



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## **ELEKTROLÜÜSERITEGA VESINIKU TOOTMISE MAJANDUSLIKU TASUVUSE HINDAMINE EESTIS**

### **THE EVALUATION OF THE ECONOMIC PROFITABILITY OF HYDROGEN PRODUCTION WITH ELECTROLYZERS IN ESTONIA**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Carmen Tamm

Üliõpilaskood: 213708EAAB

Juhendaja: Imre Drovtar, elektrivarustuse  
ekspert  
Argo Rosin, täisprofessor  
tenuuris

Tallinn 2024

# AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad,

kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"13" mai 2024

Autor: Carmen Tamm

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

"13" mai 2024

Juhendajad: Imre Drovtar

Argo Rosin

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Carmen Tamm

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Elektrolüüseritega vesiniku tootmise majandusliku tasuvuse hindamine Eestis“,

mille juhendajad on Imre Drovtar ja Argo Rosin,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

---

13. mai 2024 (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Carmen Tamm

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Elektrolüüseritega vesiniku tootmise majandusliku tasuvuse hindamine Eestis

*Kuupäev:*  
13.05.2024

59 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja:* Imre Drovtar, Argo Rosin

*Sisu kirjeldus:*

Vesinikutehnoloogia on tänapäeval aktuaalne teema energeetikas. Elektrolüüseritega on võimalik vesinikku toota süsihappegaasi vabalt. Lõputöös analüüsitakse roheline vesiniku tootmisega kaasnevaid kulusid ja uuritakse, mis parameetrid mõjutavad roheline vesiniku omahinda enim. Töö tulemusteni jõutakse teabekirjanduse analüüsimise, kvantitatiivse uuringu ja andmete võrdluse kaudu. Lõputöös arvatud tulemuste puhul on lähtutud tuleviku vaates modelleeritud andmetest. Töö annab laia ülevaate vesinikjaama tasuvuse kohta Eestis, mis on kasulik ettevõtetele, kes soovivad rohelist vesinikku toota. Antud lõputöö käigus jõuti järeldusele, et Eesti ei suuda vesinikku madalama turuhinnaga müüa, vaid saavutab võrdväärse taseme teiste riikide keskmise müügivõimekusega. Roheline vesiniku omahinda mõjutab kõige rohkem elektri hind, millest sõltub vesinikjaama tasuvus. Eestis toodetud roheline vesinik ei ole täna teadaolevate tehnoloogia ja elektri hindadega halli ega sinise vesinikuga konkurentsivõimeline. Kui Eestis soovitakse üle minna vesinikule, on Eesti transpordi, tööstuse ja energeetikasektori roheline vesiniku vajaduse katmiseks vaja 349 MW suurust jaama.

*Märksõnad:* Elektrolüüs, omahind, tasuvus, vesinik

## ABSTRACT

*Author:* Carmen Tamm      *Type of the work:* Bachelor Thesis

*Title:* The evaluation of the economic profitability of hydrogen production with electrolyzers in Estonia

*Date:* 13.05.2024

59 pages

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor of the thesis:* Imre Drovtar, Argo Rosin

*Abstract:*

Hydrogen technology has become a prominent topic in the energy sector nowadays. Electrolyzers can produce hydrogen without emitting carbon dioxide in the atmosphere. The thesis analyzes the costs associated with the production of green hydrogen and identifies which parameters affect the cost of hydrogen the most. The work consists of the analysis of grey literature, quantitative research and data comparison. The calculations used in this thesis are based on modelled data taking into account the perspective of future prices. The work provides a broad overview of the profitability of a hydrogen plant in Estonia, which is useful for companies that want to produce green hydrogen. This thesis concludes that the green hydrogen produced in Estonia cannot sell hydrogen at a lower market price but reaches a level of sales capability comparable to the average market price of other countries. The price of electricity is the main cost driver that affects the profitability of the hydrogen plant. Considering the current known technology and electricity prices, Estonia's green hydrogen cannot compete with grey and blue hydrogen production prices in the global market. To meet the demand for green hydrogen in Estonia's transportation, industry, and energy sectors, a plant with a capacity of 349 MW is needed.

*Keywords:* Electrolysis, levelized cost of hydrogen, profitability, hydrogen

# Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Carmen Tamm, 213708EAAB  
**Õppekava, peeriala:** EAAB, Elektroenergeetika  
**Juhendaja(d):** Elektrivarustuse ekspert, Imre Drovtar  
Täisprofessor tenuuris, Argo Rosin

### Lõputöö teema:

Elektrolüüseritega vesiniku tootmise majandusliku tasuvuse hindamine Eestis

The evaluation of the economic profitability of hydrogen production with electrolyzers in Estonia

### Lõputöö põhieesmärgid:

1. Analüüsida elektrolüüseriga vesiniku tootmise majanduslikku tasuvust ja seda mõjutavaid tegureid Eestis.
2. Kaardistada ära peamised kulud vesiniku tootmisel.
3. Analüüsida elektrihinna mõju vesiniku tootmishinnale.
4. Uurida, kui palju vesinikku võiks Eestis elektrolüüsi abil toota ning mis valdkondades võiks seda kasutada.

### Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse otsimine ja läbitöötamine	Veebruar
2.	Teoreetilise osa kirjutamine	Märtsi algus
3.	Vesiniku kulude ja tulude kaardistamine, uurimismeetod	Märtsi lõpp
4.	Vesiniku omahinna arvutamine, parameetrite analüüsimine	Aprill
5.	Tulemuste analüüsimine	Aprilli lõpp
6.	Järelduse ja kokkuvõtte kirjutamine	Mai algus
7.	Juhendajale läbilugemiseks saatmine	Mai algus
8.	Paranduste sisseviimine	Mai algus
9.	Töö lõplik versioon valmis	13.05.2024

**Töö keel:** ..... **Lõputöö esitamise tähtaeg:** ".....".....20.....a

**Üliõpilane:** ..... /allkiri/ "....." .....20....a

**Juhendaja:** ..... /allkiri/ "....." .....20....a

**Konsultant:** ..... /allkiri/ "....." .....20....a

**Programmijuht:** ..... /allkiri/ "....." .....20....a

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
EESSÕNA .....	9
Lühendite ja tähiste loetelu .....	10
1    SISSEJUHATUS.....	11
2    Vesiniku tootmine .....	13
2.1    Fossiilkütustest vesiniku tootmise tehnoloogiad .....	13
2.2    Elektrolüüseriga vesiniku tootmise tehnoloogiad .....	14
2.2.1    Aluseline elektrolüüser .....	15
2.2.2    Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüser .....	16
2.2.3    Tahkeoksiid-elektrolüüser.....	17
2.3    Vesinikjaamad.....	18
2.4    Vesiniku tootmise kasutusala ja aspektid Eestis .....	20
2.4.1    Vesiniku omahind.....	21
2.4.2    Vesiniku ladustamine .....	21
2.4.3    Vesinik transpordis .....	23
2.4.4    Vesinik energeetikas.....	24
2.4.5    Vesinik tööstuses .....	25
3    Vesiniku tootmise tasuvusanalüüs.....	27
3.1    Uurimismetoodika .....	27
3.2    Kaasnevad kulud .....	28
3.3    Saadavad tulud .....	30
3.4    Tasuvuse arvutamine, valem.....	32
4    Tulemuste analüüs.....	34
4.1    Hinda mõjutavad parameetrid .....	35
4.2    Elektrihinna kujunemine .....	37
4.3    Eesti roheline vesiniku kasutusala ja eksport .....	41
5    JÄRELDUS.....	45
KOKKUVÕTE .....	48
SUMMARY.....	50
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	52
LISA 1.....	59



## EESSÕNA

Antud lõputöö teema pakuti välja Eleringi teadus- ja arendustegevuste juhi Siim Iimre poolt. Soovin tänada Siim Iimret, kes andis lõputöö läbiviimiseks Eleringi 2030., 2035., ja 2040. aasta modelleeritud elektrihinna andmed kiire arengu (*Rapid Development*) stsenaariumi korral, mille põhjal viidi läbi lõputöö tasuvusanalüüs. Samuti soovin tänada enda lõputöö juhendajaid, elektrivarustuse eksperti Imre Drovtari ning täisprofessorit tenuuris Argo Rosinat, kelle abil pandi kokku lõputöö täpsem sõnastus ning teema.

## Lühendite ja tähiste loetelu

AE	<i>Alkine electrolyzer</i> , Aluseline elektrolüüser
ATR	<i>Autothermal Reforming</i> , Autotermaalreformimine
BOP	<i>Balance of Plant</i> , Jaama käit
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> , Kapitalikulud
CO <sub>2</sub>	Süsihappegaas
EL	Euroopa Liit
EPC	<i>Engineering, Procurement and Costruction</i> , Inseneri-, hanke- ja ehitusteenused
LCOH	<i>Levelized cost of hydrogen</i> , vesiniku tootmishind
OPEX	<i>Operating Expenditure</i> , Tegevuskulud
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i> , Prootonvahetus- membraaniga elektrolüüser
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> , Programmeeritavad loogikakontrollerid
POX	<i>Partial oxidation</i> , Osaline oksüdatsioon
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> , Järelevalve ning andmete kogumis- ja levitamissüsteem
SMR	<i>Steam methane reforming</i> , Auru reformimine
SOEC	<i>Solid oxide electrolysis cell</i> , Taheoksiid- elektrolüüser
TVT	Tehnoloogia valmiduse tasemed

# 1 SISSEJUHATUS

Vesinikutehnoloogia on tänapäeval aktuaalne ning uus teema energeetikas. Seda peetakse nii puhtaks, süsihappegaasi (CO<sub>2</sub>) vabaks, taastuvaks kui ka salvestatavaks energialiigiks. Taastuenergia osakaalu suurenemisega elektrisüsteemis leidub palju ajahetki, millal taastuenergia toodang ületab tarbimise. Üheks lahendusviisiks taastuenergia liigtootmise tasandamiseks on toota nendel hetkedel rohelist vesinikku. Roheline vesinik on taastuenergiaga elektrolüüsi teel toodetud heitmevaba vesinik [1]. Protsessist toodetud vesinikku on võimalik kasutada tööstustes või transpordisektoris, ent selle konkurentsivõime traditsiooniliselt ehk fossiilkütusest toodetud vesinikuga vajab rohkem uurimist. Elektrolüüseriga vesiniku tootmise omahind sõltub elektrihindadest. Seoses suurema hulga ilmastikust sõltuva elektritootmisvõimsuste tulekuga on näha, kuidas elektri hinnad võivad lühikestes ajavahemikes muutuda väga suures ulatuses, mõjutades seeläbi elektrit sisendina kasutava rohelise vesiniku maksumust. Antud töös analüüsitakse pikaajalise elektri hinna prognoosi mõju rohelise vesiniku sisendhinnale.

Töö eesmärgiks on teostada elektrolüüseriga vesiniku tootmise majanduslik tasuvusanalüüs ning uurida seda mõjutavaid tegureid Eestis. Antud lõputöös analüüsitakse peamisi kulusid Eestis vesiniku tootmisel, elektri hinna mõju vesiniku tootmise tasuvusele. Samuti analüüsitakse kui palju vesinikku võiks Eesti toota elektrolüüsi teel, arvestades pikaajalist elektri hinna prognoosi ning mis rakendustes võiks seda vesinikku kasutada. Modelleeritud elektri hindade pikaajaline vaatlemine ning analüüsimine aitab paremini planeerida rohelise vesinikuga seotuid kulusid, et kaalutleda paremini läbi antud valdkonna investeerimisotsuseid.

Töö läbiviimiseks alustati teabekirjanduse kogumisega Eestis vesiniku kasutuselevõtu kohta. Teaduskirjanduse alusel kaardistati vesiniku tootmisega kaasnevad kulud. Taani Energiaagentuuri prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseri (PEM) majanduslike näitajatega teostatakse kvantitatiivne uuring. Vesiniku majandusliku tasuvusanalüüsi tegemiseks arvutatakse vesiniku tootmishind (LCOH), tehes tabelarvutusi programmis Microsoft Excel. Samuti analüüsitakse erinevate parameetrite mõju LCOH hinnale. Seejärel keskendutakse rohelise vesiniku konkurentsivõime analüüsimisele. Töö esimeses pooles tutvustatakse elektrolüüseriga vesiniku tootmise tehnoloogiaid: aluseline elektrolüüser, prootonvahetusmembraaniga elektrolüüser ja tahkeoksiid-elektrolüüser. Samuti räägitakse esimeses peatükis vesiniku tootmise võimalustest Eestis, keskendudes nii vesiniku tootmishinnale kui ka vesiniku kasutusalaadele tööstusvaldkonnas. Lõputöös arvutatakse rohelise vesiniku omahind ning analüüsitakse,

mis juhtudel tasub vesiniku tootmine ära. Töö viimases pooles arutletakse, kui palju tasuks Eestis vesinikku toota ning kus toodetud rohelist vesinikku kasutada saaks.

Võtmesõnad: elektrolüüs, omahind, tasuvus, vesinik

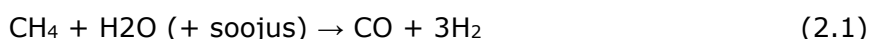
## 2 Vesiniku tootmine

Umbes 2 % kogu maailma energiatarbimisest kulub vesiniku valmistamiseks. Vesiniku tootmisviise on mitmeid, ent elektrolüüseriga vesiniku tootmisviisi peetakse kõige keskkonnasõbralikumaks. Vaid 4 % kogu maailmas toodetud vesinikust toodetakse elektrolüüseritega. [2] Euroopa Liit (EL) on seadnud prioriteediks arendada taastuvenergiast toodetavaid vesinikutehnoloogiaid [3]. Antud eesmärgi täitmiseks on EL loonud vesinikustrateegia, et suurendada süsihappegaasi (CO<sub>2</sub>) vabasid vesiniku tootmistehnoloogiate osakaalu. Euroopa Liit on strateegia esimeseks etapiks seadnud eesmärgi toota 2024. aastaks 6 GW suurushulgas vesinikelektrolüüsereid. 6 GW elektrolüüsereid peaks suutma toota kuni miljon tonni rohelist vesinikku. Esimene etapp on loodud eesmärgiga dekarboniseerida praegust vesinikutööstust. EL-i teine etapp on luua 40 GW võimsuses vesinikelektrolüüsereid Euroopasse kui ka väljaspoole Euroopat, lubades toota ja importida aastaks 2030 kümme miljonit tonni rohelist vesinikku. [4] Allika [5] kohaselt ennustatakse, et aastaks 2050 on vesiniku tarbimise vajadus 1700 TWh, mis näitab rohelse vesiniku suurejoonelist kasutuselevõttu.

### 2.1 Fossiilkütustest vesiniku tootmise tehnoloogiad

Vesiniku tootmisviisid jagunevad peamiselt kaheks: CO<sub>2</sub>-vabaks või CO<sub>2</sub>-eraldavaks. Fossiilkütuste abil vesiniku tootmine eraldab süsihappegaasi. [6] Fossiilkütustest on võimalik toota vesinikku fossiilkütuste auru reformimise (*SMR*), autotermaalreformimise (*ATR*) ja osalise oksüdatsiooni teel (*POX*). Maagaas sisaldab endas metaani ehk CH<sub>4</sub> ühendeid, mida kasutatakse ära erinevates termilistes protsessides. Näiteks kasutatakse maagaasist auru reformimise teel 700 - 1000°C temperatuuriga auru. Katalüsaatori abil reageerib veeaur koos metaaniga 3 - 25-baarise surve all, mille tulemusena toimub endotermiline reaktsioon, kus metaan ja vesi muundatakse süsinikoksiidiks ja vesinikgaasiks. [7]

Auruga reageerimise reaktsioon on kirjeldatav järgneva valemiga:



Pärast reaktsiooni toimub uus reaktsioon ehk vesi-gaas nihkereaktsioon, mille tulemusel muudetakse saadud süsinikoksiid koos veega vesinikgaasiks ja süsihappegaasiks. Vesi-

gaas nihkereaktsiooni abil kasutatakse ära ülejäänud vesi ja süsinikoksiid, mis võimaldab toota saadustest rohkem vesinikku. [7]

Vesi-gaas nihkereaktsiooni kirjeldav valem:



Protsessi viimase sammuna eemaldatakse süsinikdioksiid ja erinevad saasteained gaasivoost, jättes lõppsaaduseks puhta vesiniku. Osalise oksüdatsiooni korral reageerib metaan piiratud koguses hapniku ehk õhuga. Reaktsiooni tulemusena tekib saadusteks samuti süsinikoksiid ja vesinikgaas ning reaktsiooni käigu eraldub soojust ehk tegemist on eksotermilise protsessiga. Ka siinkorral toimub saadud CO ja H<sub>2</sub> ühenditega vesi-gaas nihkereaktsioon. Võrreldes osalise oksüdatsiooni protsessi auru reformimise protsessiga, on osalise oksüdatsiooni protsess kiirem, mistõttu kasutatakse selles väiksemaid reaktorinumaid. Negatiivseks küljeks selle protsessi puhul võrreldes auru reformimise protsessiga on väiksem vesiniku tootmisühik sisendkütuse kohta. [7] Autotermaalreformimise protsessi korral luuakse sünteesgaas osalise oksüdatsiooni ja auru reformimise meetodite kombinatsiooni kaudu. Näiteks segatakse maagaas veeauruga ning suunatakse edasi reaktorisse. Reaktoris leiab aset metaani ja hapniku vaheline osaline oksüdatsioon. Antud protsessi viiakse läbi kõrgetel temperatuuridel nagu 900 - 1050°C ning rõhu all, mis on vahemikus 30 – 100 baari. Erinevalt auru reformimise meetodist, ei vaja autotermaalreformimise meetod lisasoojust väljastpoolt, vaid suudab enda toodetud soojusega protsessid lõpuni viia. Tänu sellele omadusele ei lähe ATR tehnoloogia puhul soojus raisku ning seda taaskasutatakse rohkem kõrge temperatuuriga auru tekitamiseks. [8]

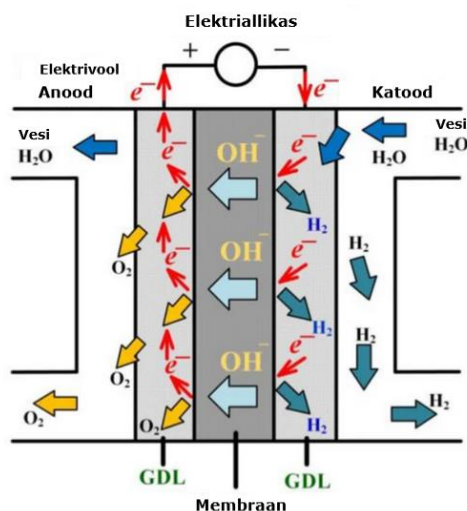
## 2.2 Elektrolüüseriga vesiniku tootmise tehnoloogiad

Elektrolüüseriga vesiniku tootmisel kasutatakse elektrit, et lõhestada veemolekul vesinikuks ning hapnikuks [9]. Elektrolüüser koosneb kahest elektroodist, anoodist ehk positiivsest elektroodist kui ka katoodist ehk negatiivsest elektroodist. Elektrolüüt eraldab anoodi ning katoodi. Elektrivoolu tõttu hakkab elektrolüüseris vesi elektroodidega reageerima, mille lõpptulemusena suudetakse vesinikgaas H<sub>2</sub> veest eraldada. [6] Elektrolüüseri tehnoloogiaid võib jaotada peamiselt kolmeks: aluseliseks elektrolüüseriks, prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseriks ning tahkeoksiid-elektrolüüseriks. Nende tehnoloogiate abil on võimalik toota rohelist vesinikku taastuenergiaallikatest.

## 2.2.1 Aluseline elektrolüüser

Aluselise elektrolüüseri (*Alkine electrolyzer or AE*) tehnoloogia on maailmas enim kasutatud elektrolüüsertehnoloogia. Tehnoloogia valmiduse skaalal (TVT) on aluseline elektrolüüser üheksandal tasemel [10]. TVT üheksas tase näitab, et AE suudab toimida töökeskkonnas ehk tehnoloogiat on reaalses töökeskkonnas testitud ning see on toimiv koos riist- või tarkvaraga. Samuti on TVT üheksandal tasemel tehnoloogia kogu dokumentatsioon kättesaadav. [11] AE-tehnoloogia puhul kasutatakse elektrolüüdina kaalium- või naatriumhüdroksiidi. [12]

Selle tehnoloogia puhul toimub vee lõhustumine katoodil, kus vee reageerimisel katoodil moodustatakse vesinikgaas  $H_2$  ning hüdroksiidioonid  $OH^-$ . Joonisel 2.1 liiguvad katoodil tekitatud hüdroksiidioonid  $OH^-$  läbi lahuse anoodile, kus leiab aset oksüdatsioonireaktsioon, mille tulemusena moodustatakse hapnikumolekul  $O_2$ .



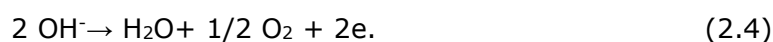
Joonis 2.1 Aluselise elektrolüüseri tööprintsip [13]

Katoodil toimuv reaktsioon on nähtaval valemis 2.3. Lisaks kirjeldab anoodi reaktsiooni valem 2.4, kus on näha, et lisaks vee ning hapnikumolekulidele tekib juurde ka kaks elektroni. [13] AE-tehnoloogia puhul koosneb anood metallilisest niklist ning katood kroom-nikkel terasest [2]. Aluselise elektrolüüseri hinnanguliseks tootmiskuluks peetakse 2,33 - 6,66 € ühe kg vesiniku kohta [12].

Katoodil [10] toimuva reaktsiooni valem:



Anoodil [10] toimuva reaktsiooni valem:

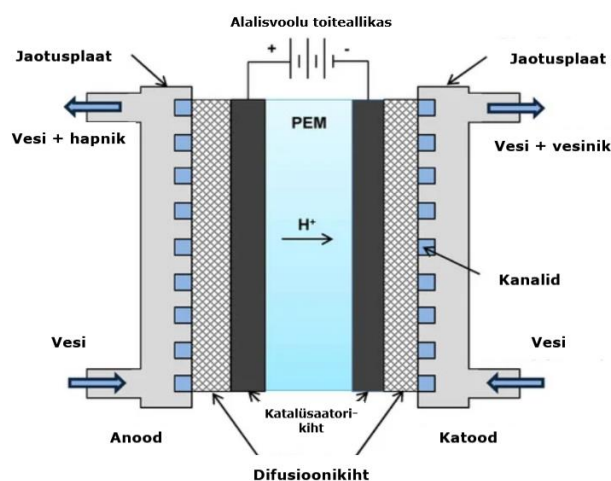


Tehnoloogilised nüansid on järgmised [12]:

- AE tehnoloogial on võrreldes teiste elektrolüüserite tehnoloogiatega madalad kapitalikulud;
- KOH (kaaliumhüdroksiid) või NaOH (naatriumhüdroksiid) vesilahuseid kasutatakse elektrolüüdina, mis nõuavad pidevat väljavahetamist;
- AE kasutatakse väetise- ja klooritööstustes;
- aluselise elektrolüüseri eluiga jääb vahemikku 60 000 - 90 000 tundi;
- tehnoloogia käivitusae on 60 minutit;
- madal töötemperatuur [14];
- madal voolutihedus 0,6 - 1 A/cm<sup>2</sup> [14].

## 2.2.2 Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüser

Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseri (*Proton Exchange membrane or PEM*) tehnoloogia puhul kasutatakse elektrolüüdina kindlat tüüpi plastilist materjali [9]. TVT skaalal on PEM-tehnoloogia sarnaselt AE-tehnoloogiaga üheksandal tasemel. [10] Joonisel 2.2 on kujutatud prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseri tehnoloogia toimimine.



Joonis 2.2. Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseri skeem [15]

Joonisel 2.2 on näha, et anoodile suunatakse vesi, mille molekulid lõhustatakse kaheks järgnevaks aatomiks: vesiniku ning hapniku osadeks. Antud keemilist reaktsiooni kirjeldab valem 2.5. Valemist on näha, et vesi oksüdeerub koostoimel hapnikuga, mille tulemusena saadakse vesinik ning eralduvad elektronid.

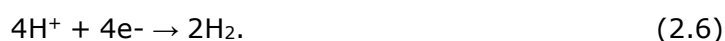


Anoodil [10] toimuv reaktsioon:



Oksüdeerumise protsessi käigus kaotavad veemolekulid elektrone. Katalüsaatori ülesanne on antud protsessi kiirendada. Positiivsed vesiniku  $\text{H}^+$  prootonid liiguvad läbi elektrolüüdi katoodi poole. Vooluringi abil liiguvad ka elektronid katoodi poolele, kus nad koos positiivsete vesinikuprootonitega vesinikgaasi  $\text{H}_2$  moodustavad. Katoodil toimuv reaktsioon on kirjeldatud valemiga 2.6. [15]

Katoodil [10] toimuv reaktsioon:



PEM-elektrolüüseri hinnanguline tootmiskulu on 3,62 €/kg. PEM-tehnoloogia nüansid on järgmised [12]:

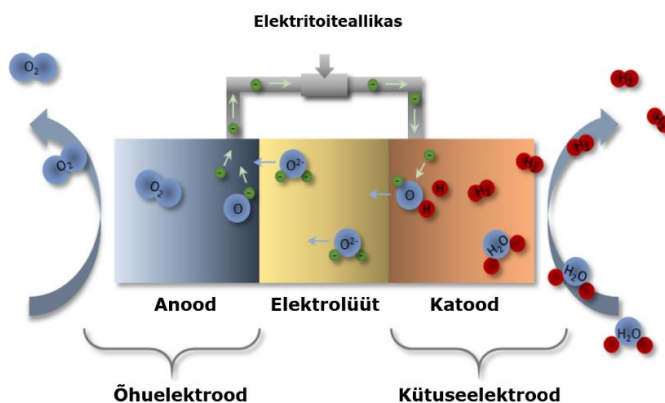
- PEM-tehnoloogia on kallis, selle kapitalikulud on kõrged, sest elektroodidena kasutatakse plaatina ja iriidumi;
- PEM-tehnoloogias on elektrolüüdina kasutusel polümeer, mida peetakse kasutajasõbralikuks;
- tehnoloogia eluiga jääb vahemikku 20 - 60 tuhat tundi;
- PEM-tehnoloogia käivitusae on ligi 15 minutit, mistõttu sobib see hästi taastuenergia kasutamiseks, suutes vastavalt taastuenergia olemasolule töötada;
- madal töötemperatuur, vähe müra [14];
- voolutihedus võib olla üle 2,0 A/cm<sup>2</sup> [14].

### 2.2.3 Tahkeoksiid-elektrolüüser

Tahkeoksiid-elektrolüüseri (*Solid oxide electrolysis cell or SOEC*) puhul kasutatakse elektrolüüdina tahkeid osakesi. [16] Võrreldes SOEC-tehnoloogiat AE- ja PEM- tehnoloogiatega, on tahkeoksiid-elektrolüüseri tehnoloogia TVT skaalal madalamal ehk seitsmendal tasemel. Antud tase näitab, et tehnoloogia või selle prototüüp on töökambris testitud ning peaaegu toimiv. Vajalik dokumentatsioon on piiratud mahus saadaval. [11]

Joonisel 2.3 on kujutatud SOEC tööfunktsiooni skeem. Selle elektrolüüseri puhul suunatakse aurustatud vesi anoodile. Anoodil tekib elektronide lisandumisel

veemolekulidest vesinikgaas  $H_2$  ja negatiivse laenguga hapnikuioonid  $O^{2-}$ . Reaktsiooni tulemusena liiguvad hapnikuioonid läbi tahke elektrolüüdi anoodile, kus oksüdatsiooniprotsessi käigus muudetakse need hapnikumolekulideks  $O_2$ . Elektrolüüsi lõpptulemusena saadakse vesinikgaas ning hapnikumolekul. [16]



Joonis 2.3 Tahkeoksiid-elektrolüüseri töörežiim [16]

Tahkeoksiid-elektrolüüseri hinnanguline tootmiskulu on 4,66 €/kg. Tehnoloogilised nüansid on järgmised [12]:

- võrreldes teiste tehnoloogiatega, kasutab SOEC odavaid materjale;
- elektriline efektiivsus on kõrge;
- elektrolüüdina kasutatakse tahkeid oksiide;
- võrreldes teiste tehnoloogiatega omab kõrget elektrilist efektiivsust;
- pikk käivitamis- ning väljalülitusaeg (60 minutit);
- väike volutihedus, kuni  $0,5 A/cm^2$  [14];
- tehnoloogia eluiga on lühike kõrge töötemperatuuri (600-700 °C) tõttu.

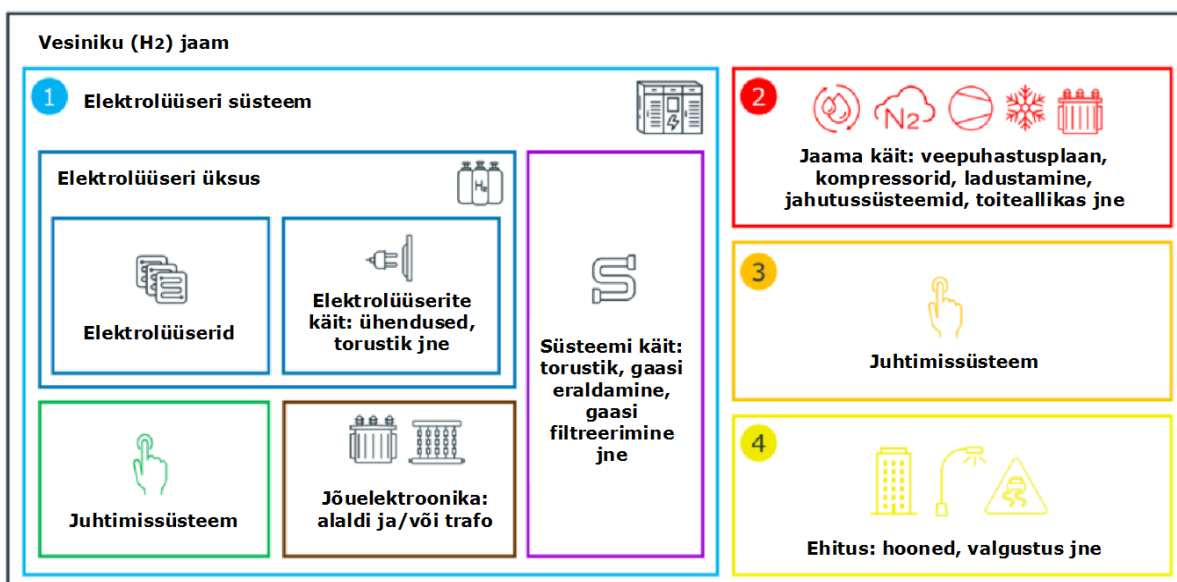
## 2.3 Vesinikjaamad

Joonisel 2.4 on kujutatud tavalise vesinikjaama ülesehitust. Vesinikjaam koosneb neljast peamisest plokist: elektrolüüseri süsteemist, jaama käidust, juhtimissüsteemist ning ehitusplokist. Elektrolüüseri süsteemis toimub elektrolüüsi protsess ning süsteem hõlmab endas omakorda nelja aspekti: elektrolüüserit ennast, süsteemi käitamist, juhtimissüsteemi ja jõuelektroonikat.

Elektrolüüseri üksus koosneb mitmest elektrolüüserist. Elektrolüüseri ülesandeks on eraldada vesinik ja hapnik veest keemilise reaktsiooni teel. Elektrolüüseriga koos käivad

erinevad pistikuühendused, torustikud ja muud elektrolüüseri käitamiseks vajalikud elemendid.

Elektrolüüseri üksusest väljaspool leiavad aset ka gaasi eraldamisprotsessid, selle filtreerimine ning suunamine. Seda kasutatakse AE-tehnoloogiate puhul, SOEC- ja PEM- tehnoloogiate puhul ei ole gaasi filtreerimine vajalik, sest protsessist saadavad vesinik ja hapnik on piisavalt puhtad. Samuti koosneb elektrolüüseri süsteem juhtimissüsteemist, kus juhitakse elektrolüüsi protsessi, ning jõuelektroonikast ehk alalditest ja trafodest. Elektrolüüseri kontrollsüsteemiga juhitakse gaasisensorite või muude turvasüsteemide olekut, kasutades nii PLC („Programmable Logic Controller“) kui ka SCADA („Supervisory Control and Data Acquisition“) programme. Iga elektrolüüseriga üksus on koos ühe alaldi või trafoga, et muuta vahelduvvool alalisvooluks.



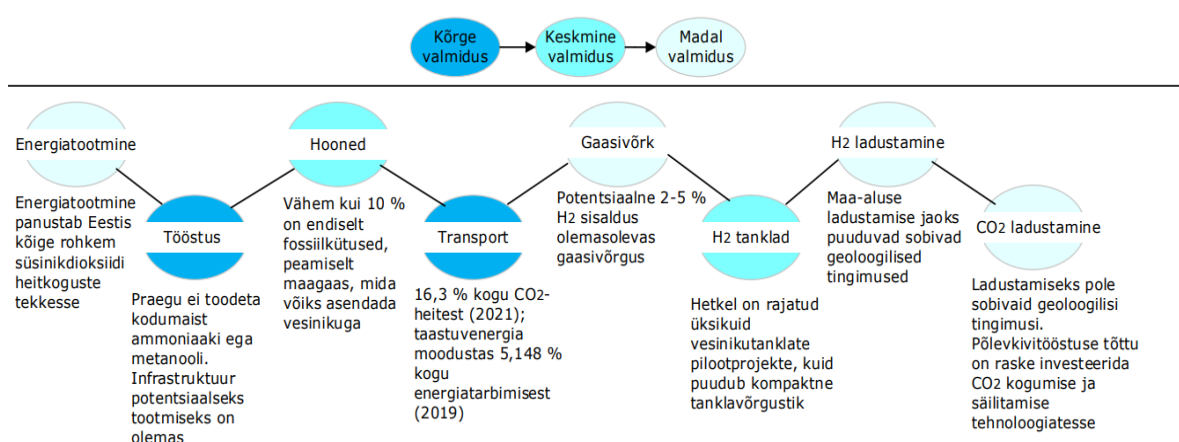
Joonis 2.4 Vesinikjaama neli peamist komponentide valdkonda [14]

Jaama käidu alla kuulub vesiniku ladustamine, erinevad jahutussüsteemid, kompressorid, vee puhastamine, soojusvahetid, pumbad jms. Jaama üheks olulisemaks osaks on kompressorid. Nende abil tõstetakse rõhku, et vesiniku ruumala vähendada, mis tagab vesiniku hõlpsama ladustamise ja transportimise. Jahutussüsteeme kasutatakse elektrolüüsi protsessis. Kompressoreid kasutatakse, et vähendada kuumust ning kaitsta elektrolüüserit suurte kahjustuste eest.

Elektrolüüserivälise juhtimissüsteemiga kontrollitakse muid jaama käitamisega seotud elemente, et automatiseerida jaama tööd ning vähendada inimeste sekkumist jaama töösse. Ehituse all mõistetakse nii jaama vundamenti, hooneid, valgustust kui ka jaama juurdepääsu teedehitust. [14]

## 2.4 Vesiniku tootmise kasutusala ja aspektid Eestis

Tänapäeval ei ole Eestis olemas vesiniku tootmise ega tarbimise turgu [17]. Eestis on olemas paar vesinikautot, ent vesinikutanklad puuduvad, mis näitab, et vesinikutehnoloogia ei ole Eestis veel laiahaardeliselt kasutusel. Keskkonnaministeerium on koostöös Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumiga läbi viinud mitmeid uuringuid, analüüsid vesiniku kasutuselevõtu erinevaid aspekte Eestis. „Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüs“ dokumendis on kajastatud joonis 2.5 Jooniselt paistab silma, et kõige kõrgema valmidusega valdkonnad, kus saaks vesinikku toota, on nii transpordi- kui ka tööstusvaldkond.



Joonis 2.5 Eesti Hetkeolukorra kaardistus – üldine vesiniku kasutuse valmisolek [12]

Joonisel 2.5 on märgitud, et tööstusvaldkonnas vesiniku kasutuselevõtuks on infrastruktuur ammoniaagi kui ka metanooli potentsiaalseks tootmiseks Eestis olemas. Seetõttu on tööstusvaldkonnas vesiniku rakendamine kõrge valmidusega. Joonisel 2.5 on näha, et veel üks kõrge valmidusega valdkond, kus saab vesinikku kasutada, on transport. Transpordi valdkonna CO<sub>2</sub> heited moodustasid 16,3 % kogu Eesti süsihappegaasi heitmetest 2021. aastal [12]. Seoses rohepöördega tekib vajadus fossiilkütustel põhinevad sõidukid turult eemaldada. Antud nõue soodustab nii elektriautode kui ka vesinikautode kasutuselevõtu potentsiaali Eestis. Samuti on joonisel välja toodud, et Eesti energeetikavaldkonnas on madal valmidus vesiniku kasutuselevõtuks. Antud põhjuseks on Eestis enamasti fossiilkütustel ehk põlevkivielektrijaamadel põhinev elektri tootmine. Põlevkivienergiast loobumisel peab Eesti leidma kõige optimaalsema energiaallika, millel ei ole süsihappegaasi heitmeid. Taastuenergia ei ole stabiilne energiaallikas, mistõttu tuleb kaaluda erinevaid salvestamisvõimalusi, et tagada tootmise ja tarbimise tasakaal. Fossiilkütuselt taastuenergiale üleminek võtab aega, mistõttu on energeetikavaldkond joonisel 2.5 madala valmidusega.

## 2.4.1 Vesiniku omahind

On teostatud uuringuid, et hinnata kui suureks kujuneb vesiniku tootmishind Eestis. Tänapäeval hinnatakse päikeseparkides vesiniku tootmishinnaks 4,5 – 5,2 €/kg, aastaks 2030 ennustatakse soodsaimaks vesiniku omahinnaks Eestis 3,4 – 4,2 €/kg. Maailmaturul arvatakse, et rohelise vesiniku hind jääb 1,2 – 4,1 €/kg vahemikku. [12] Selleks, et Eestis toodetud vesinik suudaks konkureerida maailmaturul oleva vesinikuga, peab Eestis toodetud vesiniku omahind jääma samasugusesse piiridesse nagu mujal maailmas - mida madalam on Eestis toodetud rohelise vesiniku omahind, seda konkurentsivõimelisem on see Euroopa turul.

Rohelise vesiniku tootmine on kallis, olles tänapäeval umbkaudu neli kuni viis korda kallim fossiilkütustest toodetud vesiniku hinnast. Aastaks 2030 ennustatakse, et vesiniku tootmishind on kaks kuni kolm korda kallim tänaolevatest fossiilkütustest toodetud vesiniku tootmishinnast. „Eesti vesiniku teekaart“ dokumendis [17] on välja toodud, kuidas elektrolüüseriga vesiniku tootmishind sõltub suuresti taastuenergia allikate tootmise elektri hinnast. Dokumentides on omahinna analüüsid tehtud sõltuvuses kindlast taastuenergiaallikast, ent puudub kombineeritud taastuenergiaallikatega ülevaade vesiniku omahinnast. Samuti on välja arvatud vesiniku tootmishind, kuid vesiniku tootmise tasuvuspunkt on jäetud leidmata ning analüüsimata.

## 2.4.2 Vesiniku ladustamine

Eestis on läbi viidud erinevaid analüüse vesiniku hoiustamise kohta energeetikasektoris. Nimelt on hiljaaegu „Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüs“ [12] dokumendis välja toodud, et Eesti riik ei suuda vesinikku pikaajaliselt ladustada, sest puuduvad selle jaoks maa-alused soolakoopad ja muud sobivad geoloogilised tingimused. Juhul kui peaks Eestis vesinikku pikaajaliselt ladustama, oleks selleks parim koht vesiniku tootmiskoha lähedal, näiteks on „Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüs“ dokumendis välja toodud üheks vesiniku ladustamiskohaks Paldiski tuulepargi territoorium. Teise variandina on võimalik luua vesiniku ladustamispaik vanade põlevkivikaevanduste juurde, kus on lihtsam ning ohutum ladustada suurtes kogustes rohelist vesinikku ning mille geoloogilised tingimused sarnanevad kõige enim tavapäraselt vesiniku hooajaliseks ladustamiseks kasutatavate soolakoobastega.

Lähtudes sellest on mõistlik vesinikku lühiajaliselt ladustada, näiteks tööstuses. Lühiajaliselt saab vesinikku hoiustada mitmel viisil: suruõhuga, vedeliku kujul või „külmpressitud“ gaasina [18]. Üks viis vesiniku hoiustamiseks on kõrge rõhu all, et vesinikgaasi ruumala vähendada. Vesinikgaasi H<sub>2</sub> ruumala on maagaasi ruumalast neli korda suurem. [19] Vastavalt vesiniku hoiustamisel suruõhuga saab antud meetodit hoiustamisanuma järgi jagada erinevateks tüüpideks:

1. Tüüp I: anum on valmistatud metallist ning vesinikgaasi ladustatakse 175 – 200 baari all;
2. Tüüp II: anum koosneb pooleldi filamendiga kaetud silindrist ning vesinikgaasi ladustatakse 263 – 300 baari surve all;
3. Tüüp III: anum koosneb täielikult filamendiga kaetud silindrist ning on 25 – 75 % kergemad kui I ja II tüüpi anumad, taludes survet kuni 450 baarini;
4. Tüüp IV: anum on valmistatud plastikvoodriga mähitud silindrist, olles kerge, vastupidav, pika elueaga ning taludes rõhku kuni 1000 baarini. [19]

I kui ka II tüüpi anumad kasutatakse vesinikgaasi hoiustamiseks tööstustes. Transpordisektori jaoks on I ja II tüüpi surveanumad liiga rasked ning sõidukites kasutatakse III ja IV tüüpi surveanumaid. [19] Peamiseks erinevuseks on kõikide erinevate tüüpide puhul õhurõhk.

Vesiniku hoiustamist vedeliku kujul kasutatakse selleks, et tagada turvalisem ja kompaktsem vesiniku ladustamine. Selle meetodi puhul tuleb kõigepealt vesinik vedelikuks muundada -253 °C juures. Seejärel suunatakse vesinikvedelik edasi konteineritesse, kus vesinikku hoiustatakse umbes 250 - 350 baari juures. Vesiniku hoiustamisel kasutatakse isoleeritud krüogeenseid ehk madalal temperatuuril surveanumaid soojuskadude vähendamiseks. Siinkohal tuleb tähelepanu pöörata hoiustamistemperatuurile, sest üle kriitilise piiri minnes ei ole vesinik enam vedeliku kujul. [19]

Kolmandaks ladustamismeetodiks kasutatakse külmpressitud vesinikku või teisisõnu ka krüopressitud vesinikku. Vesiniku hoiustamisanum on isoleeritud ning on võimeline taluma kõrget rõhku ning krüogeenseid temperatuure. Enda kõrge rõhu taluvuse tõttu on rõhu suurenemine anuma sees väiksel määral lubatud. [19] Selle meetodi puhul pumbatakse vedel vesinik läbi vaakumiga isoleeritud torustiku, kus surutakse vesinik 850 baari rõhu alla. Enne metallist krüosurveanumasse suunamist, jahutatakse vesinikku jäätumistemperatuurini, et suruda vesinik rohkem kokku ning suurendada vesiniku hoiustamistihedust. [20]

### 2.4.3 Vesinik transpordis

Eestis moodustab umbes 25 % tarbitud energiast transpordisektorist. 2019. aastal oli transpordisektorist tarbitud elektrienergia suurus hulk 56 GWh. Sellel aastal moodustasid transpordisektorist atmosfääri paiskunud kasvuhoonegaasid 16,3 % kogu Eesti heitmetest. Rohelist vesinikku on võimalik kasutada sõidukites, mis on vesiniku kasutusaladest kõige suurema potentsiaaliga. Eestis võiks vesinik transpordis kasutust leida just mere- ja maanteetranspordis. [12]

Kõige suuremaks takistuseks autode üleminekul vesinikkütusele peetakse vesinikutanklate puudumist [12]. Vesiniku tanklavõrgustike loomisel tuleb arvestada vesiniku tootmise, salvestamise kui ka transportimise taristuga. Lähim vesinikutankla Eestile asub Lätis. Hetkel ei ole Eestis ühtegi vesinikutanklat, ent Utilitas Eesti AS ja UG Investments teevad koostööd, et luua Tallinnasse kaks vesinikutanklat ühistranspordi üleviimiseks vesinikkütusele. Antud projekti tähtajaks on 2024. aasta. [17]

Võrreldes elektriautosid vesinikautodega, suudavad vesinikautod ise elektrit toota. Vesinikautodel elektritoide ei tule akudest, vaid kütuseelement muundab vesiniku elektrienergiaks. Vesinikautodes kasutatakse n-ö tagurpidi elektrolüüsi protsessi, kus sisendiks on vesinik ja hapnik ning reaktsiooni tulemusena saadakse nii elektrienergiat, soojust kui ka vett. Kütuselemendis toodetud elekter võib liikuda kahel erineval moel edasi. Elektrit võib edasi suunata mootorisse, mis annab autole kohese toite või elekter suunatakse edasi akusse, kust võetakse toidet auto jaoks. Selle jaoks kasutatav aku on väiksem kui elektriautodel.

Vesinikautode eeliseks on heitmetevaba transport kui ka lühem aku laadimisaeg kui elektriautodel, võttes ainult kolm kuni neli minutit vesinikupaagi laadimiseks. Ühe laadimisega on võimalik vesinikautodega sõita ligi 500 km kaugusele ning sõidukaugus ei sõltu välistemperatuurist. [21] Autodes kasutatavat vesinikku on võimalik tanklatesse transportida veokites või läbi gaasitorustiku. Eestis on olemasolev gaasi ülekandevõrgustik, mis koosneb 977,4 km pikkusest gaasitorustikust, 36 gaasijaotusjaamast ning kolmest gaasimõõtejaamast. Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et vesinikuühendid erinevad maagaasiühenditest, mistõttu on ülekandetorustiku seadmetel suurem korrosiooni-, plahvatus- ja põlemisrisk. [12]

Euroopa Liidus on kokku tulnud 31 gaasi ülekandesüsteemi haldurit, et luua visioon turvalise ja töökindla keskkonna vesiniku transportimiseks juba olemasolevatesse

gaasitorustike süsteemi. Seda projekti nimetatakse ka Euroopa vesiniku selgrooks (inglise keeles „*European Hydrogen Backbone*“). Ühendades nende 31 Euroopa riigi gaasitorustiku süsteemid kokku, saadakse üks terviklik 53 000 km pikkune süsteem vesiniku transportimiseks. Antud süsteem koosneb n-ö viiest koridorist [5]:

- Lõuna-Euroopa koridor;
  - Vesinik transporditakse Tuneesiast Kesk-Euroopasse läbi Itaalia, Slovakkia ja Tšehhi
- Portugali, Hispaaniat ja Prantsusmaad ühendava koridor;
  - Võimalik on vesinikutorusid ühendada ka Aafrika mandriga, kus torud algavad Aafrika mandrilt ning lõppevad Saksamaal
- Põhjamere koridor;
  - Meretuulest saadud vesinik transporditakse läbi Madalmaade, Belgia, Prantsusmaa ning ühendatakse Saksamaaga
- Läänemere koridor;
  - Ühendab omavahel nii Põhja- ja Baltimaad kui ka Poolat, tuginedes tööstusharudele – regioon koosneb enamasti uutest valminud torudest
- Lõuna/Ida-Euroopa koridor.
  - Ühendab omavahel Kesk-Euroopa koos Rumeenia, Ukraina ja Kreekaga, kust toodetakse vesinikku päikesest ja tuulest

Eestis osaleb ettevõtte Elering AS Euroopa vesiniku selgroo projektis. Üle-euroopaline vesinikutorustik annab Eestile võimaluse toodetud vesinikku välisriikidesse eksportida. Projektiga alustati 2021. aasta septembris ning valmimisajaks ennustatakse 2029. aastat. [5]

#### **2.4.4 Vesinik energeetikas**

Dokumendi „Eesti vesiniku teekaardi 2021 - 2050 ettepanek“ kohaselt on Eestis suur potentsiaal toota vesinikku, võttes arvesse meretuuleparkide rajamisplaane [22]. Eestis on suur meretuuleenergia potentsiaal, mille kaudu on võimalik vähendada fossiilkütuste osakaalu Eesti energiaportfellis. Samuti madaldavad meretuulepargid elektrihinda, luues optimaalsed tingimused roheline vesiniku tootmiseks Eestis. Heitmetevaba vesinikku on võimalik toota elektrolüüsi abil taastuenergiast, aga elektrolüüseriga toodetud vesinikku saab kasutada ka salvestina. Vesinikusalvesti ei osutu aga tasuvaks, sest sellel on suured energiakaod.



Elektrolüüseriga vesiniku tootmist kasutatakse ajahetkedel, mil taastuenergia allikate toodangu osakaal ületab tarbimist. Vesiniku tootmine ületoodangu hetkedel aitab hoida tootmise ja tarbimise tasakaalu. Toodeitud vesinikku on võimalik ära kasutada toodangu puudujääkide katmiseks.

Nimelt on vesinikust võimalik elektrit tagasi toota kütuselementide abil, mille jaoks piisab vesiniku- ja hapnikuühenditest. Kütuseelementide suureks plussiks on see, et neid on võimalik kasutada kohtades, mis ei ole põhivõrguga ühendatud. Seega on elektrolüüseriga vesiniku tootmine optimaalne lahendus tarbimisgraafiku vajaduste lahendamiseks mikrovõrkudes, kus puudub ühendus põhivõrguga. [23]

Vesinikutehnoloogiate integreerimisel, tehnoloogia edasiarendamisel ning vesiniku tarneahela välja kujunemisel hakkab vesiniku tootmishind ajas langema. Selle tulemusena leitakse vesinikus suurt potentsiaali energeetikas avariitoite dekarboniseerimisel. Samuti on käsil ka võrguvälistele ja reservvõimsuse rakendustele turu kavandamine, kus asendatakse fossiilkütustel baseeruvad elektrigeneraatorid kütuseelementidega. [24]

## **2.4.5 Vesinik tööstuses**

Keemiatööstustes kasutatakse tootmisprotsessides vesinikku laiaulatuslikult, näiteks metanooli, vesinikkloriidhappe ja ammoniaagi tootmisel ning metalli töötlemisel. Enamasti toodetakse 90 % kogu maailma toodetavast vesinikust ammoniaagi ja metanooli tootmisel „hallist“ vesinikust ehk fossiilkütustest saadud vesinikust. Nõudlus CO<sub>2</sub>-vaba tööstusele aitab kiirendada „rohelise“ vesiniku kasutuselevõttu kui ka tehnoloogiate edasiarendust. [12] Umbkaudu 95 % tehastes toodetud vesinikust kasutatakse kohapeal ära, sest nii vesiniku kokkusurumine kui ka transportimine on väga energiamahukas [2].

Eestis on varasemalt vesinikku mineraalväetise kasutamiseks tootnud tööstusettevõtte Nitrofert AS. Kuigi Nitrofert AS eksisteerib endiselt, ei tooda ettevõtte enam tööstuslikke tooteid. [17]. Praegu tegutsevad turul üksikud ettevõtted, kes Sillamäel ammoniaagi tootmisega tegelevad, näiteks rahvusvaheline ettevõtte EuroChem [25]. Täna puudub Eestis suurejooneline tööstuskultuur, mistõttu enamik vajalikest toorainetest imporditakse Venemaalt. Ammoniaagil põhinevaid lämmastikväetisi, mineraale või

kemikaale imporditi 2018. aastal Eestisse 390 798 tonni, kus puhta ammoniaagi sisaldus moodustas 5 470 tonni [12].

Sõda Ukrainas on toonud endaga kaasa ammoniaagi nappuse ja kõrge hinna. Aastatel 2017 - 2020 oli ammoniaagi hind umbes 200 - 400 US dollarit tonni kohta, ent aastal 2022 ulatus hetkeliselt ammoniaagi hind 1 300 dollarini. Selle tõttu on kujunenud arvamus, et tulevikus võib ammoniaagi roheline tootmine Eestis odavamaks kujuneda, kui seda sisse ostes. [26] Praegu puuduvad täpsed uuringud, kuidas ammoniaagi tootmise hind Eestis välja kujuneks. Tabelis 2.1 on kujutatud Eestisse imporditud ammoniaagi väärtus eurodes kui ka netomass kilogrammides. Tabelis 2.1 kujutatud andmed põhinevad 2019., 2022. ja 2023. aastal.

Tabel 2.1 Statistikaameti andmebaas Eestis ammoniaagi impordist [27]

			Kauba väärtus, €			Kauba netomass, kg		
			2019	2022	2023	2019	2022	2023
Import päritolu riigi järgi	Ammoniaak, veevaba või vesilahusena	Kokku	856 578	2 670 083	1 078 368	5 725 035	4 795 185	3 851 344
	Veevaba ammoniaak		17 988	32 703	52 034	14 047	10 309	21 561
	Ammoniaagi vesilahus		838 590	2 637 380	1 026 334	5 710 988	4 784 876	3 829 783

Aastal 2022 oli ammoniaagi vesilahuse hind 550 eurot tonni kohta, kuid 2023. aastal langes hind tagasi 268-le eurole tonni kohta. Võrreldes Eestisse imporditud ammoniaagi kogust ning hinda viimase viie aasta jooksul, jääb silma, et ammoniaaki on 2023. aastal pea 2 000 tonni vähem imporditud kui 2019. aastal. Suure tõenäosusega on muutus tingitud ammoniaagi hinna kallinemisest. Seda kinnitab asjaolu, et aastal 2019. maksis ammoniaak umbes 150 eurot tonni kohta ning aastal 2023 oli tonni hind kahekordistunud ehk tõusnud 280-euroni.

2024. aastal on ilmunud mitmeid uudiseid, kuidas erinevad ettevõtjad kavatsevad Eestisse vesinikul põhinevaid tööstusi luua. 2024. aasta märtsis käivitas ettevõtte Eesti Energia plastikeemia tehase ehitamiseks ettevalmistused, alustades tehase põhiprojekterimisega Auvere piirkonnas, kus tehase tooraineks on vesinik. [28] Samuti plaanivad välisinvestorid ehitada Eestis Pärnusse tehast metanooli tootmiseks. Hollandi energiavaldkonna ettevõtte Power2X planeeritav tehas läheks maksma ligi miljard eurot ning planeeritav toodetava roheline metanooli kogus oleks 500 000 tonni aastas. Tehaste loomine arendaks edasi vesinikumajanduse kujunemist Eestis. [29]

## 3 Vesiniku tootmise tasuvusanalüüs

Lõputöö eesmärgiks on analüüsida elektrolüüseriga vesiniku tootmise majanduslikku tasuvust ja seda mõjutavaid tegureid Eestis. Töö keskpunktiks on elektrolüüseriga vesiniku tootmise tasuvusanalüüs. Tasuvusanalüüsi läbiviimiseks kasutatakse teabekirjandusest saadud informatsiooni, vesinikutehnoloogia käidukulud saadakse Taani Energiaagentuuri („Danish Energy Agency“) veebileheküljelt [32] ning tasuvusanalüüsi tulemuste võrdluses ja analüüsis kasutatakse ettevõtte Elering AS [33] poolt modelleeritud 2030., 2035., ja 2040. aasta elektri hindu Eesti kiire arengu (*Rapid Development*) stsenaariumi korral. Tasuvusanalüüsi kulude arvutamisel lähtutakse PEM-tehnoloogia elektrolüüserist. Valiku põhjuseks on tehnoloogia kiire käivitusaeg, mille tõttu on vesinikku taastuveni energiaga koos mugavam toota.

### 3.1 Uurimismetoodika

Töö eesmärgi saavutamiseks kasutatakse peamiselt kahte uurimismeetodit: teabekirjanduse kogumist ja tabelarvutuste tegemist programmis Microsoft Excel. Teabekirjanduse kogumisel uuritakse välja, mis on peamised kulud vesiniku tootmisel elektrolüüseriga, millistest allikatest on tootmisel võimalik tulu saada ning mis valemil alusel arvutatakse vesiniku tootmishind. Teabekirjandusest saadud informatsiooni rakendatakse edasi programmis Microsoft Excel, sest selles programmis on suurte andmemahitudega töötlemine kasutajasõbralik. Antud töös rakendatakse kvantitatiivset uurimismeetodit, kus analüüsitakse sisendina kasutatavat modelleeritud elektri hindade vastavust tasuvuspunktile [30].

Tasuvusanalüüs teostatakse kahes etapis. Esimeses osas arvutatakse välja vesiniku tootmishind vastavalt kuludele ning võrreldakse seda teabekirjanduses saadud tulemustega. Teises etapis võetakse soovitud vesiniku tootmise turuhind väljundiks ning seejärel analüüsitakse, millises suurusjärgus peaks olema elektrolüüseril tarbitav elektri börsihind. Tabelarvutuste põhjal leitakse tasuvuspunkt, mis hetkest alates tasub elektrolüüseriga vesiniku tootmine ennast majanduslikult ära. Tasuvusanalüüsi sooritamisele järgneb tulemuste analüüs, kus kaalutakse teooriaosa kui ka praktilise osa aspekte ning leitakse kõige optimaalsem lahendus, kui palju oleks Eestis mõistlik vesinikku toota.

## 3.2 Kaasnevad kulud

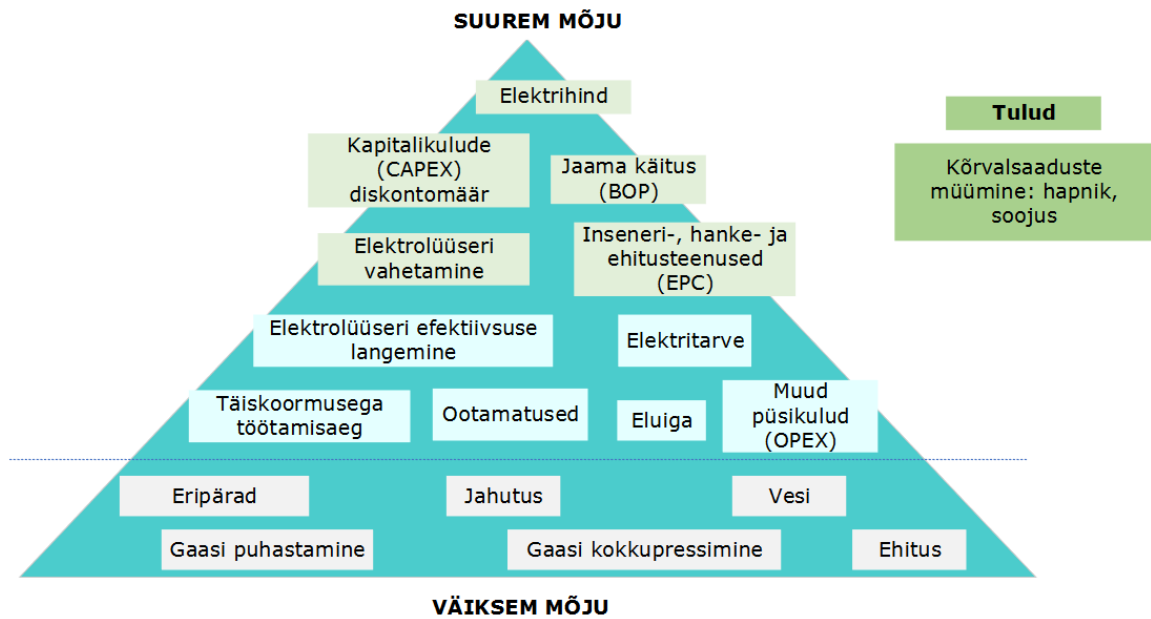
Elektrolüüseriga vesiniku tootmisjaama püstitamisel tuleb arvestada erinevate valdkondadega: elektrolüüseri süsteemiga, kontrollsüsteemiga, ehitusliku infrastruktuuriga ning vesinikjaama abisüsteemidega. Kõik need süsteemide maksumused kajastuvad vesiniku tootmishinnas. Enamik jaama kuludest kuulub kapitalikulude (*Capital Expenditure or CAPEX*) kulude alla. Hoolduskulud ja mittestabiilsed käidukulud lähevad püsikulude (*Operating Expenditure or OPEX*) kulude alla. Hinnates erinevate kuluallikate mõju vesiniku tootmishinnale, mõjutab elektrolüüsi elektri hind tootmishinda kõige enam.

Jooniselt 3.1 on toodud, et lisaks elektriinnale on CAPEXi diskontomääral, elektrolüüseri kulumisel ja väljavahetamisel suur kulu. Lisaks sellele mängib suurt rolli ka BOP (*Balance of Plant*) ehk jaama ülalpidamise kulud kui ka EPC (*Engineering, Procurement, Construction*) ehk inseneritöödega kaasnevad kulud. Kõige vähem mõjutab vesiniku tootmiskulu hoonete ehitusmaterjalid, samuti ka jahutus, gaasi puhastamise ning kokkusurumise kui ka elektrolüüsis kasutava vee maksumus. [31]

Joonisel 3.1 välja toodud EPC ehk *Engineering, Procurement, Construction* kulude alla loetakse tööjõudu, mis sisaldab endas elektrolüüseri ehitamist, detailset planeerimist, erinevaid paigaldustöid, hankeid ja muude protsessidega kaasnevaid töid. BOP kulude ehk *Balance of Plant* kulude alla loetakse vee jälgimise, pumpade, soojusvahetitega kui ka erinevaid parameetrite mõõteseadmetega kaasnevaid kulusid. Ootamatuste alla loetakse projektkulusid, mis pole kindlad ehk millega ei ole vesinikjaama planeerimisel arvestatud. Elektritarve kulude alla ei loeta elektri hind, vaid elektri kättesaadavusega kaasnevaid kulusid, näiteks jaotuskilpe, trafosid, kontrollsüsteeme jne, mis tagavad jaama ühenduse võrguga.

Antud joonisel ei ole arvestatud OPEX kulude alla elektri hind, sest elektri hind mõjutab vesinikjaama tootmishinda suurelt ning on seetõttu toodud suurima kulutegurina eraldi välja. Muude OPEX kulude alla lähevad süsteemide hoolduskulud. Püramiidi all olevas lahtris „vesi“ hinnatakse vee puhastamisega seotud kulusid, olenevalt vee koostisosadest. Püramiidi tipus on kajastatud vesinikjaama suurema mõjuga kulutegurid, püramiidi allosas on kujutatud vesinikjaama väiksema mõjuga kulutegurid.

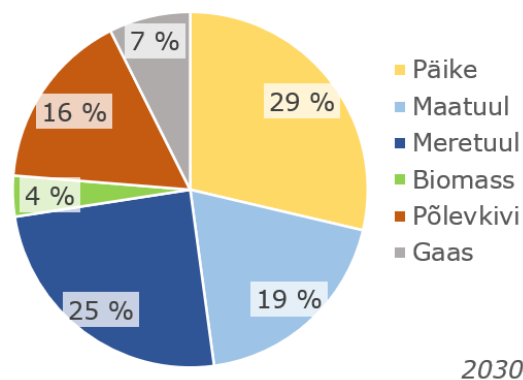
Tasuvusanalüüsi tehes arvestatakse jooniselt 3.1 välja toodud kuludega: elektri hinnaga, BOP kuludega, EPC kuludega, elektritarbe suurushulgaga, diskontomääraga, elueaga, OPEX kuludega, töötamisajaga, vee kasutamishulga ja sellega kaasnevate kuludega.



Joonis 3.1 Kulutegurite klassifitseerimine [31]

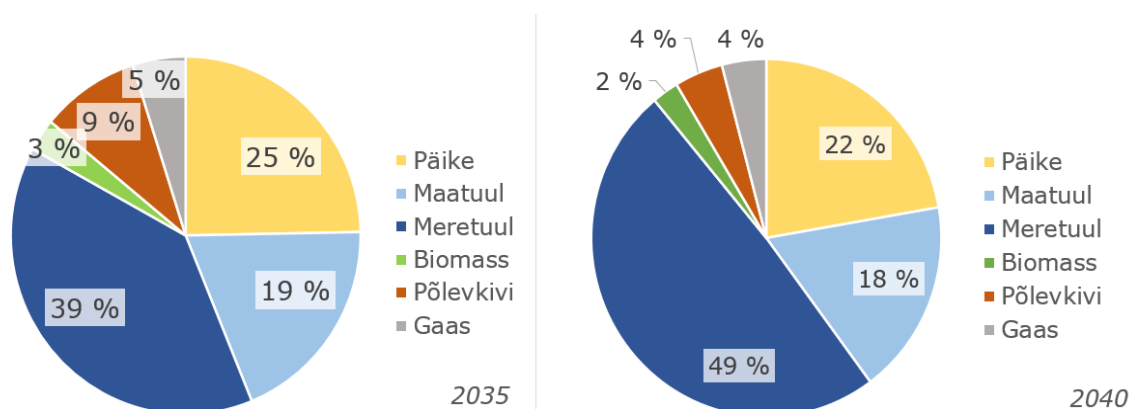
Töös ei võetud arvesse gaasi kokkusurumise ega puhastamisega kaasnevaid kulusid, sest PEM-tehnoloogia puhul ei ole vajalik gaasi puhastamine. Lisas 1 on välja toodud arvutuse puhul kasutatud elektrolüüseri peamised kulud, mis pärinevad Taani Energiaagentuuri veebilehelt [32]. Taani Energiaagentuur on teinud mitmeid tehnoloogilisi katalooge, kus on modelleeritud elektrolüüserite hindu ka tulevikuperspektiivis. Aasta 2035 andmed ei pärine antud veebileheküljelt, vaid on modelleeritud lineaarses sõltuvuses 2030. ja 2040. aastast lähtuvalt.

Tasuvusanalüüsi elektrihindade modelleerimisel kasutati Eleringi kiire arengu (*Rapid Development*) stsenaariumi korral joonisel 3.2 välja toodud tootmisallikaid. [33]



Joonis 3.2 Sisendina kasutatud modelleeritud elektrihindade tootmisüksuste osakaal 2035. ja 2040. aastal [33]

Aastal 2030 (joonis 3.3) on kõige suurema osakaaluga päikeseenergeetika 29 %-ga. Teisel kohal on meretuuleenergeetika ning kolmandal kohal on mandrituul 19 %-ga. Kõige väiksema osakaaluga on biomass.



Joonis 3.3. Sisendina kasutatud modelleeritud elektrihindade tootmisüksuste osakaal 2035. ja 2040. aastal [33]

2035. ja 2040. aasta elektrihindade modelleerimisel on kõige suurema osakaaluga meretuuleenergia (joonis 3.3). 2040. aasta elektrihindade puhul moodustab meretuul ligi 50 % kogu Eestis toodetavast elektrienergiast. Teisel kohal on päike ning kolmandale kohale jäävad tuulikud mandril. Võrreldes 2030. elektrihindade modelleerimiseks kasutatud tootmisüksusi 2040. aasta omadega, on põlevkivi tootmisprotsent langenud umbes neli korda. Tabelis 3.1 on välja toodud modelleerimisel kasutatud tootmisüksuste kogutoodang megavattides.

Tabel 3.1 Elektrihindade modelleerimiseks kasutatavad Eestis toodetavad tootmisvõimsused 2030., 2035. ja 2040. aastal [33]

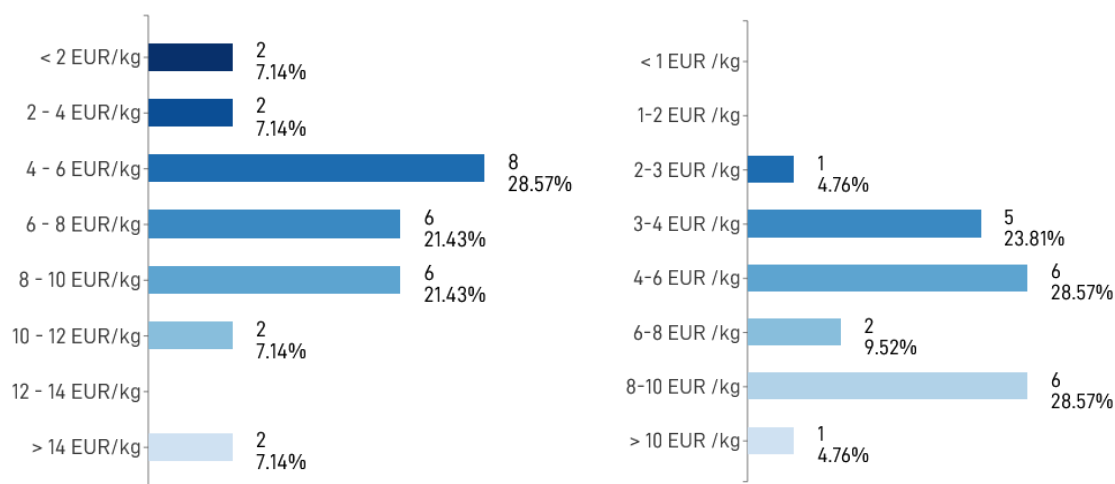
Aasta	2030	2035	2040
<b>Kogutootmisvõimsus, MW</b>	4 046	5 102	6 110

### 3.3 Saadavad tulud

Vesiniku tootmisel on võimalik tulusid saada kahest kohast: riigipoolsetest toetustest ning müügist saadud tuludest. Eesti riik plaanib rahastada erinevaid vesinikuprojekte 49,1 miljoni ulatuses aastaks 2026 [24]. Antud tasuvusanalüüsi läbiviimisel arvestati ainult müümisel saadavate tuludega, sest pole kindel, kui palju riigi poolt oleks võimalik toetust saada vesinikjaama ehitamisel. Elektrolüüseriga vesiniku tootmisel on võimalik saada tulu vesiniku ja hapniku turuhinna järgi. Vesinikgaasi tootmisel eraldub protsessi

käigus ka soojust, ent antud tasuvusanalüüsis soojuse müümise e ei arvestatud. Vesiniku turg on mitmekülgne, kus ühtset vesiniku turuhinda ei ole määratud. Vastavalt kasutusvaldkonnale kujuneb ka vesiniku müügihind.

*Statista* [34] andmebaasis hinnati 2021. aasta taastuvenergeetika kulused arvesse võttes vesiniku turu müügihinnaks 3,18 kuni 5,75 ameerika dollarit kilogrammi kohta ehk 2,95 kuni 5,34 €/kg. *Clean Hydrogen Partnership* [35] on kaardistanud *Hydrogen Valley* riikide vesiniku omahinnad ning ka müügihinnad protsentuaalselt. *Clean Hydrogen Partnership* uuringute kohaselt jääb Euroopa *Hydrogen Valley* toodangust 51,51 % kogu toodetud vesinikust müügihind vahemikku 3 – 6 €/kg [35]. Joonisel 3.4 on kujutatud *Hydrogen Valley* riikide PEM-tehnoloogia vesiniku tootmis- ja müügihind. Samuti on joonisel näidatud numbritena ja protsentuaalselt, kui mitu *Hydrogen Valley* riiki andsid sama vastuse.



Joonis 3.4 Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseriga vesiniku omahind (vasakul) ja müügihind (paremal) [35]

Joonisel 3.4 on välja toodud, et enamjaolt jääb PEM-elektrolüüseriga vesiniku omahind ka vahemikku 3 – 6 €/kg. Paremal oleval graafikul on märgata, kus vesiniku müügihind jääb peamiselt vahemikku 3 – 6 €/kg ning 8 – 10 €/kg. Antud jooniselt võib järeldada, et ühtset roheline vesiniku müügihinda ei eksisteeri, vaid hind kujuneb vastavalt lokaalsele vesiniku tootmishinnale. Selleks, et Eestis toodetud vesinik oleks konkurentsivõimeline, tuleb lähtuda madalamatest vesiniku müügihindadest.

Vesiniku hinnatav tootmishind Eestis on kallim kui mujal maailmas, mistõttu antud töös lähtutakse *Clean Hydrogen Partnership* andmebaasi ühest enimkasutatud keskmisest vesiniku müügihinnast 3 €/kg ja 6 €/kg. Antud väärtus 3 €/kg jääb ka *Statista* müügihinna vahemikku alampiiri poolele. Vesiniku oodatavale turuhinnale aastal 2030 lisatakse juurde ka hapniku müügihind.

Hapniku turuhind arvutatakse Statistikaametist saadud 2019. aastast tööstustoodangu järgi, kus hapnikku müüdi hinnaga 0,14 €/m<sup>3</sup> [27]. Hind teisendati €/kg kohta, jagades hapniku müügihinna hapniku tihedusega ning tulemuseks saadi 0,11 €/kg (ümardatult). Võrreldes 2009. ja 2015. aastaga, on hapniku hind ajas odavamaks kujunenud. Sellegipoolest on raske väita, kas hapniku hind läheb tulevikus odavamaks või muutub kallimaks suurema kasutamise vajaduse tõttu meditsiinis. Tasuvusanalüüsis kasutatakse 2019. aasta hapniku hindu. Vesiniku kui ka hapniku müügitulu kokku tuleb eeltoodud arvutuste põhjal 3,85 €/kg, sest ühe kg vesiniku tootmisel eraldub 8 kg hapnikku.

### 3.4 Tasuvuse arvutamine, valem

Tasuvuse arvutamiseks tuleb esmajoonel leida vesinikjaama tootmishind eurodes kilogrammi kohta. Inglise keeles nimetatakse vesiniku tootmishinda akronüümiga LCOH ehk *Levelized Cost of Hydrogen*. Arvutades välja Lisas 1 kajastatud Taani Energiaagentuuri PEM-elektrolüüseri andmete põhjal vesiniku tootmishind, valideeritakse sellega valemi õigsust [32].

Tulemust võrreldakse teabekirjanduses saadud andmetega. Vesiniku tootmishinna välja arvutamiseks tuleb liita kõik komponendid omavahel kokku: diskontomäär, CAPEX kulud, OPEX kulud ja elektri hinna kulud. Tasuvuse arvutamiseks kasutatakse alltoodud valemit [31].

$$LCOH = \frac{LHV}{\eta_{\text{süsteem}}} \left( \frac{\frac{i}{100} \left(1 + \frac{i}{100}\right)^n}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^n - 1} + \frac{OPEX}{100} \right) \frac{CAPEX}{T} + E, \quad (3.1)$$

kus  $LCOH$  – vesiniku tootmiskulud, €/kg,

$LHV$  – madalam kütteväärtus, kWh/kgH<sub>2</sub>,

$\eta_{\text{süsteem}}$  – süsteemi kasutegur,

$i$  – diskontomäär, %,

$OPEX$  – hoolduskulud, % · CAPEX/aasta,

$T$  – töötamisaeg aastas, tund,

$CAPEX$  – kapitaalkulud, €/kWh,



$E$  – elektri hind, €/kWh.

Tasuvuse arvutamisel on suure osakaaluga elektri hind. Töös on kasutatud 3.1 valemit, sest valemis on elektri hind OPEX kuludest eraldi sisse arvestatud, mistõttu on kergem valemit ümber tõsta ja hinnakomponenti antud valemi põhjal analüüsida. Lisas 1 välja toodud kulud teisendati ümber sobivateks ühikuteks ning kasutati valemis 3.1.

Valemist on näha, kuidas vesiniku tootmishinda lisaks elektri hinnale ka süsteemi kasutegur mõjutab. Suurema süsteemi kasuteguri puhul väheneb valemis sulgude ees kordaja, mistõttu ka ülejäänud korrutis muutub väiksemaks. Tulemuseks saadakse odavam LCOH hind.

3.1 valemi põhjal leiti Lisas 1 kasutatud majanduslike parameetrite abiga vesiniku tootmishind, milleks kujunes 2030. aasta keskmise hinna järgi 5,580 €/kg. Vesiniku tootmishinna arvutamisel koosnes elektri hind Elering AS poolt modelleeritud 2030. aasta keskmisest börsihinnast ja Elektrilevi OÜ modelleeritud võrgutasust 3,66 senti/kWh [36]. Arvutustel valiti diskontomääraks 1,5 %. Antud töös ei ole arvesse võetud müügi marginaali ega liitumistasusid. Lisaks sellele analüüsiti valemi 3.1 abil erinevate parameetrite (CAPEX, OPEX, jaama eluea, süsteemi kasuteguri) mõju rohelise vesiniku omahinnale.

Tasuvuspunkt leitakse hetkest, kus omahind on võrdeline müügi hinnaga ehk tulu on 0. Tasuvuspiiri leidmiseks tõstetakse valem 3.1 ümber, kus otsitavaks on nüüdsest elektri hind ning tulemuseks saadi valem 3.2. Siinkohal kasutatakse LCOH väärtuse asemel eeldatavat vesiniku müügi hindu ehk tulude summat.

$$E = \frac{LCOH \cdot \eta_{\text{süsteem}}}{LHV} - \left( \frac{\frac{i}{100} \cdot \left(1 + \frac{i}{100}\right)^n}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^n - 1} + \frac{OPEX}{100} \right) \frac{CAPEX}{T} \quad (3.2)$$

Valemit 3.2 kasutatakse rohelise vesiniku konkurentsivõimelisuse hindamisel fossiilkütustest saadud vesiniku omahindadega. Antud valem võimaldab välja arvutada keskmise elektri hinna, mis on vajalik soovitava rohelise vesiniku omahinna saavutamiseks. Antud valemiga saab arvutada elektri hindu, lähtudes rohelise vesiniku müügi hinnast või soovitavast omahinnast. Muutuvaks parameetriks valemis on LCOH.

Arvutused sooritati programmis Microsoft Excel. Tulemused on kajastatud peatükis 4 tabelite kujul. Valemi 3.2 tulemuseks saadud keskmist elektri hindu võrreldi Elering AS poolt saadud tunnipõhiste elektri hindadega, kus uuriti, mitu protsenti ajast on börsihinnad odavamad või võrdväärsed arvutatud keskmise elektri hinnaga.

## 4 Tulemuste analüüs

Tasuvusanalüüsi esimeses etapis arvatati vesiniku tootmishind vastavalt tootmisaastale, mis on kujutatud tabelis 4.1. Tabelis esitatud keskmine elektri hind põhineb 8496 tunni ehk 354. päeva jooksul. Tulemustes on arvestatud tingimusega, et jaam on aastas suletud üksteist päeva hooldustööde või muude katkestuste tõttu.

Arvutuste tegemisel [36] on lähtud Elektrilevi OÜ 2030. aasta modelleeritud võrgutasust. Tabelis 4.1 kujutatud LCOH hinna arvutamisel ei arvestata võrgutasu muutumisega ajas. Tegelik vesiniku LCOH hind võib ajas muutuda, kui muutuvad ka võrgutasud. Tabelis 4.1 on välja toodud keskmine börsihind ilma võrgutasudeta, et lihtsustada tabelis kajastatud andmeid lugejale. LCOH hind on tabelis välja arvutatud koos võrgutasudega. Arvutuste tegemisel kasutati valemit 3.1.

Tabel 4.1 Prootonvahetusmembraaniga tehnoloogiaga vesiniku omahinna (LCOH) arvutamine, kus sisendina on kasutatud modelleeritud 2030., 2035. ja 2040. aasta keskmisi elektri hindu

Aasta	2030	2035	2040
Keskmine börsihind [33], €/MWh	53,256	47,614	34,030
LCOH (arvutatud võrgutasuga), €/kg	5,580	5,073	4,156

Tabelis 4.1 on märgata, kuidas elektri hind kujuneb ajas odavamaks. Antud muutus tuleneb 2040. aasta modelleeritud elektri hindadest, kus on arvestatud taastuvenergia osakaalu suurenemisega. Täpsemalt on suurendatud meretuuleelektrijaamade osakaalu, mis moodustab antud mudelis 49 % Eestis toodetud elektrienergiast (vt Joonist 3.3). Suur taastuvenergia osakaal toodetud elektrienergiast põhjustab elektriturul rohkem „nullhindasid“. Tabelis on näidatud ka vesiniku tootmishinda (LCOH), mis jääb vahemikku 4,15 kuni 5,58 €/kg. Teostades arvutusi 2030. aasta elektri hindadega, ei ole „Eesti vesiniku kasutuselevõtu ressursi“ dokumendis [12] kajastatud ennustatav 2030. aasta vesiniku tootmishind samas suurusjärgus. Lõputöös arvutatud omahinnad on kõrgemad kui mainitud dokumendis kuvatud omahinnad. Analüüsidest elektri hinna mõju vesiniku tootmishinnale, on vajalik uurida ka erinevate parameetrite mõju.

Selleks, et hinnata tehnoloogia edasiarenguga kaasnevaid odavamaid kulusid, on viidud tabelis 4.2 läbi eraldi arvutused. Tabelis 4.2 on kasutusel 2030. aasta keskmine elektri hind 2035. ja 2040. aasta PEM-elektrolüüseri tehnoloogia kulude puhul. Antud tulemustest tuleb välja, et tehnoloogilised kulud madaldavad elektrolüüseri hinda umbes 0,2 €/kg võrra.

Tabel 4.2 Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseriga vesiniku omahinna (LCOH) arvutamine, kasutades sisendiks modelleeritud 2030. aasta keskmist elektri hindu 2035. ja 2040. aasta tehnoloogia kulude puhul

Aasta	2030	2035	2040
Keskmine börsihind [33], €/MWh	53,256	53,256	53,256
LCOH, €/kg	5,580	5,385	5,195

## 4.1 Hinda mõjutavad parameetrid

Vesiniku tootmishinna analüüsimisel keskendutakse järgnevate parameetrite mõjule: määratud ja muutuvatele OPEX kuludele, CAPEX kuludele, süsteemi kasutegurile, jaama elueale ja elektri hinnale. Tabeli 4.3 esimeses tulbas on välja toodud erinevad parameetrid koos ühikutega. Teises tulbas on välja toodud parameetri konkreetne väärtus või selle suhe võrreldes arvutustel kasutatavate algandmetega. Tabeli 4.3 kolmandas tulbas on kujutatud 2030., 2035. ja 2040. aasta arvutatud LCOH hind. Arvutustel on kasutusel lisas 1 kasutatud tehnoloogilised parameetrid, mis ei ole eraldi välja toodud tabelis 4.3 (näiteks plaaniline jaama katkestus).

Tabel 4.3 Parameetrite mõju vesiniku tootmishinnale

Parameeter	Suurus	2030 LCOH	2035 LCOH	2040 LCOH
<b>Algandmetega tootmishind</b>		<b>5,580</b>	<b>5,073</b>	<b>4,156</b>
Jaama eluiga, aasta	5	6,573	5,926	4,875
	15	5,740	5,211	4,287
	35	5,516	5,018	4,109
Määratud ja muutuvad OPEX, % · CAPEX	3	5,649	5,132	4,254
	4	5,717	5,190	4,226
	6	5,853	5,308	4,353
CAPEX, €/kW	0,5 · algandmed	5,348	4,873	3,987
	1,5 · algandmed	5,813	5,273	4,324
	2 · algandmed	6,046	5,473	4,493
Süsteemi kasutegur, %	50	6,529	6,089	5,120
	70	4,664	4,349	3,657
	80	4,081	3,805	3,200
Elektri hind, €/kWh	0,5 · algandmed	4,065	3,752	3,236
	1,5 · algandmed	7,096	6,394	5,075
	2 · algandmed	8,612	7,715	5,995

## **Elektrihind ja kasutegur**

Tabelist 4.3 on märgata, et vesiniku tootmishinda mõjutab kõige rohkem muutuv elektrihind. Antud arvutused on kooskõlas joonisega 3.1, kus elektrihinna maksumust kujutatakse suurima mõjutegurina vesiniku hinna kujunemisel. Vähendades keskmist elektrihinda kaks korda, langeb LCOH 5,580 €/kg-lt 4,065 €/kg-le. Erinevuseks on umbes 1,5-eurose vahega. Vähendades 2035. aasta elektrihinda kaks korda, langeb LCOH 5,073 €/kg-lt 3,752 €/kg-le ja hinnavaheks on 1,321 eurot. Elektrihinna mõju 2040. aasta vesiniku tootmishinnale on veel väiksem. Vähendades elektrihinda kaks korda, on 2040. aasta LCOH hinnavahe 0,920 €/kg. Tulemustest on näha, et aastatega muutub LCOH stabiilsemaks, hoolimata elektrihinna kõikumisest. Antud muutus võib olla tingitud tehnoloogiate edasiarenemise tõttu.

Lõputöös on kasutusel järgnevad vesinikjaama süsteemi kasutegurid: 2030. aastal on kasuteguriks 58 %, 2035. aastal on kasuteguriks 60 % ja aastal 2040 62 %. Tabelis 4.3 esitatud tulemused kinnitavad, et süsteemi kasutegur mõjutab märkimisväärselt LCOH hinda. Suurendades süsteemi kasutegurit 12 % võrra, väheneb 2030. aasta vesiniku tootmishind 0,916 euro võrra. 2035. aasta puhul on 70 %-ne kasutegur põhjustanud LCOH hinnas 0,724-eurose erinevuse ning 2040. aastal 0,499-eurose vahe. Lähtudes vesinikjaama kasuteguri olulisest mõjust LCOH hinnale, on vaja tulevikus arvestada kasuteguri suurendamisega, näiteks vesinikjaamas eralduva soojuse taaskasutamisega.

## **OPEX ja CAPEX kulud**

OPEX kulude protsent ei mõjutanud arvutuste käigus LCOH väärtust palju. Kui OPEX kuludeks on 6 %, siis vesiniku tootmishind suurenes 0,273 €/kg võrra 2030. aastal. Aastal 2040 suurenes vesiniku tootmishind 0,197 €/kg võrra. CAPEX kulud mõjutavad oluliselt LCOH hinda, mis on samuti välja toodud joonisel 3.1. Vähendades CAPEX kulusid langeb LCOH hind 2030. aastal 5,348 €/kg-le, mis on ligikaudu 4 %-ne langus. Suurendades CAPEX kulusid 2030. aastal tõuseb tootmishind 6,046 €/kg-ni ehk tootmishind suureneb 8 %. Antud muutusest on näha, et CAPEX kulusid suurendades, tõuseb LCOH hind 8 %, ent CAPEX kulusid vähendades langeb LCOH hind ainult 4 %. Mainitud muutus võib olla tingitud OPEX kuludest, sest OPEX kulud sõltuvad CAPEX kuludest. Suurendades CAPEX kulusid kaks korda, tõusevad ka OPEX kulud kahekordselt.

## Jaama eluiga

Vähendades vesinikjaama eluiga viis korda, suureneb vesiniku omahind 1 €/kg võrra peaaegu iga aasta puhul. Viimasel ehk 2040. aastal on omahindade vaheks umbes 0,719 €/kg. Mida suurem on jaama eluiga, seda odavamaks kujuneb ka vesiniku omahind, sest nii saab kulusid jaotada optimaalsemalt pikema perioodi vältel. Joonisel 3.1 on jaama eluiga keskmise mõjuga, mis kajastub ka tabeli 4.3 tulemustes. Oluline on arvestada, et selles töös ei ole arvesse võetud jaama kasuteguri halvenemist.

Võrreldes kõiki parameetrite mõjusid vesiniku tootmishinnale on märgata, et elektri hind ja jaama kasutegur mõjutavad vesiniku omahinda kõige enam, kus tootmishinnad kõiguvad vahemikus 4 – 9 €/kg. Kõige suurem mõju on siiski elektri hinnal. Samuti on CAPEX kuludel märkimisväärne mõju LCOH hinnale, mõjutades LCOH hinda 0,466 euro piires. OPEX kulude kui ka jaama eluea mõju vesiniku omahinnale ei ole võrreldes teiste parameetritega suur.

## 4.2 Elektri hinna kujunemine

Elektri hinna arvutamisel kasutati valemit 3.2. Valemis 3.2 saadud elektri hinnast lahutati maha võrgutasu. Kõikides tabelites on kujutatud elektri börsihind. Selles peatükis on välja arvatud roheline vesiniku tasuvuspunkt sõltuvalt prognoositavatest omahindadest ning müügihindadest.

### Elektri hinna kujunemine sõltuvalt vesiniku omahinnast

Vesiniku omahind sõltub oluliselt nii vesiniku kasutusala kui ka vesiniku tüübist. Antud lõputöös analüüsiti tasuvuspunkti lähtuvalt soovitatavast vesiniku omahinnast ja erinevatest vesiniku turuhindadest. Lõputöös käsitletakse rohelist vesinikku ja selle omahinnad valitakse „Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüs“ dokumendi [12] sisust. Nii sinise kui ka halli vesiniku omahind tuleneb *BloombergNEF* statistikast [37]. Rohelise vesiniku tulemusi võrreldakse halli ja sinise vesinikuga. Tulemused on kajastatud tabelis 4.4.

Tabelis 4.4 on välja toodud roheline, halli ja sinise vesiniku omahinnad. Rohelise vesiniku omahinnad jäävad maailmas vahemikku 1,2 kuni 4,1 €/kg [12]. On ennustatud, et

Eestis jääb rohelise vesiniku omahind aastal 2030 vahemikku 3,4 – 4,2 €/kg. Omahindade vahemiku alampiir ja ülempiir lisati tabelisse 4.4. Halli ja sinise vesiniku hinnavaheemikud pärinevad *BloombergNEF* statistikast, kus on lähtutud 2023. aasta vesiniku LCOH hindadest [37]. Tabelis 4.4 on lisatud ainult hinnavaheemike alam- ja ülempiirid. 2030. aasta tulbas on välja arvatud soovitud LCOH hinna puhul keskmine elektri hind (ühikutes €/MWh).

Tabel 4.4 Erinevate vesiniku omahindade keskmine elektri börsihind

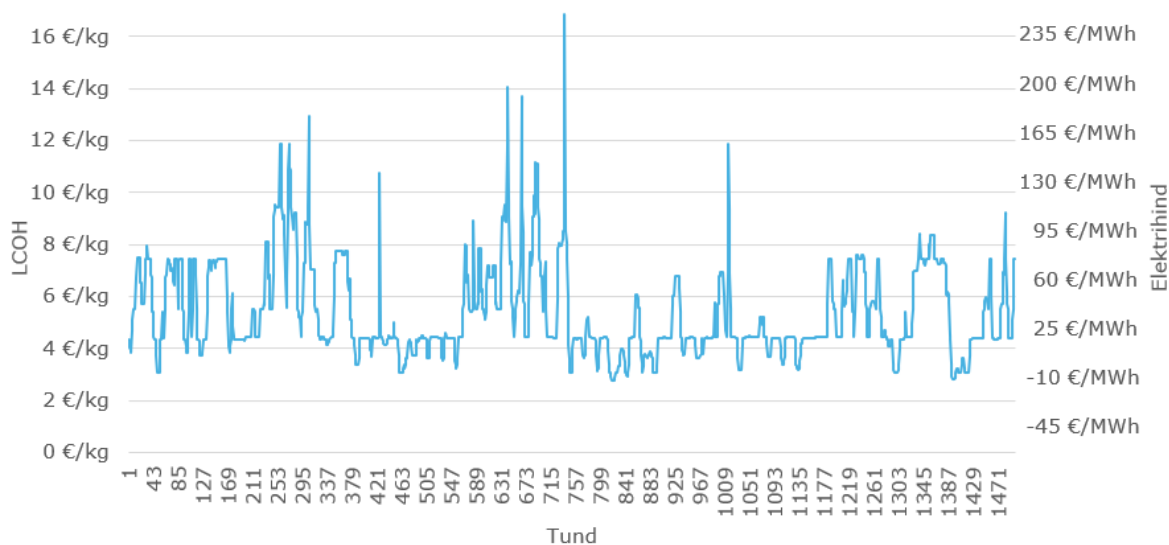
	Rohelise vesiniku omahind, €/kg	Elektri hind, €/MWh		
		2030	2035	2040
<b>Maailmas</b>	1,2	-23,70	-22,18	-20,64
	4,1	27,25	30,08	33,00
<b>Eestis</b>	3,4	14,95	17,46	20,05
	4,2	29,01	31,88	34,85
	<b>Hall vesinik</b>			
<b>Maailmas</b>	0,92	-28,61	-27,23	-25,82
	2,75	3,53	5,75	8,03
	<b>Sinine vesinik</b>			
<b>Maailmas</b>	1,69	-15,09	-13,35	-11,58
	4,40	32,52	35,48	38,55

Tootes vesinikku hinnaga 1,2 €/kg, peab 2030. aastal elektri börsihind olema keskmiselt -23,70 €/MWh. Võrreldes tootmiseks sobilikku elektri hindaga Elering AS-i modelleeritud 2030. aastate elektri hindadega, ei leidu ühtegi tunnihinda, mis vastaks antud nõudele. Rohelise vesiniku tootmishinna 4,1 €/kg puhul peab 2040. aasta andmete puhul peab olema võrdne või väiksem väärtusest 33 €/MWh. 2040. aasta modelleeritud elektri hindadest on umbes 47 % väärtustest alla 33 €/MWh. Tabelis 4.4 on näha, et 2030. aastal toodetud roheline vesinik ei suuda tänapäeval toodetava halli vesinikuga konkureerida. Rohelisel vesinikul on suurem konkurentsivõime sinise vesinikuga ja väiksem konkurentsivõime halli vesinikuga. Kui lähtuda sinise vesiniku LCOH hinna ülempiirist (4,4 €/kg), siis vastavad 2030. aasta modelleeritud elektri hinnad 38 % ulatuses vajalikule elektri hinnale. Võrreldes 2035. ja 2040. aasta elektri hinna vastavusi sinise vesiniku arvutatud elektri hinna piirile, tõuseb vastavuste protsent 2040. aastaks 49 %-le. Lähtudes tabelist 4.4 ei suuda Eesti konkureerida sinise ja halli vesiniku tootmishinnaga. 2040. aasta elektri hindades on 49 % ajast sinise vesiniku keskmine börsihind alla väärtuse 38,55 €/MWh.

Joonisel 4.1 on kujutatud 1500 tunni vältel 2030. aasta LCOH tunnipõhine hind. Joonisel 4.1 on vasakul y-teljel näidatud LCOH hinnad ja paremal y-teljel elektri hinnad. Jooniselt 4.1 saab näha, milline on elektri hind ja LCOH igal tunnil. Negatiivsed

elektrihinnad näitavad, et LCOH hinna arvutamiseks minevad kulud on liiga suured, mistõttu peab elektrihind olema negatiivne, et soovitud LCOH omahind saada.

Taani Energiaagentuuri [14] andmete puhul on lähtutud sellest, et jaam töötab aastas 4000 tundi. Sellest tulenevalt võivad jaama kulud olla kõrgemad. Ideaalis võiks vesinikjaam rohkem tunde töötada, mis muudaks ka vesinikjaama kulud väiksemaks. Pikema ajaperioodi vältel langevad jaama kulud ühe ühiku kohta. Selles lõputöös on arvestatud sellega, et jaam töötab aastaringelt.



Joonis 4.1 2030. aasta LCOH tunnipõhine hind sõltuvalt erinevatest elektrihindadest 1500 tunni vältel

### Vesiniku tasuvuspunkt sõltuvalt müügihinna

Tabelis 4.5 on välja toodud elektri börsihinna tasuvuspiir ehk mis hinnast allapoole tasub Eestis vesinikku toota vesiniku müügihinna 3 €/kg puhul. Lisaks on arvestatud ka hapniku müügihinnaga. Tasuvuspunkt näitab maksimaalset elektri börsihinda, millal on vesiniku omahind võrdne müügihinnaga ehk tulu on 0 eurot. Selleks, et omahind ei ületaks müügihinda, peab elektrihind olema võrdne või odavam kui tabelis kujutatud börsihind.

Tabel 4.5 Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseriga vesiniku keskmine elektri börsihind sõltuvalt müügihinna 3,85 €/kg

Aasta	2030	2035	2040
<b>Tasuvuspunkt, €/MWh</b>	22,93	25,65	28,45

Tabelis 4.6 on vesiniku müügihinnaks valitud 6 €/kg. Väärtus on valitud, sest enamik joonisel 3.4 PEM-tehnoloogiaga vesinikku tootvatest *Hydrogen Valley* riikidest kavatseb müüa vesinikku vahemikus 3 – 6 €/kg.

Tabel 4.6 Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseriga vesiniku keskmine elektri börsihind sõltuvalt müügihinnast 6,85 €/kg

	<b>2030</b>	<b>2035</b>	<b>2040</b>
<b>Tasuvuspunkt, €/MWh</b>	75,63	79,71	83,95

2030. aasta modelleeritud elektrihindadest on 63 % ajast hinnad alla 75,63 €/MWh. 2035. aasta hindadest vastab nõudele 79 % hindadest ning 2040. aasta elektrihindadest 95 %. Võrreldes tabelis 4.5 saadud tulemustega, on tasuvuspiir siinkohal kolm kuni neli korda suurem. Antud tulemustest tuleb välja, et Eesti on 6,85 €/kg müügihinna puhul maailmaturul konkurentsivõimeline, suutes üle poole elektrolüüsi tööajast vesinikku odavamata omahinnaga toota. 3,85 €/kg alampiirist lähtudes, ei ole Eestis mõtet vesinikku toota maailmaturule. 2040. aasta hindadest on 43 % ajast elektrihind madalamal 28,45 €/MWh-st tasuvuspunktist.

Tabelites 4.5 ja 4.6 leiti tasuvuspunkt siis, kui vesiniku omahind oli võrdne müügihinnaga. Kasumi teenimiseks võiks vesiniku müügihind olla vähemalt 30 % kõrgem kui vesiniku tootmishind. Tabelis 4.7 on kajastatud keskmine elektri börsihind, millega on võimalik toota vesinikku nii, et müügihind on 30 % kõrgem vesiniku omahinnast.

Tabel 4.7 Prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseriga vesiniku keskmine elektri börsihind, olukorras, kus teenitakse 30 % tulu

		<b>Elektri hind, €/MWh</b>		
		<b>2030</b>	<b>2035</b>	<b>2040</b>
<b>Müügi hind, €/kg</b>	3,85	2,57	4,76	7,01
	6,85	39,46	42,60	45,86

Müügihinna 3,85 €/kg puhul ei ole võimalik 2030., 2035. ega 2040. aastal 30 % tulu teenida. Selle jaoks peab vesiniku omahind olema 2,695 €/kg. Võrreldes tabelis 4.7 saadud tulemusi tabeliga 4.6, langeb keskmine elektri hind üle 30 €/MWh võrra. 2030. aasta elektri hinnad ega 2035. aasta elektri hinnad ei võimalda 6,85 €/kg müügihinna puhul 30 % tulu teenida. Antud müügihinna juures 30 % kasu teenides, peab omahind olema 4,795 €/kg. 2040. aasta elektri hindadest on umbes 79 % hindadest alla 45,86 €/MWh ehk üle poole ajast on võimalik vesiniku tootmisel 30 % tulu teenida.



## 4.3 Eesti rohelise vesiniku kasutusala ja eksport

Antud lõputöös analüüsitakse rohelise vesiniku vajadust järgnevatel kasutusvaldkondades: tööstuses, transpordis ja energeetikas. Tööstuses analüüsiti rohelise ammoniaagi tootmisvõimalust Eestis. Transpordis uuriti, kui palju rohelist vesinikku on vaja Eestis toota, et viia kõik Eesti bussid vesinikkütusele. Energeetikas analüüsiti, kui palju rohelist vesinikku läheb vaja maagaasi asendamiseks.

### Tööstus

Eestil puudub praegu valmidus toota vesinikku, sest riigil puudub sobiv tehnoloogia ja kogemus. Tulevikus on Eestil suur vesiniku tootmispotentsiaal. Vesinikku on võimalik kasutada Eestis transpordi-, energeetika- ja tööstussektoris.

Vesinikule üleminekut soodustab tööstussektoris võimalus toota ise ammoniaaki, et saada lahti ammoniaagi impordist. Ammoniaagi vajaduse katmiseks piisaks Eestil 10 MW PEM-elektrolüüseriga jaamast. Tabelist 2.1 on näha, et Eestisse imporditi 2023. aastal 3 851 344 kg ammoniaaki. Umbes 17,65 % ammoniaagi massist moodustub vesinik ehk vesiniku osakaal ammoniaagis on 679 762 kg [38]. See tähendab, et tööstuse jaoks on vaja vähemalt 679 762 kg vesinikku. 10 MW PEM-elektrolüüseriga jaam toodab aastas ligi 1 677 875 kg vesinikku, mis ületab Eesti praeguse vesiniku vajaduse 2,5 korda. Ülejäänud rohelist vesinikku, mida Eesti ei kasuta, on võimalik eksportida Eestist välja. 679 762 kg vesiniku vajaduse katmiseks piisab 4 MW-suuruselt jaamast.

Eestis tegutseb aktiivselt ettevõtte Nitrofert AS, kelle enamik müügitulu tuleb ekspordist. Ligi 90 % ettevõtte toodangust eksporditi välismaale [39]. Nitrofert AS jaam käivitati 1993. aastal. Sellel ajal oli ettevõtte ammoniaagi tootmispotentsiaaliks 200 tuhat tonni ja karbamiidi potentsiaaliks 180 tuhat tonni aastas. Nii ammoniaagi kui ka karbamiidi tootmiseks on üheks sisendiks vesinik. Aastal 2004 oli ettevõtte toodangu netokäiveks 38,4 miljonit eurot, millest ammoniaagi müügi kogus moodustas 124,3 tuhat tonni ja karbamiidi müügi kogus moodustas 130,7 tuhat tonni [40]. Enda tegevusaastatel suutis ettevõtte suurt kasumit teenida eelkõige sellepärast, et maagaasi hinnad olid poole odavamad kui ammoniaagi müügi hinnad. See võimaldas ettevõttel ammoniaagi tootmiskulud võimalikult madalal hoida. Ettevõtte ei tegele enam ammoniaagi tootmisega, sest maagaasi hinnatõusu tõttu ei tasunud enam tootmine ära. Rohelise ammoniaagi turule toomine võib seda muuta.

Statista [34] andmebaasi kohaselt ennustatakse, et Euroopa roheline ammoniaagi turg tõuseb 2,3 miljardi euroni, mis on 57 korda kõrgem praegusest roheline ammoniaagi turust. Rohelise vesiniku abil ammoniaagi tootmine Euroopas võib turu kasvu soodustada, sest Euroopas puuduvad suuremahulised maagaasi ressursid nagu on Aasias või Ameerikas. Täna kõigub roheline ammoniaagi hind vahemikus 675 - 1312 €/tonn ning aastaks 2030 võib roheline ammoniaagi hind kujuneda vahemikku 445 - 890 €/tonn [41].

## Transport

Eesti roheline vesiniku tootmispotentsiaal transpordi otstarbeks vajab põhjalikku analüüsi. Hetkel on vesiniku kütusehind Kesk-Euroopas keskmiselt 15,75 €/kg [42]. Konkurentsipüsimeks peab Eesti suutma müüa vesinikku odavamalt. Valdkond, kus on mõttekas vesinikkütust kasutusele võtta, on bussid. Kõik Eesti Maanteeametis registreeritud bussid, mis osalevad Eesti liikluses, kasutavad kütusena diisli, bensiini kui ka gaasi, ent nõudlus roheline kütuse jaoks kasvab. Vesinikutehnoloogial sõiduvahendeid tootvaid ettevõtteid on palju. Vesinikubusse on maailmas juba olemas ja üks firma, kes vesinikubusse toodab on Hyundai [43]. Üle 48-istmeline buss tarbib umbes 34 kg vesinikku 550 km läbimiseks ehk 100 km läbimiseks on kütusekulu 6,18 kg 100 km kohta. Toyota Mirai vesinikul põhinev sõiduauto tarbib aga 2,60 kg 100 km puhul [44]. Lisaks Eestis bussidele võiks ka osad sõiduautod asendada vesinikkütusega (näiteks 10 % autodest). Transpordiameti 2022. aasta autopargi sõiduki uuringute järgi oli busside aastane läbisõit kokku 329,8 miljonit kilomeetrit ning sõiduautode läbisõit moodustas kokku 9705,4 miljonit kilomeetrit [45]. Aastal 2022 oli Tallinna ühistranspordi busside aastane läbisõit kokku 31 172,9 tuhat kilomeetrit. [46] Tabelis 4.8 on kajastatud sõidukite summaarne aastane läbisõit ning sellest tulenevalt aastane vesinikutarve läbisõidu katmiseks.

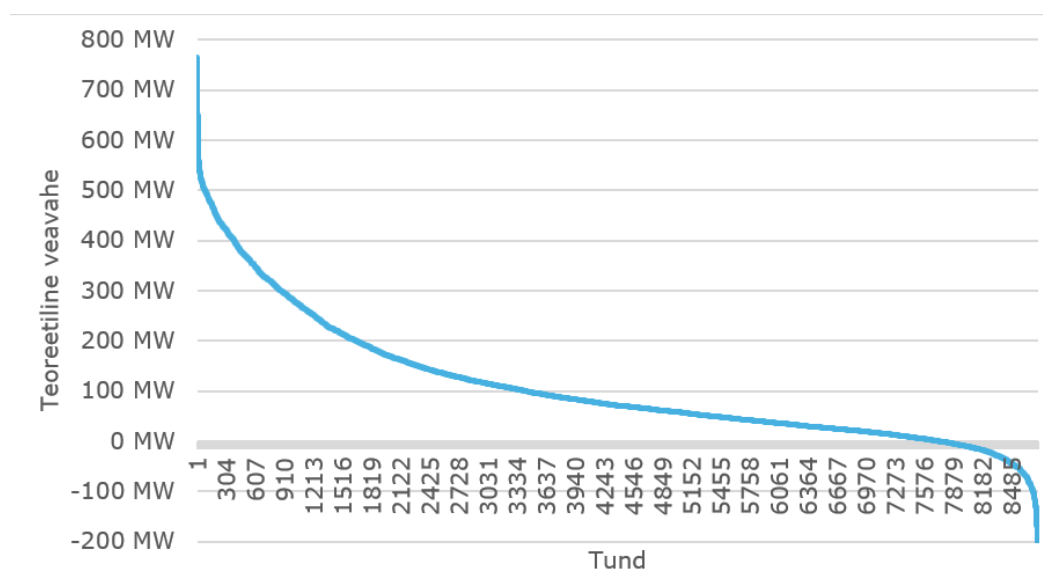
Tabel 4.8 Vesiniku kogus, et katta ära Eestis busside ning 10 % sõiduautode sõidukulu, põhinedes 2022. aasta läbisõidu andmetele

	<b>Sõiduautod 10 %</b>	<b>Bussid kokku</b>	<b>Ühistransport Tallinn</b>
<b>Läbisõit kokku, km</b>	970 540 000	329 800 000	31 172 900
<b>Vesinikkütuse tarbimine, kg/100 km</b>	2,60	6,18	6,18
<b>Aastane vesinikuvajadus sõidukite peale kokku, kg</b>	25 234 040	20 381 640	1 926 485

## Energeetika

CIVITTA [47] on teinud koostöös Eleringi AS-ga mitmeid prognoose, millega võiks maagaasi erinevate stsenaariumite korral asendada. Baasstsenaariumi põhjal prognoositakse, et aastal 2030. on maagaasi tarbimine Eestis 5 216 GWh aastas ning sellest 12 % moodustab vesinik. See tähendab, et iga tund tarbitakse 71,45 MW suuruses vesinikku. Aastal 2035. on selleks suurushulgaks 93,1 MW ning 2040. aastal 89,9 MW. Prognoos on tehtud aastani 2050 ning iga aasta jääb vesiniku tarbimise suurushulk tunnis vahemikku 71,45 – 93,1 MW. Teostatud uuringu kohaselt lähtutakse asjaolust, et maagaasi tarbimine langeb ajas ning rohelise vesiniku osakaal maagaasi tarbimiseks kasvab. Tulemusena jääb vesinikuvajadus maagaasi tarbimise katmiseks aastatega konstantseks.

Energeetikas saab rohelist vesiniku kasutada tootmise ja tarbimise tasakaalustamiseks. Vesinikjaam on elektritarbija ning võrku elektrit ei tooda, aga enda tarbimist saab jaam juhtida ning seejärel bilansiteenust pakkuda. Näiteks on suure potentsiaaliga rohelise vesiniku tootmine hetkedel, millal toimub taastuenergia puhul liigtootmine ehk elektrienergiat on vaja tarbida. Vesinikjaama võimsuse määramiseks on üheks võimaluseks analüüsida eelnevalt Eleringi päikese- kui ka tuuleenergia eelmiste aastate bilansihaldurite prognoosi ning võrrelda seda tegeliku toodanguga [48]. Mõõtevea abil on võimalik koostada koormusgraafik ning määrata kindlaks, mis peaks olema baasvõimsus, millega vesinikjaam saaks aastaringiselt taastuenergia ületootmist tasakaalustada. Antud koormusgraafik on kujutatud joonisel 4.2.



Joonis 4.2 Bilansihaldurite prognoosi ja toodangu modelleeritud 2030. aasta veavahe koormusgraafik, põhinedes 2023. aasta veavahe koormusgraafikule

Joonisel 4.2 on kõige suuremaks veavaheks 765 MW, mis tähendab, et tuule- ja päikeseenergia toodang on 765 MW kõrgem kui bilansihaldurite poolt tehtud prognoos. Negatiivne veavahe näitab, et toodetakse vähem kui bilansihaldurid on prognoosinud. Positiivne veavahe näitab, et taastuvenergia allikatest saadud toodang on suurem kui algselt prognoositud toodang. Joonisel 4.2 kujutatud teoreetiline veavahe on koostatud 2030. aastaks, põhinedes 2023. aasta vea koormusgraafikule. Tegelik toodang on umbes 1 029 tundi aastas madalam kui prognoositud toodang. Bilansihaldurite poolt suurimaks veavaheks prognoositavast toodangust on 227 MW madalama toodangu puhul.

Antud joonis 4.2 põhineb ainult 2023. aasta tegeliku toodangu ja bilansihaldurite prognoosi veavahel. Sellepärast ei saa täielikult väita, et 2030. aastal on veavaded samasugused, vaid põhjalikuma analüüsi tegemiseks tuleb uurida ka eelmiste aastate veavahesid. Samuti on jooniselt 4.2 näha, et enamuse ajast on tegelik toodang olnud suurem kui bilansihaldurite poolt prognoositud toodang. Järelikult tekib rohkem hetki, kus ei arvestata taastuvenergia ületoodanguga.

Koormusgraafikult tuleb välja, et aastas toodab 7 372 tundi päikese- ja tuuleenergia rohkem prognoositavast toodangust, mistõttu võiks 7 372 tundi aastas 10 MW-se vesinikjaamaga rohelist vesinikku toota. 10 MW-ne jaam suudaks katta ära peaaegu kogu aasta ületootmise baasvajaduse. Võimalus on ka 50 MW jaamaga vesinikku toota 5 366 tundi aastas. Võimalus on rajada ka suurema võimsusega vesinikjaam. Suurema võimsusega vesinikjaama miinuseks on sessioonide salvestus.

Lähtudes joonisel 4.2 mudelleeritud bilansihaldurite veagraafikust, on võimalus 100 MW suurust jaama kasutada 3 426 tundi aastas ehk 4 – 5 kuud. Sessioonide roheline vesiniku tootmine on kallim kõrgemate kapitalikulude poolest. Jaotades 100 MW-se jaama kapitalikulud väiksema perioodi vältel, osutub vesiniku omahind ühiku kohta kallimaks. Antud hetkedel peaks elektri hind olema piisavalt soodne, et vesiniku jaam suudaks ennast lühemal perioodil tasuvaks osutada.

Võrreldes transpordisektori, tööstuse- ja energeetikasektori vesinikuvajadust, läheb tööstuses kõige vähem vesinikku vajada Eesti omatarbeks. Kõige suurema vesinikuvajadusega on transpordisektor. Energeetika vesinikuvajaduse suurus sõltub sellest, kui suur jaam rajatakse ületootmise puhul toodangu ja tarbimise tasakaalustamiseks. Kõikide arvutuste puhul lähtuti 10 MW jaama maksimaalsest toodangust 4 740 kg päevas. Arvutuste puhul ei arvestatud planeeritava katkestusega.

## 5 JÄRELDUS

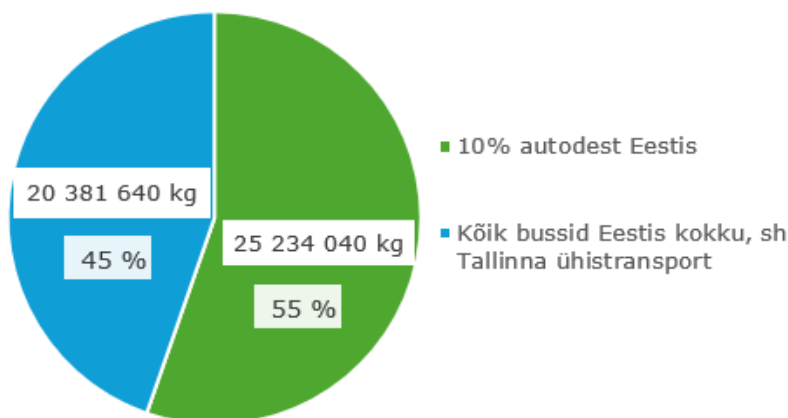
Tulemusteks saadud omahinnad on suuremad kui „Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüs“ dokumendis [12] kajastatud tootmishinnad. See viitab sellele, et dokumendis tehtud arvutused võivad olla teostatud arvestades kõige soodsamaid tingimusi ehk uuringus prognoositakse liiga madalaid rohelise vesiniku omahindu. Lõputöös on arvestatud sellega, et jaam töötab täisvõimsusel aastaringset. Teabekirjanduses tehtud andmed põhinevad sessioonsel salvestamisel ehk 4000 töötunnil, mis mõjutab ka vesiniku tootmishinda. Madalamate töötundide puhul on vaja suuremaid ühikvõimsusi, et toota vajalik kogus vesinikku. Töös tehtud arvutustel ei arvestatud gaasi töötlemiskuludega, sest PEM-tehnoloogia puhul ei ole see vajalik. Samuti ei arvestatud ka võrgutasude muutumisega ajas.

Täna teadaolevate tehnoloogia ja elektrihindadega ei suuda Eestis toodetud roheline vesinik halli ega sinise vesinikuga konkureerida. Selleks, et 2040. aastal suudaks roheline vesinik konkureerida halli vesiniku omahinnaga, peab elektrihind langema alla 8,03 €/MWh. Eesti võimekust müüa maailmaturule toodetavat vesinikku ei ole võimalik praegu hinnata. Eesti ei ole võimeline vesinikku madala turuhinnaga müüma. Sellegipoolest jääb Eestis toodetava vesiniku müügihind *Hydrogen Valley* riikide plaanitava müügihinna vahemikku [35]. See tähendab, et Eesti ei suuda vesinikku madalama turuhinnaga müüa, vaid saavutab võrdväärse taseme teiste riikide keskmise müügi võimekusega. Eesti võimekust vesinikku müüa saab kindlaks teha siis, kui on kujunenud välja ühtne vesiniku turuhind.

Eestis on võimalus vesiniku kasutada nii transpordi-, tööstuse- kui ka energeetikasektoris. Eestis on varasemalt olemas olnud ammoniaagi tööstuskultuur, kus enamik toodetud ammoniaagist suunati ekspordiks [39]. Vesiniku rakendusalasid tööstuses on mitmeid, ent majanduslikult ei tasu Eestis toodetud rohelise vesinikuga ammoniaaki toota – ainuüksi ammoniaagi tootmiseks vajamineva rohelise vesiniku tootmine on kallim kui rohelise ammoniaagi hind. Ühe tonni ammoniaagi tootmiseks läheb vaja umbes 177 kilogrammi vesinikku, mille tootmishind lähtuvalt 5,58 €/kg omahinnast on kokku 988 € [38]. Antud summa kulub ainult vesiniku tootmisele, mis ületab 2030. aasta ammoniaagi hinda. Eesti vesinikuvajaduse katmisel 2023. aasta andmete põhjal läheb vaja 4 MW suurust vesinikjaama.

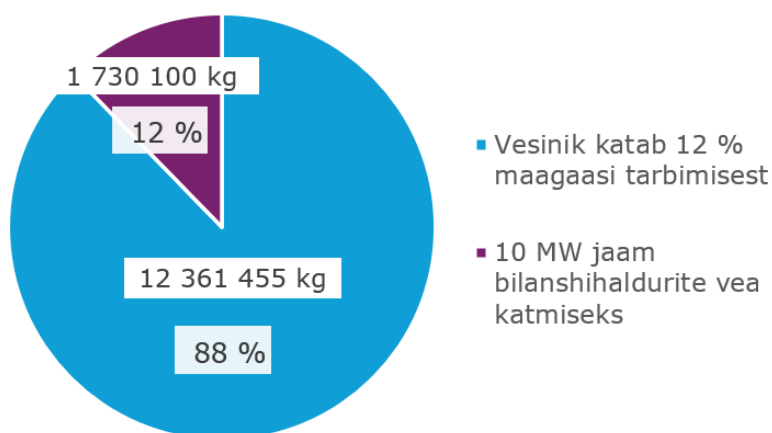
Transpordisektoris on võimalus vesinikku kasutada näiteks bussiliikluses. Tänapäeva bussiliikluses kasutatakse kütusena gaasi, diislit kui ka bensiini, aga vajadus rohelise kütuse vastu tõuseb. Selleks, et katta ära Eesti busside kütusevajadus vesinikuga, on vaja toota 55 840 kg vesinikku päevas. Joonisel 5.1 on kujutatud arvutuste tulemusena

saadud aastase rohelise vesiniku vajadus kilogrammides transpordisektoris, et katta ära 2022. aasta andmetel põhinev autopargi läbisõit. Joonisel 5.1 on näha, et busside kui ka 10 % autode vesinikuvajadus on peaaegu võrdväärsed. Autode läbisõidu katmiseks vajaminev roheline vesinik moodustub 55 % kogu transpordisektoris vajaminevast vesinikust. Kokku kulub transpordisektoris aastas 45,6 miljonit kg vesinikku. Selleks, et katta ära joonisel 5.1 kujutatud transpordisektori vesinikuvajadus, läheb vaja 264 MW suurust vesinikjaama (arvestamata vesinikjaama planeeritavat katkestust).



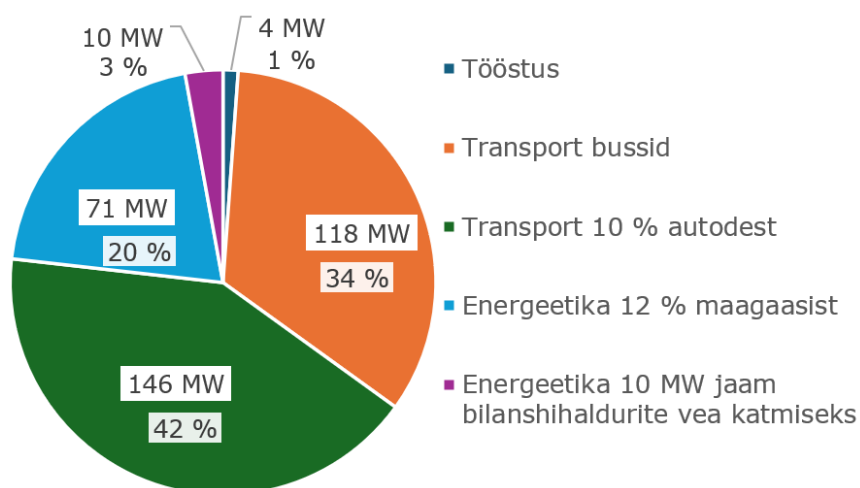
Joonis 5.1 Aastane rohelise vesiniku vajadus kilogrammides transpordisektoris

Energeetikasektoris on võimalik rohelist vesinikku ära kasutada kahel eesmärgil: osaliselt maagaasi tarbimise katmiseks kui ka bilansihaldurite prognoosi vea katmiseks. 2030. aasta prognoosist lähtudes [47], läheb 12 % ulatuses maagaasi tarbimise katmiseks vaja umbes 71 MW suurust vesinikjaama. Bilansihaldurite prognoosi veavahe katmiseks 2030. aasta prognoosist lähtudes, on võimalik rajada 10 MW-ne vesinikjaam tööajaga 10 kuud või 50 MW-ne vesinikjaam tööajaga 7 kuud aastas. Joonisel 5.2 on kujutatud energeetikasektoris vesinikjaamade rohelise vesiniku toodang kilogrammides aasta kohta. Kogu energeetikasektori aastane vesinikuvajadus on 14 miljonit kg.



Joonis 5.2 Aastane rohelise vesiniku vajadus kilogrammides energeetikas

Joonisel 5.3 on kujutatud elektrolüüseritega vesinikjaama suurus megavattides, et katta ära välja toodud valdkonna roheline vesiniku vajadus. Joonisel 5.3 on kujutatud transpordisektoris Eesti busside (sh Tallinna ühistranspordi) ning 10 % ulatuses autode vesinikuvajadus. Tööstuses on kujutatud vesinikjaama suurus Eesti roheline vesiniku vajaduse katmiseks, arvestamata eksporti. Rohelise vesinikuga energeetikas arvestatakse bilansihaldurite vea katmiseks 10 kuu vältel kui ka osaliselt maagaasi vajaduse asendamiseks. Selleks, et katta ära kogu Eesti roheline vesiniku vajadus, on vaja vähemalt 349 MW-st vesinikjaama. Jooniselt 5.3 on näha, kuidas 76 % kogu Eesti roheline vesiniku vajadusest moodustab transpordisektoris. Antud jaam töötab aastaringelt. Kui aastal 2040 toota vesinikku hinnaga 3,85 €/kg, siis 43 % ajast on börsihinnad sobilikud. Selleks, et tagada soovitatav vesiniku koguse tootmine, on vaja rajada rohkem jaamasid või 2,5 korda suurema võimsusega vesinikjaam. Selline märkimisväärne tarbimine võib hakata mõjutama ka elektri hindu.



Joonis 5.3 Rohelise vesiniku vajaduse katmiseks vesinikjaama suurus

Rohelise vesiniku omahind Eestis moodustab 2030. aastal 136 %, 2035. aastal 124 % ning 2040. aastal 101 % varasemate uuringute kohasel maailmas toodetud vesiniku LCOH hinnast. Sellest võib järeldada, et Eestis toodetud roheline vesinik on maailmaturul alates 2040. aastast konkurentsivõimeline. Töö tulemused sõltuvad tänastest hindadest, aja jooksul võivad elektri hinnad ning tehnoloogia maksumus muutuda, mis mõjutab omakorda vesiniku LCOH hinda.

Antud lõputöös keskenduti vesiniku tootmisel selle lühiajalisele ladustamisele. Tulevikus võiks lõputöö teema edasi uurimisel arvestada ka müügi marginaali kui ka liitumistasuga ja analüüsida elektrolüüseriga vesiniku tootmisel pikaajalise ladustamiskuludega. Edasistes uuringutes võiks põhjalikumalt analüüsida ka vesinikjaama tehnoloogia edasiarendamise võimalusi kui ka roheline vesiniku tarneahela kulusid transpordisektoris.

## KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärgiks on analüüsida elektrolüüseriga vesiniku tootmise majanduslikku tasuvust ja seda mõjutavaid tegureid Eestis. Töö viidi läbi, et hinnata Eesti võimekust toota rohelist vesinikku ning hinnata Eestis toodetud vesiniku konkurentsivõimelisust maailma turul.

Lõputöös lähtuti arvutuste tegemisel Taani Energiaagentuuri andmebaasist saadud elektrolüüseri kuludest ning ettevõttelt Elering AS-i modelleeritud kiire arengu (*Rapid Development*) 2030., 2035. ja 2040. aasta elektrihindadest. Arvutuste käigus tuli välja, et kõige rohkem mõjutab rohelse vesiniku omahinda elektri hind ja vesiniku jaama kasutegur. Lähtudes keskmisest elektri hinnast, saadi 2030. aasta omahinnaks 5,580 €/kg, 2035. aastal 5,073 €/kg ning 2040. aastal 4,156 €/kg. Rohelse vesiniku omahind odavnes ajas madalama elektri hinna kui kui ka tehnoloogia edasiarenemise tõttu. „Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüs“ dokumendist [12] lähtudes võiks Eestis toodetava vesiniku omahind jääda vahemikku 3,4 – 4,2 €/kg. Antud tulemuse saavutamiseks peaks elektri hind olema 2030. aastal alla 29,01 €/MWh, 2035. aastal alla 31,88 €/MWh ja 2040. aastal alla 34,85 €/MWh.

Rohelse vesinikul ei ole välja kujunenud ühtset vesiniku turuhinda. Lõputöös on lähtutud vesiniku ja hapniku müügi hinnast 3,85 €/kg ning 6,85 €/kg. Arvutuste tegemisel lähtuti sellest, et müügist oleks võimalik 30 % tulu saada. Eesti ei suuda 3,85 €/kg müügi hinna puhul sellist tulu teenida. 2030. aasta ja 2035. aasta tehnoloogiatega ei ole realistlik vesiniku tootmisest 30 % tulu saada 6,85 €/kg müügi hinna puhul. 2040. aasta elektri hindadest on 79 % ajast võimalik müüa vesinikku hinnaga 6,85 €/kg ning teenida selle pealt 30 % tulu. Lähtudes lõputöös saadud tulemustest, ei suuda Eesti rohelse vesiniku tootmisega välisturul enne 2040. aastat konkureerida.

Lõputöös hinnati Eesti tööstus-, transpordi- ja energeetikasektori vesinikuvajadust. Hoolimata sellest, et Eestis on varasemalt olnud eksportiv ammoniaagi tööstus, ei ole majanduslikult mõistlik Eestis toodetud rohelisest vesinikust ammoniaaki toota, lähtudes tänasest teadaolevast tehnoloogia maksumusest, tehnilistest eripäradest ja elektri hindadest. 17,65 % ammoniaagi massist moodustub vesinik [38]. See tähendab, et ühe tonni ammoniaagi tootmiseks läheb vaja umbes 177 kilogrammi vesinikku, mille tootmishind on kokku 988 €, lähtuvalt 5,58 €/kg omahinnast. Antud summa kulub ainult vesiniku tootmisele, mis ületab juba ammoniaagi 2030. aasta hinda. Kui vesiniku



tootmishind ei kujune odavamaks, siis puudub võimalus Eestis toodetud rohelist ammoniaaki eksportida maailmaturule.

Transpordisektoris ajendab vesinikule üleminekut fossiilkütustel põhinev bussiliiklus. Selleks, et katta 10 % sõiduautode ja busside aastane kütusevajadus, on vaja toota aastas vähemalt 45,6 miljonit kilogrammi vesinikku ehk 125 tuhat kilogrammi päevas. Antud eesmärgi täitmiseks 2030. aastaks on vaja püstitada vesinikjaam võimsusega 263 MW. Juhul kui soovitakse ära katta ainult Tallinna ühistranspordi ja 10 % autode läbisõit, kulub aastas ligi 27,2 miljonit kilogrammi. Vajaduse katmiseks läheb vaja vesinikjaama võimsusega 157 MW. Arvutuste läbiviimisel lähtuti 2022. aasta andmetest, mistõttu soovitatav vesinikuvajadus läbisõidu katmiseks võib ajas veel tõusta. Ainult Eesti busside kütusevajaduse katmiseks on vaja toota päevas 55 840 kg vesinikku. Sellest tulenevalt oleks vaja püstitada vesinikjaam võimsusega 118 MW.

Energeetika valdkonnas saab vesinikjaamad võtta kasutusele taastuenergia liigtootmisel ajal, et balanseerida tootmise ja tarbimise tasakaalu. Võimalus on püstitada 10 MW suurune vesinikjaam, mis suudaks aastas 7 372 tundi taastuenergia ületoodangut ära kasutada või 50 MW suurune vesinikjaam, mis töötab aastas 5 366 tundi. Lisaks sellele on tehtud mitmeid prognoose, kus asendatakse maagaasi tarbimise vajadus roheline vesinikuga. CIVITTA ja Elering AS uuringute põhjal [47] moodustub baasstsenaariumi korral 2030. aastal 12 % maagaasi tarbimisest vesinik. Antud eesmärgi täitmiseks on vaja 2030. aastal 71,45 MW suurust vesinikjaama.

Antud lõputöö käigus jõuti järeldusele, et Eesti ei suuda vesinikku madalama turuhinnaga müüa, vaid saavutab võrdväärse taseme teiste riikide keskmise müügivõimekusega. Varasemate uuringute kohaselt on Eestis prognoositud liiga optimistlikke roheline vesiniku hindasid. Madalamate hindade puhul on jaama töötunnid väiksemad, mille puhul on vaja suuremaid ühikvõimsusi, et toota vajalikus koguses vesinikku. Rohelise vesiniku omahinda mõjutab kõige rohkem elektri hind, millest sõltub vesinikjaama tasuvus. Eestis toodetud roheline vesinik ei ole täna teadaolevate tehnoloogia ja elektri hindadega halli ega sinise vesinikuga konkurentsivõimeline. Kui Eestis soovitakse üle minna vesinikule, on Eesti transpordi, tööstuse ja energeetikasektori roheline vesiniku vajaduse katmiseks vaja 349 MW suurust jaama. Kui aastal 2040 toota vesiniku 3,85 €/kg hinnaga, siis 43 % ajast on börsihinnad sobilikud. Selleks, et tagada soovitatav vesiniku koguse tootmine, on vaja rajada 2,5 korda rohkem jaamasid, mille tarbimine võib hakata mõjutama ka elektri hindu.

## SUMMARY

This thesis focuses on analyzing the profitability of hydrogen production using electrolyzers in Estonia and the factors that influence it. The purpose of the study was to assess Estonia's capacity for producing green hydrogen and evaluate the competitiveness of Estonia's green hydrogen in the global market.

The thesis relied on data from the Danish Energy Agency's database to calculate electrolyzer costs, while the modelled electricity prices for 2030, 2035, and 2040 were provided by Elering AS. Based on the average electricity price of each year, the green hydrogen production cost in 2030 was determined to be 5,580 €/kg, in 2035 about 5,073 €/kg and 4,156 €/kg in 2040. The cost of green hydrogen decreased over time due to lower electricity prices and technological advancements. According to the analysis of „Estonia's Analysis of Hydrogen Resource Utilization document“ [12], the cost of hydrogen produced in Estonia could range from 3,4 to 4,2 €/kg. To achieve this outcome, the electricity price needs to be less than 29,01 €/MWh by 2030, less than 31,88 €/MWh by 2035, and less than 34,85 €/MWh by 2040.

There is no established market price for green hydrogen. In the thesis, the selling prices of hydrogen and oxygen were chosen to be 3,85 €/kg and 6,85 €/kg. It was assumed that a 30 % profit could be obtained from sales. Estonia cannot generate such profit at a selling price of 3,85 €/kg. At a selling price of 6,85 €/kg, it is not realistic to earn a 30 % profit using the technologies of 2030 and 2035. It is possible to sell hydrogen for 6,85 €/kg for 79 % of the time, ensuring a 30 % profit with the energy prices of 2040. Based on the thesis results, Estonia will not be able to produce enough green hydrogen to compete in the global market before 2040.

The thesis reviewed the hydrogen demands of Estonia's industry, transport, and energy sectors. Producing ammonia from green hydrogen in Estonia is not economically viable, given current technological costs, technical characteristics, and electricity prices. Hydrogen makes up 17,65 % of ammonia's mass. This means that about 177 kilograms of hydrogen are required to generate one ton of ammonia. The total production cost of green ammonia would come up to 988 €, based on a 5,58 €/kg green hydrogen production cost. This amount is solely used for hydrogen generation, which has already surpassed the cost of ammonia in 2030. If hydrogen production costs continue to rise, green ammonia produced in Estonia will be unable to compete in the worldwide market.

The transition to hydrogen in the transportation sector is driven by fossil fuel-based bus transportation. To cover the annual fuel needs of all buses and 10 % of cars in Estonia, it is necessary to produce at least 45,6 million kilograms of hydrogen annually or 125 thousand kilograms of green hydrogen per day. To achieve this goal by 2030, a hydrogen plant with a capacity of 263 MW is required. If solely public transportation in Tallinn and 10 % of Estonia's car mileage are covered, about 27,2 million kilograms of hydrogen must be produced every year. To accommodate this demand, a 157-megawatt hydrogen plant is necessary. The recommended hydrogen need for mileage coverage may rise with time because the calculations are based on the data from 2022. To cover only the fuel needs of Estonian buses, 55 840 kg of hydrogen must be produced every day. As a result, a hydrogen plant capable of producing 118 MW would be required.

In the energy sector, hydrogen plants can be used to utilize excess renewable energy production to balance production and consumption of energy. It is possible to set up a 10 MW hydrogen plant, which can utilize 7 372 hours of excess renewable energy production annually, or a 50 MW hydrogen plant, which operates for 5 366 hours per year. Additionally, several studies have been made where the need for natural gas consumption could be replaced by green hydrogen. According to CIVITTA and Elering AS studies [47], 12 % of natural gas consumption could be replaced by hydrogen in 2030. To achieve this goal, a hydrogen plant with a capacity of 71,45 MW is necessary by 2030.

This thesis concludes that the green hydrogen produced in Estonia cannot sell hydrogen at a lower market price but reaches a level of sales capability comparable to the average market price of other countries. Previous research conducted in Estonia predicted optimistic production costs for green hydrogen. When prices are lower, the plant operates fewer hours, which requires higher unit capacities to produce the necessary amount of hydrogen. The price of electricity is the main cost driver that affects the profitability of the hydrogen plant. Considering the current known technology and electricity prices, Estonia's green hydrogen cannot compete with grey and blue hydrogen production prices in the global market. To meet the demand for green hydrogen in Estonia's transportation, industry, and energy sectors, a plant with a capacity of 349 MW is needed. If the wished green hydrogen production price is 3,85 €/kg, then 43 % of the time electricity prices are suitable. To ensure the necessary amount of hydrogen production, it is necessary to build 2,5 times more hydrogen plants, which consumption may start to affect electricity prices.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Z. Ying, L. Ruiying, L. Zexuan, L. Jian, Z. Hongjun ja X. Chunming, „Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society”, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, köide 43, lk. 2–13, Märts 2022. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.02.001>
- [2] Fermi Energia, „Vesiniku, ammoniaagi ja sünteetilistekütuste tootmine tuumaenergia abil: tehnilis-majanduslik analüüs,“ detsember 2020. Kasutatud: 20. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://fermi.ee/wp-content/uploads/2021/03/h2-raport-fermi-energiale-pdf.pdf>
- [3] Euroopa Komisjon, „Hydrogen,“ *energy.ec.europa.eu*. Kasutatud: 20. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en)
- [4] Dr. N. Brahy, „Regulation and opportunity,“ *hy24partners.com*, 22. september 2021. Kasutatud: 20. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.hy24partners.com/regulation-and-opportunity/>
- [5] OGE, „European Hydrogen Backbone,“ *oge.net*. Kasutatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://oge.net/en/press-public-information/magazine/european-hydrogen-backbone?fbclid=IwAR3BGOS9Kink9-s00XvWod-hFag7n9n6q9LOHcEBUBXVQSdSDsJQdOlauQs>
- [6] Demaco Cryogenics, „All about the hydrogen electrolyzer,“ *demaco-cryogenics.com*. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://demaco-cryogenics.com/blog/about-hydrogen-electrolyzer/>
- [7] U.S Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, „Hydrogen Production: Natural Gas Reforming,“ *energy.gov*. Kasutatud: 27. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [8] IDTechEx, „Autothermal Reforming: A Promising Technology for Blue Hydrogen Production, Says IDTechEx,“ *www.prnewswire.com*. Kasutatud: 27. märts 2024.

[Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.prnewswire.com/news-releases/autothermal-reforming-a-promising-technology-for-blue-hydrogen-production-says-idtechex-301795446.html>

- [9] U.S Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, „Hydrogen Production: Electrolysis,” *energy.gov*. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [10] EPCM Holdings, „Green Hydrogen: Technology Evaluation Criteria for Electrolyser Selection | EPCM,” *epcmholdings.com*. Kasutatud: 20. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://epcmholdings.com/green-hydrogen-technology-evaluation-criteria-for-electrolyser-selection/#235\\_Technology\\_Readiness\\_Level](https://epcmholdings.com/green-hydrogen-technology-evaluation-criteria-for-electrolyser-selection/#235_Technology_Readiness_Level)
- [11] Eesti Teadusagentuur, „Tehnoloogilise valmiduse tasemed, TVT (Technology Readiness Levels, TRL) vastavalt Euroopa Liidu teadusuuringute ja raamprogrammi Horisont 2020 tehnoloogiaklassifikaatorile”. Kasutatud: 20. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://etag.ee/rahastamine/uurimistoetused/arendusgrant/tehnoloogilise-valmiduse-tasemed/>
- [12] Riigikantselei, Majandus- ja Kommunikatsiooniministerium, Keskkonnaministerium, Civitta Eesti AS, Stockholmi Keskkonnainstituudi Tallinna Keskus, Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut, „Eesti vesinikuressursside kasutuselevõtu analüüs lõpparuanne,” 2021. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2021/07/lopparuanne-vesinikuressursside-kasutamise-analuus.pdf>
- [13] F. Gambou, D. Guilbert, M. Zasadzinski, and H. Rafaralahy, „A Comprehensive Survey of Alkaline Electrolyzer Modeling: Electrical Domain and Specific Electrolyte Conductivity,” *Energies*, köide 15, nr. 9, lk. 3452, mai 2022. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. doi: <https://doi.org/10.3390/en15093452>

- [14] Danish Energy Agency ja Energinet, „Technology Data for Renewable Fuels,” 2024. Kasutatud: 29. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology\\_data\\_for\\_renewable\\_fuels.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_for_renewable_fuels.pdf)
- [15] S. Sood *et al.*, „Generic Dynamical Model of PEM Electrolyser under Intermittent Sources,” *Energies*, köide 13, nr. 24, lk. 6556, detsember 2020. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. doi: <https://doi.org/10.3390/en13246556>
- [16] KIT Laboratory for Electron Microscopy, „KIT - LEM - Research - Solid oxide fuel cells,” *www.lem.kit.edu*, 30. september 2022. Kasutatud: 13. märts 2024. Saadaval: <https://www.lem.kit.edu/english/128.php>
- [17] Keskkonnaministeerium, Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Eesti vesiniku teekaart”, veebruar 2023. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://kliimaministeerium.ee/media/10210/download&ved=2ahUKEwiU4vvOjYiGAXXvFxAIH0RCwAQFnoECAYQAQ&usq=AOvVaw2TmyI2HjZ\\_A4cj\\_fv0lWe9](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://kliimaministeerium.ee/media/10210/download&ved=2ahUKEwiU4vvOjYiGAXXvFxAIH0RCwAQFnoECAYQAQ&usq=AOvVaw2TmyI2HjZ_A4cj_fv0lWe9)
- [18] U.S Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, „Hydrogen Storage,” *energy.gov*. Kasutatud: 20. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>
- [19] G. AlZohbi, A. Almoaikeel, and L. AlShuhail, „An overview on the technologies used to store hydrogen,” *Energy Reports*, köide 9, lk. 28–34, oktoober 2023. Kasutatud: 20. märts 2024. [Võrgumaterjal]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.072>
- [20] N. Arnold, „Hydrogen Storage Technologies,” *encyclopedia.pub*, 15. juuni 2013. Kasutatud: 20. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://encyclopedia.pub/entry/23402>
- [21] BMW, „Hydrogen fuel cell cars: what you need to know | BMW.com,” *bmw.com*, 5. detsember 2019. Kasutatud: 27. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html>

- [22] A. Aslam, T. E. Butt, K. Kirsimaa, K. Suik, L. Tammiste, ja M. Rehema, „Eesti vesiniku teekaardi 2021 - 2050 ettepanek,” Stockholm Keskkonnainstituudi Tallinna Keskus, november 2021. Kasutatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2022/01/vesiniku-teekaart.pdf>
- [23] „Electricity production from hydrogen,” *www.terega.fr*. Kasutatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.terega.fr/en/lab/how-do-you-produce-electricity-from-hydrogen>
- [24] A. Aslam, T. E. Butt, K. Kirsimaa, K. Suik, L. Tammiste, ja M. Rehema, „Eesti vesiniku teekaardi 2021 - 2050 ettepanek: lisad,” Stockholm Keskkonnainstituudi Tallinna Keskus, november 2021. Kasutatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2022/01/vesiniku-teekaart--lisad.pdf>
- [25] Skepast & Puhkim, „Sillamäe ammoniaagiterminali keskkonnamõju hindamine sai valmis,” *skpk.ee*. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://skpk.ee/uudis/sillamae-ammoniaagiterminali-keskkonnamoju-hindamine-sai-valmis/>
- [26] „Mida tähendab see Eestile, kui hakkame ise ammoniaaki tootma?,” *Trialoog*, 15. veebruar 2024. Kasutatud: 13. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://trialoog.taltech.ee/mida-tahendab-see-eestile-kui-hakkame-ise-ammoniaaki-tootma/>
- [27] Statistikaamet, „Statistika andmebaas”. Kasutatud: 27.03.2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://andmed.stat.ee/et/>
- [28] Enerfit, „Eesti Energia käivitas ettevalmistused plastikeemia tehase ehitamiseks”, *energia.ee*, 15. märts 2024. Kasutatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.energia.ee/et/uudised/avaleht/-/newsv2/2024/03/15/eesti-energia-kaivitas-ettevalmistused-plastikeemia-tehase-ehitamiseks?fbclid=IwAR2Tk97A2jhIH9U68Rwq0trycZ1EvlIPNqCyWTVSjNzrVM62W904OaFiio>

- [29] „Power2X Estonia,” *Power2X Estonia*. Kasutatud: 29. märts 2024.  
[Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.power2x.ee/>
- [30] M. Lagerspetz, *Ühiskonna uurimise meetodid: sissejuhatus ja väljajuhatus*, Tallinn 2023. TLÜ Kirjastus
- [31] F. Nigbur, M. Robinius, P. Wienert, ja M. Deutsch, „Levelised cost of hydrogen. Making the application of the LCOH concept more consistent and more useful,” Agora Industry and Umlaut, juuli 2023. Kasutatud: 29. märts 2024.  
[Võrgumaterjal]. Saadaval: [www.agora-industry.org](http://www.agora-industry.org)
- [32] Danish Energy Agency, „Data Sheets for energy carrier generation and conversion,” veebruar 2024. Kasutatud: 2. aprill 2024. [Võrgumaterjal].  
Saadaval: <https://ens.dk/en/our-services/technology-catalogues/technology-data-renewable-fuels>
- [33] Elering AS modelleeritud 2030., 2035. ja 2040. aasta elektri hinnad, avaldamata.
- [34] Statista, „Forecast global green hydrogen projects’ selling prices 2021,” *statista.com*. Kasutatud: 10. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.statista.com/statistics/1260117/projected-selling-prices-of-large-scale-hydrogen-green-projects/>
- [35] „Hydrogen cost and sales prices | H2Valleys,” *h2v.eu*. Kasutatud: 10. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://h2v.eu/analysis/statistics/financing/hydrogen-cost-and-sales-prices>
- [36] Elektrilevi OÜ, „Elektrilevi võrgutasu visioon aastani 2030: kokkuvõte”. Kasutatud: 2. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141/8650150/Vorgutasu\\_visioon\\_lyhikokkuvote.pdf?fbclid=IwAR2fibdSGi8cYy-1wRVEfACws8Kum1eSx9wGkq0M6RYL66ljgBarxV7cjtE](https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141/8650150/Vorgutasu_visioon_lyhikokkuvote.pdf?fbclid=IwAR2fibdSGi8cYy-1wRVEfACws8Kum1eSx9wGkq0M6RYL66ljgBarxV7cjtE)
- [37] K. Schelling, „Green Hydrogen to Undercut Gray Sibling by End of Decade,” *BloombergNEF*, 9. august 2023. Kasutatud: 10. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://about.bnef.com/blog/green-hydrogen-to-undercut-gray-sibling-by-end-of-decade/>



- [38] G. Thomas ja G. Parks, „Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy: A Study of Issues Related to the Use of Ammonia for On-Board Vehicular Hydrogen Storage,” *U.S Department of Energy*, veebruar 2006. Kasutatud: 12. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/potential-roles-ammonia-hydrogen-economy>
- [39] „Keskkonnakaitseload,” Keskkonnaamet KOTKAS. Kasutatud: 28. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://kotkas.envir.ee/permits/public\\_detail\\_view?permit\\_id=129398&form\\_permit\\_id=129398](https://kotkas.envir.ee/permits/public_detail_view?permit_id=129398&form_permit_id=129398)
- [40] „Aktiaselts NITROFERT,” *teatmik.ee*. Kasutatud: 28. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.teatmik.ee/et/personlegal/10160963-Aktiaselts-NITROFERT>
- [41] „Green Ammonia – An Alternative Fuel,” *FutureBridge*, 3. november 2022. Kasutatud: 29. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-energy/green-ammonia-an-alternative-fuel/>
- [42] „H2.LIVE: Hydrogen Stations in Germany & Europe,” *H2.LIVE*. Kasutatud: 11. aprill 2024 [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://h2.live/en/?fbclid=IwAR0Z60dBdeBRrF7zNwlzaQVIj3-KcUv2DmJ6n08Acu3wbcoQHNDhM2veJVA>
- [43] Hyundai Motor Company, „ELEC CITY Fuel Cell | Hydrogen Bus | Hyundai Motor Company,” *Hyundai Electrified Commercial Vehicles*. Kasutatud: 23. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ecv.hyundai.com/global/en/products/electric-city-fuel-cell-fcev>
- [44] Toyota Motor Sales, „2022 Toyota Mirai Specs & Options: Full Specs”. Kasutatud: 24.04.2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.toyota.com/mirai/features/mechanical\\_performance/3002/3003](https://www.toyota.com/mirai/features/mechanical_performance/3002/3003)
- [45] Transpordiamet, „Autopargi läbisõit 2022”. Kasutatud: 27. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http>

s://www.transpordiamet.ee/media/18499/download&ved=2ahUKEwjs2If77YWG  
AxWPLRAIHeyNDXAQFnoECBEQAQ&usg=AOvVaw1gmYPQrgNp7\_ohHOyiEbOs

- [46] Tallinna Linnatransport AS, „Majandusaasta aruanne 2022“. Kasutatud: 28. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tlt.ee/wp-content/uploads/2023/10/TLT-2022-majandusaasta-aruanne-ariregistrist.pdf>
- [47] Civitta International OÜ, „Gaasitarbimise puhtale energiale ülemineku uuring: Eesti gaasitarbimise prognoos kuni 2050. aastani“, 4. juuni 2021. Kasutatud: 28. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/sites/default/files/2021-10/Eesti%20gaasitarbimise%20uuring.pdf>
- [48] Elering AS, "Elektri tarbimine ja tootmine," *elering.ee*. Kasutatud: 23. aprill 2024 [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.elering.ee/elektri-tarbimine-ja-tootmine>
- [49] D. Peterson, J. Vickers, ja D. DeSantis, „DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record“. *U.S Department of Energy*, 3. veebruar 2020. Kasutatud: 10. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: [https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/19009\\_h2\\_production\\_cost\\_pem\\_electrolysis\\_2019.pdf?Status=Master](https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/19009_h2_production_cost_pem_electrolysis_2019.pdf?Status=Master)
- [50] Gas encyclopedia, „Oxygen,“. Kasutatud: 2. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://encyclopedia.airliquide.com/oxygen#the-molecule>

# LISA 1

L1. Arvutuste tegemisel lähtunud prootonvahetusmembraaniga elektrolüüseri andmed [32]

<b>10MW</b>				
<b>Elektrolüüser</b>	<b>Ühik</b>	<b>2030</b>	<b>2035</b>	<b>2040</b>
Elektrolüüseri jaama võimsus	MW	10,00	10,00	10,00
Elektrolüüseri jaama vesiniku toodang	kg/päevas (maksimaalselt)	4739,76	4862,07	4990,85
<b>Sisend</b>				
Elektri sisendi ja väljundi suhe	MWh/MWh	100,00	100,00	100,00
Elektrolüüseri tarve	KWh/kg	50,64	49,36	48,09
Elektrolüüseri tarve + jaama käitus (BOP)	KWh/kg	56,92	55,49	54,06
Veetarve	kg/MWh (sisend)	178,00	182,33	187,16
<b>Väljund</b>				
Jaama kasutegur	% sisend (MWh/MWh)	58,50	60,01	61,60
Vesiniku toodang ühest MWh-st	kg/MWh (sisend)	19,75	20,26	20,80
Planeeritud katkestus	päeva aastas	11,00	11,00	11,00
Eluiga	aastat	25,00	25,00	25,00
Elektrolüüseri vahetamise tihedus	tundi	77500	83750	90000
Ehitusaeg	aastat	1,00	1,00	1,00
<b>Finantsandmed 2020 aasta hindade seisuga</b>				
<b>Alginvesteering</b>	€/kW sisendi kohta	950,00	837,50	725,00
Elektrolüüser	€/kW sisendi kohta	225,18	198,51	171,85
Elektrolüüseri süsteem	€/kW sisendi kohta	327,60	288,80	250,01
Jaama käitus (BOP)	€/kW sisendi kohta	135,96	119,86	103,76
Juhtimissüsteem	€/kW sisendi kohta	80,46	70,93	61,40
Ehitusinfrastruktuur	€/kW sisendi kohta	35,89	31,64	27,39
Kaudsed kulud	€/kW sisendi kohta	144,92	127,75	110,59
<b>Määratud OPEX kulud</b>	% alginvesteeringust / aastas	2,00	2,00	2,00
<b>Lisakulud</b>				
Elektrolüüseri ühekordne vahetuskulu iga 9 aasta tagant [49]	€/kW sisendi kohta	337 766,37	297 767,72	257 769,07
Veetarve	kg/kW (sisendi)	0,1780	0,1823	0,1872
Vee maksumus (mugavusvalim)	€/kW	0,0004	0,0004	0,0004
<b>ELEKTRI KULUD</b>				
Elektrihind [33]	€/MWh	53,26	47,61	34,03
Võrgutasud [36]	€/MWh	36,6	36,6	36,6
<b>TULUD</b>				
<b>Hapniku müügihind 2019 seisuga</b>	€/kg	0,11	0,11	0,11
Hapniku tihedus [50]	kg/m <sup>3</sup>	1,35	1,35	1,35
Hapniku müügihind [27]	€/m <sup>3</sup>	0,14	0,14	0,14
<b>Rohelise vesiniku oodatav turuhind 2030 [35]</b>	€/kg	6,00	6,00	6,00