%
<b>signaal puudub</b>	451	303	200	44%	66%

Mudel suutis anda BEO hindade korral vaid 39% ning BEM hindade korral vaid 38% juhtudest õige signaali (seal hulgas korrad, kui signaali ei antud). Üle 60% juhtudest andis mudel vale signaali (Tabel 5.4)

Tabel 5.4. Bilansienergia ostu- ja müügihindade õigete ja valede signaalide osakaalud

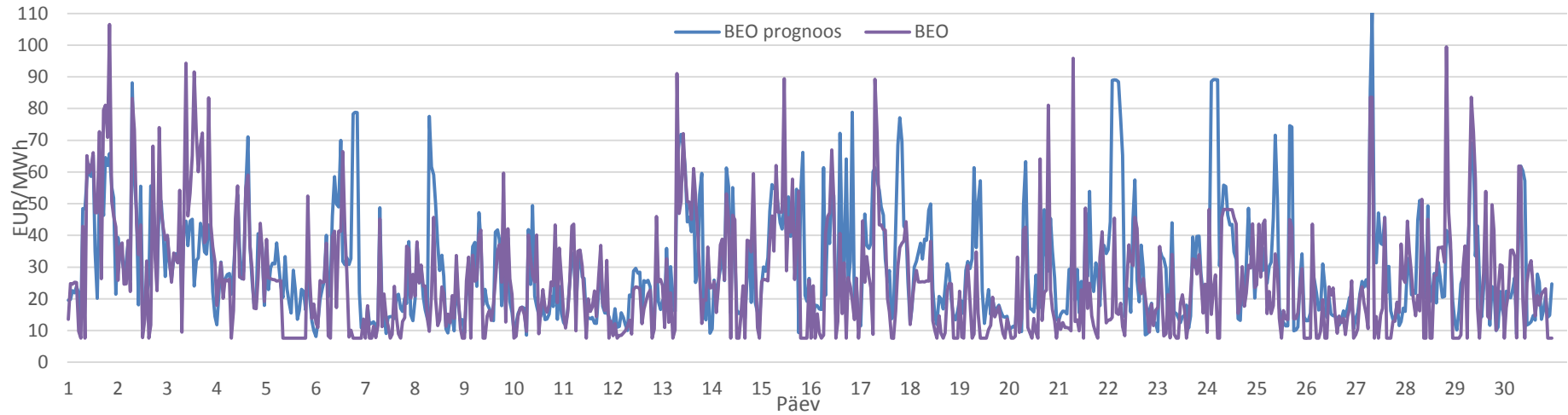
Signaal	BEO		BEM	
	<i>kordi</i>	<i>Osakaal</i>	<i>kordi</i>	<i>Osakaal</i>
Õige signaal	279	39%	272	38%
Vale signaal	441	61%	448	62%

Koostatud prognoosimudeli keskmine absoluutviga ületas 14 EUR/MWh, mis näitab väga suurt viga hindade täpsuse prognoosimisel. 60% bilansienergia ostuhinna suundadest ning 63% bilansienergia müügihinna suundadest suutis mudel õigesti tabada. Ka „väga madal hind“ hinnahäire andmisel ei saavutanud mudel püstitatud eesmärki saavutada 70% täpsus. Bilansienergia ostuhinna korral suutis mudel anda 62% ning müügihindade korral 66% „väga madal hind“ signaalidest õigesti. Ülejäänud signaalide täpsus oli alla 34%. Kõikidest antud signaalidest vaid 39% olid õiged. Koostatud mudel ei osutunud antud tingimuste korral õnnestunuks.

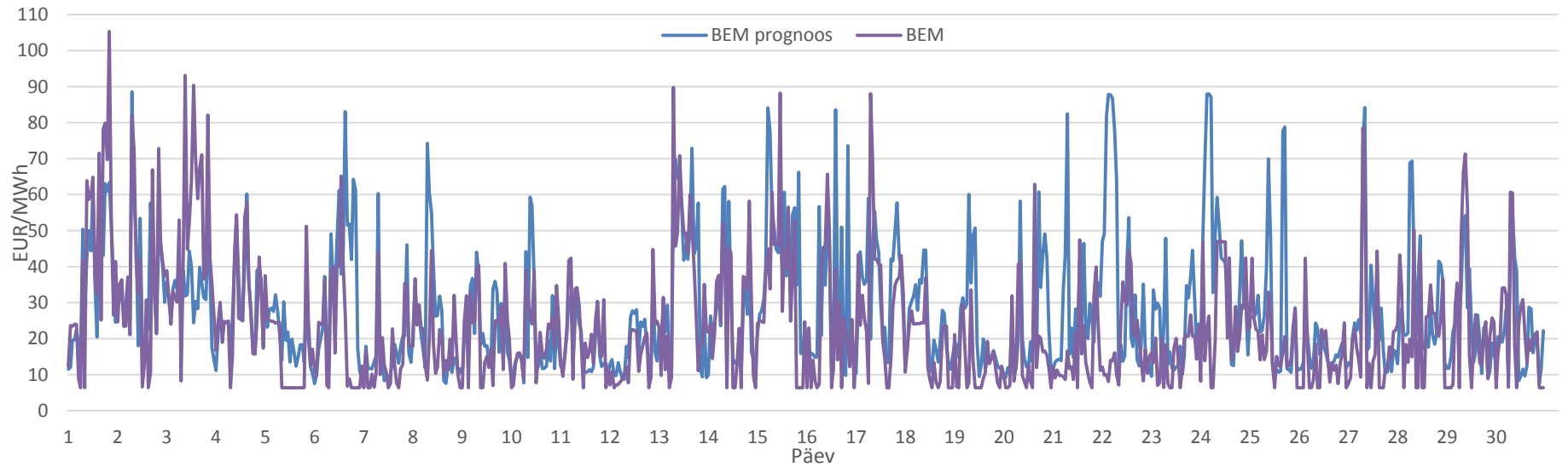
Mõistmaks, kas bilansienergia hinna suuna suur prognoosiviga tuleneb võrgust endast või hoopis vvsaldo ja Balti saldo prognooside ebatäpsusest, vaatleme järgmises punktis, millised oleksid olnud prognoosi tulemused, kui vvsaldo ja Balti saldo prognooside asemel oleks kasutatud nende reaalselt kujunenud andmeid.

#### **5.4. Bilansienergia hinna prognoosi tulemused tegelike vvsaldo ja Balti saldo väärtustega**

Joonisel 5.12 on kujutatud närvivõrgu poolt genereeritud bilansienergia ostuhinnad ning joonisel 5.13 bilansienergia müügihinnad võrrelduna tegelike hindadega. Sarnaselt eelmise peatüki tulemustele, ei ole suutnud närvivõrk tabada madalaimaid bilansienergia hindasid ning pigem prognoosib neid üle.

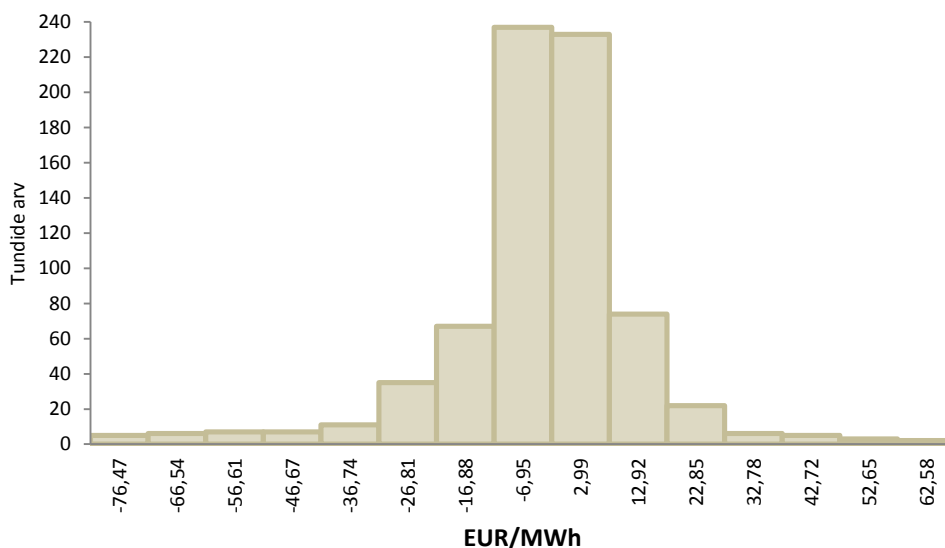


Joonis 5.12. Prognostitud ja tegelikult kujunenud bilansienergia ostuhinnad aprillis 2015 tegelike vsaldo ja balti saldo väärtuste korral

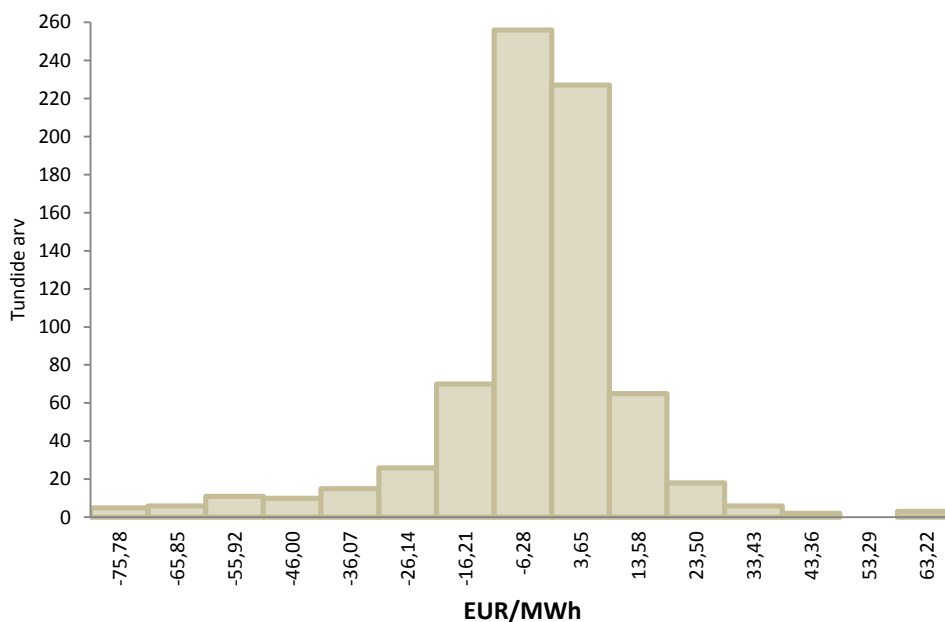


Joonis 5.13. Prognostitud ja tegelikult kujunenud bilansienergia ostuhinnad aprillis 2015 tegelike vsaldo ja balti saldo väärtuste korral

Joonisel 5.14 kujutatud tegelike bilansienergia ostuhindade ning joonisel 5.15 bilansienergia müügihindade vigade histogramm võrrelduna prognoositud hindadega. Sarnaselt eelmise peatüki tulemustega, on vead jaotunud normaaljaotuse järgi. Vigade vahemik pole oluliselt muutunud, küll aga vigade jaotus on koondunud rohkem keskele, ehk väiksemaid vigu on rohkem ning suuremaid vigu esineb harvematel juhtudel kui prognoositud vvsaldo ja Balti saldo korral.



Joonis 5.14. Bilansienergia ostuhindade prognoosivigade histogramm



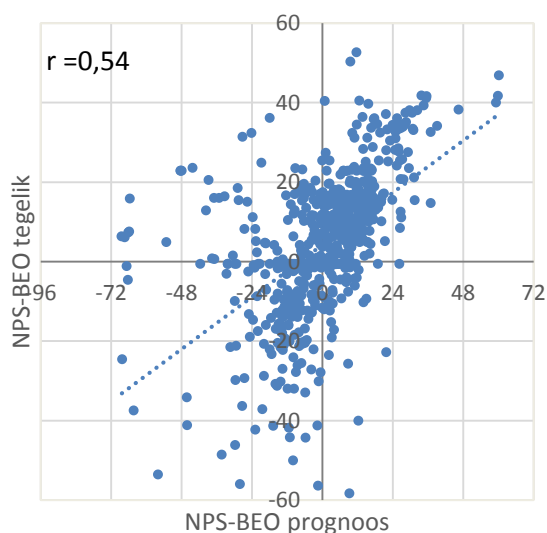
Joonis 5.15. Bilansienergia müügihindade prognoosivigade histogramm

Tabelis 5.5 on välja toodud närvivõrgu poolt prognoositud väärtuste keskmine absoluutviga, ruutkeskmine viga ning täpsus bilansienergia hinna suuna prognoosimisel.

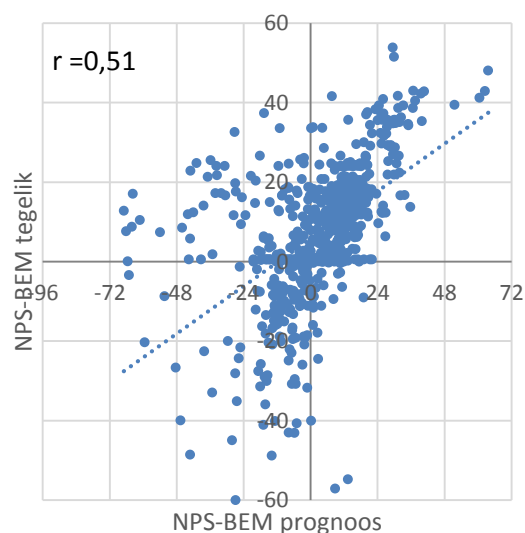
Tabel 5.5. BEO ja BEM prognooside tulemused tegelike vs saldo ja Balti saldo väärtuste korral

	BEO	BEM
<b>MAE</b>	11,22	11,09
<b>RMSE</b>	3,35	3,33
	<b>NPS-BEO</b>	<b>NPS-BEM</b>
<b>Suund</b>	77,1%	75,3%
<b>Posit. (BE hind madalam)</b>	80,1%	94,3%
<b>Negat. (BE hind kõrgem)</b>	72,9%	45,7%

Võrreldes eelmise peatüki tulemustega, on paranenud kõige enam bilansienergia hinna suuna prognoosi täpsus. Bilansienergia ostuhinna suunda, võrreldes NPS hinnaga, suutis närvivõrk prognoosida 77,1% täpsusega, müügihinna suunda aga 75,3% täpsusega. Joonistel 5.16 ja 5.17 on näha, et kõige paremini suutis närvivõrk prognoosida olukordi, kus NPS hind on kõrgem kui bilansienergia hind (posit.). Bilansienergia ostuhinna puhul suutis võrk 80,1% ning BEM puhul 94,3% tõenäosusega NPS hinnast madalamad bilansienergia hinnad õigesti prognoosida. Tunde, kus NPS-BEO oli negatiivne, ehk NPS hind oli madal bilansienergia hinnast, suutis võrk ligi 72,9% juhtudest õigesti prognoosida, NPS-BEM puhul aga vaid 45,7% juhtudest. Kõige rohkem eksis mudel prognoosides madalaid bilansienergia hindu kõrgetena.



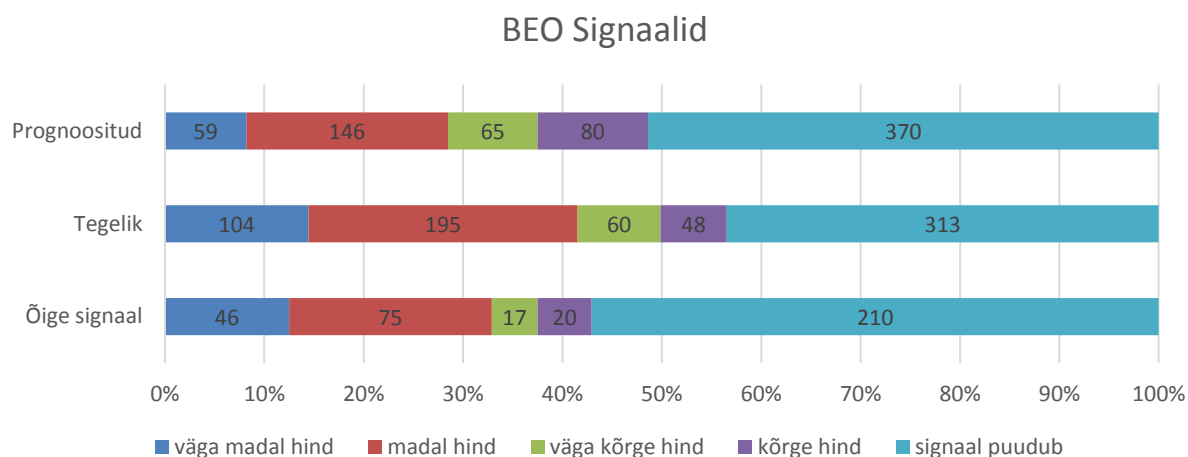
Joonis 5.16. BEO hinna prognoosi suund võrreldes tegeliku BEO suunaga



Joonis 5.17. BEM hinna prognoosi suund võrreldes tegeliku BEM suunaga

Korrelatsioon prognoositud ja tegelike bilansienergia hindade vahel kujunes 0,54 ning müügihindade vahel 0,51, mis näitab muutujate vaheliste nõrka seost. Keskmised absoluutvead (11,22 ja 11,90) näitavad üpriski suurt eksimust hindade prognoosimisel.

Järgnevalt vaatleme mudeli edastatud hinnahäireid ning võrdleme neid tegelikult kujunenud häiretega. Joonistel 5.18 ja 5.19 on esitatud prognoositud, tegelikud ning õigesti prognoositud signaalide osakaalud (ja arvud). Bilansienergia ostuhinna signaalide korral andis kõige parema tulemuse „väga madal hind“ signaali prognoos. Häire anti 59 korral, neist 46 (78%) olid õiged signaalid, kokku oleks pidanud „väga madal hind“ signaali olema 104 korral, seega suutis mudel tabada 44% signaalidest edastada korrektselt. Ülejäänud signaalide edastamise arvud ja vastavad osakaalud on esitatud tabelis 5.6.



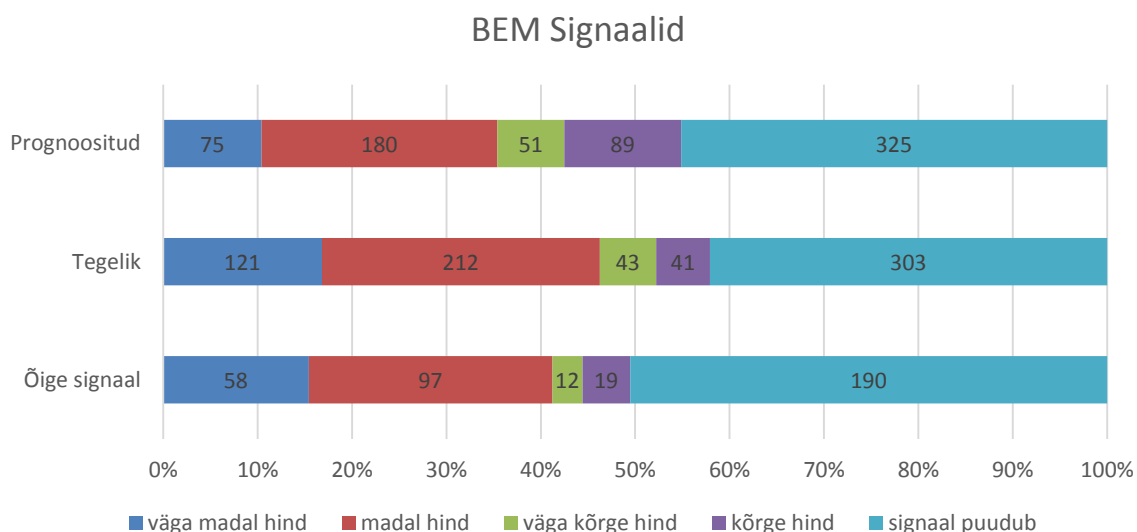
*Joonis 5.18. Vvsaldo ja Balti saldo väärtustega prognoositud bilansienergia ostuhindade signaalide osakaal võrdluses tegelikult kujunenud signaalide osakaaluga*

Vastavalt tabelile 5.6, on näha, et „madal hind“ ja „väga madal hind“ signaale prognoosib mudel vähem, kui neid tegelikult on, ning „kõrge hind“ ja „väga kõrge hind“ signaalide arvu prognoosib mudel tegelikest rohkem. Ka joonistelt on näha, et mudel ei suuda tabada bilansienergia madalamaid hindasid, vaid prognoosib pigem üle.

*Tabel 5.6. Bilansienergia ostuhinna prognoositud, tegelike ning õigete signaalide arvud ja osakaalud*

BEO	Prognoositud signaal	Tegelik signaal	Õige signaal	prognoosist	tegelikest
<b>väga madal hind</b>	59	104	46	78%	44%
<b>madal hind</b>	146	195	75	51%	38%
<b>väga kõrge hind</b>	65	60	17	26%	28%
<b>kõrge hind</b>	80	48	20	25%	42%
<b>signaal puudub</b>	370	313	210	57%	67%

Bilansienergia müügihinna signaalide korral andis kõige parema tulemuse taaskord „väga madal hind“ signaali prognoos. Häire anti 75 korral, neist 58 (77%) olid õiged signaalid, kokku oleks pidanud „väga madal hind“ signaali olema 121 korral, seega suutis mudel tabada 48% signaalidest edastada korrektselt. Ülejäänud signaalide edastamise arvud ja vastavad osakaalud on esitatud Tabel 5.7.



Joonis 5.19. Vvsaldo ja Balti saldo väärtustega prognoositud bilansienergiämüügihindade signaalide osakaal võrdluses tegelikult kujunenud signaalide osakaaluga

Tabel 5.7. Bilansienergia müügihinna prognoositud, tegelike ning õigete signaalide arvud ja osakaalud

BEM	Prognoositud signaal	Tegelik signaal	Õige signaal	prognoosist	tegelikest
<b>väga madal hind</b>	75	121	58	77%	48%
<b>madal hind</b>	180	212	97	54%	46%
<b>väga kõrge hind</b>	51	43	12	24%	28%
<b>kõrge hind</b>	89	41	19	21%	46%
<b>signaal puudub</b>	325	303	190	58%	63%

Mudel suutis anda BEO hindade korral 51% ning BEM hindade korral 52% juhtudest õige signaali (seal hulgas korrad, kui signaali ei antud). Üle 60% juhtudest andis mudel vale signaali (Tabel 5.4)

Tabel 5.8. Bilansienergia ostu- ja müügihindade õigete ja valede signaalide osakaalud

Signaal	BEO		BEM	
	kordi	Osakaal	kordi	Osakaal
Õige signaal	368	51%	376	52%
Vale signaal	352	49%	344	48%

Koostatud prognoosimudeli keskmine absoluut viga jäi vahemikku 11 EUR/MWh piiridesse. Tulemus on küll parem kui eelmise mudeli korra, kuid näitab endiselt väga suurt viga hindade täpsuse prognoosimisel. 77% bilansienergia ostuhinna suundadest ning 75% bilansienergia müügihinna suundadest suutis mudel õigesti tabada. Ka „väga madal hind“ hinnahäire andmisel suutis mudel saavutada püstitatud eesmärgi, 70% täpsuse. Bilansienergia ostuhinna korral suutis mudel anda 77% ning müügihindade korral 78% „väga madal hind“ signaalidest õigesti. Ülejäänud signaalide täpsus jäi vahemikku 21-54%. Kõige ebatäpsem oli mudel „väga kõrge hind“ ja „kõrge hind“ signaalide andmisel. Kõikidest antud signaalidest enam kui pooled (51-52%) olid õiged.

Kuna tegelikult kujunenud vvsaldo ja Balti saldo andmetega tehtud bilansienergia hinna prognoosid põhinevad täpselt samadel alustel, mis esialgsel juhulgi, siis saab järeldada, et eelmises peatükis esitatud ebaõnnestunud tulemused tulenevad vvsaldo ja Balti saldo prognooside vigadest. Koostatud bilansienergia hinna prognoosimudel osutus õnnestunuks juhul, kui vvsaldo väärtusi ei prognoositud, vaid kasutati reaalseid väärtusi.

## 5.5. Tulemused

2015. a. aprilli kuul kujunenud keskmine NPS hind oli 30,50 EUR/MWh, minimaalse hinnaga 13,08 ning maksimaalse 72,05 EUR/MWh. Kujunenud bilansienergia keskmine ostuhind oli 25,77 ning müügihind 23,42 EUR/MWh, mis on vastavalt 4,73 ning 2,35 EUR/MWh võrra madalam kujunenud NPS hinnast. Tabelis 5.9 on välja toodud peatükis 2 analüüsitud esimese kvartali hindade näitajad võrrelduna aprilli näitajatega. Aprillis kujunenud hinnad ning statistilised näitajad sarnanevad ning jäävad samasse suurusjärku 2015. aasta esimese kvartali hindade statistiliste näitajatega. Sellest tulenevalt saab väita, et hindade kujundus jätkas aprillis aasta esimese kvartali hindadega sarnast trendi.

*Tabel 5.9. Bilansienergia ning NPS hindade statistiliste näitajate võrdlus kahel perioodil*

	01.01.15-31.03.15			apr.15		
	BEO	BEM	NPS	BEO	BEM	NPS
<b>Keskmine</b>	29,60	27,86	32,50	25,77	23,42	30,50
<b>MIN</b>	5,80	4,49	5,09	7,60	6,40	13,08
<b>MAX</b>	122,19	120,99	75,00	106,50	105,30	72,05
<b>MOD</b>	7,50	6,50	26,08	7,60	6,40	42,09
<b>MED</b>	25,79	24,05	29,25	22,16	20,20	26,01

Järgnevalt vaatleme ja võrdleme prognoosimudelite tulemusi. Nimetagem esialgset prognoosimudelit „Mudel 1“ ning tegelike vvsaldo ja balti saldo andmetega tehtud prognoosi „Mudel 2“.

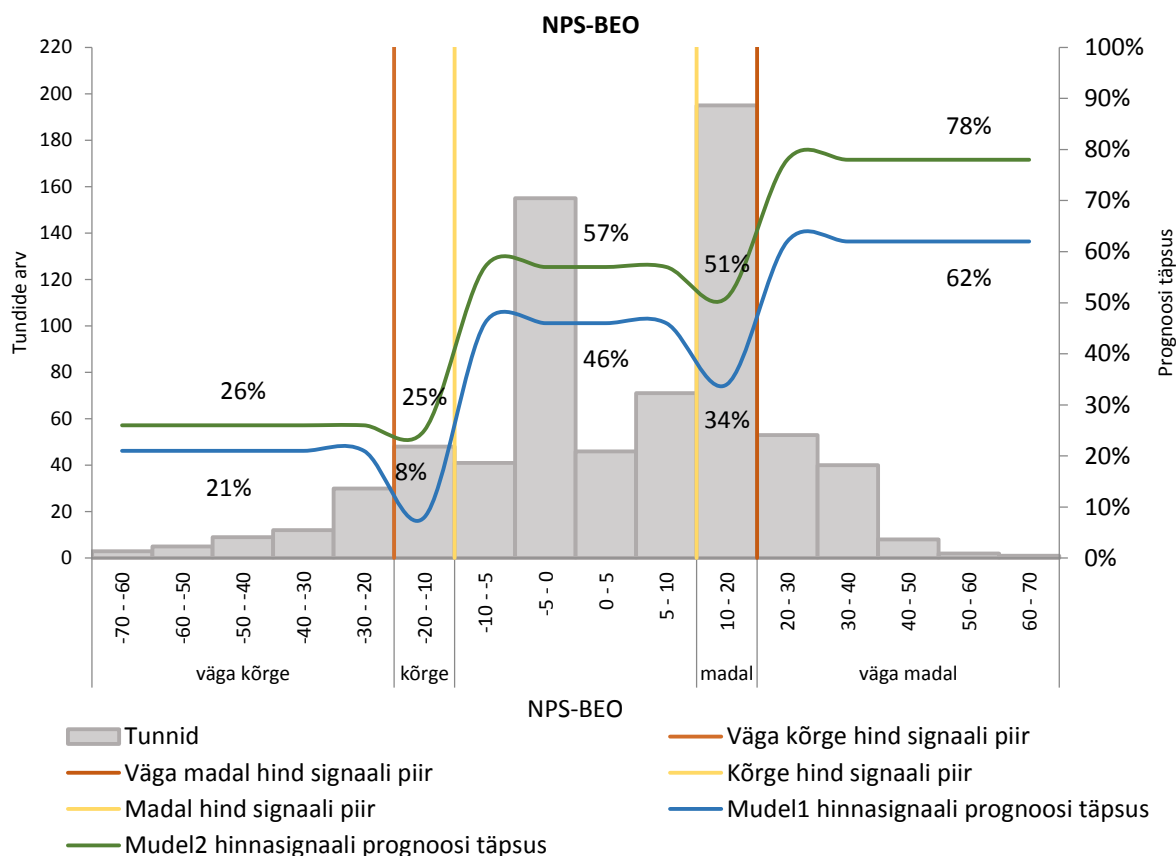


Tabelis 5.10 on kujutatud Mudel 1 ja Mudel 2 bilansienergia hindade MAE ja RMSE väärtusi ning suundade prognoosi täpsusi. Nagu näha ning eelnevates peatükkides selgus, siis Mudel 2 tulemused on paremad kui Mudel 1 tulemused. Bilansienergia hinna suunad prognoosis Mudel 2 täpsusega 77% (BEO) ning 75% (BEM), mis ületavad mudeli hindamiskriteeriumi 70%. Mudel 1 suuna prognoos jäi alla 64%.

*Tabel 5.10. Mudel 1 ja Mudel 2 tulemuste võrdlevad näitajad*

	Mudel 1		Mudel 2	
	BEO	BEM	BEO	BEM
<b>MAE</b>	14,74	14,00	11,22	11,09
<b>RMSE</b>	3,84	3,74	3,35	3,33
	<b>NPS-BEO</b>	<b>NPS-BEM</b>	<b>NPS-BEO</b>	<b>NPS-BEM</b>
<b>Suund</b>	60,1%	63,2%	77,1%	75,3%
<b>Posit. (BE hind madalam)</b>	66,2%	84,4%	80,1%	94,3%
<b>Negat. (BE hind kõrgem)</b>	52,6%	30,4%	72,9%	45,7%

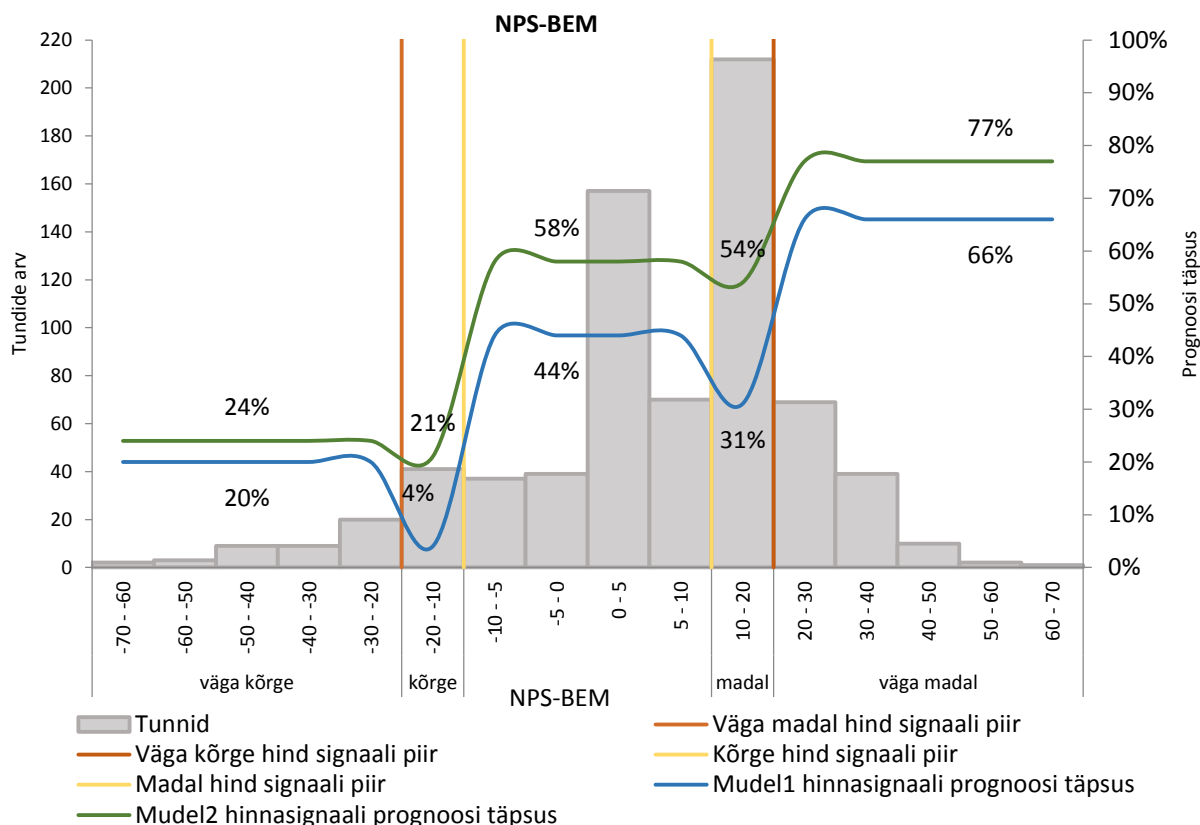
Joonis 5.20 on kujutatud 2015. aasta aprillis kujunenud NPS ja bilansienergia ostuhinna vahe (NPS-BEO) väärtuste sagedust etteantud piirides. Kõige rohkem oli väärtusi (195), kus NPS-BEO oli vahemikus 10-20, ehk NPS hind oli BEO hinnast 10-20 EUR/MWh kallim ning see jäi „madal hind“ signaali kategooriasse. Kokku 59 tunnil oli hind „väga kõrge hind“ tsoonis, mil BEO hind oli NPS hinnast 20 -70 EUR/MWh kallim. „väga madal hind“ tsooni jäi 104 tundi, mil BEO hind oli NPS hinnas 20-70 EUR/MWh võrra odavam. Joonisel on kujutatud kollase ja punasega piire, mis tähistavad erinevate hinnasignaali vahemikke. Võrdlusena on välja toodud Mudel 1 (sinine) ja Mudel 2 (roheline) hinnasignaali prognoosi täpsused antud häirete korral. Signaali „väga madal hind“ ületas ainsana ette antud mudeli hindamiskriteerium 78%-ga Mudel 2. „madal hind“ signaalidest olid korrektsed ligi pooled, 51%. Kõrgete hindade signaale mudel anda ei suutnud.



Joonis 5.20. NPS-BEO kujunenud aprilli väärtuste histogramm ning Mudel 1 ja Mudel 2 signaalide täpsused

Sarnaselt eelmisele joonisele, on joonisel 5.21 kujutatud 2015. aasta aprillis kujunenud NPS ja bilansienergia müügihinna vahe (NPS-BEM) väärtuste sagedust etteantud piirides. Kõige rohkem oli väärtusi (212), kus NPS-BEM oli vahemikus 10-20, ehk NPS hind oli BEM hinnast 10-20 EUR/MWh kallim ning see jäi „madal hind“ signaali kategooriasse. Kokku 43 tunnil oli hind „väga kõrge hind“ tsoonis, mil BEM hind oli NPS hinnast 20 -70 EUR/MWh kallim. „väga madal hind“ tsoonis jäi 121 tundi, mil BEM hind oli NPS hinnas 20-70 EUR/MWh võrra odavam. Signaali „väga madal hind“ ületas ainsana ette antud mudeli hindamiskriteerium 78%-ga Mudel2. „madal hind“ signaalidest olid korrektsed ligi pooled, 51%. Ka bilansienergia müügihindade korral ei olnud mudel võimeline kõrgete hindade signaale edastama.

Kõikidest signaalidest, andis Mudel 1 korrektsid signaale vaid 39% (BEO) ja 38% (BEM) juhtudest ning Mudel 2 korral olid 51% (BEO) ja 52% (BEM) kõikidest antud signaalidest õiged. Sealjuures on arvestatud tunde, kus mudel korrektselt signaali ei andnud.



Joonis 5.21. NPS-BEO kujunenud aprilli väärtuste histogramm ning Mudel 1 ja Mudel 2 signaalide täpsused

Kuna Mudel 1 ja Mudel 2 ainsaks erinevuseks on vvsaldo ja Balti saldo väärtused, siis saab järeldada, et Mudel 1 suured vead tulenevad vvsaldo ja Balti saldo väärtuste prognoosimatusest. Koostatud prognoosimudel täitis kriteeriume saldo suuna prognoosi täpsusel ning „väga madal hind“ signaali andmisel.

Bilansienergia hinna modelleerimise kitsaskohaks võib nimetada puudulikke teadmisi kujunevate vvsaldo ja Balti saldo väärtuste kohta. Prognoosides vvsaldo väärtusi ANN2013 ja Balti saldo väärtusi ANN2014 mudeliga ning neid rakendades bilansienergia hinna mudelisse, ei suutnud mudel saavutada ette antud 70% kriteeriume. Antud töös väljatöötatud närvivõrku ei ole võimalik antud tingimuste juures kasutada.

## 5.6. Järeldused

### Mudel 1

Põhjused, et vvsaldo ja Balti saldo suurused pole prognoositava bilansienergia hinna tunniks teada ning ka neid väärtusi tuleb prognoosida, siis saldode ennustamise veast tulenevalt suureneb ka hindade prognoosiviga. Saldode ennustamisel tulenevad vead peamiselt sellest, et saldod ise sõltuvad väga paljudest raskesti ennustatavatest asjaoludest, nagu näiteks ilmastik (temperatuur,

päikseline/pilvine, tuul jne), tootmine, tarbimine, ülekandevõimsused ja piirangud, avariid, turuosaliste käitumine jne.

Edaspidistes uuringutes tuleks analüüsida, millest ja kuidas saldode kujunemine täpselt toimub, et uusi teadmisi prognoosimisel võimalikult täpselt kasutada. Tuleks kaaluda saldode prognoosimisel kasutada rohkem sisendeid ja algandmeid. Prognoosides eraldi näiteks tarbimist ja tootmist ning kasutades ka ilmastiku andmeid, on närvivõrgul rohkem infot mille vahel seoseid leida ning tõenäoliselt suudaks ka täpsemini prognoosida.

## **Mudel 2**

Teadaolevate vvsaldo ja Balti saldo väärtuste korral on võimalik suhteliselt täpselt (üle 75% täpsusega) bilansienergia hindade suunda ennustada. Peamised vead bilansienergia hindade suuna prognoosimisel tulevad tundidel, mil vvsaldo ja Balti saldo on erinevate suundadega (25% tundidest). Samuti ei suuda mudel ära tabada hindade alumist piiri ning seetõttu prognoosib madala bilansienergia hindadega tunnid väärtuselt veidi kõrgemad.

Kuigi hindade prognoosimisel kasutati viimaste avalikustatud bilansienergia hindadega treenitud närvivõrgu mudeleid, esines mudelites siiski süstemaatiline viga kõrgete hindade prognoosimisel ning hinnasignaali andmisel. Antud anomaalia lahendamiseks tuleks edaspidistes mudeli arendustes kontrollida, millest antud viga tuleneb, kas põhjuseks võib olla mõni mudeli sisend.

Edaspidistes uuringutes tasuks kaaluda teiste sisendmuutujate kasutamist või lisamist, mis võiks paremini ja täpsemini kirjeldada bilansienergia hinna kujunemist. Siinjuures tuleks jätkata uurimustööd närvivõrgu matemaatilise arhitektuuri loomisel, et parandada signaalide andmise täpsust ka kõrgete hindade korral.

Siinkohal tuleb tähele panna, et vaid närvivõrgust pärineva informatsiooni alusel ei ole otstarbekas otsuseid langetada. Väljuvat signaali saab kasutada pigem ühe vihjena bilansienergia hinna liikumise kohta ülejärgmisel tunnil. Portfelli prognoosi tuleks hoida tasakaalus parima teadmise juures ning võimalikku eabilanssi vähendada kasutades päevasisest turgu Elbas.

## Lõputöö kokkuvõte

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli koostada prognoosimudel, bilansienergia hindade kaks tundi ette prognoosimiseks, mis annab kõrgete ja madalat hindade korral hinnahäire. Antud magistritöö eesmärgiks ei olnud bilansienergia hinna väga täpne prognoosimine, vaid pigem bilansienergia hinna suuna ennustamise (võrreldes NPS hinnaga) ning prognoosimise läbi ennustada ekstreemseid olukordi, kus bilansienergia hind on „väga kõrge“ või „väga madal“.

Magistritöö on struktureeritud viide suuremasse jaotusesse. Töö esimeses osas anti ülevaade aegridade analüüsist ning kirjeldati pikemalt tehisnärvivõrkude olemust ning kahe erineva mudeli (MLFN ja GRNN) tööpõhimõtteid; kirjeldati libiseva keskmise ning otsustuspuu meetodeid.

Magistritöö teises osas anti ülevaade bilansienergia hindade kujunemisest ning teostati hindade analüüsid kahel perioodil: alates 2013. aasta algusest kuni 2015. aasta märtsi lõpuni ning 2015. aasta 1. kvartali hindade põhjal, võrdluses NPS hindadega. Selgus, et 2015. aasta alguses toimunud avatud tarnija muutus on mõjutanud bilansienergia hindasid ning selle kujunemist. Seetõttu kasutati bilansienergia hindade edasises käsitluses vaid andmeid alates 2015. aastast.

Töö kolmandas peatükis analüüsiti, kuidas mõjutavad Eesti elektrisüsteemi planeeritud ja tegeliku vahelduvvoolu saldo vahe (vvsaldo) ning Baltikumi summaarne eabilanss bilansienergia hindasid. Samuti analüüsiti, kuidas Eesti elektrisüsteemi ühendatud tuuleparkide toodang ja tuule kiirus mõjutavad bilansienergia hindade kujunemist. Suuremat tähelepanu pöörati olukordadele, kus oli tugev tuul ning kõrge planeeritud toodang ning madal tuul ning madal planeeritud toodang. Selgus, et bilansienergia hindade kujunemisel on suur roll nii Eesti kui ka Baltikumi eabilanssidele. Samuti mõjutavad hindade kujunemist nii kõrged kui ka väga madala tuulekiirusega tunnid.

Bilansienergia hinna prognoosimiseks kaks tundi ette on vaja prognoosida nii Eesti kui ka Baltikumi vastava ajaskaala saldo suurused. Magistritöö neljandas osas uuriti võimalusi Eesti (vvsaldo) ja Baltikumi eabilansside (Balti saldo) prognoosimiseks. Parima prognoosi välja selgitamiseks koostati kolm mudelit tehisnärvivõrkudel, neli libiseva keskmise mudelit ning hübriidmudel parimast närvivõrkude ja libiseva keskmisest mudelist. Uuringust selgus, et kolmest erinevast meetodist andsid parimad tulemused närvivõrkude mudelid. Bilansienergia hindade modelleerimisel Eesti vahelduvvoolu saldo prognoosimiseks kasutati ANN2013 mudelit, mille treenimisel kasutati andmeid alates 2013. aastast. Baltikumi summaarse saldo prognoosimiseks andis parima tulemuse ANN2014 mudel, mis kasutas andmeid alates 2014. aastast.

Antud töö viimases, viiendas, osas koostati mudel närvivõrkudega, mis prognoosib bilansienergia hindasid kaks tundi ette. Vastavalt otsustuspuul esitatud loogikale esitab mudel madalate hindade korral „madal hind“ või „väga madal hind“ hinnahäire, kõrgete hindade korral aga „kõrge hind“ või „väga kõrge hind“ hinnasignaali, et vastavalt vajadusele portfelli tarbimise ja tootmise prognoosi uuendada. Mudel loetakse õnnestunuks, kui ta suudab õigesti prognoosida 70% bilansienergia hinna suundadest võrreldes NPS hinnaga. Sealjuures peavad õiged signaalid moodustama 70% ekstreemse hinna signaalidest.

Närvivõrkude mudelil kasutati üheksat sisendit, sh nädalapäev, tund, kategooria, tuule kiirus, planeeritud tuule toodang, vvsaldo, balti saldo, NPS EE hind ja NPS baltikumi keskmine hind. Bilansienergia hindade prognoosimisel on lähtutud põhimõttest, et mida rohkem andmeid närvivõrgul treenimiseks on, seda paremaid seoseid, ning seeläbi ka prognoose, suudab võrk luua. Seetõttu trenniti närvivõrk uute bilansienergia hindade laekumisel iga kord uuesti.

Bilansienergia hindade prognoosi täpsust võrreldi keskmise absoluutvea, ruutkeskmise vea ning mudeli võime järgi prognoosida bilansienergia hinna suund, võrreldes NPS hinnaga, õigesti. Selgus, et keskmine absoluut viga ületas 14 EUR/MWh, mis näitab väga suurt viga hindade täpsuse prognoosimisel. Kõigest 60% bilansienergia ostuhinna suundadest ning 63% bilansienergia müügihinna suundadest suutis mudel õigesti tabada. Ka „väga madal hind“ hinnahäire andmisel ei saavutanud mudel püstitatud eesmärki. Bilansienergia ostuhinna korral suutis mudel anda 62% ning müügihindade korral 66% „väga madal hind“ signaalidest õigesti. Ülejäänud signaalide täpsus oli alla 34%. Kõikidest antud signaalidest olid õiged vaid 39%. Kuigi bilansienergia hindade suuna prognoositäpsus üle 60% on hea ning annab süstemaatilise eelise, ei osutunud koostatud mudel ette määratud antud tingimuste korral õnnestunuks.

Kehvade prognoositulemuste tõttu koostati samade tingimuste alusel prognoosid tegelikult kujunenud Eesti ja Baltikumi eabilansside andmetega. Antud analüüs andis arusaama, et kehvade tulemuste põhjuseks oli vvsaldo ja balti saldo ebatäpne prognoosimine. Reaalsete andmetega suutis mudel prognoosida õigesti 75-77% bilansienergia hinna suundadest. Mudeli poolt antud „väga madal hind“ hinnasignaalidest 78% olid õiged. „väga kõrge hind“ signaalid aga ei osutunud täpseteks – vaid 26% antud häiretest olid tõesed. Kõikidest antud signaalidest olid tõesed 51%. Eesti ja Baltikumi süsteemide reaalsete andmete kasutamisel saavutas mudel etteantud eesmärgid ning loetakse õnnestunuks hindade suuna ning „väga madal hind“ hinnasignaali prognoosimisel.

Siinjuures tuleb veelkord tähele panna, et vaid närvivõrgust pärineva informatsiooni alusel ei ole otstarbekas otsuseid langetada. Väljuvat signaali saab kasutada pigem ühe vihjena bilansienergia

hinna liikumise kohta ning portfelli prognoosi tuleb alati bilansis hoida oma parima teadmise juures ning vajadusel bilansi parandamiseks teha lisatarneid kasutades päevasisest turgu Elbas.

Üheks mudeli kitsaskohaks tuleks mainida veel lühikest bilansienergia hinna ajalugu uue avatud tarne lepingu raames. NPS ja bilansienergia hinnad on olnud stabiilsed ning kõikunud mõistlikes piirides, kuna puuduvad ekstreemsed olukorrad, siis ei oska ka närvivõrk bilansienergia hindu prognoosida kõrgete (rohkem kui 100 EUR/MWh) hindade korral.

Edaspidises uurimuses tuleks leida alternatiivseid võimalusi vvsaldo ja balti saldo prognooside parandamiseks, piisavalt hea tulemuse korral oleks võimalik rakendada ka koostatud bilansienergia hinna mudelit. Samuti tasuks kaaluda teiste sisendmuutujate kasutamist või lisamist, mis võiks paremini ja täpsemini kirjeldada bilansienergia hinna kujunemist. Siinjuures tuleks jätkata uurimustööd närvivõrgu matemaatilise arhitektuuri loomisel, et parandada signaalide andmise täpsust ka kõrgete hindade korral. Samuti tuleks leida võimalusi hindade prognoosimiseks rohkem kui 2 tundi ette.

Antud töös kajastatud meetodika puhul selgus, et tehislake närvivõrkude meetodikat on võimalik rakendada bilansienergia hindade prognoosimiseks piisavalt täpsete algandmete olemasolul. Küll aga ilmnes antud töö kitsaskohana piisavalt täpse vvsaldo ja Balti saldo prognoosimise puudumine. Seetõttu tuleb antud ülesande püstituse juures lugeda mudel ebaõnnestunuks.

## Kasutatud kirjandus

- [1] Bilansiteenuse ülevaade. Elering AS, (2015) [Online]. <http://elering.ee/ulevaade/>. (08.05.2015).
- [2] Vainu, J. (1981) *Aegridade analüüs*. Tartu: Tartu Riiklik Ülikool, Majandusküberneetika ja statistika kateeder.
- [3] Liiv, I. (2005) „Andmekaevandamine“ A&A, kd. 6, 28-43.
- [4] Fouladgar, M. M., Yazdani, M., Khazaei, S., Zavadskas, D. K. (2013) „COMPARISON OF VECTOR TIME SERIES AND ANN TECHNIQUES FOR FORECASTING OF WTI OIL PRICE,“ *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, kd. 47, nr 4, 1-16.
- [5] Wang, J., Wang, J. (2015) „Forecasting stock market indexes using principle component analysis and stochastic time effective neural networks,“ *Neurocomputing*, nr 156, 68-78.
- [6] Akdeniz Duran, E., Pamukcu, A., Bozkurt, H. (2014) „COMPARISON OF DATA MINING TECHNIQUES FOR DIRECT MARKETING CAMPAIGNS,“ *Journal of Engineering and Natural Sciences*, nr 32, 142-152.
- [7] Tomar, D., Agarwal, S. (2013) „A survey on Data mining approaches for Healthcare,“ *International Journal of Bio*, kd. 5, nr 5, 241-266.
- [8] Dolara, A., Grimaccia, F., Leva, S., Mussetta, M., Ogliari, E. (2007) „A Physical Hybrid Artificial Neural Network for Short Term Forecasting of PV Plant Power Output,“ *Energies*, nr 8, 1138-1153.
- [9] Taylor, J. W., McSharry, P. E. (2007) „Short-Term Load Forecasting Methods: An Evaluation Based on European Data,“ *IEEE Transactions on Power Systems*, kd.22, nr 4, 2213-2219.
- [10] Cărbureanu, M. (2012) „The Annual Inflation Rate Analysis Using Data Mining Techniques,“ *Economic Insights - Trends & Challenges*, kd 64, nr 4, 121-128.
- [11] Poplawski, T., Dudek, G. Lyp, J. (2015) „Forecasting methods for balancing energy market in Poland,“ *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, kd. 65, 94-101.



- [12] Tee, C. Y., Cardell, J. B., Ellis, G. W. (2009) „Short-Term Load Forecasting Using Artificial Neural Networks,“ *North American Power Symposium (NAPS)*, Sarkville, MS, USA.
- [13] Stokelj, T. Paravan, D., Golob, R. (2000) „Short and mid term hydro power plant reservoir inflow forecasting,“ *IEEE, Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on*, 21 1107-1112.
- [14] Karu, A. „Tehislike närvivõrkude rakendamine aktsia hinna liikumise prognoosimisel,“ Tartu, 2012.
- [15] Swingler, K. (2001) *Applying Neural Networks: A Practical Guide*. Bodmin: MPG Books Ltd.
- [16] Petlenkov, E. (2004) „Tehisnärvivõrgud ja nende rakendused,“ [Online]. <http://www.dcc.ttu.ee/las/ISS0010/Tehisnarvivorgud-Eduard2004.pdf>. (06.04.2015).
- [17] Grünberg, M. (2013) Pankroti prognoosimise mudeli koostamine Eesti tööstussektori ettevõtete näitel, Tartu.
- [18] Li, W., Luo, Y., Zhu, Q., Liu, J., Le, J. (2008) „Applications of AR-GRNN model for financial time series forecasting“ *Neural Computing & Applications*, nr 5/6, kd. 17, 441-448.
- [19] Houichi, L., Dechemi, N., Heddami, S., Achour, B. (2013) „An evaluation of ANN methods for estimating the lengths of hydraulic jumps in U-shaped channel“ *Journal of Hydroinformatics*, kd 15, nr 1, 147-154.
- [20] Hannan, S. A., Maza, R.R., Ramteke, J. J. (2013) „Generalized Regression Neural Network and Radial Basis Function for Heart Disease Diagnosis,“ *International Journal of Computer Applications*, kd. 7, nr 13, 7-13.
- [21] Singh, R., Vishal, V., Singh, T. N., Ranjith, P. G. (2013) „A comparative study of generalized regression neural network approach and adaptive neuro-fuzzy inference systems for prediction of unconfined compressive strength of rocks,“ *Neural Computing & Applications*, kd. 23, nr 2, 499-506.
- [22] NeuralTools6. Palisade. [Online]. <http://www.palisade.com/neuralTools/>. (26.03.2015).
- [23] Sauga, A. *Kvantitatiivsete meetodite kasutamine majanduses*. (2005) [Online]. [http://www.sauga.pri.ee/audentes/download/kvantmeetod\\_1k69\\_92.pdf](http://www.sauga.pri.ee/audentes/download/kvantmeetod_1k69_92.pdf). (26.03.2015).

- [24] Konkurentsiamet, (2008) *Bilansienergia hinna arvutamise ühtne metoodika*. [Online]. <http://www.konkurentsiamet.ee/file.php?25676>. (29.03.2015).
- [25] Elering AS. (2015) *Elektrisüsteemi eabilansi avatud tarne* [Online]. <http://elering.ee/sustee/>. (26.03.2015).
- [26] Elering AS. *Baltikumi süsteemihaldurite vaheline eabilansi selgitamise leping*. [Online]. <http://elering.ee/baltikumi-susteemihaldurite-vaheline-ebabilansi-selgitamise-leping-imbalance-settlement-agreement-2/>. (01.04.2015).
- [27] Elering, AS. *Bilansienergia hinnad*. [Online]. <http://elering.ee/bilansienergia-hinnad-2013-9/>. (29.03.2015).
- [28] „Bilansi tagamise (tasakaalustamise) eeskirjad,“ 08. 01. 2015. [Online]. [http://elering.ee/public/Teenused/Bilanss/Bilansi\\_tagamise\\_ehk\\_tasakaalustuseeskirjad.pdf](http://elering.ee/public/Teenused/Bilanss/Bilansi_tagamise_ehk_tasakaalustuseeskirjad.pdf). [ 29. 03. 2015].
- [29] Elering AS. *Saldo*. [Online]. <http://elering.ee/saldo/>. (06.04.2015).
- [30] Sauga, A. *Korrelatsioon- ja regressioonanalüüs*. (2005) [Online]. [http://www.sauga.pri.ee/audentes/download/kvantmeetod\\_1k45\\_68.pdf](http://www.sauga.pri.ee/audentes/download/kvantmeetod_1k45_68.pdf). (26.03.2015).
- [31] Litgrid AB. *Generation* [Online]. <http://www.litgrid.eu/index.php/dashboard/generation/638>. (11.04.2015).
- [32] Litgrid AB, *Consumption*. [Online]. <http://www.litgrid.eu/index.php/dashboard/consumption/637>. (11.04.2015).
- [33] Augstsprieguma tīkls AS. *Planned and actual demand, net exchange and production*. [Online]. [http://ast.lv/eng/power\\_system/current\\_situation\\_in\\_power\\_system/planned\\_and\\_actual\\_demand\\_\\_net\\_exchange\\_and\\_production/](http://ast.lv/eng/power_system/current_situation_in_power_system/planned_and_actual_demand__net_exchange_and_production/). (11.04.2015).
- [34] Elering AS. (2014) *Eesti Elektrisüsteemi tarbimishinnade rahuldamiseks vajaliku tootmisvaru hinnang*. [Online]. [http://elering.ee/public/Infokeskus/Aruanded/Elering\\_Tootmispiisavuse\\_aruanne\\_2014.pdf](http://elering.ee/public/Infokeskus/Aruanded/Elering_Tootmispiisavuse_aruanne_2014.pdf). (06.04.2015).
- [35] Sharma, D. K., Hota, H. S. (2013) „DATA MINING TECHNIQUES FOR PREDICTION OF DIFFERENT CATEGORIES OF DERMATOLOGY DISEASES,“ *Academy of Information & Management Sciences Journal*, kd. 16, nr 2, 103-115.

## Lisad

1. L.1. Kuude ja aastate keskmised NPS , bilansienergia ostu- ja müügihinnad
2. L.2. Vvsaldo närvivõrkude treenimise tulemused
3. L.3. Balti saldo närvivõrkude treenimise tulemused
4. L.4. Vvsaldo närvivõrkude testimise tulemuste graafiline kujutis
5. L.5. Balti saldo närvivõrkude testimise tulemuste graafiline kujutis perioodil
6. L.6. Vvsaldo libiseva keskmiste mudelite testimise tulemuste graafiline kujutis
7. L.7. Balti saldo libiseva keskmiste mudelite testimise tulemuste graafiline kujutis
8. L.8. Bilansienergia hindade saabumiskuupäevad aprillis 2015

### L.1. Kuude ja aastate keskmised NPS , bilansienergia ostu- ja müügihinnad

	BEO	BEM	NPS
<b>2013</b>	<b>51,1</b>	<b>46,93</b>	<b>43,14</b>
jaan.13	56,09	50,86	41,76
veebr.13	55,54	52,96	39,81
märts.13	54,57	52,05	45,27
apr.13	47,34	45,19	43,33
mai.13	47,43	45,46	37,14
juuni.13	57,06	55,94	53,35
juuli.13	42,68	35,18	40,19
aug.13	47,89	41,15	43,66
sept.13	40,61	32,84	47,38
okt.13	54,8	48,73	46,76
nov.13	59,18	57,43	42,32
dets.13	50,47	46,06	36,85
<b>2014</b>	<b>44,65</b>	<b>40,88</b>	<b>37,61</b>
jaan.14	50,15	44,98	40,97
veebr.14	43,64	37,24	34,79
märts.14	43,74	41,67	31,57
apr.14	36,44	32,77	31,64
mai.14	38,39	33,71	36,85
juuni.14	44,99	39,56	35,81
juuli.14	47,27	42,11	44,17
aug.14	46,66	43,94	39,09
sept.14	42,19	40,33	42,96
okt.14	45,92	43,48	40,23
nov.14	51,17	48,85	35,41
dets.14	45,03	41,54	37,42
<b>2015</b>	<b>29,6</b>	<b>27,86</b>	<b>32,5</b>
jaan.15	32,62	30,5	33,84
veebr.15	28,75	27,17	33,43
märts.15	27,35	25,83	30,31

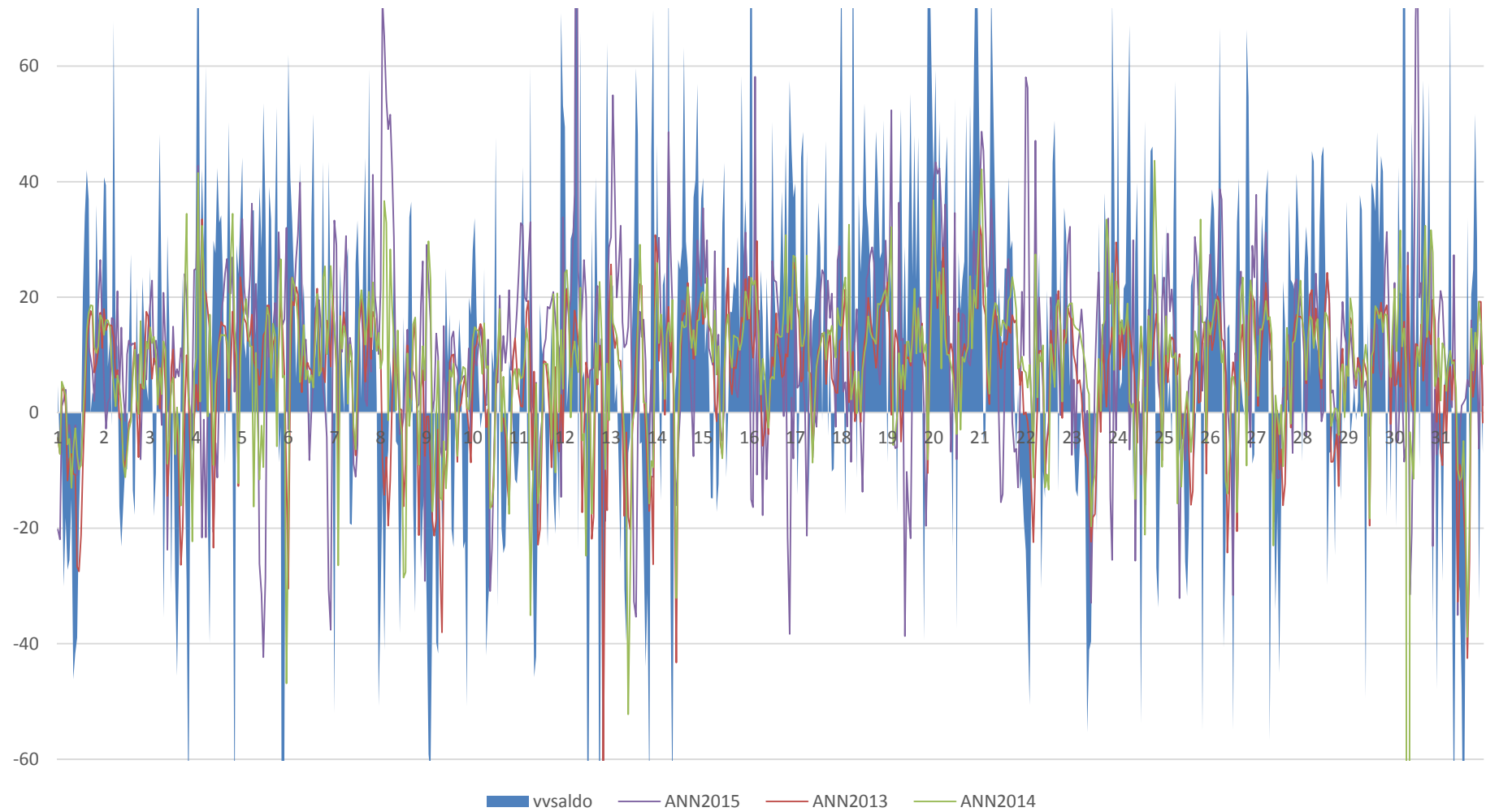
## L.2. Vvsaldo närvivõrkude treenimise tulemused

Summary	ANN2013	ANN2014	ANN2015
<b>Net Information</b>			
<b>Name</b>	Net Trained on vvsaldo_train2013	Net Trained on vvsaldo_train2014	Net Trained on vvsaldo_train2015
<b>Configuration</b>	GRNN Numeric Predictor	GRNN Numeric Predictor	GRNN Numeric Predictor
<b>Location</b>	This Workbook	This Workbook	This Workbook
<b>Independent Category Variables</b>	0	0	0
<b>Independent Numeric Variables</b>	5 (Weekday, Hour, planeeritud saldo, T-3, T-2)	5 (Weekday, Hour, planeeritud saldo, T-3, T-2)	5 (Weekday, Hour, planeeritud saldo, T-3, T-2)
<b>Dependent Variable</b>	Numeric Var. (vvsaldo)	Numeric Var. (vvsaldo)	Numeric Var. (vvsaldo)
<b>Training (75%)</b>			
<b>Number of Cases</b>	14152	8161	1054
<b>Training Time</b>	00:11:36	00:04:18	00:00:06
<b>Number of Trials</b>	81	90	134
<b>Reason Stopped</b>	Auto-Stopped	Auto-Stopped	Auto-Stopped
<b>% Bad Predictions (30% Tolerance)</b>	85,4367%	86,7541%	77,4194%
<b>Root Mean Square Error</b>	30,09	28,07	21,30
<b>Mean Absolute Error</b>	21,34	20,78	15,93
<b>Std. Deviation of Abs. Error</b>	21,21	18,87	14,15
<b>Testing (25%)</b>			
<b>Number of Cases</b>	4718	2720	352
<b>% Bad Predictions (30% Tolerance)</b>	87,7279%	88,6029%	86,0795%
<b>Root Mean Square Error</b>	33,31	32,04	28,58
<b>Mean Absolute Error</b>	22,92	22,03	22,01
<b>Std. Deviation of Abs. Error</b>	24,17	23,26	18,23
<b>Data Set</b>			
<b>Name</b>	vvsaldo_train2013	vvsaldo_train2014	vvsaldo_train2015
<b>Number of Rows</b>	18873	10881	1406
<b>Manual Case Tags</b>	NO	NO	NO
<b>Variable Impact Analysis</b>			
<b>T-2</b>	76,1575%	78,2516%	26,2812%
<b>T-3</b>	19,0811%	11,9337%	2,0175%
<b>planeeritud saldo</b>	1,0532%	7,6608%	44,3227%
<b>Hour</b>	2,5318%	1,3530%	16,5411%
<b>Weekday</b>	1,1763%	0,8009%	10,8375%

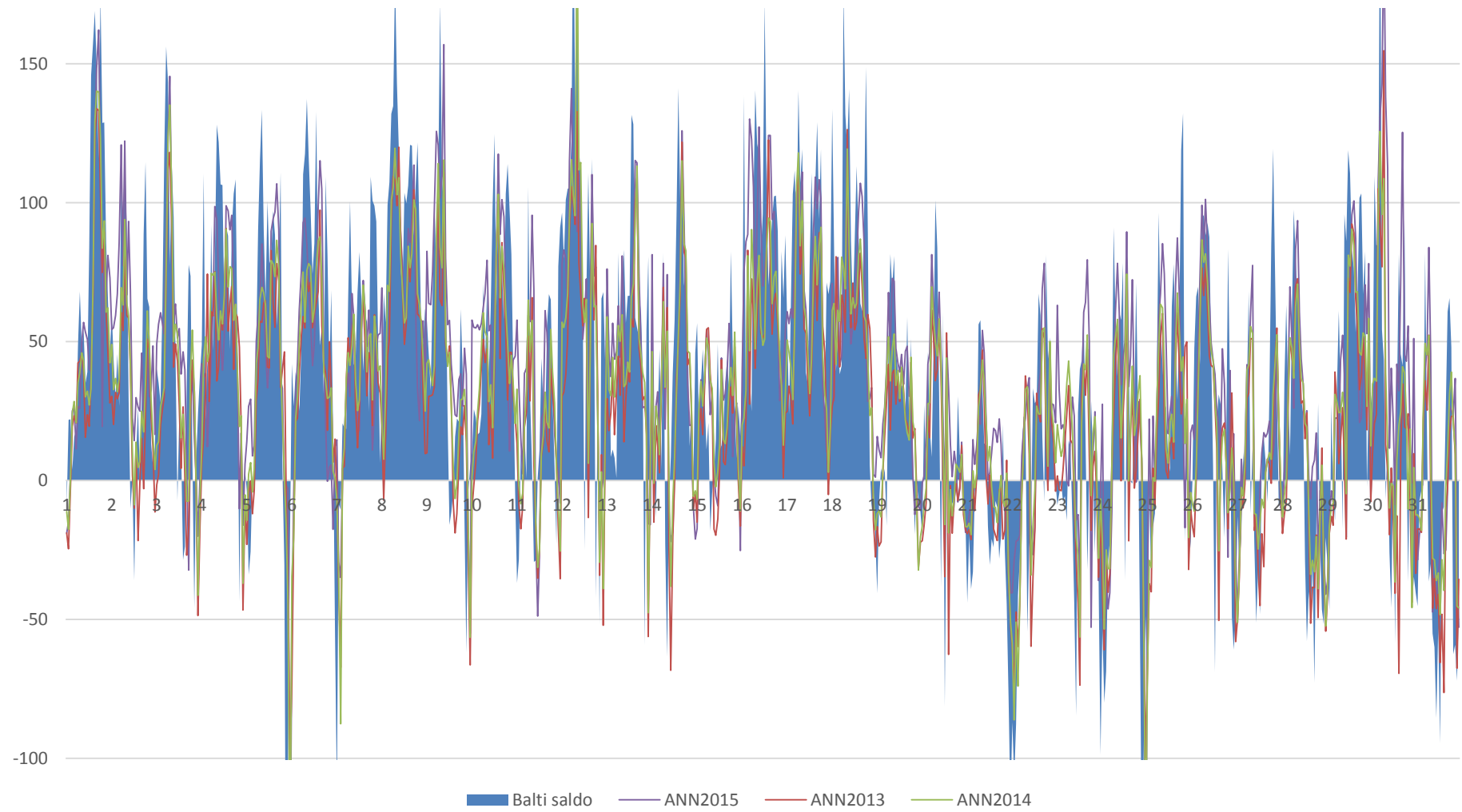
### L.3. Balti saldo närvivõrkude treenimise tulemused

Summary	ANN2013	ANN2014	ANN2015
<b>Net Information</b>			
<b>Name</b>	Net Trained on balti_train2013	Net Trained on balti_train2014	Net Trained on balti_train2015
<b>Configuration</b>	GRNN Numeric Predictor	GRNN Numeric Predictor	GRNN Numeric Predictor
<b>Location</b>	This Workbook	This Workbook	This Workbook
<b>Independent Category Variables</b>	0	0	0
<b>Independent Numeric Variables</b>	5 (Weekday, Hour, Planeeritud saldo, T-3, T-2)	5 (Weekday, Hour, Planeeritud saldo, T-3, T-2)	5 (Weekday, Hour, Planeeritud saldo, T-3, T-2)
<b>Dependent Variable</b>	Numeric Var. (Balti saldo)	Numeric Var. (Balti saldo)	Numeric Var. (Balti saldo)
<b>Training</b>			
<b>Number of Cases</b>	14149	7601	1054
<b>Training Time</b>	00:15:30	00:05:27	00:00:03
<b>Number of Trials</b>	99	133	66
<b>Reason Stopped</b>	Auto-Stopped	Auto-Stopped	Auto-Stopped
<b>% Bad Predictions (30% Tolerance)</b>	75,7811%	74,3586%	55,5977%
<b>Root Mean Square Error</b>	46,86	37,62	30,76
<b>Mean Absolute Error</b>	34,12	28,46	23,20
<b>Std. Deviation of Abs. Error</b>	32,11	24,61	20,21
<b>Testing</b>			
<b>Number of Cases</b>	4716	2534	352
<b>% Bad Predictions (30% Tolerance)</b>	77,5445%	77,1902%	67,3295%
<b>Root Mean Square Error</b>	49,30	47,51	41,48
<b>Mean Absolute Error</b>	35,34	31,71	32,36
<b>Std. Deviation of Abs. Error</b>	34,38	35,38	25,94
<b>Data Set</b>			
<b>Name</b>	balti_train2013	balti_train2014	balti_train2015
<b>Number of Rows</b>	18865	10135	1406
<b>Manual Case Tags</b>	NO	NO	NO
<b>Variable Impact Analysis</b>			
<b>T-2</b>	86,2729%	71,0288%	42,5168%
<b>T-3</b>	0,4857%	13,0294%	7,9674%
<b>Hour</b>	8,2761%	7,4682%	18,7986%
<b>Planeeritud saldo</b>	4,1537%	6,4633%	21,1250%
<b>Weekday</b>	0,8116%	2,0103%	7,9674%

#### L.4. Vvsaldo närvivõrkude testimise tulemuste graafiline kujutis

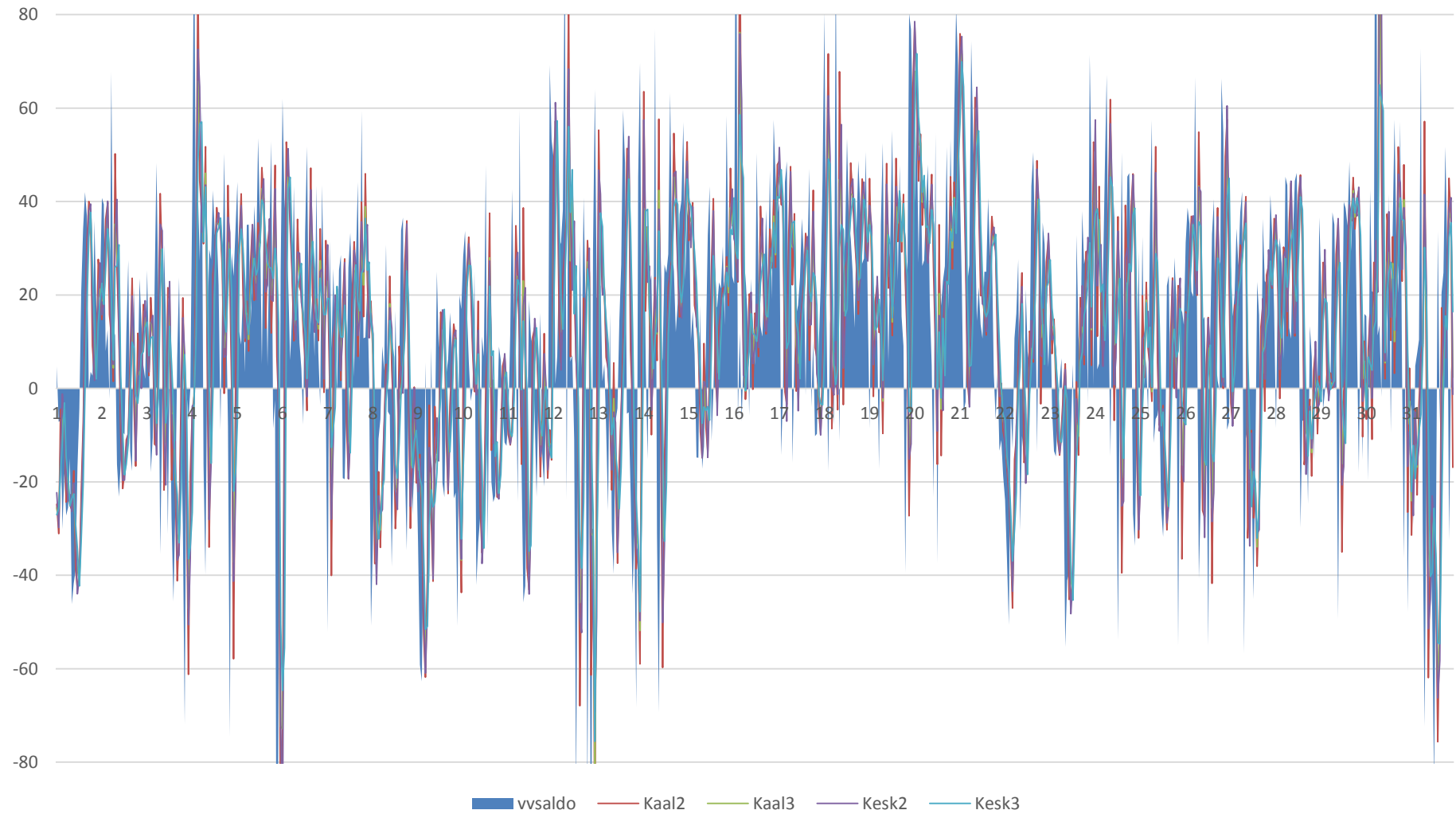


### L.5. Balti saldo närvivõrkude testimise tulemuste graafiline kujutis perioodil

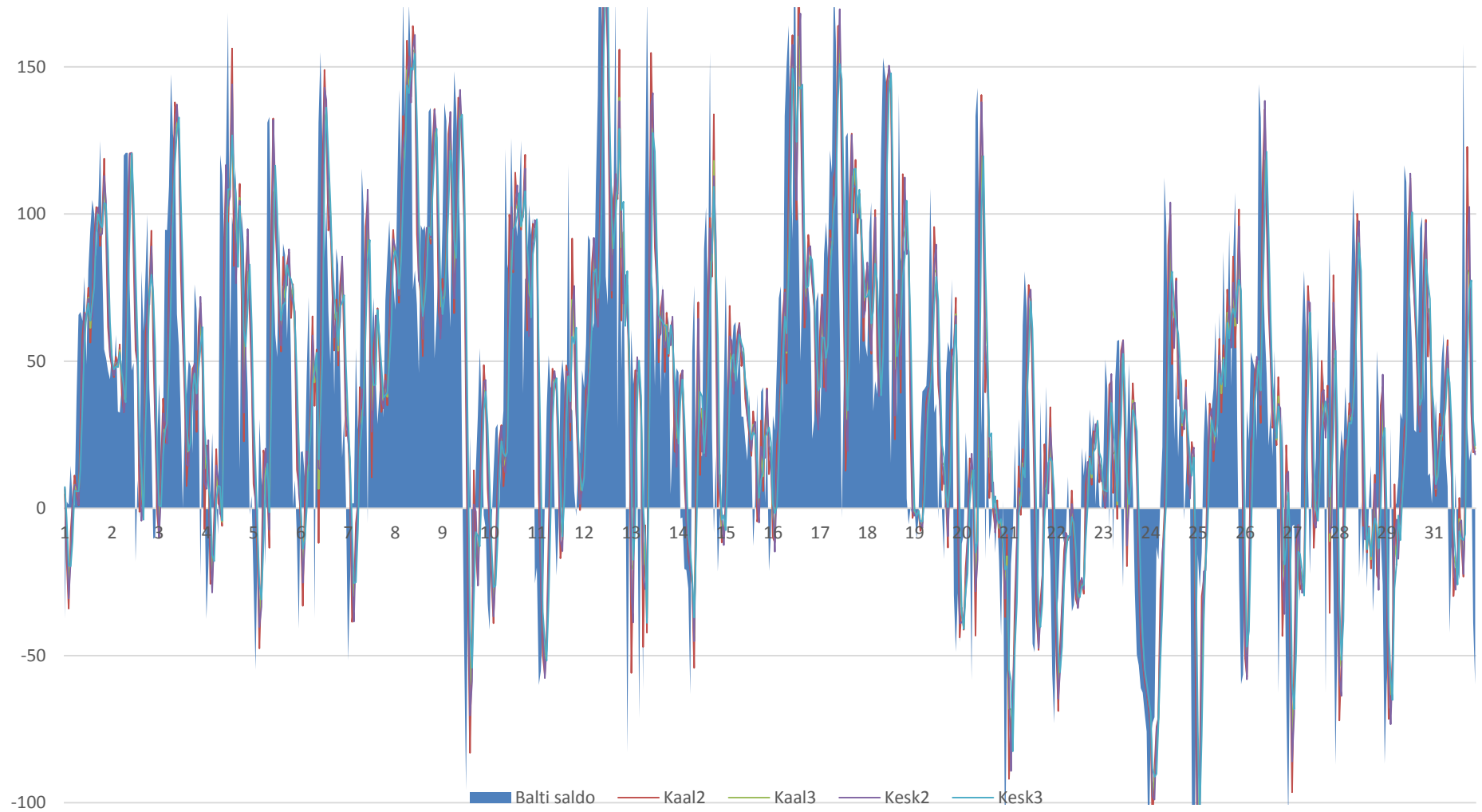




## L.6. Vvsaldo libiseva keskmiste mudelite testimise tulemuste graafiline kujutis



### L.7. Balti saldo libiseva keskmiste mudelite testimise tulemuste graafiline kujutis



## L.8. Bilansienergia hindade saabumiskuupäevad aprillis 2015

### APRILL 2015

	esmaspäev	teisipäev	kolmapäev	neljapäev	reede	laupäev	pühapäev
	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>
treenimiseks kasutatud hinnad			kuni 29.märts	kuni 29.04	kuni 31.märts	kuni 31.märts	kuni 31.märts
saabuvad andmed		27,28,29.03	30.märts	31.märts			
	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
treenimiseks kasutatud hinnad	kuni 31.märts	kuni 02.apr	kuni 05.apr	kuni 06.apr	kuni 07.apr	kuni 08.apr	kuni 08.apr
saabuvad andmed	1,2.04	3,4,5.04	6.apr	7.apr	8.apr		
	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>
treenimiseks kasutatud hinnad	kuni 08.apr	kuni 9.apr	kuni 12.apr	kuni 13.apr	kuni 14. apr	kuni 15.apr	kuni 15.apr
saabuvad andmed	9.apr	10,11,12.04	13.apr	14.apr	15.apr		
	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>
treenimiseks kasutatud hinnad	kuni 15.apr	kuni 16.apr	kuni 19.apr	kuni 20.apr	kuni 21.apr	kuni 22.apr	kuni 22.apr
saabuvad andmed	16.apr	17,18,19.04	20.apr	21.apr	22.apr		
	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>
treenimiseks kasutatud hinnad	kuni 22.apr	kuni 23.apr	kuni 26.apr	kuni 27.apr			
saabuvad andmed	23.apr	24,25,26.04	27.apr	28.apr			