

Energiatehnoloogia instituut

**ALUSELISE ELEKTROLÜÜSERI HEITSOOJUSE  
UTILISEERIMINE KAUGKÜTTEVÕRGUS**

**UTILIZATION OF WASTE HEAT FROM ALKALINE  
ELECTROLYZER IN THE DISTRICT HEATING NETWORK**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Viktoria Kislenkova

Üliõpilaskood 221368MASM

Anna Volkova, kaasprofessor

Juhendaja: tenuuris, uurimisrühma juht

Tallinn 2024

(Tiitellehe pöördel)

## **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.

"27" mai 2024.

Autor: Viktoria Kislenkova

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 202.....

Juhendaja: .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

"....." .....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

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

Mina Viktoria Kislenkova (sünnikuupäev: 07.07.1985 )

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Aluselise elektrolüüseri heitsoojuse utiliseerimine kaugküttevõrgus,

mille juhendaja on Anna Volkova,

- 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.

---

<sup>1</sup>*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

/ allkirjastatud digitaalselt /

## LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

**Üliõpilane:** Viktoria Kislenkova, 221368MASM

Õppekava, peeriala: MASM02/22 - Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja(d): Anna Volkova, kaasprofessor tenuuris, 620 3905

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) Aluselise elektrolüüseri heitsoojuse utiliseerimine kaugküttevõrgus

(inglise keeles) Utilization on waste heat from alkaline electrolyzer in the district heating network

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Uurida elektrolüüseri heitsoojuse rakendamise potentsiaali Tallinna kaugküttevõrgus
2. Hinnata kui suure osa maagast toodetud soojusenergiat saab elektrolüüseri heitsoojusega asendada ning kui palju õnnestub sellega CO<sub>2</sub> heitmeid säästa
3. Uurida kuidas protsessi heitsoojuse utiliseerimine mõjutab elektrolüüseri energiatõhusust

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Probleemi püstitus ning lõputöö teema formuleerimine	26.01.2024
2.	Lõputöö struktuuri loomine, kirjanduse ülevaate	26.01.2024 - 16.02.2024
3.	Simulatsioonimudeli valmistamine	16.02.2024 - 01.03.2024
5.	Lõputöö mustandi koostamine	01.03.2024 - 18.05.2024
6.	Lõputöö eelkaitsmine	22.05.2024
7.	Töö lõplik versioon valmis	27.05.2024

**Töö keel:** eesti      **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "27" mai 2024.a

**Üliõpilane:** Viktoria Kislenkova "27"mai 2024.a

/ allkirjastatud digitaalselt /

**Juhendaja:** ..... ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

**Konsultant:** ..... ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

**Programmijuht:** ..... ".....".....202....a

/ allkirjastatud digitaalselt /

# SISUKORD

EESSÕNA .....	8
LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU .....	9
1. SISSEJUHATUS.....	12
2. Vesinik ja selle roll tõhusa energia tulevikus.....	14
2.1 Vesiniku tootmisetehnoloogiad ja vesinikuvärvid.....	14
2.2 Vesinikutootmine, -majandus ja initsiatiivid .....	16
2.3 Vesiniku tootmine elektrolüüsi meetodil.....	20
3. Elektrolüüsi heitsoojuse kasutamise potentsiaal kaugküttes .....	24
3.1 Elektrolüüs ja heitsoojus.....	24
3.2 Heitsoojuse kasutamine kaugküttes .....	26
3.3 Elektrolüüsi heitsoojuse utiliseerimine kaugküttevõrgus.....	28
3.4 Ülevaade elektrolüüsi heitsoojuse utiliseerimise projektidest maailmas .....	30
3.4.1 Green Hydrogen Esslingen.....	31
3.4.2 Reaalsed näited Taanist .....	31
3.4.3 3H2 – Helsinki Hydrogen Hub .....	32
4. Metoodika .....	33
4.1 Uuringu objekt .....	33
4.2 Uurimistöö kirjeldus ja eesmärgid .....	33
4.3 Üürimistöö piirangud .....	34
4.4 Vesiniku tootmine .....	35
4.5 Kaugküttevõrk ja soojuse tootmine Tallinnas.....	37
4.6 Elektrolüüseri heitsoojuse integreerimine kaugküttevõrku .....	39
4.7 Heitmed .....	41
4.8 Elektrolüüseri kasutegur .....	43
4.9 Vesiniku tootmiskulud .....	43
4.10 Stsenaariumid .....	46
4.10.1 Stsenaarium 1 – projektipõhine miinimum-maht .....	47
4.10.2 Stsenaarium 2 - Vesinikutootmine piiratud tunnipõhise elektrihinnaga .....	48
4.10.3 Stsenaarium 3- Vesiniku pidev tootmine.....	49
5. Tulemused .....	50
5.1 Tulemuste kokkuvõte .....	50
5.2 Tulemuste analüüs.....	52
KOKKUVÕTE .....	57
SUMMARY.....	59
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU .....	61
LISAD .....	64

Joonis 2.1 Vesiniku värvid [9] .....	16
Joonis 2.2 Vesiniku tootmine tehnoloogia järgi, 2020-2022 [10].....	17
Joonis 2.3 Väljakuulutatud vähese heitega vesiniku tootmisprojektide kaart [10] .....	17
Joonis 2.4 Tee Euroopa vesiniku ökosüsteemini samm-sammult [12] .....	18
Joonis 2.5 Skemaatiline Eesti vesiniku teekaart .....	19
Joonis 2.6 Elektrolüüsielemendi (raku) põhiprintsiip aluselises keskkonnas koos poolläbilaskva diafragma kahe poolelemendi vahel, et eraldada vesinik ja hapnik segunemisest [15].....	20
Joonis 2.7 Aluselise elektrolüüsielemendi tüüpiline konstruktsioon [15] .....	22
Joonis 2.8 AEL elektrolüüseri virna skeem [15].....	22
Joonis 2.9 Traditsioonilise aluselise elektrolüüseri skeem [15] .....	23
Joonis 3.1 Energiavoo diagramm elektrolüüsi jaoks koos (paremal) heitsoojuse utiliseerimisega ja ilma (vasakul) [3] .....	25
Joonis 3.2 Olemasolevate soojusallikate eelistus kaugküttes [5] .....	27
Joonis 3.3 Power-to-X heitsoojuse utiliseerimise näide [21] .....	31
Joonis 4.1 Uurimistöös käsitletud süsteemi piir [3] .....	34
Joonis 4.2 Rohevesiniku tootmisskeem.....	36
Joonis 4.3 Kaugküttevõrgu soojustarbimine sõltuvalt välisõhu temperatuurist [24] ...	38
Joonis 4.4 Tallinna kaugküttevõrgu 2023. aasta tootmisgraafik tootmisüksuste kaupa [24].....	38
Joonis 4.5 Elektrolüüsvirna jahutussüsteemi skeem .....	40
Joonis 4.6 Tallinna Elektriijaama (sh Vão CHP I ja Vão CHP II tagastuva vee temperatuur) [24].....	41
Joonis 4.7 Vesiniku tootmise kulutegurid [31] .....	44
Joonis 4.8 2023. aasta NordPool elektrihind .....	46
Joonis 5.1 Stsenaariumi 1 visualisatsioon .....	51
Joonis 5.2 Stsenaariumi 2 visualisatsioon .....	51
Joonis 5.3 Stsenaariumi 2a visualisatsioon.....	52
Joonis 5.4 Stsenaariumi 3 visualisatsioon .....	52
joo 2.1 Kaasaegsete madaltemperatuuriliste vee elektrolüüsitehnoloogiate põhiomadused [3] .....	21
Tabel 4.1 Elektrolüüseri tehnilised parameetrid [19] .....	36
Tabel 4.2 Kaugküttevõrgu parameetrid heitsoojuse tarnimiseks.....	39
Tabel 4.3 Vesiniku omahinna arvutamiseks kasutatud eeldused.....	45
Tabel 4.4 Simulatsiooni 1 põhimõte .....	48
Tabel 4.5 Simulatsiooni 2 põhimõte .....	49

Tabel 4.6 Simulatsiooni 3 põhimõte .....	49
Tabel 5.1 Tulemuste koondtabel .....	50
Tabel 5.2 Heitsoojuse kogus .....	53
Tabel 5.3 Maagaasiga toodetud soojuse asendamine ja süsinikdioksiidi heitmete sääst .....	54
Tabel 5.4 Elektrolüüseri efektiivsus .....	55
Tabel 5.5 Elektri hind ja vesiniku tootmiskulud .....	56

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema sõnastati Tallinna Tehnikaülikooli tenuuri kaasprofessori ja uurimisgrupi juhi Anna Volkova juhendamisel. Uurimistöö algandmed, sealhulgas Tallinna kaugküttevõrgu ja soojustootmise andmed, pärinevad AS Utilitas Tallinn AS-ilt. Vesiniku tootmisüksuse andmed ja rohevesiniku tervikahela projekti informatsioon pärinevad Stargate Hydrogen Solution OÜ-lt ja Utilitas OÜ-lt.

Töö koostamisel sain hindamatut abi ja toetust mitmelt isikult. Eelkõige soovin tänada oma juhendajat, Anna Volkovat, kelle juhendamine oli määrava tähtsusega töö eduka valmimise jaoks. Tema kriitiline mõtlemine ja professionaalne nõustamine aitasid suunata uurimistöö fookust ning tagada töö akadeemilise kvaliteedi.

Samuti soovin tänada oma lähedasi ja töökaaslasi, kes toetasid ja innustasid mind kogu lõputöö kirjutamise protsessi vältel.

Lõputöö peamiseks eesmärgiks oli uurida elektrolüüseri heitsoojuse rakendamise potentsiaali Tallinna kaugküttevõrgus, arvestades planeeritava elektrolüüseri kättesaadavat heitsoojust ja kaugküttevõrgu tootmisüksusi.

Töö kirjutamise protsess oli suurepärane õppimiskogemus, mis andis mulle sügavamad teadmised uuritud valdkonnas. Loodan, et see töö pakub väärtuslikke teadmisi elektrolüüsi heitsoojuse kaugküttesüsteemi integreerimise võimalike eeliste ja tehnilise teostatavuse kohta.

**Võtmesõnad:** magistritöö, vesinik, kaugküte, heitsoojus, taastuvad energiaallikad, soojustoomine



## LÜHENDTE JA TÄHISTE LOETELU

*FID – (Final Investment Decision) lõplik investeerimisotsus*

*CO<sub>2</sub> – süsihapegaas, süsinikdioksiid*

*CO – vingugaas, süsinikmonoksiid*

*H<sub>2</sub> - vesinik*

*O<sub>2</sub> - hapnik*

*H<sub>2</sub>O - vesi*

*SMR – (steam methane reforming) maagaasi aurureformimine*

*CCS / CCUS – (Carbon Capture, Utilisation and Storage) süsinikdioksiidi kinnipüüdmine, kasutamine ja ladustamine*

*PEM – (Proton Exchange membrane) Prootonivahetusmembraan*

*EL - Euroopa Liit*

*PtX/P2X (Power-to-X) –on elektrienergia muundamine, energia salvestamine ja taastuvenergia ülejäägist rekonverteerimine. X võib terminoloogias viidata ühele järgmistest: power-to-ammoniaak, power-to-kemikaalid, power-to-gaas (power-to-vesinik, power-to- metaan) jne*

*DC - direct current*

*AEL - (Alkaline electrolysis) leeliseline (aluseline) elektrolüüs*

*SOEC - (solid oxide electrolyzer cell) tahkeoksiid elektrolüüselement*

*TVT - tehnoloogilise valmiduse tase*

*LHV - (lower heating value) alumine kütteväärtus*

*HHV - (higher heating value) ülemine kütteväärtus*

*LTE - (low temperature electrolysis) madaltemperatuuriline elektrolüüs*

*KK - kaugküte*

*KKV - kaugküttevõrk*

*KHG - kasvuhoonegaas*

*LCA - (life cycle assessment) elutsükli hindamine*

*BoL - (beginning of life) eluea algus*

*EoL - (end of life) eluea lõpp*

*CHP - (combined heat and power) koostootmisjaam*

*CAPEX - (Capital expenditure) kapitalikulud*

*OPEX - (Operating expenses) tegevuskulud*

*LCOH - (levelized cost of hydrogen) tasandatud vesiniku hind*

*WLTP - World Harmonized Light Vehicle Test Procedure, mis on sõiduautodele mõeldud laboratooriumitest, mis töötab nn päriselu sõiduandmete pealt ja arvutab sealjuures kokku CO<sub>2</sub> emissioonide ning kütusekulu numbrid*

*$Q_{primaar}$  - kasutatud primaarenergia kogus, [MWh]*

*$Q_{maagaas}$  - maagaasiga toodetud ja kaugküttevõrgu suunatud soojuse hulk, [MWh]*

*$\eta_{gaasi\ katel}$  - gaasikatla kasutegur, [%]*

*$m_{CO_2}$  - CO<sub>2</sub> heitmekogus, [kg]*

*$q_{CO_2}$  - maagaasi süsihappegaasi heitmefaktor  $\left[\frac{kgCO_2}{MWh}\right]$*

*$Q_{primaar}$  - kasutatud primaarenergia kogus, [MWh]*

*$q_c$  - süsinikuheitme faktor  $\left[\frac{tC}{TJ}\right]$*

*$\eta_{H_2}$  - elektrolüüseri kasutegur, [%]*

*HHV (H<sub>2</sub>) - (Higher heating value) Vesiniku ülemine kütteväärtus, [kWh/kg H<sub>2</sub>]*

*$E_{elektrolüüser}$  - elektrolüüseri energiatarve, [kWh/kg H<sub>2</sub>]*

*$\eta_{H_2+soojus}$  - elektrolüüseri kasutegur heitsoojuse utiliseerimisega, [%]*

*$Q_{jääk}(H_2)$  - vesiniku tootmisel utiliseeritud erisoojus, [kWh/kg H<sub>2</sub>]*

*LCOH - (levelized cost of hydrogen) vesiniku tasandatud hind, [EUR/kg]*

$I_0$  – investeerimiskulud eurodes

$I_t$  – Investeerimiskulud aastal  $t$  (virna asendamise kulud) eurodes

$E_t$  – Aastal  $t$  tarbitud elekter, sealhulgas tootmiskulud, võrgukulud ja maksud, kui need on kohaldatavad, ning elektrolüüseri virna degradeerimine

$M_t$  – Muud tegevuskulud aastal  $t$

$H_t$  – Vesiniku tootmine aastal  $t$

$r$  – Diskontomäär või kapitalikulu

# 1. SISSEJUHATUS

Tuleviku energiasüsteemis võib vesinik mängida kesket rolli, pakkudes lahendusi, mis aitavad oluliselt vähendada süsinikuheidet erinevates sektorites. Vesiniku kasutamine võib olla eriti tõhus tööstuses, transpordis, energia tootmises ja ehitussektoris, kus traditsioonilised süsinikupõhised energialahendused põhjustavad märkimisväärseid heitkoguseid. Kuna globaalsed tarneahelad liiguvad jätkusuutlikumate ja keskkonnasõbralikumate lahenduste poole, suureneb lähiaastatel märkimisväärselt nõudlus vesiniku tootmistehnoloogiate järele. See kasvav nõudlus peegeldab vajadust innovatiivsete ja tõhusate lahenduste järele, mis suudavad rahuldada suurenevat energiavajadust, vähendades samal ajal ökoloogilist jalajälge.

Vesinikku on mitut erinevat tüüpi, mida liigitatakse tootmisprotsessi ja sellest tulenevate kasvuhoonegaaside heitkoguste alusel. Puhas vesinik, tuntud ka kui "taastuv vesinik" või "roheline vesinik," saadakse vee elektrolüüsil, kasutades elektrit, mis on toodetud taastuvatest energiaallikatest. Selle tootmisprotsessi käigus ei eraldata kasvuhoonegaase, muutes selle keskkonnasõbralikuks alternatiiviks traditsioonilistele vesiniku tootmise meetoditele.

Elektrolüüs on paljulubav meetod vesiniku tootmiseks taastuvatest energiaallikatest, kuid sellel on üks oluline puudus, protsessi käigus vabaneb suurtes kogustes soojusenergiat, mis tavaliselt jääb kasutamata.

Kaugkütte mängib samuti olulist rolli säästvate energiasüsteemide tulevikus. Globaalsed keskkonnaprobleemid ja jätkusuutliku energiaallika otsingud on muutnud heitsoojuse taaskasutamise üheks olulisemaks teemaks energiatööstuses, eriti oluline on see kaugküttesüsteemide kontekstis, kus tööstusprotsesside ja muude heitsoojusallikate jääksoojuse utiliseerimine võib oluliselt parandada süsteemi tõhusust ja vähendada keskkonnamõju.

Käesolev töö, käsitleb leeliselisest elektrolüüserist pärineva heitsoojuse rakendamise potentsiaali Tallinna kaugküttevõrgus ning annab ülevaate nii teoreetilisest potentsiaalst kui ka praktilistest rakendustest, toetudes Eesti vesiniku tervikahela pilootprojektile ja laiematele Euroopa Liidu algatustele.

Idee seisneb selles, et suunata elektrolüüseri heitsoojus kaugküttesüsteemi, kus see võiks asendada muud tüüpi kütteallikaid, vähendades seeläbi fossiilkütuste tarbimist ja CO<sub>2</sub> heitmeid. Uuringud näitavad, et elektrolüüsi heitsoojuse integreerimine kaugküttesüsteemidesse võib oluliselt suurendada mõlema süsteemi energiatõhusust ja jätkusuutlikkust, aidates seeläbi kaasa säästvama ja tõhusama energiaökosüsteemi loomisele [1–3].

Elektrolüüsideadmete heitsoojuse kaugküttevõrku integreerimise praktilisi rakendusi ja eeliseid toetavad veelgi heitsoojuse ärakasutamise juhtumiuuringud ja olemasolevad

rakendused. Näiteks on erinevatest tööstus- ja energiaprotsessidest tekkiva heitsoojuse integreerimine kaugküttesüsteemidesse juba osutunud tõhusaks Euroopas, kus sellised algatused on toonud kaasa süsinikdioksiidi heitkoguste olulise vähenemise ja energiatõhususe paranemise [4–6].

Nendele fundamentaalsetele uuringutele ja kogemustele tuginedes vaadeldakse käesolevas lõputöös juhtumiuuringut Tallinna linnas, kus plaanitakse elektrolüüseri heitsoojuse utiliseerimise kasutuselevõttu. Tallinnas rakendatav vesiniku tervikahela pilootprojekt pakub väärtuslikku ülevaadet ja andmeid selle kohta, kuidas leeliseliste elektrolüüserite heitsoojus võib kaugküttesüsteemi integreerimisel mõjutada linna energiatarbimise mustrit. Selle töö eesmärk on anda põhjalik analüüs võimalike mõjude kohta, sealhulgas keskkonnakasu, energiatõhususe paranemine ja majanduslik kokkuvõtteid, käsitledes samal ajal ka sellise integreerimisega seotud väljakutseid ja tehnilisi kaalutlusi.

See uurimistöö aitab kaasa akadeemilisele ja praktilisele arutelule säästvate energialahenduste üle ning ühtib ka ülemaailmsete energia ülemineku eesmärkidega ja kasvava keskendumisega rohelisele vesinikule kui tulevaste energiasüsteemide võtmelemendile. Kirjeldades üksikasjalikult leeliseliste elektrolüüserite heitsoojuse kasutamise potentsiaali, on selle töö eesmärk inspireerida edasisi uuringuid ja sarnaseid projekte, mis tähistab olulist sammu säästvama linnaenergia juhtimise suunas nii Eestis kui ka välismaal.

## 2. Vesinik ja selle roll tõhusa energia tulevikus

Kliimakriisi üha kasvav tunnustamine on loonud aluse ülemaailmsele üleminekule säästvatele ja vähese CO<sub>2</sub>-heitega energiasüsteemidele. Nende mõjude leevendamiseks on vaja kiireid ja olulisi meetmeid, mis nõuavad üleminekut säästvamatele energiaallikatele. Selles kontekstis vesinikku tunnustatakse järjest enam selle mitmekülguse eest puhta energia kandjana, mis hakkab mängima võtmerolli globaalsete süsinikuheitmete vähendamisel erinevates valdkondades nagu energiasalvestus, transport ning tööstus.

Käesolev peatükk annab põhjaliku ülevaate vesinikust, kui potentsiaalsest puhta energia kandjast, erinevatest vesinikuliikidest, mis klassifitseeritakse vastavalt nende tootmismeetoditele. Samuti analüüsitakse vesiniku tootmise praegust olukorda nii globaalsel kui ka Euroopa tasandil, tuues esile tootmismahud ja tulevikusuundumused. Erilist rõhku pannakse roheline vesiniku tootmisele elektrolüüsi meetodil, mida peetakse keskkonnasõbralikuks ja paljulubavaks tehnoloogiaks.

### 2.1 Vesiniku tootmisetehnoloogiad ja vesinikuvärvid

Vesinikutehnoloogial on lähematel kümnenditel potentsiaal olla Euroopa transpordi ja energiamajanduse keskmes. Siiski sõltub selle elujõulisus puhta energia kandjana suueresti sellest, kuidas seda toodetakse. Vesiniku tootmise viisid erinevad olenevalt kasutatavast tootmismeetodist ja energiaallikast, millest igaühel on oma keskkonnamõju. Vesiniku värvus annab märku selle tootmisviisi keskkonnasõbralikkusest (Joonis 2.1).

Erinevates allikates käsitletakse erinevaid vesiniku värve ning see teave võib varieeruda sõltuvalt allikast. Alljärgnevalt tutvustan peamisi vesiniku liike värvide kaupa.

**Hall vesinik** on kõige levinum vesiniku tootmise viis, mis hõlmab maagaasi aurureformimist (Steam Methane Reforming, SMR). Selles protsessis reageerib maagaas (metaan) kõrgel temperatuuril veeauruga, mille tulemusena saadakse vesinik ja süsinikdioksiid. Tootmise käigus eralduv süsinikdioksiid (CO<sub>2</sub>) on kasvuhuonegaas, mis panustab globaalsesse soojenemisse. Halli vesiniku tootmise väljundiks on seega vesinik (H<sub>2</sub>) ja märkimisväärsed kogused süsinikdioksiidi.

**Sinine vesinik** toodetakse sarnaselt halli vesinikuga maagaasi aurureformimise teel, kuid selle eripära on süsinikku püüdmise ja säilitamine (Carbon Capture and Storage, CCS). Sinise vesiniku tootmise protsessis püütakse tekkinud süsinikdioksiid kinni ja säilitatakse ohutult maa-alustes ladustamispaikades või kasutatakse edasiseks tööstuslikuks otstarbeks. See vähendab oluliselt protsessi keskkonnamõju võrreldes

halli vesinikuga. Sinise vesiniku tootmise väljundiks on vesinik ( $H_2$ ) ja püütud süsinikdioksiid ( $CO_2$ ).

**Pruun vesinik** ja **must vesinik**, toodetakse kivisöe gaasistamise teel. Pruuni vesiniku puhul kasutatakse pruunsütt ja musta vesiniku puhul kivisütt. Gaasistamise protsessis reageerib kivisüsi kõrgel temperatuuril ja rõhul auruga, mille tulemusel saadakse vesinik ja süsinikmonooksiid. Edasistes reaktsioonides saadakse veel rohkem vesinikku ja süsinikdioksiidi. Need protsessid on keskkonnale väga kahjulikud, kuna tekib suur hulk süsinikdioksiidi ja teisi saasteaineid, näiteks tahma. Pruun ja must vesinik, mida toodetakse kivisöe gaasistamise teel, ei koosne ainult vesinikust, vaid selle osad on lisaks  $CO_2$ ,  $CO$ , metaan, etüleen ja väikses osas muud gaasid.

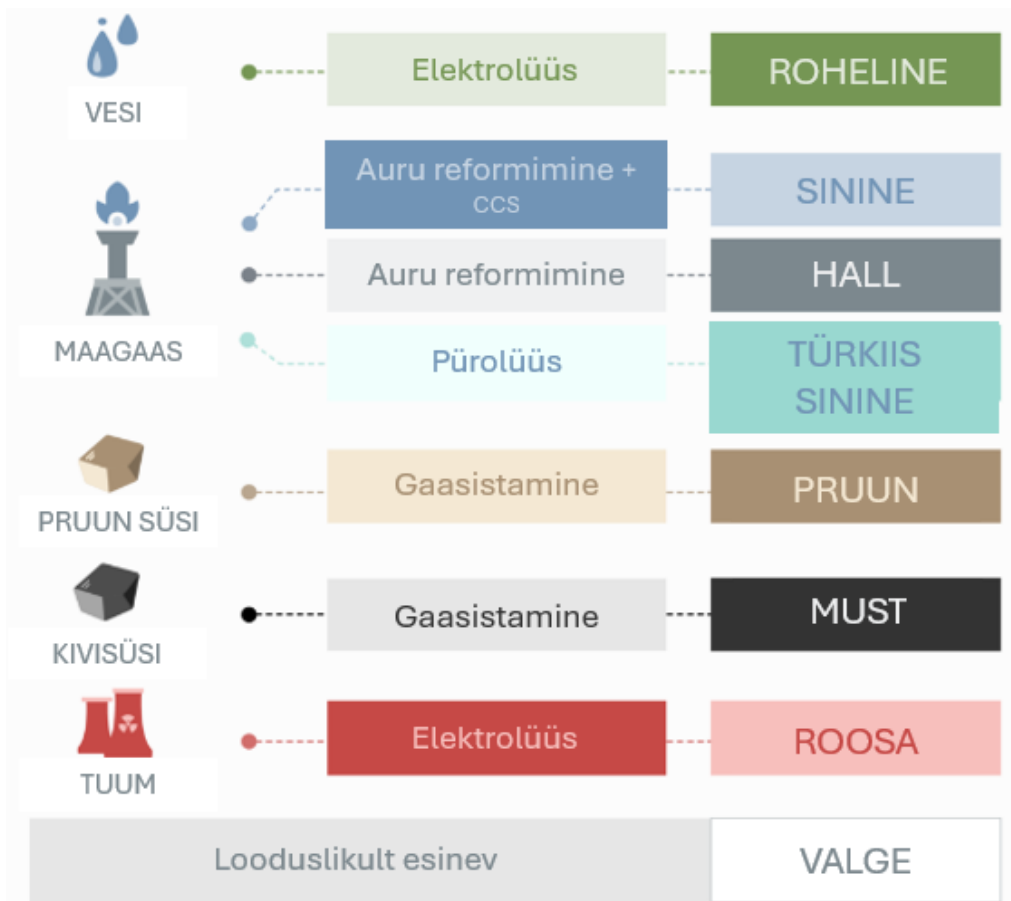
**Roosa vesinik** toodetakse vee elektrolüüsi teel, kuid kasutades elektrienergia allikana tuumaenergiat. Sarnaselt roheline vesinikuga jagatakse vesi ( $H_2O$ ) elektrolüüsi teel vesinikuks ja hapnikuks, kuid energiaallikaks on tuumaenergia. See meetod on süsinikuvaba, kuna tuumaenergia tootmisel ei eraldu süsinikdioksiidi. Roosa vesiniku tootmise väljundiks on puhas vesinik ( $H_2$ ) ja hapnik ( $O_2$ ).

**Türkiis sinine vesinik** toodetakse metaani pürolüüsi teel. Pürolüüsi protsessis laguneb metaan ( $CH_4$ ) kõrgel temperatuuril vesinikuks ja tahkeks süsinikuks. Kuna selles protsessis ei teki süsinikdioksiidi, peetakse seda keskkonnasõbralikumaks võrreldes halli või pruuni vesinikuga. Tootmise väljundiks on vesinik ( $H_2$ ) ja tahke süsinik ( $C$ ), mida saab kasutada erinevates tööstuslikes rakendustes.

**Valge vesinik** viitab looduslikult esinevale vesinikule, mis ei ole tööstuslikult toodetud. Valge vesinik tekib maapinnas geoloogiliste protsesside tulemusena ja seda võib leida teatud geoloogilistes piirkondades. Kuna valge vesinik ei ole tootmisprotsessi tulemus, ei kaasne selle kasutamisega täiendavat süsinikuemissiooni. Valge vesiniku väljundiks on puhas vesinik ( $H_2$ ).

**Roheline vesinik** on keskkonnasõbralikum variant, mida toodetakse vee elektrolüüsi teel, taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrist. Elektrolüüsi protsessis jagatakse vesi ( $H_2O$ ) elektrienergia abil vesinikuks ja hapnikuks ning sellel tootmisel ei eraldata kasvuhoonegaase. Tootmisprotsessi väljundiks on vesinik ( $H_2$ ) ja hapnik ( $O_2$ ).

Rohelise vesiniku tootmise viis, milleks on vee elektrolüüs on juba hästi välja kujunenud ning küps tehnoloogia. Rohelise vesiniku tootmise tehnoloogiad, nagu näiteks PEM (prootonivahetusmembran) elektrolüüs ja leeliselektrolüüs, on aktiivses edasiarendamises ja neid täiustatakse pidevalt, et muuta protsessid tõhusamaks ja kuluefektiivsemaks. Tänu oma keskkonnasõbralikkusele on roheline vesiniku potentsiaal tuleviku energiamajanduses märkimisväärne, eriti sektorites, kus süsinikdioksiidi vähendamine on kriitilise tähtsusega, nagu transport ja tööstus. [7–9]



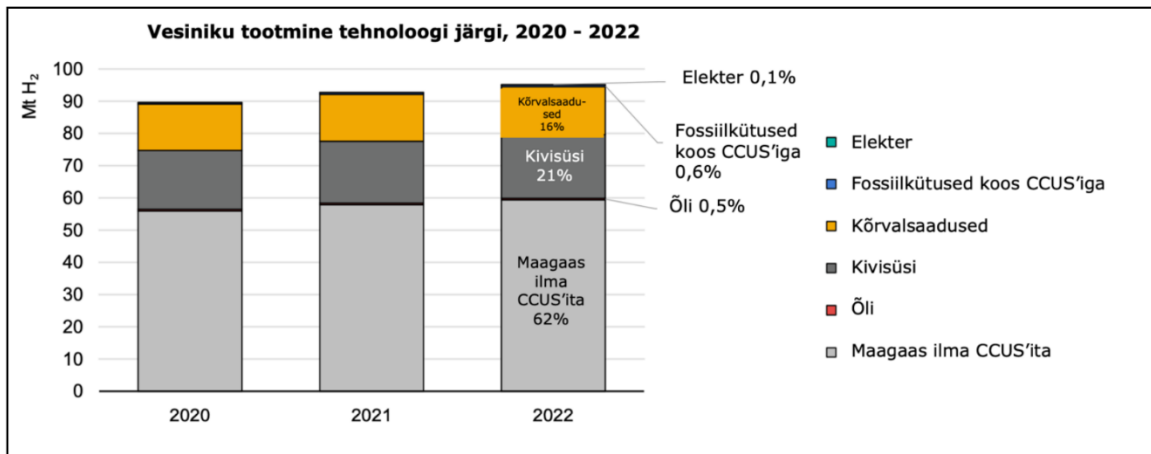
Joonis 2.1 Vesiniku värvid [9]

## 2.2 Vesinikutootmine, -majandus ja initsiatiivid

Vesinikutööstus laieneb kiiresti. Ülemaailmne vesiniku tarbimine jõudis 2022. aastal 95 miljoni tonnini (Joonis 2.2), mis on peaaegu 3% rohkem kui 2021. aastal [10]. Siiski on endiselt vaja lahendada mitmeid väljakutseid, nagu roheline vesiniku tootmise skaleerimine, kulude vähendamine ja ohutuse tagamine. Praegu põhineb suurem osa vesiniku tootmisest fossiilkütustel, mis põhjustab märkimisväärseid süsinikuheidet. Selle probleemi lahendamiseks keskendutakse üha enam roheline vesiniku tootmisele, et vähendada keskkonnamõju.

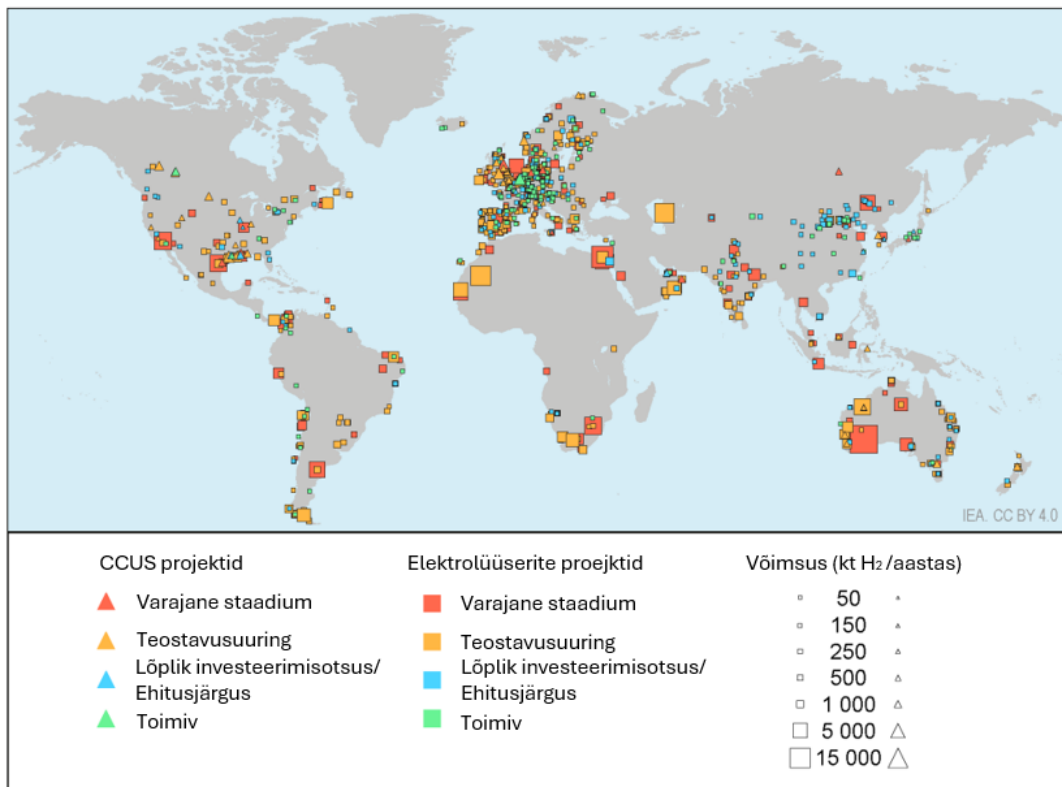
Maagaasist vesiniku tootmine moodustas 62% ülemaailmsest toodangust, kivisööst - andis 21% ülemaailmsest toodangust. Vesinik, mida toodetakse rafineerimistehastes ja naftakeemiatööstuses, moodustas 16% maailma toodangust. Madala heitega vesiniku tootmine oli 2022. aastal alla 1 Mt (0,7% maailma toodangust) ning peaaegu täielikult maagaasist koos CCS-ga (Joonis 2.2). Vee elektrolüüs moodustas vaid 0,1% tänapäeva globaalsest vesinikutoodangust. Ei tohi aga mainimata jätta, et elektrolüüserite installeeritud võimsus ja väljakuulutatud projektide arv on viimastel aastatel kiiresti kasvanud.[10]





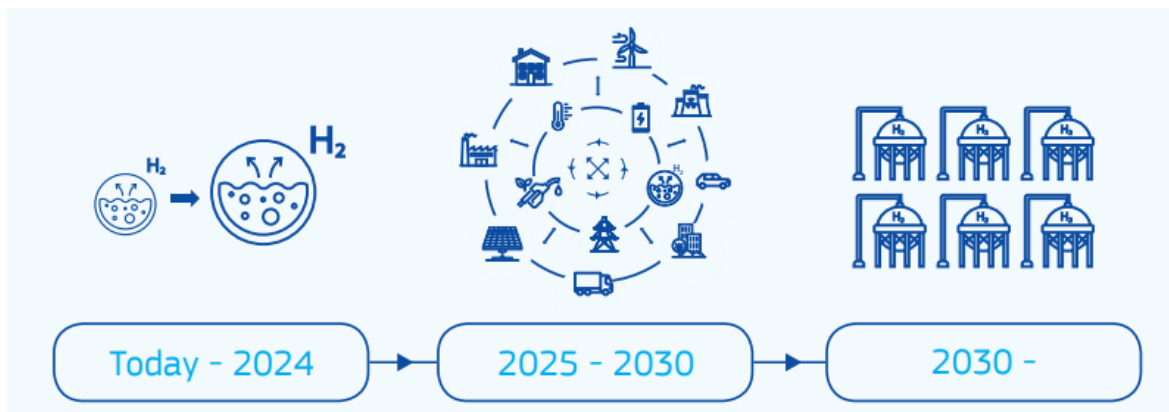
Joonis 2.2 Vesiniku tootmine tehnoloogia järgi, 2020-2022 [10]

Tulevikku vaadates peaks rohelise vesiniku tootmise trajektoor oluliselt suurenema tänu ülemaailmsetele jõupingutustele üleminekul puhtamatele energiaallikatele. Väljakuulutatud projektide põhjal (Joonis 2.3) võib 2030. aastaks ülemaailmne paigaldatud elektrolüüsiseadmete võimsus ulatuda 175 GW-ni. Selle prognoositava kasvu põhjuseks on kasvav nõudlus puhtamate tööstusprotsesside järele ja transpordisektori nihkumine vesinikkütusele. [4]



Joonis 2.3 Väljakuulutatud vähese heitega vesiniku tootmisprojektide kaart [10]

Euroopa Liit (EL) on seadnud ambitsioonikad eesmärgid saada süsinikuneutraalseks aastaks 2050 ning oodatakse, et vesinik hakkab mängima olulist rolli selle eesmärgi saavutamisel. Juulis 2020 avaldatud EL-i vesiniku strateegia eesmärk on suurendada vesiniku tootmist ja kasutamist, eriti rohelist vesinikku, investeeringute abil uurimis- ja innovatsioonitegevusse, infrastruktuuri arendamisse ning poliitilise toetuse kaudu. Strateegia näeb ette vesiniku kasutamise laiendamist tööstuse, transpordi ja soojusenergia valdkondades ning rahvusvahelise koostöö soodustamist vesiniku tehnoloogiate ja turgude osas. [11]

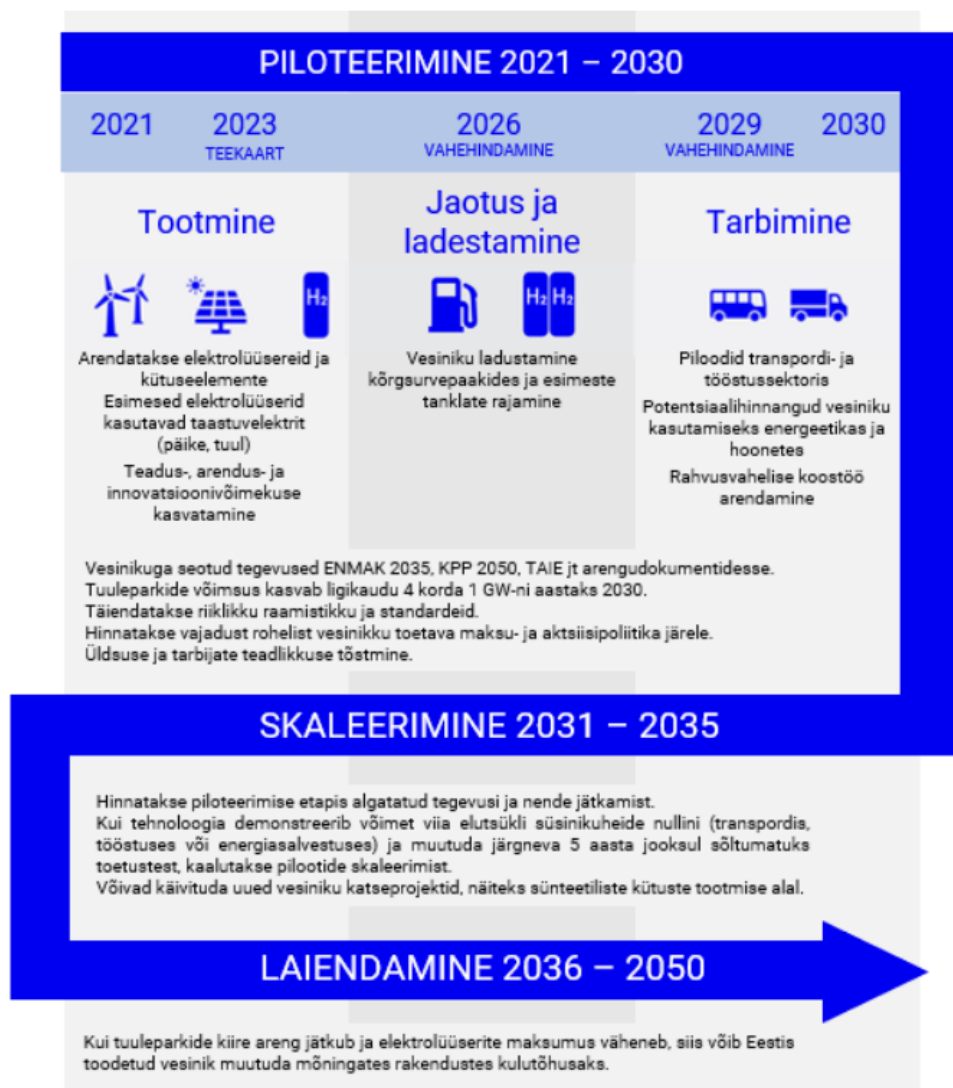


Joonis 2.4 Tee Euroopa vesiniku ökosüsteemini samm-sammult [12]

Esimeses etapis, aastatel 2020–2024, on strateegia eesmärk paigaldada vähemalt 6 GW taastuva vesiniku elektrolüüsi teel tootmist. Tootmise kogus oleks kuni üks miljon tonni taastuvat vesinikku. Teises etapis, aastatel 2025–2030, on strateegia eesmärk paigaldada vähemalt 40 GW taastuva vesiniku elektrolüüsi teel tootmist. Kolmandas etapis, alates 2030. aastast ja aastani 2050, peaksid taastuva vesiniku tehnoloogiad jõudma küpsuseni ja neid tuleks laiemalt kasutusele võtta, et jõuda kõikidesse süsinikdioksiidihetega sektoritesse, kus muid alternatiive ei pruugi olla või millel on kõrgemad kulud (Joonis 2.4).[11]

Ka Eesti on võtnud eesmärgiks arendada aktiivselt vesinikumajandust, keskendudes samuti taastuvenergiaallikatest toodetud vesiniku potentsiaalile. Riik on seadnud plaanid suurendada taastuvelektri kättesaadavust, mis on oluliseks sammuks rohelse vesiniku tootmise laiendamisel. Allpool (Joonis 2.5) on toodud skemaatiline Eesti vesiniku teekaart. Aastad 2021–2030 on määratletud kui vesinikusektori piloteerimise etapp, mille jooksul keskendutakse poliitikameetmete väljatöötamisele, teadus- ja arendustegevusele ning mitmetele pilootprojektidele [13]

Aastatel 2031–2035 - skaleerimise etapis - keskendutakse vesiniku väärtusahela arendamisele, majandusmudelite täiustamisele ja nõudluse-pakkumise tasakaalu saavutamisele. On oodata ka uusi katseprojekte, näiteks sünteetiliste rohekütuste tootmine. Aastatel 2036–2050 on laiendamise etapi aeg, mis hakkab sõltuma varasemate etappide edukusest. [13]



Joonis 2.5 Skemaatiline Eesti vesiniku teekaart

Eesti eesmärk on lähiaastatel toota 2000–40000 tonni rohelist vesiniku aastas[13]. Eeldatakse, et nõudlus kasvab 40–70 kilotonnilt 2030. aastal 160–320 kilotonnini 2050. aastaks. [14]

Valitsus on juba investeerinud märkimisväärseid summasid vesinikutehnoloogiate arendamise toetamiseks, eraldades alates 2020. aastast vesinikusektori arendamiseks üle 120 miljoni euro. Lisaks on plaanitud taaste- ja vastupidavusrahadu vahenditest suunata 49,1 miljonit eurot vesiniku terviktehnoloogiate kasutuselevõtu edendamiseks.[13,14]

Kuigi see ülevaade ei ole kõikehõlmav, rõhutavad esitatud perspektiivid selgelt, et vesinik, mis on toodetud elektrolüüsi tehnoloogia abil, omab tulevastes energiasüsteemides märkimisväärset tähtsust. Elektrolüüsi tootmistehnoloogia keskne roll toob esile selle olulise potentsiaali ja kriitilise tähtsuse homse energialahenduste arendamisel ja jätkusuutlikkuses. See tehnoloogia mitte ainult võimaldab puhta vesiniku

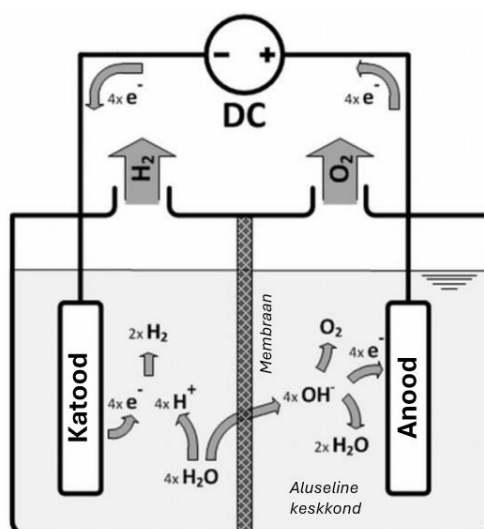
tootmist, kuid aitab ka vähendada süsiniku jalajälge ja toetada taastuvenergia integreerimist.

Tulevased arengud, poliitiline toetus ja turu dünaamika tõenäoliselt suurendavad elektrolüüsi tähtsust veelgi, muutes selle võtmeteguriks energiamaastiku kujundamisel. Elektrolüüs, mis kasutab vett ja taastuvenergiat, pakub lahendust, mis võib aidata saavutada süsinikuneutraalsuse eesmärgi ja pakkuda puhta energia allikat paljudes tööstusharudes. Sel viisil muutub elektrolüüs asendamatuks komponendiks mitte ainult energiavarustuses, vaid ka keskkonna kaitsmisel ja kestlikkuse tagamisel.

## 2.3 Vesiniku tootmine elektrolüüsi meetodil

Et rahuldada tulevast vesinikunõudlust, peetakse taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrolüüsi peamiseks tehnoloogiaks taastuva vesiniku tootmisel. Vee elektrolüüs, on juba hästi välja kujunenud ning küps tehnoloogia, mis põhineb elektrienergia abil vee molekuli lõhustamisel vesinikuks ja hapnikuks. [8]

Vee elektrokeemiline lagundamine vesiniku ja hapniku tootmiseks, ehk **elektrolüüs** on üsna lihtne protsess, mis hõlmab kahte elektroodi elektrolüüdis, mis on ühendatud alalisvoolu (DC) toiteallikaga (Joonis 2.6). See on endotermiline reaktsioon, mis nõuab energiavarustust ja kui elemendile (rakule) on rakendatud piisavalt kõrge pinge, toimub redoksreaktsioon, mille käigus tekib katoodil (negatiivne elektrood) vesinik ja anoodil (positiivne elektrood) hapnik. Poolelemendi eraldamiseks kasutatakse pooläbilaskvat membraani, et vältida tootegaaside segunemist, võimaldades samal ajal ionide transporti. [15]



Joonis 2.6 Elektrolüüsielemendi (raku) põhiprintsiip aluselises keskkonnas koos pooläbilaskva diafragma kahe poolelemendi vahel, et eraldada vesinik ja hapnik segunemisest [15]

See tööpõhimõte kehtib igat tüüpi vee-elektrolüüsielementide puhul, need erinevad ainult kasutatava elektrolüüdi poolest. Kõige levinumad tehnoloogiad on aluselise

vedela elektrolüüdiga töötavad leeliselised elektrolüüsielemendid (AEL cell), protonvahetusmembraan elektrolüüsielemendid (PEM) ja kõrgtemperatuuriline või tahkeoksiid elektrolüüselement (SOEC), mis kasutavad tahket elektrolüüti [15]

Leeliseline elektrolüüs (AEL) ja protonvahetusmembraani (PEM) elektrolüüs on madalatemperatuurilise elektrolüüsi tehnoloogiad, mis töötavad temperatuuril alla 100° C. Need kaks tehnoloogiat esindavad tänapäeval kõige küpsemaid ja kaubanduslikult kättesaadavaid tehnoloogiaid. Tulenevalt asjaolust, et käesolev lõputöö keskendub põhiliselt madala temperatuuriga vee elektrolüüsile, millel on potentsiaal kiireks suuremahuliseks kasutuselevõtuks, uuritakse edaspidi üksikasjalikumalt ainult AEL ja PEM tehnoloogiaid.

Ülevaade kaasaegsetest elektrolüüsitehnoloogiatest ja nende parameetritest on toodud tabelis (Tabel 2.1) ning allpool lisandub ka iga tehnoloogia väike kirjeldus.

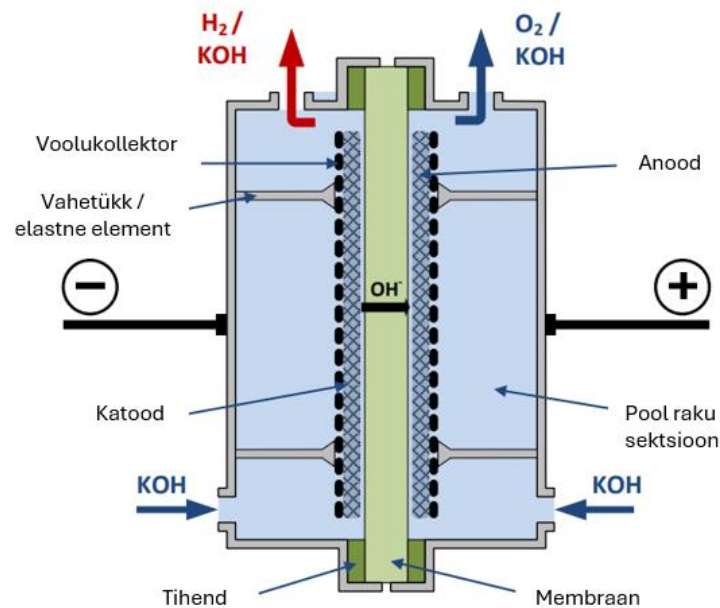
Tabel 2.1 Kaasaegsete madaltemperatuuriliste vee elektrolüüsitehnoloogiate põhiomadused [3]

Tehnoloogia	AEL	PEM
Tehnoloogia tase	Kaubanduslik	Kaubanduslik
	TVT 9[16]	TVT 8-9[16]
Opereerimistemperatuur	60-90°C	50-80°C
Tüüpiline virna võimsus	<10 MW	<5 MW
Elektriline efektiivsus (LHV)	63-71%	60-68%
Koormuse paindlikkus	20-100%	0-100%
Külm käivitus	1-2 h	5-10 min
Soe käitus	1-5 min	<10 s

**Leeliseline elektrolüüs (AEL)**, üks vanimaid ja küpsemaid tehnoloogiaid, kus elektrolüüdina kasutatakse kaalium- või naatriumhüdroksiidi leeliselist vesilahust. Selles protsessis oksüdeeritakse anoodil olev vesi hapniku ja positiivselt laetud vesinikuioonide (prootonite) tootmiseks, mis seejärel migreeruvad läbi elektrolüüdi katoodile, kus need redutseeritakse gaasiliseks vesinikuks. Leeliselised elektrolüüserid on tuntud oma vastupidavuse poolest ja neid on laialdaselt kasutatud tööstuslikes rakendustes, pakkudes suhteliselt kõrget efektiivsust, umbes 60–70%. Kuid nende suured mõõdud ja aeglasem dünaamiline reaktsioon võrreldes teiste tehnoloogiatega muudavad need vähem sobivaks rakendustele, mis nõuavad kiiret väljundi reguleerimist.

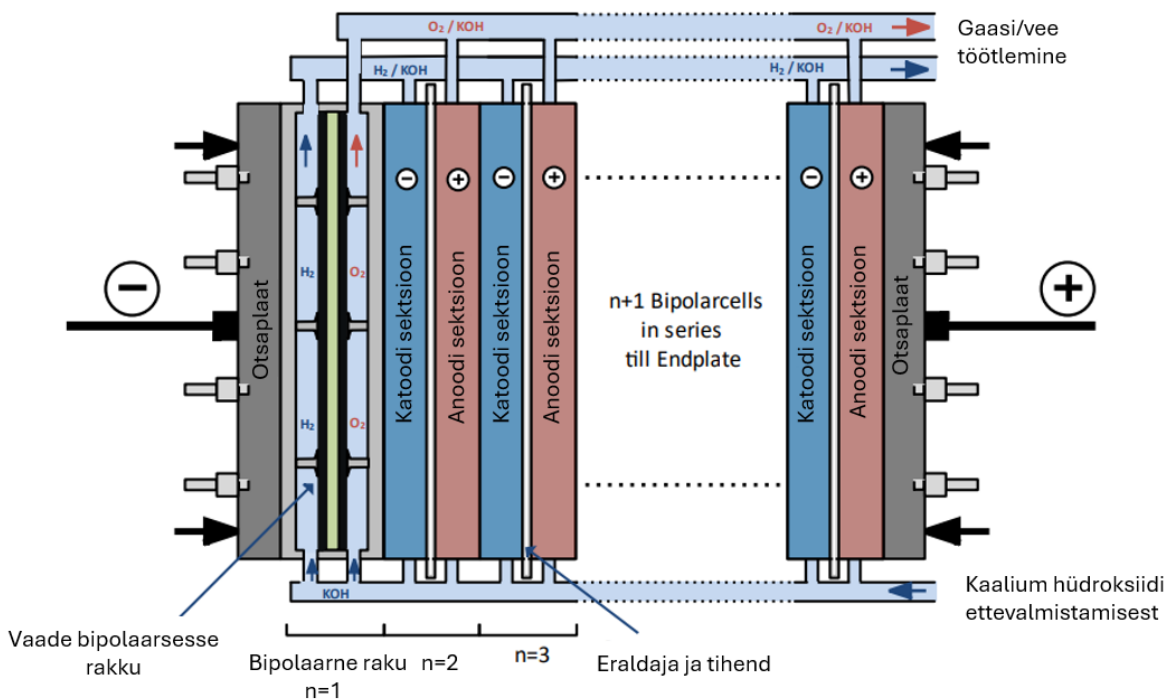
**Protonvahetusmembraani (PEM)** elektrolüüs on uuem vesiniku tootmise tehnoloogia. See kasutab polümeerelektrolüütmembraani ja töötab suurema voolutihedusega, mille tulemuseks on palju kompaktsemad süsteemid. PEM-elektrolüüs pakub kiiremaid reageerimisaegu ja kõrgema puhtusastmega vesiniku väljundis, mis on kütuseelementide rakenduste jaoks ülioluline. Vaatamata oma suuremale efektiivsusele, mis võib ületada 70%, kritiseeritakse seda tehnoloogiat sageli selle kõrge hinna pärast, peamiselt kallite katalüsaatorimaterjalide, nagu plaatina ja iriidium, kasutamise tõttu. Traditsioonilised elektrolüüsisüsteemid jagunevad kolmeks tasandiks:

- **Rakus** (elemendis) (Joonis 2.7) toimuvad elektrokeemilised reaktsioonid, seega on see elektrolüüseri põhielement. [15]



Joonis 2.7 Aluselise elektrolüüsielemendi tüüpiline konstruktsioon [15]

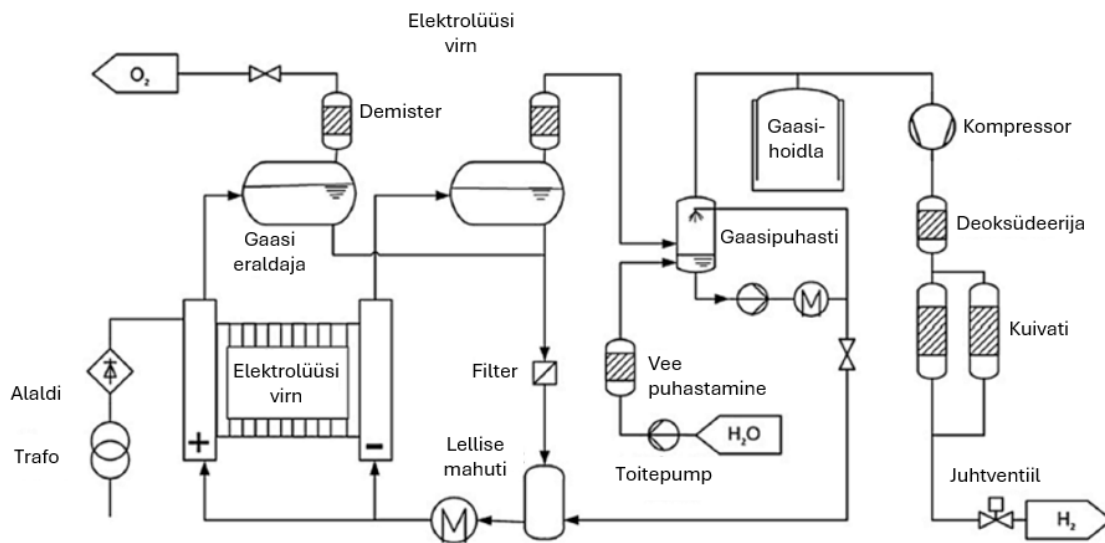
Vesiniku tootmisvõimsus raku kohta määratakse voolutiheduse ja raku suuruse järgi. Suurema tootmisvõimsuse saavutamiseks saab mitu elementi ühendada elektriliselt järjestikku, et moodustada elementide **virn** (Joonis 2.8). [15]



Joonis 2.8 AEL elektrolüüseri virna skeem [15]

- Kuigi virn on elektrolüüseri põhikomponent, koosneb kogu **süsteem** mitmest täiendavast protsessikomponendist, mõõteriistadest ja juhtimisseadmetest.

Põhiline süsteemiskeem leeliselise elektrolüüseri jaoks, mis töötab ühe virnaga on toodud joonisel (Joonis 2.9). [15]



Joonis 2.9 Traditsioonilise aluselise elektrolüüseri skeem [15]

Tänapäeval ainsa kaubanduslikult saadaoleva roheline elektrolüüsitehnoloogiana on veepõhine madaltemperatuuriline elektrolüüs (LTE), s.o. leeliseline vee elektrolüüs (AEL) ja protonvahetusmembraani elektrolüüs (PEM) ning need tehnoloogiad hakkavad lähiaastatel katma suurema osa roheline vesiniku nõudlusest. Kuid nii AEL (aluselise elektrolüüsi) kui ka PEM (protonvahetusmembraan elektrolüüs) tehnoloogiad on iseloomustatud suhteliselt madala efektiivsuse ja märkimisväärse heitsoojuse tekkega. Järelikult võib suur osa taastuvenergiast, mida kasutatakse vesiniku tootmiseks elektrolüüsi kaudu, kaduma minna. Seega on heitsoojuse ära kasutamine oluline strateegia süsteemi üldise tõhususe suurendamiseks.

## **3. Elektrolüüsi heitsoojuse kasutamise potentsiaal kaugküttes**

Selle jaotise eesmärk on uurida ja kvantifitseerida elektrolüüsiprotsessi käigus tekkiva heitsoojuse kogust, samuti hinnata selle kaugküttesüsteemidesse integreerimise võimalust. Metoodika hõlmab elektrolüüsi jääksoojuse potentsiaali hindamist ja olemasolevate integreerimisvõimaluste uurimist, mis põhinevad seni erinevates riikides läbiviidud projektide ja juhtumiuuringute analüüsil. Käesolev töö keskendub põhiliselt madalatemperatuurilisele elektrolüüsile, s.o AEL ja PEM, mis on tänapäeval kõige enam arenenud ja kaubanduslikult kättesaadavad tehnoloogiad, vaadeldes nende spetsiifilisi omadusi ja integreerimispotentsiaali energiasüsteemidesse.

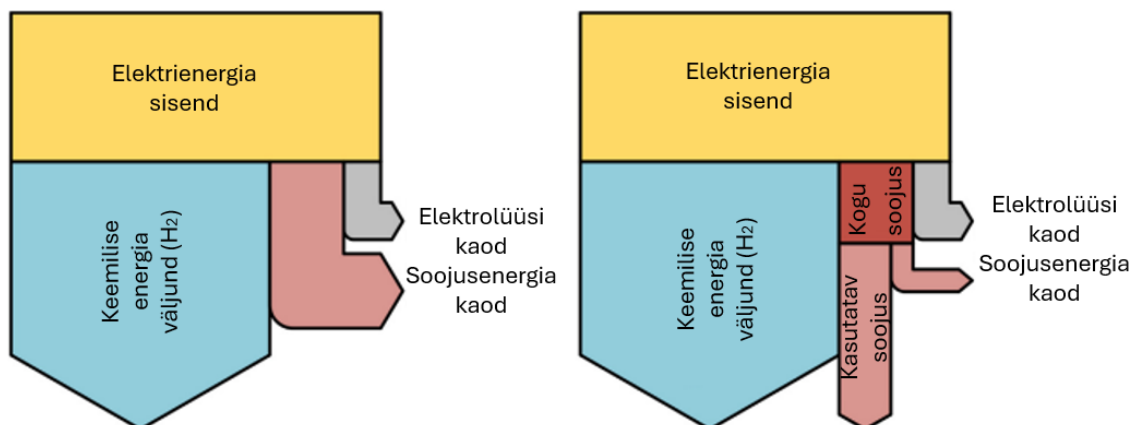
### **3.1 Elektrolüüs ja heitsoojus**

Elektrolüüsi on mitut tüüpi, mis erinevad mitmel viisil, kuid neil on ühine omadus: koos vesiniku ja hapnikuga toodavad nad soojust. Ja just seda elektrolüüsi saadust on tavaliselt jäetud suures osas tähelepanuta. Nüüd, kui elektrolüüs on kombineeritud taastuva ja seega väärtuslikuma energiaga, on selge, et võimalikult vähe sellest energiast tuleks raisata. Selline mõtlemine ja selliste toimingute mastaapsuse kasv on ärritanud huvi elektrolüüsi heitsoojuse ära kasutamise vastu.

Elektrolüüseri virnas eraldub soojust toimuvate keemiliste reaktsioonide pöördumatuse ja elemendi oomilise takistuse tõttu. Elektrolüüsireaktsioon võib kulgeda ilma soojust tarbimata või tootmata, nn termoneutraalsel pingel. Selle potentsiaali juures on reaktsioonikiirus aga liiga madal, nii et vesinikku praktiliselt ei teki. Seetõttu rakendatakse elementidele ülepinge, mis suurendab reaktsiooni kiirust ja muudab elektrolüüsi reaktsiooni eksotermiliseks, mille tulemusena eraldub soojust, mis vajab välist jahutust ja mida saab potentsiaalselt ära kasutada muudes rakendustes.

Joonisel (Joonis 3.1) on toodud välja elektrolüüsi energiavoo diagramm:





Joonis 3.1 Energiavoo diagramm elektrolüüsi jaoks koos (paremal) heitsoojuse utiliseerimisega ja ilma (vasakul) [3]

Madaltemperatuurilise elektrolüüsi abil muundatakse tooteks umbes 60-80% sisenevast elektrist, ülejäänud energia vabaneb soojusena [1,16]. Enamiku elektrolüüseri süsteemi bilansi (st elektrienergia muundamise või demineraliseeritud vee tootmise) puhul ei saa soojust taaskasutada, seega saab soojust taaskasutamise tehniline potentsiaal põhineda ainult virna efektiivsuse tasakaalul. Tavaliselt soojust (50–90°C) eemaldatakse virnadest kuivjahutite abil. Kui elektrolüüserid paigaldatakse potentsiaalse soojustarbija lühikese vahemaa taha, saab toodetud heitsoojust utiliseerida, mille tulemuseks on suurem üldine süsteemi efektiivsus [1]. Eeldatakse, et AEL ja PEM annavad heitsoojuspotsentiaali 20–30% nende nimivõimsusest [8] ning elektrolüüsi süsteemi heitsoojuse utiliseerimine on viis tõsta süsteemi efektiivsust 11-20% võrra [1,2]

Elektrolüüsist saadava soojust taaskasutamise potentsiaal sõltub mitmest tegurist, sealhulgas elektrolüüseri suuruselt, töötingimustest ja heitsoojuse kvaliteedist. Mida suurem on süsteem, seda rohkem heitsoojust see genereerib. Kvaliteetne heitsoojus sõltub töötingimustest. Näiteks täisvõimsusel töötav elektrolüüser soojeneb kiiremini ja saavutab vajaliku temperatuuri kiiremini kui osalise koormusega töötav elektrolüüser. Madala temperatuuritaseme tõttu (50–80°C PEM-i ja 60–90°C aluselise elektrolüüsi puhul) on heitsoojuse taaskasutamise võimalused siiski piiratud. Arvestades täiendavaid kadusid soojusülekanne ja transpordi ajal, on kõige parem kasutada seda heitsoojust lähedalasuvates rakendustes ja otsese integreerimise kaudu [3].

Hetkel on teada mõningatest paljutöötavatest projektidest, kus plaanitakse elektrolüüsi heitsoojust tõhusalt ära kasutada. Üks nendest on Plansee rafineerimistehase projekt Tirolis Reutte'is [17], mis hõlmab Linde Gas GmbH-i poolt 4 MW leeliselise elektrolüüseri (AEL) ehitamist. Projekt peaks valmima 2025. aastaks. Elektrolüüser hakkab tootma vesinikku puhtast elektrist, vähendades CO<sub>2</sub> heitkoguseid ligikaudu 4000 tonni võrra aastas. Ajalooliselt tootis Linde Gas vesinikku maagaasiga aurureformimise

teel. Uus elektrolüüsiseade tähistab olulist nihet keskkonnasäästlikuma tehnoloogia suunas. Elektrolüüsi käigus tekkivat heitsoojust plaanitakse kasutada Plansee-s kohapeal, suurendades üldist süsteemi energiatõhusust. Teine hea näide on OMV Schwechati rafineerimistehas Austrias. Seal ehitatakse 10 MW võimsusega PEM elektrolüüserit, mis peaks lähiajal valmima. Tehas hakkab tootma rohelist vesinikku bio- ja fossiilkütuste hüdraatimiseks, eesmärgiga vähendada süsinikdioksiidi heitkoguseid 15 000 tonni CO<sub>2</sub> võrra aastas. Elektrolüüsiprotsessist tekkinud heitsoojus utiliseeritakse rafineerimistehases, parandades seeläbi energiatõhusust ja jätkusuutlikkust. Need projektid pakuvad häid näiteid elektrolüüsist tekkiva heitsoojuse uuenduslikust kasutamisest, näidates olulist keskkonnakasu ja paremat energiatõhusust. Oodatavad tulemused hõlmavad CO<sub>2</sub> heitkoguste vähenemist ja energiatõhususe paranemist, mis aitab kaasa tööstusprotsesside üldisele jätkusuutlikkusele.

Kuigi ei saa märkimata jätta, et elektrolüüsi heitsoojuse ärakasutamine toob kaasa ka väljakutseid. Tehnilised integratsiooniprobleemid tekivad jääsoojuse temperatuuri ja vooluomaduste vastavusse viimisel vastuvõtusüsteemide vajadustega. Infrastruktuuri arendamine on samuti tegur, mis nõuab investeeringuid vajalikesse torustikesse, soojusvahetitesse ja muudesse komponentidesse, et soojust tõhusalt üle kanda ja ära kasutada. Lisaks tuleb hoolikalt hinnata nende algatuste majanduslikku elujõulisust tagamaks, et heitsoojuse taaskasutamise majanduslikud eelised on suuremad selle kogumise ja transportimisega seotud kuludest.

Elektrolüüsi peetakse võtmetehnoloogiaks taastuva vesiniku nõudluse rahuldamiseks tulevikus ning sõltuvalt vesiniku tootmise tsentraliseerimisest on tulevikus vaja mitme MW või GW võimsusega elektrolüüsisüsteeme. Seega on nende süsteemide termiline integreerimine kriitilise tähtsusega, et parandada ühenduvust olemasoleva energiainfrastruktuuriga ja üldist energiatõhusust [3]

Kokkuvõtteks võib öelda, et elektrolüüsiseadmete heitsoojus on väärtuslik ressurss, mis võib anda olulise panuse energiasüsteemide jätkusuutlikkuse ja energiatõhususe parandamisse. Tehniliste, infrastruktuuriliste ja majanduslike tõkete ületamisel saab seda peidetud potentsiaali ära kasutada keskkonna- ja majandusliku kasu saamiseks ning see muidu tähelepanuta jäetud soojus võib mängida olulist rolli mitmesuguste küttevajaduste rahuldamisel alates tööstuslikest rakendustest kuni kaugküttevõrkude varustamiseni.

## **3.2 Heitsoojuse kasutamine kaugküttes**

Kaugküte on tehnoloogia, mis mängib märkimisväärset rolli energiasectori dekarboniseerimisel, parandades küttesüsteemide energiatõhusust ja hõlbustades taastuvate energiaallikate integreerimist. Kaugküttesüsteemid kasutavad torude võrku,

et jagada soojust tsentraalsest allikast, näiteks elektriyaamast või heitsoojuse taaskasutussüsteemist, mitmesse hoonesse või majapidamisse. See võimaldab tsentraliseerida kütetootmist ja kasutada tõhusamaid kütetehnoloogiaid, nagu koostootmine ja soojuspumbad. Kasutades tõhusamaid kütetehnoloogiaid ja vähendades energiakadusid, saavad kaugküttesüsteemid oluliselt vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid ja parandada küttesüsteemide üldist energiatõhusust [6]

Kaaludes erinevaid võimalusi soojuse tootmiseks kaugküttes, tuleb järgida soojusallika eelistamise skeemi (Joonis 3.2). Esimene alternatiiv, mida kaaluda, on heitsoojus tootmisettevõtetest, supermarketitest, andmekeskustest ja muudest potentsiaalsetest soojusallikatest kaugküttevõrgu lähedal. Heitsoojuse utiliseerimine võib parandada üldist energiatõhusust ning vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid ja primaarenergia tarbimist [5].



Joonis 3.2 Olemasolevate soojusallikate eelistus kaugküttes [5]

Jääksoojuse integreerimine kaugküttevõrkudesse hõlmab soojuse kogumist ja utiliseerimist erinevatest tööstus- ja linnaallikatest, mis muidu hajuks keskkonda. See parandab energiasüsteemi üldist efektiivsust, kasutades ära elektritootmise ja tööstusprotsesside kõrvalsaadusi ning vähendab oluliselt ka keskkonnamõju [4].

Jääksoojuse kasutamise eelised kaugküttesüsteemides hõlmavad energiakulude ning kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemist ja energiatõhususe suurenemist. Rakendamist võivad aga mõjutada sellised probleemid nagu infrastruktuuri arendamise kõrged algkapitalikulud, vajadus tehnoloogia integratsiooni järele ja regulatiivsed tõkked. Lisaks võib heitsoojusallikate kättesaadavus ja pidevus varieeruda, mis nõuab hoolikat planeerimist ja projekteerimist, et tagada usaldusväärsed küteteeenused [18].

Erinevates Euroopa linnades on edukalt demonstreeritud heitsoojust kasutavate kaugküttesüsteeme, mis näitab säästva energia praktikate edukat integreerimist [18]. Need juhtumid näitavad, kuidas kaugkütet saab heitsoojuse taaskasutamise uuenduslike lähenemisviiside abil tõhustada. Taanis, Kopenhaageni kaugküttesüsteem on üks arenenumaid maailmas, kasutades kaugkütte süsteemis umbes 98% linna elektritootmisest ja muudest allikatest pärinevast heitsoojusest [18]. Rootsis, Växjö kaugküttevõrgus utiliseeritakse piirkonnas domineerivate tööstuste (paberitootmine ja saeveskid) heitsoojust [4]. Soome Helsingis on kaugküttevõrku integreeritud andmekeskuste heitsoojus [5]. Saksas, Frankfurdi kaugkütte- ja jahutussüsteem kasutab kohaliku jäätmekäitlusjaama heitsoojust [18]. Nottinghami kaugküttevõrk teenindab tuhandeid kodusid ja ettevõtteid, kasutades ära jäätmete põletamisel tekkivat heitsoojust [4]. Ka Tallinna kaugküttevõrk on hea näide sellest kuidas saab efektiivselt utiliseerida heitsoojust elektritootmisest ja jäätmekäitlusest.

Üldiselt kujutab heitsoojuse utiliseerimine kaugküttes olulist sammu säästva linnaarengu suunas. Heitsoojuse ärakasutamise kaudu saavad kaugküttesüsteemid märkimisväärselt kaasa aidata energiatõhususe ja süsinikuneutraalsuse eesmärkide saavutamisele linnakeskkonnas. Arvestades ülemaailmselt plaanitavat roheline vesiniku tootmisrajatiste kiiret kasvu, võiks kaugküttesüsteemide üheks paljulubavaks potentsiaalseks soojusallikaks olla roheline vesiniku tootmisel tekkiv jääsoojus. See integratsioon mitte ainult suurendab energiatõhusust, vaid loob ka potentsiaalse sünergia kaugkütte ja elektrolüüsi heitsoojuse vahel, parandades veelgi energia kasutamise tavasid.

### **3.3 Elektrolüüsi heitsoojuse utiliseerimine kaugküttevõrgus**

Ligikaudu kolmandik elektrolüüsis kasutatavast elektrist muundatakse soojuseks, mida ajalooliselt on raisatud. See annab ainulaadse võimaluse koguda ning integreerida seda heitsoojust kaugküttevõrkudesse, muutes kõrvalsaaduse potentsiaalselt väärtuslikuks energiaressursiks.

Potentsiaalne heitsoojus ülemaailmsest vesinikutootmisest võib 2050. aastaks ulatuda ligikaudu 4000 TWh-ni (800 GWth 5000h täiskoormusega töö) [3]. See maht on märkimisväärne võrreldes kaugkütte nõudlusega, mis oli 2014. aastal ligikaudu 3200 TWh [6]. Selle heitsoojuse kasutamine kaugküttevõrkudes võib oluliselt vähendada primaar energiaallikate vajadust soojuse tootmisel, toetades laiemaid keskkonna- ja majandussäästlikkuse eesmärke.

Elektrolüüsi jääsoojuse ärakasutamine kaugküttevõrkudes mitte ainult suurendab energiasüsteemi tõhusust, vaid aitab küttesüsteeme dekarboniseerida. Kasutades ära

seda, mis muidu oleks kaotatud energia, toetab see meetod kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamist ja suurendab vesiniku tootmise üldist kasumlikkust.

Selleks, et elektrolüüseri heitsoojust utiliseerida kaugküttevõrgus on kaks peamist võimalust: otsene integreerimine kaugküttesüsteemi või soojuspumba kasutamisel, selleks et saavutada vajaliku temperatuuri.

Nagu juba varem mainitud (Tabel 2.1), töötavad tavaliselt PEM-süsteemid temperatuurivahemikus 50–80 °C ja AEL-süsteemid temperatuuril 60–90 °C. Jahutusvee kontuuri tagasivoolu temperatuuri teoreetiline ülempiir on võrdne elektrolüüseri töötemperatuuriga (ilma soojusvaheti kadusid arvestamata). Siiski nõuavad praktilised piirangud märkimisväärset temperatuurierinevust soojusvaheti soojal ja külmal poolel, tavaliselt üle 10 °C, et tagada tõhus soojusülekanne. Mõistlik on jahutusvee pealevoolu temperatuur hoida umbes 45–50 °C juures, kuigi on võimalik seda veidi tõsta, eriti süsteemide puhul, mis töötavad temperatuuril umbes 80–90 °C. Kõrgema temperatuurirežiimi valik suurendab virna efektiivsust, kuid kiirendab degradeerumist, lühendades virna kasutusiga [19]. Seetõttu on erinevatel tootjatel erinevad eelistused töötemperatuuride osas.

Praegu töötavad kaugküttevõrgud pealevoolu temperatuuriga 100–70 °C ja tagasivoolu temperatuuriga 60–50 °C, kuigi tulevased perspektiivid näitavad nende temperatuuritasemete langust [6].

Soojuspumba kasutamine elektrolüüseri jahutusvee kontuuri ja kaugkütte pealevoolu liini vahelise temperatuurierinevuse kõrvaldamiseks võib osutuda mõistlikumaks kui elektrolüüseri töötemperatuuri tõstmine, kuna virna degradeerumine võib olla kallim kui soojuspumba kasutamine.

Elektrolüüseri heitsoojuse otsene integreerimine KKV-u on võimalik, kui temperatuur elektrolüüseri jahutuskontuuri tagastuvas liinis on võrdne kõrgem KKV-u temperatuurist. Kuid tavaliselt KKV töötavad kõrgematel temperatuuridel, kui elektrolüüserid suudavad pakkuda, mistõttu see lahendus on paremini rakendatav ainult tulevaste madala temperatuuriga KKV jaoks. Tavaliselt jääb elektrolüüseri jahutuskontuuri tagastuva liini temperatuur vahemikku 50–60 °C, kuid seda saab potentsiaalselt tõsta, ulatudes kuni 70 °C-ni. Kui elektrolüüseri jahutuskontuuri tagasivoolu temperatuur ei jõua päris kaugkütte pealevoolu temperatuurini, kuid jääb töövahemikku, on heitsoojuse otsene kasutamine siiski võimalik KKV tagasivoolu liini eelsoojendamiseks, enne kui see jõuab tootmisjaama. See meetod võimaldab elektrolüüseri heitsoojuse täielikku utiliseerimist, kui KKV soojustarbimine on suur võrreldes elektrolüüseri heitsoojusega.

Otseintegreerimisel elektrolüüseri heitsoojuse kaugküttevõrku on üks lähenemisviis soojusvaheti paigaldamine, et eraldada elektrolüüseri jahutuskontuur KK-süsteemist.

Alternatiivina võib KK tagasivoolu liin toimida nõ jahutusvedelikuna, sellega kaob täiendava soojusvaheti vajadus.

Kuid kui ülalmainitud tingimused ei ole täidetud (elektrolüüseri jahutuskontuuri temperatuur on madalam kaugkütte vee temperatuurist), muutub soojuspumba paigaldamine vajalikuks selle soojuse tõhusaks kasutamiseks. See suurendab soojuse tasandatud hinda peaaegu neli korda [1], kuid muutub vajalikuks, kui kaugküttevõrk ei suuda vastu võtta madalamat temperatuuri või kui heitsoojus mõjutab oluliselt kaugküttevõrku.

Heitsoojuse utiliseerimisega elektrolüüsisüsteemid (PEM) on näidanud üldist kasutegurit (vesinik + soojus) ca 90% [1,2].

Elektrolüüsiseadmete heitsoojuse kasutamise potentsiaal on märkimisväärne võimalus suurendada süsteemi energiatõhusust ja vähendada keskkonnamõju. Vesiniku tootmise kõrvalsaadus soojuse näol võib olla märkimisväärne, eriti suuremahuliste tootmisvõimsuste puhul. Õigete strateegiate ja tehnoloogiate abil saab seda koguda ja uuesti kasutada, pakkudes nii energiatootjatele kui ka tarbijatele võidustsenaariumi.

Elektrolüüserite heitsoojuse ärakasutamise keskkonnakasu on lisaks energia raiskamise vähendamisele ja tootmisprotsessi efektiivsuse tõstmisele ka kasvuhooenergia heitkoguste vähenemine, kuna väheneb vajadus täiendava kütteenergia järele, mida toodetakse sageli fossiilsetest kütustest.

Lisaks võib nende kahe süsteemi – vesiniku tootmise ja kaugkütte – integreerimine anda tugeva vastuse kasvavale vajadusele säästvate ja tõhusate küttelehenduste järele. See avab võimalusi süsteemi paindlikkuse ja töökindluse suurendamiseks, mis on energia pakkumise ja nõudluse kõikuva dünaamika kontekstis kriitilise tähtsusega.

### **3.4 Ülevaade elektrolüüsi heitsoojuse utiliseerimise projektidest maailmas**

Elektrolüüsi heitsoojuse utiliseerimine kaugküttes on seni vähe uuritud teema ja kõik olemasolevad uuringud on peamiselt teoreetilised, keskendudes protsessi simulatsioonidele ja eeldustele. Reaalsete projektiandmete aruannete puudus muudab raskeks teoreetiliste tulemuste ja mudelite tõepärasuse ja praktilise rakendatavuse hindamise.

Siiski on teada mõningatest projektidest, kus plaanitakse elektrolüüsi heitsoojust utiliseerida kaugküttes. Allpool on toodud nende projektide lühikirjeldused.

### 3.4.1 Green Hydrogen Esslingen

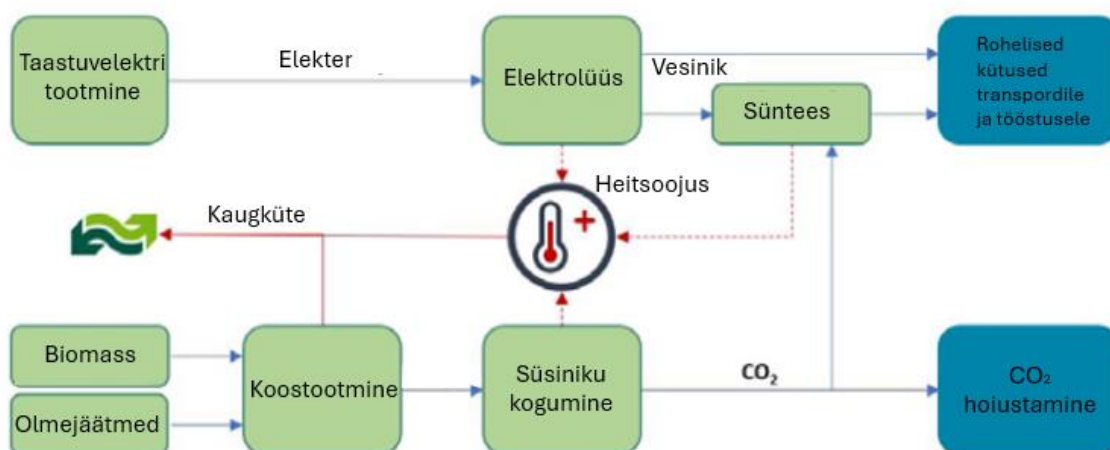
Green Hydrogen Esslingeni asutasid 2019. aasta märtsis Polarstern Erzeugungs GmbH, Univ. Prof. (em.) Dr. M. Norbert Fisch ja Stadtwerke Esslingen. Koos kujundavad nad tuleviku linnaosa, kus iga partner panustab oma tugevustesse.

Piirkonna energia- ja tehnoloogiakeskuse südames on elektrolüüsiseade võimsusega 1 MWel. See muundab fotogalvaaniliste süsteemide elektrienergia ülejäägi vesinikuks. Sel viisil toodetakse iga päev 400 kg vesinikku. Vesinikku saab juhtida kohalikku keskmise rõhuga gaasivõrku või kasutada transpordivahendustes. Lisaks kasutatakse elektrolüüsi käigus tekkivat heitsoojust kaugküttevõrgus. See suurendab elektrolüüsi üldist efektiivsust 55% -lt umbes 90% -ni. [20]

### 3.4.2 Reaalsed näited Taanist

Kaugküttevõtte TVIS utiliseerib oma võrgus heitsoojuse vesiniku tootmise projekti HySysynergy raames, mille omanik ja käitaja on Everfuel. Fredericias asuv HySynergy toodab elektrolüüsi teel rohelist vesinikku ning protsessi heitsoojust suunatakse kaugküttesüsteemi. Projekti esimeses etapis, mis hõlmab 20 MW elektrolüüseri, võib heitsoojus igal aasta soojusega varustada kuni 1,800 kodu. Projekti teise ja kolmanda etapi eesmärk on paigaldada vastavalt 300 MW ja 1 GW elektrolüüserid, suurendades seeläbi oluliselt heitsoojuse integreerimise potentsiaali.

Copenhagen Infrastructure Partners (CIP) töötab oma 1 GW HØST PtX (Power to X) projekti kallal Esbjergis (Joonis 3.3), Taani läänerannikul. Projekti eesmärk on toota nii vesinikku kui ka ammoniaaki. Heitsoojus võib katta kuni 15 000 kodu soojusvajadust Esbjergi kaugküttevõrgus, mida omab ja haldab DIN Forsyning. [21]



Joonis 3.3 Power-to-X heitsoojuse utiliseerimise näide [21]

Sellise integratsiooni edukate näidete tutvustamisega saab Taani olla eeskujuks teistele riikidele, kes soovivad üleminekut säästvatele energiasüsteemidele.

### 3.4.3 3H<sub>2</sub> – Helsinki Hydrogen Hub

Helsingis asuva Heleni eesmärk on alustada vesiniku tootmist. Projekti tulemusena valmib 3H<sub>2</sub> – Helsinki Hydrogen Hub, mis on Helsinki Clean-Tech Hubi esimene vesinikuprojekt. 3H<sub>2</sub> – Helsinki Hydrogen Hubi pilootjaama projekt – võimsus on ligikaudu kolm MW. Toodetud vesinikku hakatakse kasutama eelkõige tehase juurde rajatava vesiniku tankla kaudu, mis on mõeldud peamiselt raskeveoks. Samuti on võimalik vesinikku tarnida klientidele konteinerites. Tootmisprotsessis tekkiv heitsoojus kasutatakse ära Heleni kaugküttevõrgus, mis tähendab, et jaama üldine energiatõhusus on üle 90%. Eesmärk on käivitada vesiniku tootmine uues tehases 2026. aastal ja avada tankla 2027. aastal. Projektiga vähendatakse CO<sub>2</sub> emissiooni 3700 tonni võrra aastas. Summa on arvestatud fossiilkütuste asendamist tihedas liikluses ja heitsoojuse ärakasutamist kaugküttevõrgus. [22]

Kokkuvõttes on antud teema edasiseks arenguks kriitilise tähtsusega, et keskenduda praktiliste andmete kogumisele ja analüüsile. See mitte ainult ei kinnitaks teoreetiliste tööde paikapidavust, vaid annaks ka väärtuslikku teavet praktiliste rakenduste täiustamiseks. Seetõttu on edasine uurimistöö ja empiiriliste andmete kogumine hädavajalikud selle teema süvitsi mõistmiseks ja arendamiseks.



## 4. Metoodika

Käesolevas peatükis on kirjeldatud antud töös kasutatud metoodikat. Alljärgnevalt kirjeldatakse kasutatud uurimismeetodit, andmekogumise protseduure ja analüüsimeetodeid, mis tagavad töö teadusliku täpsuse ja objektiivsuse.

### 4.1 Uuringu objekt

Uuringuobjektiks on rohevesiniku tervikahela pilootprojekt rohevesiniku kasutuselevõtmiseks ühistranspordisektoris [23]. Projekti raames rajatakse Tallinnasse rohevesiniku tootmisüksuse, milleks on 1 MW leeliseline elektrolüüser ja tarnetaristu vesinikutankla näol ning soetakse rohevesinikku tarbiva autopargi. Samuti planeeritakse kasutada vesiniku tootmisprotsessis tekkivat heitsoojust kaugküttevõrgus, mis omakorda suurendaks kogutsükli kasutegurit.

Vesiniku tootmiseks kavandatakse tootmiskompleksi AS Utilitas Tallinn Elektriijaama läheduses, mida varustatakse elektrienergiaga otseliini kaudu. Vesiniku tootmiskompleks kasutab 100-protsendiliselt taastuvelektrit.

Eesti vesiniku pilootprojekti eesmärk on minna üle vähem keskkonnahäiringut tekitavale rohevesinikku tarbivale ühistranspordile Eestis, luues vesiniku tervikahela. Samuti aitab projekt kaasa kestliku arengu eesmärkide saavutamisele, luues ressursitõhusa ja fossiilenergiast väiksema süsiniku jalajäljega taastuenergia tootmise ahela.

Projekti tulemusena luuakse tervikahel rohevesiniku tootmiseks, tarnimiseks ja tarbimiseks taksoveo valdkonnas Eestis. Projekti oodatavad tulemused on järgmised:

- Toodev minimaalne rohevesiniku maht, mis projekti tulemusena võetakse transpordi sektoris aastas kasutusse on 36,08 t/a;
- Projekti tulemusena väheneb KHG heide transpordisektoris 1,7 CO<sub>2</sub>ekv kt/a ning muu kaasnev aerosoolne heide 0,06 t/a.
- vesiniku tootmisprotsessis tekkivat heitsoojust utiliseeritakse kaugküttevõrgus, mis suurendab kogutsükli kasutegurit [19,23,24]

### 4.2 Uurimistöö kirjeldus ja eesmärgid

Käesolevas uurimistöös analüüsitakse 1 MW leeliselise elektrolüüseri heitsoojuse utiliseerimist Tallinna kaugküttevõrgus. Uuringus kasutatakse Eesti Vesiniku tervikahela pilootprojekti andmeid, et analüüsida selle lahenduse energeetilise, majandustiku ja keskkonna tõhusust sõltuvalt elektrolüüseri opereerimisstrateegiast. Elektrolüüseri heitsoojuse integreerimine kaugküttevõrku pakub mitte ainult potentsiaalset lahendust

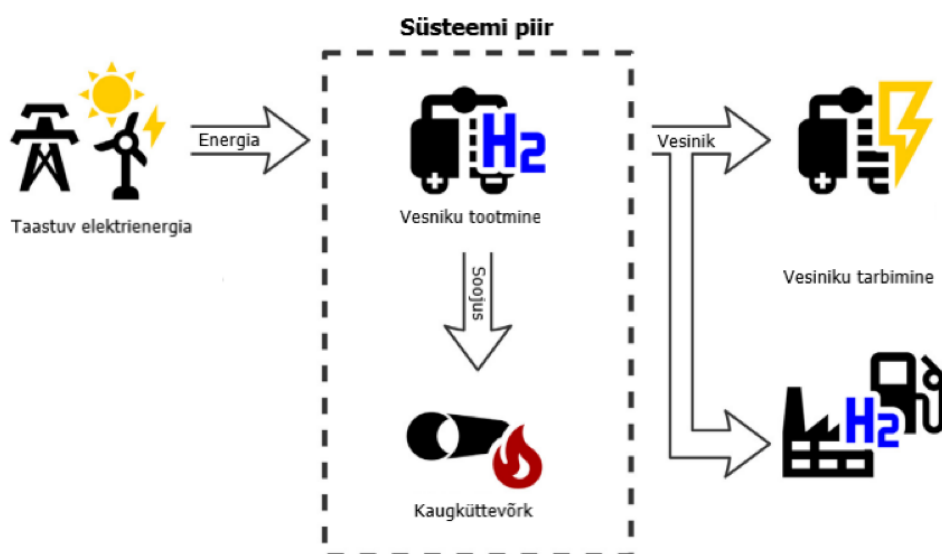
süsteemi energiatõhususe suurendamiseks, vaid aitab kaasa ka üleminekule jäätaksuutlikule energiamajandusele. Üksikasjaliku analüüsi ja simulatsiooni abil püüab käesolev töö anda ülevaate lahenduse tehnilistest, majanduslikest ja keskkonnaaspektidest, hõlbustades seeläbi teadlike otsuste tegemist tulevaste projektide jaoks sarnases kontekstis.

Põhilised küsimused, millele antud töös püütakse vastust leida, on järgmised:

- Kui palju elektrolüüseri heitsoojusest oleks võimalik kaugküttevõrku lisada sõltuvalt elektrolüüseri opereerimisstrateegiast? Kuidas see mõjutaks elektrolüüseri üldist tõhusust?
- Kui suurt osa CO<sub>2</sub> heitmetest aastasest soojustootmiseks kasutatavast maagaasist oleks võimalik säästa elektrolüüseri heitsoojuse integreerimisega kaugküttevõrku?
- Kuidas elektrolüüseri opereerimisstrateegia mõjutab vesiniku tootmiskulusid?

### 4.3 Üürimistöö piirangud

Vaatamata sellele, et vesiniku tervikahela projekt hõlmab laiemat piiri, sh vesiniku tootmine, vesiniku taristu ja tarbimine ning elektrolüüsi heitsoojuse utiliseerimine, keskendutakse käesolevas uurimistöös peamiselt küsimusele, kas on võimalik positiivne koostoime vee elektrolüüsi ja kaugküttevõrkude vahel ühisel energiaturul või -süsteemis. Uurimistöö selgeks piiritlemiseks käsitletakse elektrolüüsi (s.t. vesiniku tootmist elektri abil) eranditult soojusallikana ja kaugkütet soojuse tarbijana. Ülejäänud rohevesiniku tervikahela projekti osad jäävad antud uurimistöö piiridest välja (Joonis 4.1).



Joonis 4.1 Uurimistöös käsitletud süsteemi piir [3]

Kuigi selle uuringu lähenemine oli põhjalik ja meetmed hoolikalt võetud, tuleb mainida, et uuringul on teatud piirangud.

- Algandmed: Uuring on teostatud 2023. aasta Tallinna kaugkütte põhivõrgu tootmiskoormuste ja NordPool elektri hindade põhjal. Seega aastast aasta võivad need näitajad olla erinevad ja mõjutada lõpptulemust.
- Mudeli lihtsustamine: Süsteemi modelleerimisel tehti teatud eeldusi. Näiteks, elektrolüüseri heitsoojus oli sisestatud konstantse väärtusena MW-ides olenemata elektrolüüseri tegelikust dünaamilisest käitumisest. Elektrolüüseri ja soojusvaheti töötingimused sõltuvad paljudest teguritest, mis tähendab, et tekkiv heitsoojuse hulk võib varieeruda ja mõjutada tulemusi.
- Mudeli valideerimine: Mudel on kavandatud hoolikalt reaalsele tingimuste järgi; siiski tuleb märkida, et kuna projekt on alles realiseerimisel mudelit pole valideeritud tegelike tööandmetega.
- Süsteemi skaala: Uuringu tulemused ja järeldused on spetsiifilised arvesse võetud kaugküttevõrgu ja elektrolüüseri tehnilistele parameetritele. Süsteemide skaleerimine võib kaasa tuua lisakomplekssusi ja tegureid, mida selles uuringus ei ole arvestatud. Seetõttu võivad simulatsioonitulemused suuruse muutumisel olla mittelineaarsed.
- Keskkonnamõju: Kuigi see uuring viitab jääksoojuse ärakasutamise tõttu positiivsele keskkonnamõjule, ei ole läbi viidud kogu protsessi etappide keskkonnamõju arvestavat põhjalikku elutsükli hindamist (LCA). Seega ei ole selles uuringus arvestatud süsteemi täielikku keskkonnaalast jalajälge.

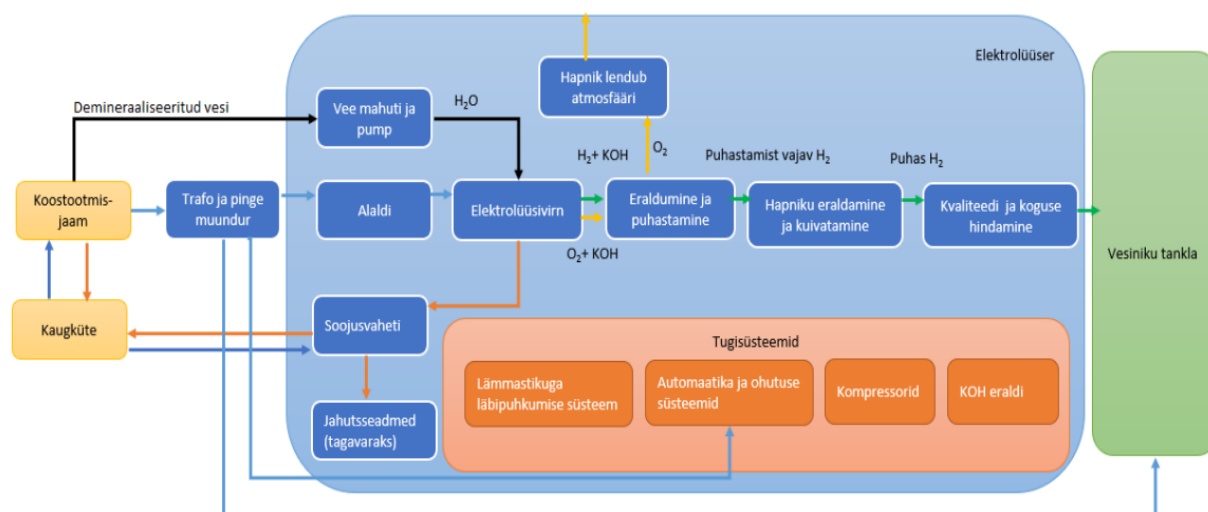
Kuigi neid piiranguid tuleks tulemuste tõlgendamisel arvestada, pakub uuring siiski väärtuslikke teadmisi elektrolüüsi heitsoojuse kaugküttesüsteemi integreerimise võimalike eeliste ja tehnilise teostatavuse kohta. Tulevased uuringud võivad neid piiranguid käsitleda, viies läbi ulatuslikuma uuringu, mis hõlmab tegelike tööandmeid.

## 4.4 Vesiniku tootmine

Rohevesiniku tootmiseks kasutatakse projektis leeliselist elektrolüüserit nominaalvõimsusega 1 MW<sub>el</sub>, mille põhikomponendiks on elektrolüüsivirn (electrolysis stack), kus alalisvoolu toimel muundatakse vesi vesinikuks ja hapnikuks. Protsess viiakse läbi kaaliumhüdrosiidi vesilahuses 90°C juures ja lisaks vesinikule ning hapnikule tekib reaktsiooni kõrvalsaadusena jääksoojus. Elektrolüüsiks kasutatav elekter saadakse otseliiniga tootmisüksuse kõrval asuvast Tallinna elektrijaamast, kus toodetakse 100% taastuvenergiat.

Vesiniku tootlikkus on 200 Nm<sup>3</sup>/h või 18 kg/h. Pidevalt töötava elektrolüüseri korral vastab see vesiniku tootmisvõimsusele üle 400 kg/päevas.

Projektijärgne rohevesiniku tootmise skeem on toodud joonisel (Joonis 4.2).



Joonis 4.2 Rohevesiniku tootmisskeem

Tabelis (Tabel 4.1) on koondatud elektrolüüseri põhilised tehnilised näitajad.

Tabel 4.1 Elektrolüüseri tehnilised parameetrid [19]

Elektrolüüseri tehnilised parameetrid	Väärtus	Ühik
Virna suurus	1	MW <sub>el</sub>
Vesiniku tunnine tootmiskaht	200	Nm <sup>3</sup> /h
	18	kg/h
Vesiniku minimaalne aastane tootmiskaht	38	tH <sub>2</sub> /aasta
Vesiniku maksimaalne aastane tootmiskaht	144	tH <sub>2</sub> /aasta
Virna installeeritud võimsus	1056	kW
Elektrolüüseri enetgiatarve (BoL)	4,3	kWh/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>
	51,9	kWh/kg H <sub>2</sub>
Elektrolüüseri enetgiatarve (EoL)	5,3	kWh/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>
	63,0	kWh/kg H <sub>2</sub>
Elektrolüüseri kasutegur (HHV) BoL	75,9	%
Elektrolüüseri kasutegur (HHV) EoL	62,5	%
Opereerimisvahemik	20-100	%
Elektrolüüseri maksimaalne opereerimistemperatuur	90	°C
Täiskoormuse tundide arv	ca 8000	h
Kättesaadava heitsoojuse hulk (BOL)	165	kWh
Kättesaadava heitsoojuse hulk (EOL)	350	kWh
Jahutusvedeliku pealevoolu temperatuur	53	°C
Jahutusvedeliku tagasivoolu temperatuur	63	°C
Kadu üle soojusvaheti	3	°C
Aastane elektrolüüsielemendi degradeerimine	1	%
Vesiniku temperatuur väljundis [°C]	°C	40

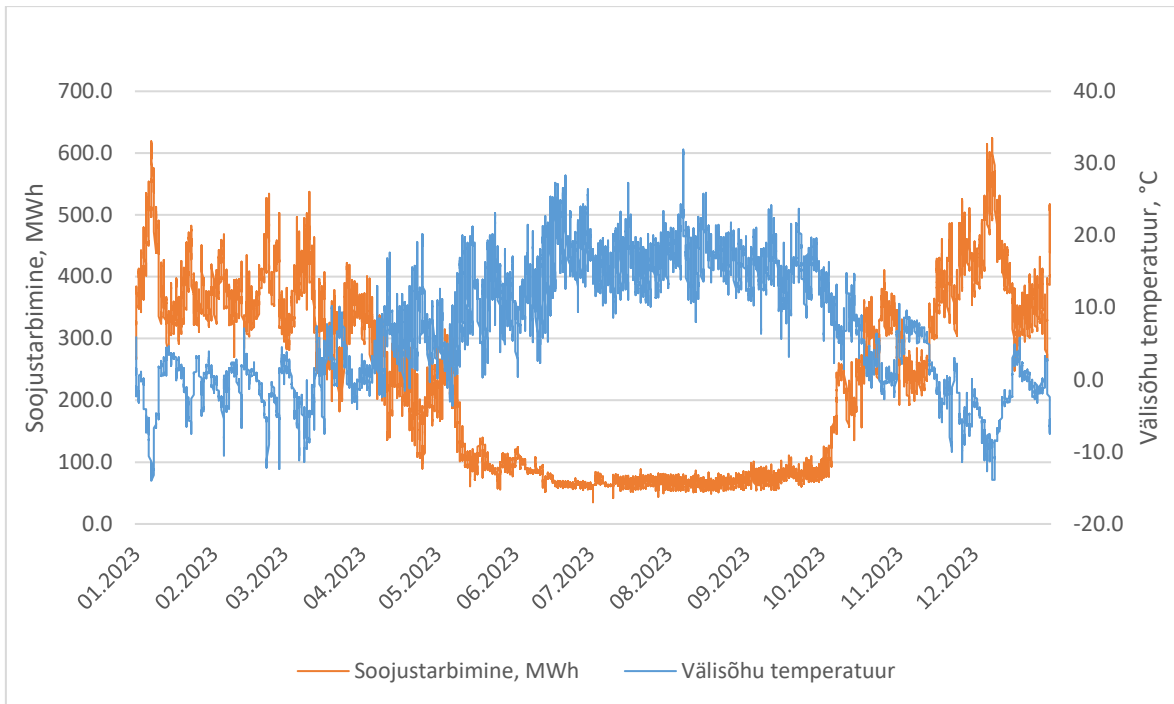
<b>Elektrolüüseri tehnilised parameetrid</b>	<b>Väärtus</b>	<b>Ühik</b>
Elektrolüüt	30% Water + KOH	
(Töötlemata) veekulu	l/h	328
Virna eluiga	h	80000
Süsteemi eluiga	aastat	20
Süsteemi kättesaadavuse sihtmärk (v.a hooldustööd)	%	92

## 4.5 Kaugküttevõrk ja soojuse tootmine Tallinnas

Antud uurimistöös vaadeldakse Tallinna kaugküttevõrgu. Tallinna kaugküttevõrgus on kokku seitse soojusallikat, mille hulka kuuluvad AS Eesti Energiale kuuluv Iru soojuselektrijaam ja OÜ Utilitas Tallinnale kuuluvad Tallinna Elektrijaam (koostootmisjaam), mille alla kuuluvad kaks koostootmisüksust, Mustamäe koostootmisjaam, Ülemiste katlamaja, Spordi 9 katlamaja ja Kristiine katlamaja.

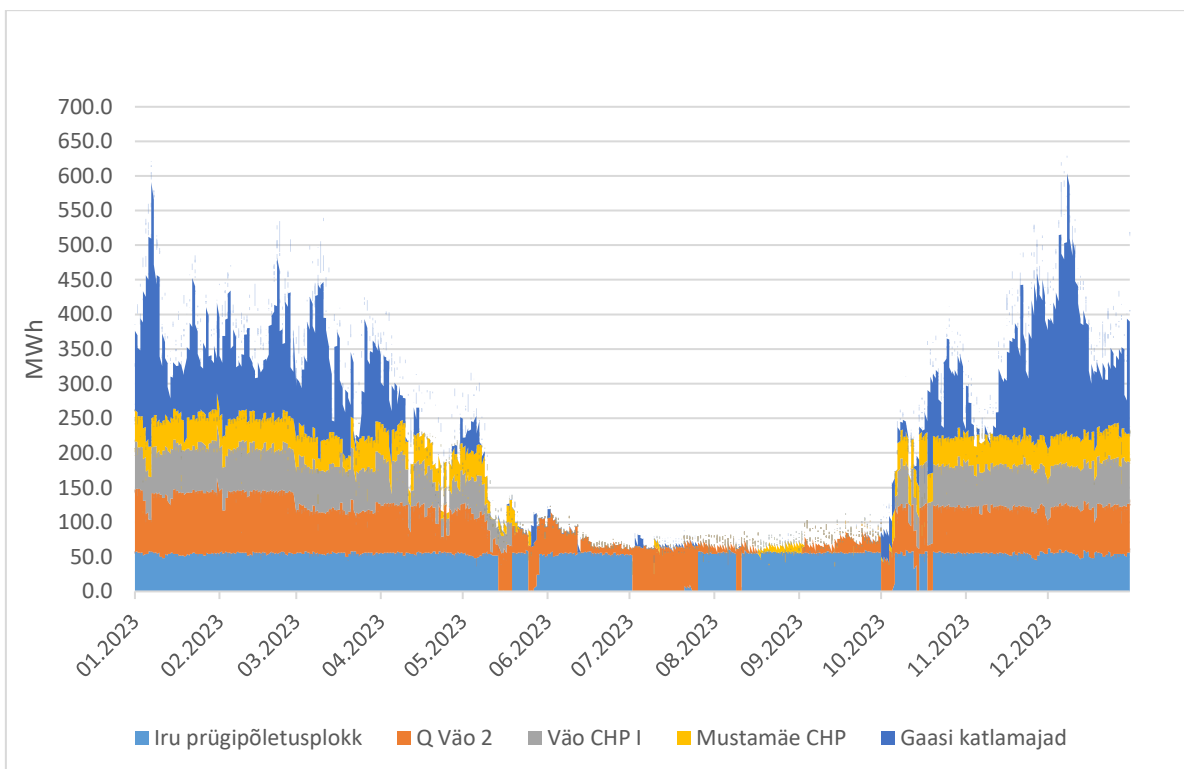
Iru soojuselektrijaamas kasutatakse peamise kütusena majapidamistes tekkivaid segaolmejäätmeid. Lisaks jäätmetele toodetakse Tallinna põhivõrgus soojust biomassist, eelkõige puiduhakkest, mida kasutatakse AS Utilitas Tallinna koostootmisjaamades. Talviseid tipukoormusi kaetakse vajaduspõhiselt maagaasiga. [24–27]

Tallinna kaugküttevõrgu tarbimine ja tunnikeskmine välisõhu temperatuur on esitatud graafikul (Joonis 4.3). Graafikult on näha otsest seost välisõhu temperatuuri ja küttekoormuse vahel. Suveperioodil küttekoormus langeb, mis on tingitud kõrgemate väliõhu temperatuuridest. [24]



Joonis 4.3 Kaugküttevõrgu soojustarbimine sõltuvalt välisõhu temperatuurist [24]

Tallinna kaugküttevõrk toimib tiputootmisel temperatuurirežiimil tootmisüksusest pealevoolu temperatuuriga 100°C ja tarbijate poolelt tagasivoolu temperatuuriga 60°C. Kuid, mida soojem on ilm, seda madalam on pealevoolu temperatuur ja kõrgem tagasivoolu temperatuur. [28]



Joonis 4.4 Tallinna kaugküttevõrgu 2023. aasta tootmisgraafik tootmisüksuste kaupa [24]

Kuna käesoleva töö üks eesmärkidest on uurida kui suurt osa CO<sub>2</sub> heitmetest aastasest soojustootmiseks kasutatavast maagaasist oleks võimalik säästa elektrolüüseri heitsoojuse integreerimisega kaugküttevõrku on joonisel (Joonis 4.4) toodud välja soojustootmis graafik tootmisüksuste kaupa. Andmete parema käsitlemise eesmärgil on antud graafikul kõik maagaasil töötavad tootmisühikud ühendatud ning kajastatud sinise värviga.

Allolevas tabelis (Tabel 4.2) on toodud peamised parameetrid elektrolüüsiseadme heitsoojuse integreerimiseks kaugküttevõrku.

Tabel 4.2 Kaugküttevõrgu parameetrid heitsoojuse tarnimiseks

Tehniline parameeter	Väärtus	Ühik
Eelistatud kaugküttevõrgu tagastuva liini temperatuur (soojusvahetisse)	50	°C
Eelistatud kaugküttevõrgu tagastuva liini temperatuur (soojusvahetist)	60	°C
Kaugkütte tagastuva liini temperatuur aasta jooksul	33-67	°C
Kaugus vesiniku tootmisüksusest kaugküttevõrguni	20	m
Protsent elektrolüüseri ja soojustarbija (Tallinna elektrijaama) kattuvast tööajast	25-100	%

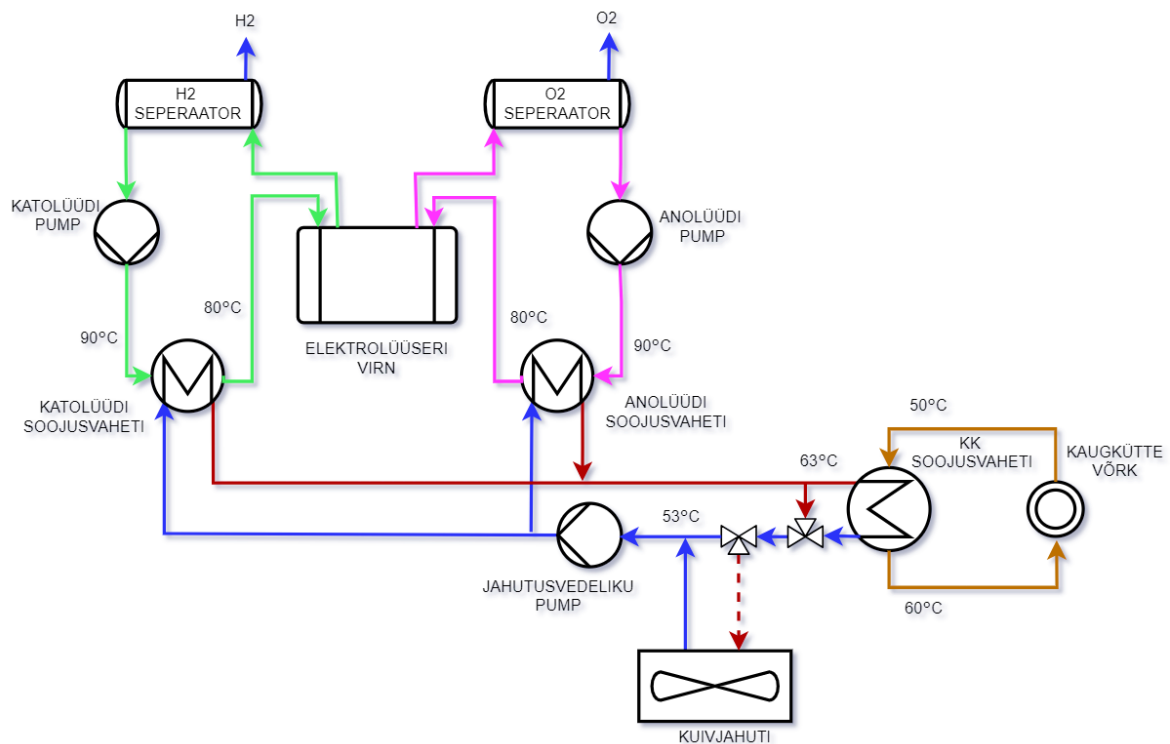
## 4.6 Elektrolüüseri heitsoojuse integreerimine kaugküttevõrku

Nagu enamik protsesse, pole vee elektrolüüs ideaalne protsess. Elektrolüüsi rakkude sisemiste takistuste tõttu tekib elektrolüüsi virnas soojus. Elektrolüüseri rakkude kahjustamise vältimiseks tuleb soojust süsteemist eemaldada. Sel põhjusel asetatakse elektrolüüti ringlustsüklisse soojusvaheti. Tavaliselt toimub jahutamine kuivjahutitega, mis alandavad jahutusvedeliku (tavaliselt vee/glükooli segu) temperatuuri peaaegu ümbritseva õhu temperatuurini. Kuid heitsoojust saab kasutada ka ruumide kütmiseks, nt. kaugküttevõrkude kaudu – mida antud projektis ka realiseeritakse. Kuna vesiniku tootmisüksus paikneb Tallinna Elektriijaama kõrval ning linna kaugküttevõrgu vahetus läheduses oli otsustatud seda võimalust ära kasutada ning suunata elektrolüüseri heitsoojuse kaugküttevõrku. Elektrolüüdi jahutussüsteemi jahutusvedeliku temperatuurigraafik on 63/53°C (Tabel 4.1), mis potentsiaalselt võimaldab kaugküttevõrgu tagastuva liini ära kasutada elektrolüüseri virna jahutamiseks, ehk ära anda liigsoojus ja seega eelsoojendada kaugküttevõrgu pealevoolu liini. Selline lahendus suurendab mõlema süsteemi energiatõhusust.

Tuleb tõdeda, et elektrolüüsisüsteemis ei ole elektrolüüseri virn ainus koht, kus jääsoojus tekib. Toodegaase ( $H_2$  ja  $O_2$ ) tuleb samuti jahutada, et kondenseerida vesi gaasivooludest. Lisaks tuleb soojust ära juhtida alalditest ja gaasipuhastusseadmetest. Alaldid ja gaasijahutid vajavad jahutusvedeliku varustust maksimaalselt  $40\text{ }^\circ\text{C}$  juures, mistõttu on selle jääsoojuse kasutamine kaugküttevõrgus keerulisem ning antud projektis sellist lahendust ei realiseerita. Üldmainitud komponentidelt soojuste ära juhtimine on lahendatud teise jahutuskontuuriga, soojus suunatakse õhkjahutusega soojusvaheti kaudu välisõhku.

Vaatleme aga elektrolüüsvirna jahutuskontuuri (Joonis 4.5).

Selle jahutuskontuuri peamine eesmärk on hoida elektrolüüseri virnast väljuva elektrolüüdi temperatuur alla  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Selleks jahutatakse virnadesse sisenevat elektrolüüti (katolüüdi ja anolüüdi) soojusvahetites. Soojuskandjaks on 40% kontsentratsiooniga etüleenglükooli-vee segu, mis tsirkuleerib süsteemis.



Joonis 4.5 Elektrolüüsvirna jahutussüsteemi skeem

Elektrolüüdi temperatuuri kontrollitakse, reguleerides jahutusvedeliku vooluhulka soojusvahetites, läbi jahutusvedeliku pumba kiiruse reguleerimise.

Jahutusvedelik saab soojust ära anda kahel viisil: 1) kaugküttevõrku läbi KK soojusvaheti; 2) atmosfääri õhku läbi kuivjahuti.

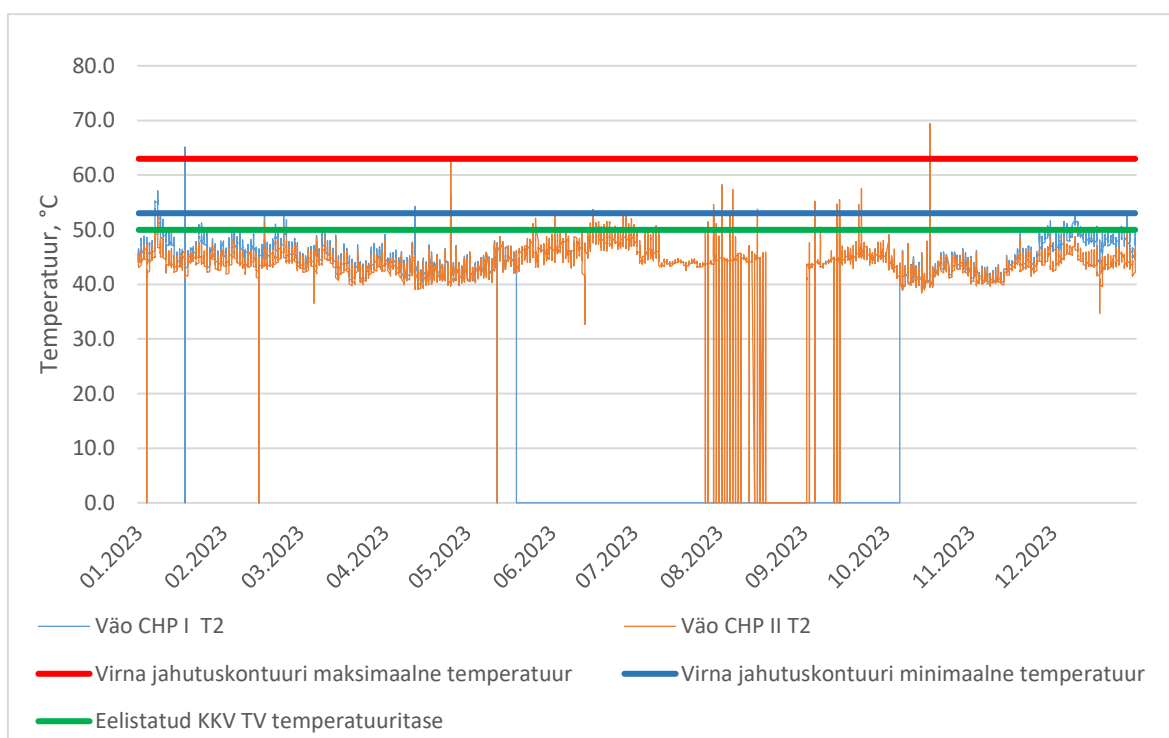
Kuum jahutusvedelik käib kõigepealt läbi KK soojusvaheti. Soojuse äraandmine kaugküttevõrku läbi sõltub mh. kaugkütteevee pealevoolu temperatuurist ja vooluhulgast, mis ei ole elektrolüüseri poolt kontrollitav.



Kui peale kaugkütte soojusvaheti läbimist ei ole saavutatud jahutusvedeliku temperatuur ca 53 °C (vt. Tabel 4.1), saadetakse jahutusvedelik täiendavaks jahutuseks ka läbi kuivjahuti.

Kui kaugküttevõrgu tagastuva liini temperatuur on kõrgem kui jahutusvedeliku maksimaalne temperatuur (63°C – Tabel 4.1) või kui kaugkütte tsirkulatsioon puudub (nt hooldustööd või muu seisak), siis jahutamine toimub ainult kuivjahutiga.

Analüüsid Tallinna Elektriijaama (Väo CHP I ja Väo CHP II) 2023. aasta tagasivoolu liini temperatuuri – Joonis 4.6 – järeldeb, et suurema osa aastast on kaugküttevõrgu tagastuva liini temperatuur sobilik elektrolüüseri jääsoojuse kaugküttesse suunamiseks. Soojemal perioodil, kuskil mai keskpaigast kuni septembri keskpaigani on vahel kaugküttevõrgu tagastuva liini temperatuur kõrgem kui 50°C, see tähendab, et sellel perioodil elektrolüüsi jahutamise oleks võimalik vaid osaliselt katta kaugkütteveega (arvestades 3°C kaoga üle soojusvaheti – vt. Tabel 4.1) ning vajalik on täiendav jahutamine kuivjahutiga. Erandiks on mõned lühiajalised perioodid aasta jooksul, nt hooldusperiood ja perioodid, mil jaam ei tööta – sellistel perioodidel toimub elektrolüüsi jahutamine kuivjahutiga.



Joonis 4.6 Tallinna Elektriijaama (sh Väo CHP I ja Väo CHP II tagastuva vee temperatuur) [24]

## 4.7 Heitmed

Kui elektrolüüsist tulenev heitsoojus asendab fossiilsete kütuste baasil toodetud soojuse, tekitab CO<sub>2</sub> heitmete vähendamise potentsiaal. Käesolevas töös vaatlesin

maagasi kasutust, kui primaarenergia soojusallika kaugküttevõrgus ning hindasin selle potentsiaalse säästu.

Gaasikatelde puhul eeldasin, et tööstusliku katla puhul on kasutegur 90% ( $\eta_{\text{gaasi katel}}$ ).

Kasutatud primaarenergia arvutasin järgmisel:

$$Q_{\text{primaar}} = \frac{Q_{\text{maagaas}}}{\eta_{\text{gaasi katel}}} \quad (4.1)$$

Kus  $Q_{\text{primaar}}$  – kasutatud primaarenergia kogus, [MWh]

$Q_{\text{maagaas}}$  – maagaasiga toodetud ja kaugküttevõrgu suunatud soojuse hulk, [MWh]

$\eta_{\text{gaasi katel}}$  – gaasikatla kasutegur, [%]

Maagaasi süsiniku eriheidde  $q_c$  võrdub 15,3  $\frac{tC}{TJ}$  vastavalt määruse nr 86, 27.12.2016 „Välisõhku väljutatava süsinikdioksiidi heite arvutusliku määramise meetodid“ Lisale 2. [29]

CO<sub>2</sub> heitmete faktori  $q_{CO_2}$  teisendamiseks TJ-st MWh-ks kasutatakse järgmist valemit:

$$q_{CO_2} = \frac{q_c \times 3664}{0,27778 \times 1000} [30] \quad (4.2)$$

Kus  $q_c$  – süsinikuheitme faktor  $\left[\frac{tC}{TJ}\right]$

$q_{CO_2}$  – Süsinikdioksiidi heitmefaktor  $\left[\frac{kgCO_2}{MWh}\right]$

Maagaasi süsinikdioksiidi heitmefaktor on  $q_c = 201,81 \left[\frac{kgCO_2}{MWh}\right]$

Maagaasi CO<sub>2</sub> heitkoguste vähendamise potentsiaali kilogrammides  $m_{CO_2}$  arvutasin järgmiselt:

$$m_{CO_2} = q_{CO_2} \times Q_{\text{primaar}} \quad (4.3)$$

Kus  $m_{CO_2}$  – CO<sub>2</sub> heitmekogus, [kg]

$q_{CO_2}$  – maagaasi süsihappegaasi heitmefaktor  $\left[\frac{kgCO_2}{MWh}\right]$

$Q_{\text{primaar}}$  – kasutatud primaarenergia kogus, [MWh]

## 4.8 Elektrolüüseri kasutegur

Elektrolüüseri efektiivsust saab üldjuhul väljendada elektrienergia sisendi ja vesiniku väljundenergia suhtena, valem (4.4).

$$\eta_{H_2} = \frac{HHV(H_2)}{E_{elektrolüüser}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Kus  $\eta_{H_2}$  - elektrolüüseri kasutegur, %

$HHV(H_2)$  – (Higher heating value) Vesiniku ülemine kütteväärtus, kWh/kg H<sub>2</sub>

$E_{elektrolüüser}$  – elektrolüüseri energiatarve, kWh/kg H<sub>2</sub>

Juhul, kui lisaks vesinikule kasutatakse ka protsessis tekkiv heitsoojus, ehk väljundenergia hulk suureneb, saab seda efektiivsust tõsta.

$$\eta_{H_2+soojus} = \frac{HHV(H_2) + Q_{jääk}(H_2)}{E_{elektrolüüser}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

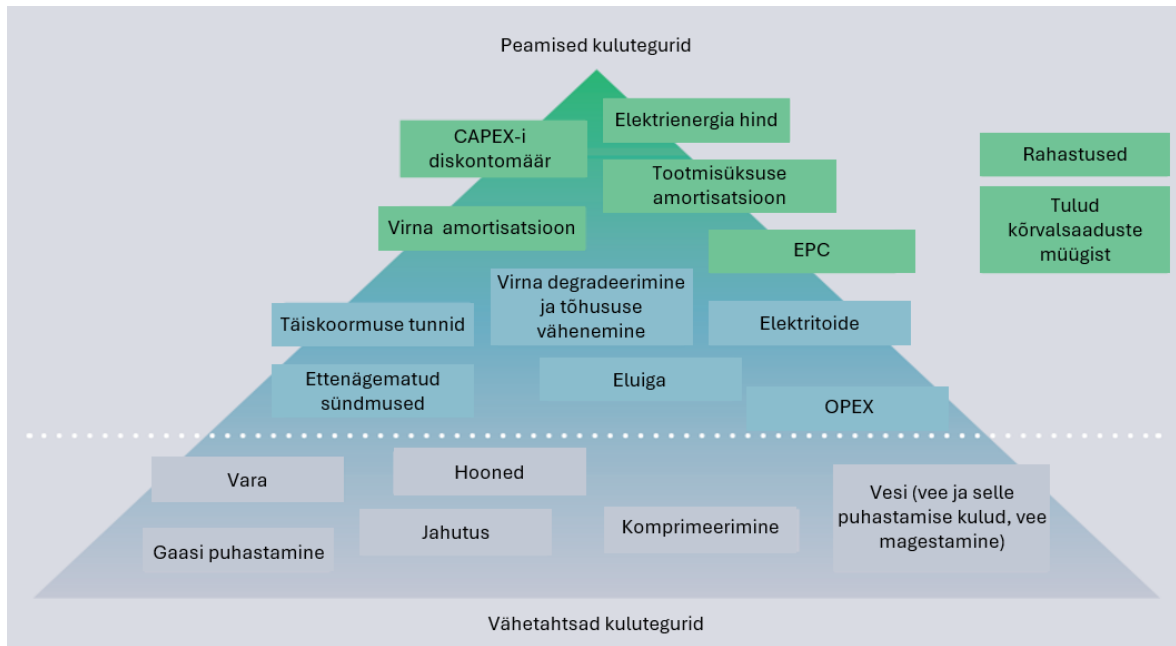
Kus  $\eta_{H_2+soojus}$  – elektrolüüseri kasutegur heitsoojuse utiliseerimisega, %

$Q_{jääk}(H_2)$  – vesiniku tootmisel utiliseeritud erisoojus, kWh/kg H<sub>2</sub>

## 4.9 Vesiniku tootmiskulud

Praktiline viis kulude arvutamiseks hõlmab keskendumist peamistele teguritele, mis tavaliselt põhjustavad kulusid, konkreetse projekti või asukohaga seotud üksikasju arvestamata. Sellised tegurid nagu projektide rahastamine või maksusoodustused tuleks üldiselt välja jätta.

Vesiniku tootmise kulutegurite klassifikatsioon on näidatud järgmisel skeemil (Joonis 4.7).



Joonis 4.7 Vesiniku tootmise kulutegurid [31]

Vesiniku tootmiskulude arvutamiseks on kasutatud valemit (4.6), valemi allikaks on [32] ning see sisaldab täiendavaid eeldusi, mis põhinevad tööstusalastel teadmistel. Need eeldused puudutavad elektrolüüserite kulusid, elektrolüüserite tööaegu, vara elutsükli, virna vastupidavust, virna degradeerumist ja virna asendamise kulusid ning muid tegureid:

$$LCOH = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t + E_t + M_t}{(1+r)^t}}{\frac{H_t}{(1+r)^t}} [32] \quad (4.6)$$

Kus  $LCOH$  – (levelized cost of hydrogen) vesiniku tasandatud hind, [EUR/kg]

$I_0$  – investeerimiskulud eurodes

$I_t$  – Investeerimiskulud aastal  $t$  (virna asendamise kulud)

$E_t$  – Aastal  $t$  tarbitud elekter, sealhulgas tootmiskulud, võrgukulud ja maksud, kui need on kohaldatavad, ning elektrolüüseri virna degradeerimine

$M_t$  – Muud tegevuskulud aastal  $t$

$H_t$  – Vesiniku tootmine aastal  $t$

$r$  – Diskontomäär või kapitalikulu (diskontomääraks on antud juhul on võetud 5%)

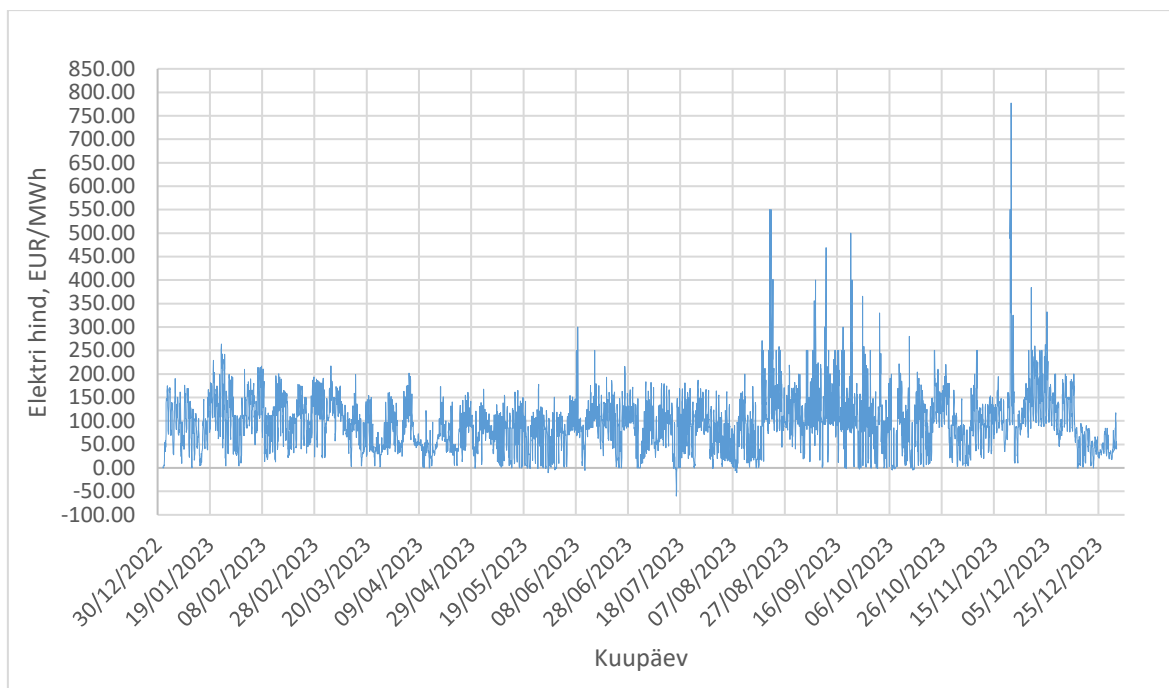
Vesiniku omahinna arvutamiseks kasutatud eeldused on esitatud Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Vesiniku omahinna arvutamiseks kasutatud eeldused

Parameeter	Väärtus	Ühik
Keskmine aastane elektri hind vesiniku tootmistundidel	Sõltuvalt stsenaariumist	EUR/MWh
Elektrolüüseri töötunnid aastas	Sõltuvalt stsenaariumist	h/aasta
Vesiniku tootmismah	Sõltuvalt stsenaariumist	kg/aasta
Elektrolüüseri installeeritud võimsus	1056	kW
Vesiniku tootmissüsteemi eluiga	20	aastat
Diskontomäär	5	%
Elektrolüüseri energiakulu aastas (BOL)	Sõltuvalt stsenaariumist	kWh
Elektrolüüseri CAPEX	1500000	EUR
OPEX: Virna vastupidavus	80000	h
OPEX: Virna asendamise kulud	25	% CAPEX-ist
OPEX: Elektrolüüseri energiatarve (BOL)	51,9	kWh/kg
OPEX: Elektrolüüseri energiatarve (EOL)	63,0	kWh/kg
OPEX: Elektrolüüseri aastane hoolduskulu*	3	% CAPEX-ist
OPEX: Virna degradeerimine	1	% aastas

\*Elektrolüüseri 3% investeeringust, hinnang on saadud Taani MTÜ-lt Hydrogen Valley DK, kellele kuulub üks Euroopa esimesi tööstuslikke PEM-elektrolüüsereid nimega HyBalance

Elektrihinna kaalutud keskmise väärtuse arvutamiseks on lähtutud 2023. aasta NordPool-i elektri hindadest (Joonis 4.8)



Joonis 4.8 2023. aasta NordPool elektri hind

## 4.10 Stsenaariumid

Käesolevas töös analüüsiti erinevate elektrolüüseri opereerimisstrateegiate kontekstis elektrolüüserist pärineva heitsoojuse lisamist Tallinna kaugkütte põhivõrku ning sellest tulenevaid tootmisprofile. Soojustoodangu hindamiseks ja stsenaariumite mudelite koostamiseks kasutati tabelitarkvara Microsoft Excel. Alusandmetena võeti AS Utilitas Tallinn poolt esitatud soojustootmisüksuste 2023. aasta toodangu andmed (Joonis 4.4), NordPooli 2023. aasta tunnipõhine elektri hind (Joonis 4.8) ning elektrolüüseri tootmisandmed (Tabel 4.1). Kokku oli uuritud kolm stsenaariumi.

Kõigi kolme opereerimisstrateegia puhul hinnati ja arvatati soojushulka, mida potentsiaalselt saab vesiniku tootmisprotsessi heitsoojusest kaugküttevõrku lisada; toodetud vesiniku mahtu; elektrolüüseri töötunde ja elektri hinda tundidel, mil vesinik toodeti. Nende andmete alusel sai arvatatud parandatud elektrolüüseri kasutegur. Samuti uuriti, kuidas elektrolüüseri heitsoojuse lisamine kaugküttevõrku mõjutab vajadust maagaasi kasutamise järele soojuse tootmiseks. Nende andmete alusel tehti CO<sub>2</sub> heitmete säästu arvutused ning majanduslik analüüs, millega arvatati vesiniku tootmishinda sõltuvalt opereerimisstrateegiast.

Selleks, et hinnata kaugküttevõrku lisatud soojushulka, analüüsiti Tallinna Elektri jaama koostootmisjaamade tagastuva liini temperatuure ning juhul, kui need olid madalamad või võrdsed nõutud parameetriga (vt. Tabel 4.2), lisati elektrolüüseri kättesaadava heitsoojuse väärtuse megavattides (MW). Siin tuleb aga tähelepanu juhtida, et arvutus

on lihtsustatud ning elektrolüüseri dünaamilise käitumisega pole arvestatud. Samuti pole arvestatud ka osalise jääksoojuse utiliseerimisega, st kui tagastuva liini temperatuur oli kõrgem eelisatud temperatuurist soojusvahetisse vaid madalam eelistatud temperatuurist soojusvahetist (Tabel 4.2). Reaalelus oleks osaline jääksoojuse utiliseerimine võimalik.

Selleks, et hinnata, kui palju maagaasiga toodetud soojusest õnnestub katta elektrolüüseri heitsoojusega, lahutati 2023. aasta reaalsest maagaasi soojustoodangust tunni kaupa teoreetiliselt arvatud lisatud heitsoojuse kogust. Edaspidi oli tehtud aastane säästetud maagaasiga toodetud soojushulk ning nende andmete alusel arvatud säästetud CO<sub>2</sub> heitmekogus.

Majandusliku arvutuse aluseks olid tabelis (Tabel 4.3) toodud andmed. Elektri hind kogu teoreetiliselt toodetud vesiniku tootmiseks oli võetud aasta kaalutud keskmisena summerides iga tunnipõhise elektri hinna, mil vesinik oli toodetud ja jagatud aastase töötundide arvuga.

Kuna elektrolüüseri efektiivsuse näitaja eluea jooksul muutub, seda liigikaudselt 1% võrra aastas, olen arvutusi teinud eluea alguse ja eluea lõpu jaoks, et hinnata kuivõrd palju see numbrilistes väärtustes ja soojushulkades tähendada võiks.

#### **4.10.1 Stsenaarium 1 – projektipõhine miinimum-maht**

Esimene stsenaarium on vesiniku tervikahela projekti miinimumstsenaarium, mis hõlmab kindlat minimaalset rohevesiniku aastast tootmismahu, milleks on 38 tonni H<sub>2</sub> aastas. Selle stsenaariumiga kaasnevad järgmised piirangud:

- Päevane vesiniku tootmismahut peaks olema vahemikus 100-120 kg H<sub>2</sub>, kuna see kogus on seotud vesiniku igapäevase lõpptarbimisega vesiniku tervikahela projekti raames. Seega vesiniku tootmine peaks toimuma ca 6 tundi ööpäevas, mis vastab vesiniku kogusele ööpäevas 108 kg.
- Samuti tuleb arvestada, et vesiniku hoiustamine on piiratud ning peab lähtuma kättesaadavate hoiustamismahutite kogumahust, milleks on 720 kg vesinikku. Iga kolme ööpäeva tagant tühjendatakse üks kolmest mahutist, mis võimaldab vesiniku tootmist jätkata.

Arvestades, et vesiniku hind sõltub eelkõige elektri hinnast, on rakendatud loogikat, et vesinikku toodetakse vaid ööpäeva soodsaimatel elektri hindade tundidel. Elektrolüüseri tööpõhimõttest lähtuvalt on otstarbekas seda teha järjestikustel tundidel, kuna elektrolüüseri käivitamine ja peatamine on aeganõudev ja dünaamiline protsess.

Eeldame, et vesinikku toodetakse ööpäeva soodsamate elektri hinnaga järjestikustel kuue tunni pikkustel ajavahemikel. Elektrolüüseri opereerimisstrateegia põhimõtte näeks siis järgmiselt – vt. Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Simulatsioon 1 põhimõte

Madalam 6-tunnine el.hind	Vesiniku mahuti	Kas toota või mitte	KKV T2	Maagaasi koormus olemas	Soojus KKV-u	CO <sub>2</sub> sääst
Jah	Täis	Ei	0<T2<50	Jah	0	Ei
Jah	Ei ole täis	Jah	0<T2<50	Jah	350	Jah
Jah	Täis	Ei	>50	Jah	0	Ei
Jah	Ei ole täis	Jah	>50	Jah	0	Ei
Jah	Täis	Ei	0	Jah	0	Ei
Jah	Ei ole täis	Jah	0	Jah	0	Ei
Jah	Täis	Ei	0<T2<50	Ei	0	Ei
Jah	Ei ole täis	Jah	0<T2<50	Ei	350	Ei
Jah	Täis	Ei	>50	Ei	0	Ei
Jah	Ei ole täis	Jah	>50	Ei	0	Ei
Jah	Täis	Ei	0	Ei	0	Ei
Jah	Ei ole täis	Jah	0	Ei	0	Ei
Ei	Täis	Ei	0<T2<50	Jah	0	Ei
Ei	Ei ole täis	Ei	0<T2<50	Jah	0	Ei
Ei	Täis	Ei	>50	Jah	0	Ei
Ei	Ei ole täis	Ei	>50	Jah	0	Ei
Ei	Täis	Ei	0	Jah	0	Ei
Ei	Ei ole täis	Ei	0	Jah	0	Ei
Ei	Täis	Ei	0<T2<50	Ei	0	Ei
Ei	Ei ole täis	Ei	0<T2<50	Ei	0	Ei
Ei	Täis	Ei	>50	Ei	0	Ei
Ei	Ei ole täis	Ei	>50	Ei	0	Ei
Ei	Täis	Ei	0	Ei	0	Ei
Ei	Ei ole täis	Ei	0	Ei	0	Ei

#### 4.10.2 Stsenaarium 2 - Vesinikutootmine piiratud tunnipõhise elektrihinnaga

Teise stsenaariumi puhul on piiravaks faktoriks tunnine elektrihind. Siinpool aga tasub mainida, et sarnaselt esimese stsenaariumiga ning lähtuvalt elektrolüüseri tööpõhimõttest, vesiniku tootmine peaks toimuma minimaalselt kuuel (võib olla ka rohkemal) järjestikusel tunnil. Samuti minimaalne aastane vesiniku tootmismahut peaks olema täidetud, ehk väljundis peaks olema 38 t või rohkem vesinikku. Vesinikutootmine ei ole selles stsenaariumis piiratud hoiustamismahutitega, vaid on eeldatud, et saab toota nii palju kui võimalik. Ka päevane tootmismahut ei ole kindlaks määratud, ehk kui hind osutub piirhinnast kõrgem, ei toota vesiniku üldse.

Antud stsenaariumiga olen natuke katsetanud ning proovinud erineva piirhinna väärtust, selleks et vaadata kuivõrd palju tunnipõhine piirhind võib lõpliku tulemust mõjutada nii vesiniku tootmismahu kui ka keskmise hinna kontekstis. Tulemuste koondtabelis (Tabel 5.1) on toodud kahe erineva elektri piirhinnaga saadud tulemused – 60 EUR/MWh (stsenaarium 2) ja 100 EUR/MWh (stsenaarium 2a).

Elektrolüüseri opereerimisstrateegia põhimõtte teise stsenaariumi jaoks on toodud allpool (Tabel 4.5).



Tabel 4.5 Simulatsiooni 2 põhimõte

Elektrihind alla piirmäära	Kas toota või mitte	KKV T2	Maagaasi koormus olemas	Soojus KKV-u	CO <sub>2</sub> sääst
Ei	Ei	0<T2<50	Jah	0	Ei
Jah	Jah	0<T2<50	Jah	350	Jah
Ei	Ei	>50	Jah	0	Ei
Jah	Jah	>50	Jah	0	Ei
Ei	Ei	0	Jah	0	Ei
Jah	Jah	0	Jah	0	Ei
Ei	Ei	0<T2<50	Ei	0	Ei
Jah	Jah	0<T2<50	Ei	350	Ei
Ei	Ei	>50	Ei	0	Ei
Jah	Jah	>50	Ei	0	Ei
Ei	Ei	0	Ei	0	Ei
Jah	Jah	0	Ei	0	Ei

#### 4.10.3 Stsenaarium 3- Vesiniku pidev tootmine

Kolmanda stsenaariumi puhul on ette nähtud pidev vesiniku tootmine, ehk on arvestatud, et elektrolüüser töötab oma maksimaalse aastase töötundide arvu, milleks on 8000 h. Hoolduse perioodi olen eeldanud enam vähem samal ajal, mil toimub ka Tallinna elektrijaama hooldusperiood või kui jaam ei funktsioneer. Vastavalt graafikule (Joonis 4.4) langeb see periood juulikuu peale.

Elektrolüüseri opereerimisstrateegia põhimõte kolmanda stsenaariumi jaoks on toodud allpool (Tabel 4.6).

Tabel 4.6 Simulatsiooni 3 põhimõte

Kas juuli?	Kas toota või mitte	KKV T2	Maagaasi koormus olemas	Soojus KKV-u	CO <sub>2</sub> sääst
Jah	Ei	0<T2<50	Jah	0	Ei
Ei	Jah	0<T2<50	Jah	350	Jah
Jah	Ei	>50	Jah	0	Ei
Ei	Jah	>50	Jah	0	Ei
Jah	Ei	0	Jah	0	Ei
Ei	Jah	0	Jah	0	Ei
Jah	Ei	0<T2<50	Ei	0	Ei
Ei	Jah	0<T2<50	Ei	350	Ei
Jah	Ei	>50	Ei	0	Ei
Ei	Jah	>50	Ei	0	Ei
Jah	Ei	0	Ei	0	Ei
Ei	Jah	0	Ei	0	Ei

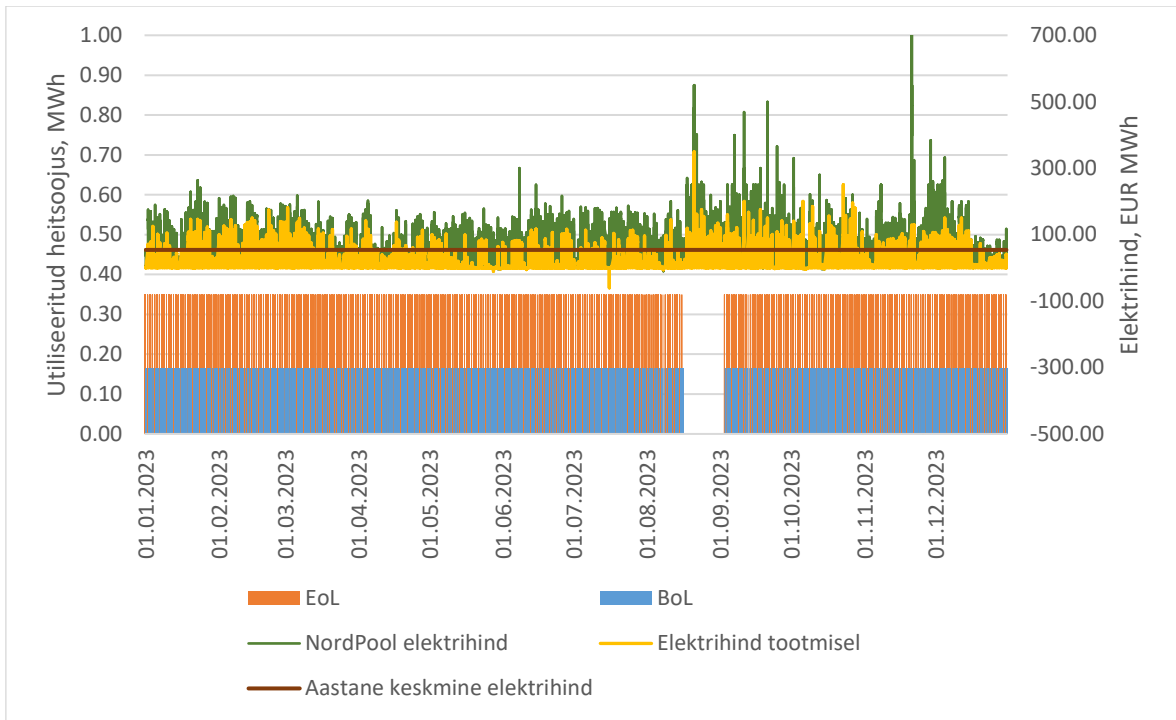
## 5. Tulemused

### 5.1 Tulemuste kokkuvõte

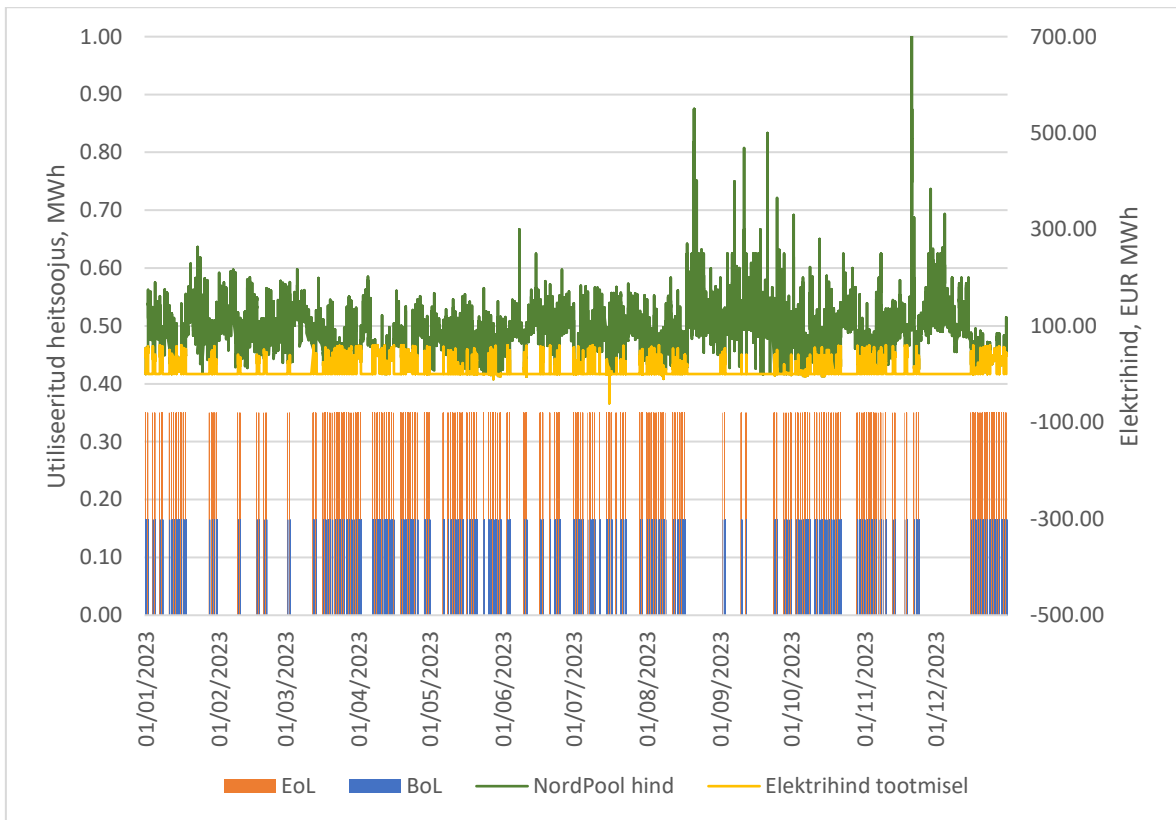
Mugavamaks analüüsimiseks olen koondanud kõik arvutuskäigus saadud tulemused tabelisse (Tabel 5.1). Samuti olen visualiseerinud kõik stsenaariumid graafikutel (Joonis 5.1, Joonis 5.2, Joonis 5.3, Joonis 5.4). Graafikutel on näidatud tunni kaupa kaugküttesüsteemis utiliseeritud heitsoojus elektrolüüsi virna eluea alguses ja lõpus ning Nordpool-i tunnipõhine elektrihind ja elektri hind vesiniku tootmisel.

Tabel 5.1 Tulemuste koondtabel

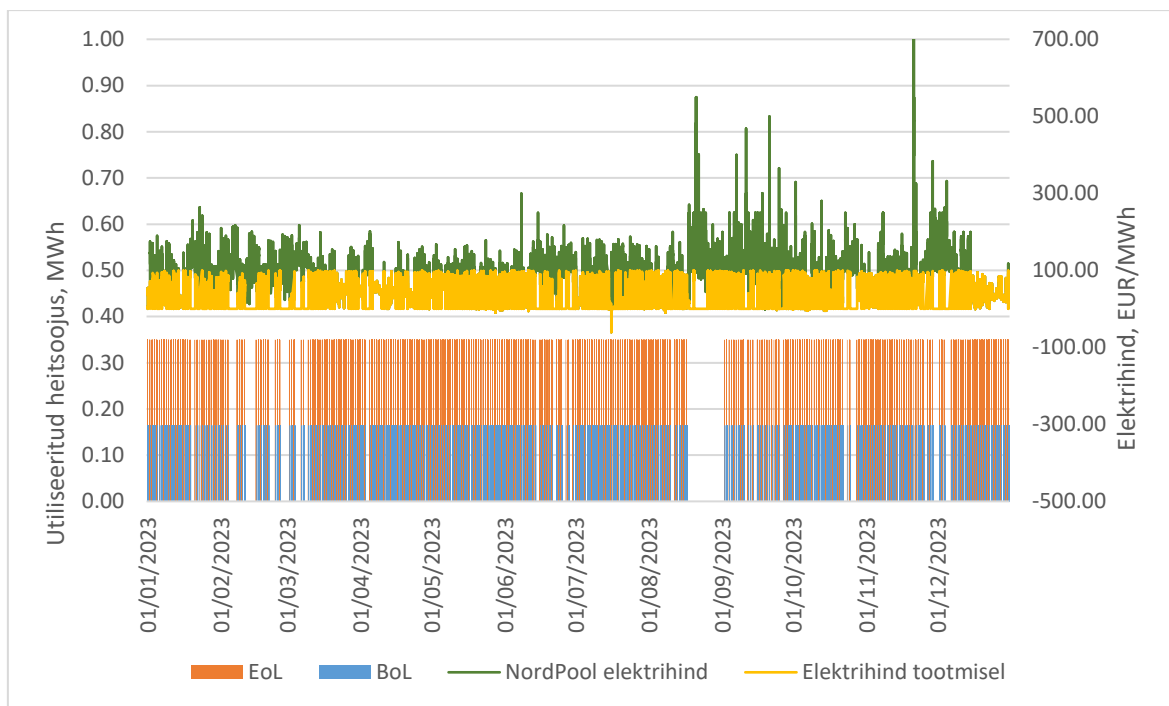
Parameeter	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 2a	Stsenaarium 3
Elektrolüüseri opereerimise põhimõte	6 h/ööpäev odavaima el.hinnaga	El.hinna piirmäär 60 EUR/MWh	El.hinna piirmäär 100 EUR/MWh	24/7 tootmine
Aastane vesiniku tootmiskaht, t H <sub>2</sub>	39,2	38,2	83,9	144,3
Elektrolüüseri töötundide arv aastas, h aastas	2178	2122	4663	8016
Potentsiaalselt kättesaadav heitsoojus (BoL - EoL), MWh aastas	359 - 762	350 - 743	770 - 1632	1332 - 2806
Kaugküttevõrku sisestatud jääksoojus (BoL - EoL), MWh aastas	335 - 711	340 - 722	736 - 1562	1239 - 2628
Maagaasiga toodetud soojusenergia asendamine (BoL - EoL), MWh aastas	257 - 544	256 - 543	575 - 1219	972 - 2061
Maagaasi süsinikeide sääst ( $m_{CO_2}$ ) (BoL - EoL), t CO <sub>2</sub> aastas	58- 122	76 -162	165 - 350	278 - 589
Keskmine aastatne elektri hind tootmisel, EUR/MWh	54,44	26,84	53,34	91,84
Vesiniku tootmishind, EUR/kg H <sub>2</sub>	8,41	6,80	5,69	26,29



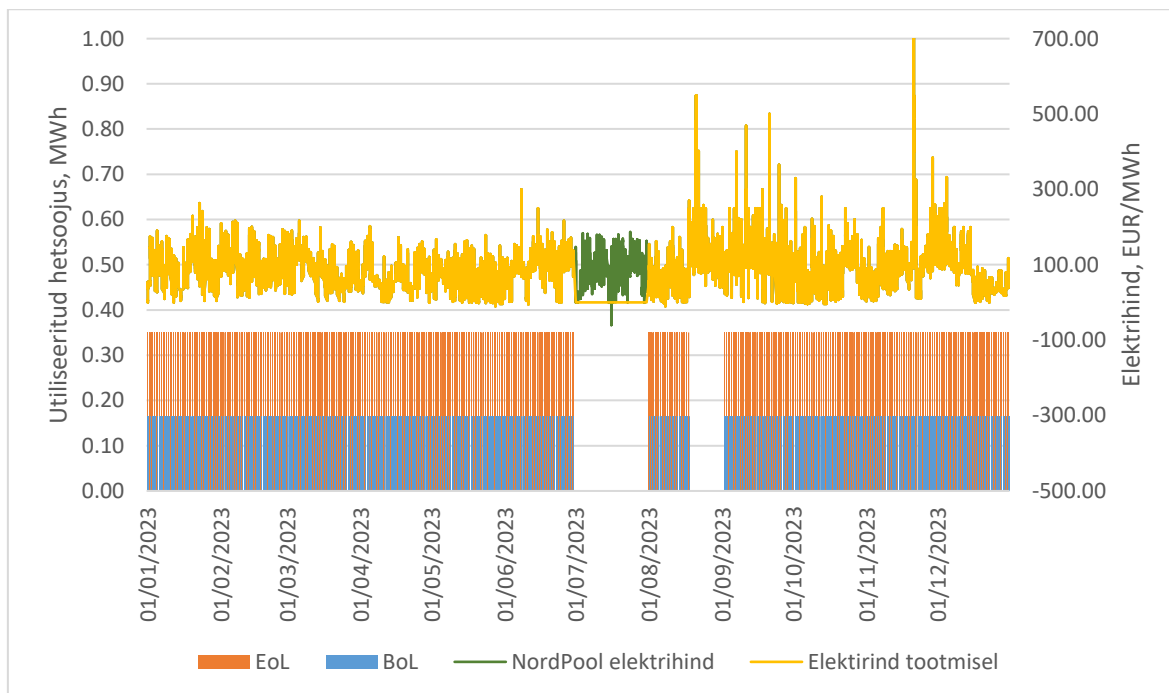
Joonis 5.1 Stsenaariumi 1 visualisatsioon



Joonis 5.2 Stsenaariumi 2 visualisatsioon



Joonis 5.3 Stsenaariumi 2a visualisatsioon



Joonis 5.4 Stsenaariumi 3 visualisatsioon

## 5.2 Tulemuste analüüs

Kõigi opereerimistrateegiatega juures on tagatud vesiniku minimaalne projektijärgne tootmismahut 38 t H<sub>2</sub> aastas.

Nagu järeldub tulemuste tabelist (Tabel 5.2), elektrolüüsi protsessi käigus eraldatud potentsiaalselt utiliseeritav heitsoojus ulatub vastavalt opereerimisstrateegiale 350 – 2806 MWh<sub>th</sub>-ni aastas. Sellest soojusenergiast enamiku saaks potentsiaalselt ära kasutada kaugküttevõrgus, sõltuvalt opereerimisstrateegiast on utiliseerimata jäänud soojuse osakaal vaid 3-7% kogu kättesaadavast heitsoojusest. Muidugi Tallinna kaugküttevõrgu mastaabis, pole see soojuse hulk sugugi suur, samas tegemist on soojusega, mis oleks muidu kaotsi läinud atmosfääri. Lähtudes kehtivast soojusenergia müügi piirhinnast, milleks on 79,04 EUR/MWh+km [33] saab seda soojusenergiat väljendada rahalises ekvivalendis järgmiselt 27 650 – 221 674 EUR+km.

Siinpool tasub märkida, et elektrolüüsi opereerimisstrateegia valik ei mõjuta väga tulemusi, üldiselt mida rohkem vesiniku toodetakse, seda rohkem soojust eraldatakse ja saab potentsiaalselt utiliseerida, mis on ka loogiline. Kuid osakaal utiliseeritud soojusest on erinevate opereerimisstrateegiatega juures on kõigub vaid mõne % ulatuses.

Tabel 5.2 Heitsoojuse kogus

Parameeter	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 2a	Stsenaarium 3
Elektrolüüsi opereerimise põhimõte	6 h/ööpäev odavaima el.hinnaga	El.hinna piirmäär 60 EUR/MWh	El.hinna piirmäär 100 EUR/MWh	24/7 tootmine
Potentsiaalselt kättesaadav heitsoojus (BoL - EoL), MWh aastas	359 - 762	350 - 743	770 - 1632	1332 - 2806
Kaugküttevõrku sisestatud jääsoojus (BoL - EoL), MWh aastas	335 - 711	340 - 722	736 - 1562	1239 - 2628
Utiliseerimata jäänud heitsoojuse osakaal %	6,7%	2,8%	4,3%	6,3%

Tulemustest (Tabel 5.3) on näha, et utiliseeritud heitsoojusest 75 – 78% asendas maagaasiga toodetud soojusenergiat ning sellega saaks potentsiaalselt säästa vastavalt elektrolüüsi opereerimisstrateegiale 58-589 t CO<sub>2</sub> aastas. Et aru saada kuivõrd palju see CO<sub>2</sub> heitmekogus on, toon näite elust. Võtame keskmise bensiiniauto, nt Škoda Oktavia, mille CO<sub>2</sub> heitmekogus on ca 160gCO<sub>2</sub>/km WLTP järgi (ehk World Harmonized Light Vehicle Test Procedure, mis on sõiduautodele mõeldud labora tooriumitest, mis töötab nn päriselu sõiduanndmete pealt ja arvutab sealjuures kokku CO<sub>2</sub> emissioonide ning kütusekulu numbrid). Eeldame, et auto sõidab keskmiselt 15000 km aastas. Lihtsa kalkulasiooniga saame arvutada, et säästetud CO<sub>2</sub> hulk vastaks umbes 24-245 auto aastasele CO<sub>2</sub> heimekogusele.

Sarnaselt eelmisele stsenaariumile, ei avaldu elektrolüüsi opereerimisstrateegia märkimisväärset mõju sellele, kui suur osakaal maagaasiga toodetud soojusenergiast

saab elektrolüüseri heitsoojusega asendada. Kõigi opereerimisstrateegiatega puhul jääb see osakaal 75-78% ringi. Kuid näha on loogilist seost absoluutsetes väärtustes, so mida rohkem vesiniku toodetakse, seda rohkem saab säästa maagasist CO<sub>2</sub> heitmeid.

Tabel 5.3 Maagaasiga toodetud soojuste asendamine ja süsinikdioksiidi heitmete sääst

Parameeter	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 2a	Stsenaarium 3
Elektrolüüseri opereerimise põhimõte	6 h/ööpäev odavaima el.hinnaga	El.hinna piirmäär 60 EUR/MWh	El.hinna piirmäär 100 EUR/MWh	24/7 tootmine
Kaugküttevõrku sisestatud jääksoojus (BoL - EoL), MWh aastas	335 - 711	340 -722	736 -1562	1239 - 2628
Maagaasiga toodetud soojusenergia asendamine (BoL - EoL), MWh aastas	257 - 544	256 - 543	575 - 1219	972 - 2061
Asendatud maagasist toodetud soojusenergia osakaal %	76.6%	75.2%	78.1%	78.4%
Maagaasi süsinikeide sääst ( $m_{CO_2}$ ) (BoL - EoL), t CO <sub>2</sub> aastas	58- 122	57 -122	165 - 350	278 - 589

Analüüsime kuidas utiliseeritud heitsoojus mõjutab elektrolüüseri efektiivsust. Elektrolüüseri elektrienergiatarve eluea jooksul muutub, see on seotud virna degradeerimisega, mis on ca 1% aastas. See tähendab, et toota sama kogus vesinikku tuleb ajaga suurendada elektrienergia sisendi, vastavalt tootja andmetele ühe kilogrammi vesiniku tootmiseks on eluea alguses vaja 51,9 kWh ning eluea lõpus 63 kWh elektrienergiat [19], mis vastab elektrolüüseri efektiivsusele  $\eta_{H_2}$  vastavalt 75,9 – 62,5%. Energiatarve suurenemisega suureneb ka protsessiga kaasnev soojuseraldus, ehk vananemisega hakkab elektrolüüser eraldama rohkem soojust. Elektrolüüseri tootjaandmete järgi [19] teoreetiline heitsoojuse eraldus, mis kaasneb protsessiga võrdub virna eluea alguses 165 kWh ja eluea lõpus 350kWh elektrolüüseri täisvõimsusel töötamisel. Arvestades heitsoojusega, mis sai kaugküttevõrgu sisestatud arvutasin elektrolüüseri parandatud kasuteguri  $\eta_{H_2+soojus}$  ning sain tulemuseks ca 92% sõltumata elektrolüüseri opereerimisstrateegiast ja virna elueast. See tähendab elektrolüüseri kasuteguri suurenemist keskmiselt 17% võrra elektrolüüseri virna eluea alguses ning ligi 30% võrra elektrolüüseri virna eluea lõpus. Siit saab järeldada, et elektrolüüseri heitsoojuse utiliseerimisega saab tõsta ja tasandada seadme üldist energiatõhusust.

Tabel 5.4 Elektrolüüseri efektiivsus

Parameeter	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 2a	Stsenaarium 3
Elektrolüüseri opereerimise põhimõte	6 h/ööpäev odavaima el.hinnaga	El.hinna piirmäär 60 EUR/MWh	El.hinna piirmäär 100 EUR/MWh	24/7 tootmine
Elektrolüüseri energiatarve ( $E_{elektrolüüser}$ )(BoL - EoL), kWh/kg H <sub>2</sub>	51,9 - 63,0			
Elektrolüüseri kasutegur HHV ( $\eta_{H_2}$ ) (BoL - EoL), %	75,9 - 62,5%			
1 kg H <sub>2</sub> tootmisel eralduv heitsoojus ( $Q_{jääk}(H_2)$ )(BoL - EoL), kWh/kg H <sub>2</sub>	8,5 - 18,1	8,9 - 18,9	8,8 - 18,6	8,6 - 18,2
Elektrolüüseri kasutegur HHV ( $\eta_{H_2+soojus}$ ) (BoL - EoL), %	92,4 - 91,2%	93,1 - 92,5%	92,9 - 92%	92,5 - 91,4%
Efektiivsuse muutus, %	16,5 - 28,7	17,2 - 30	17 - 29,5	16,6 - 28,9

Viimasena vaatleme majandusliku poolt – vt. Tabel 5.5. Vesiniku tootmishind sõltub suuresti elektri hinnast [31]. Nagu näha, opereerimistrateegia omab antud kontekstis suurt mõju. Aasta keskmise elektri hinna tase võib vastavalt valitud strateegiale muutuda kolmekordselt (27 vs 92 EUR). Esimese strateegia puhul oli määravaks see, et tootmine pidi toimuma igapäevaselt sõltumata päeva keskmise elektri hinna tasemest. Selle põhjuseks oli piiratud vesiniku ladustamisvõime ja tootja kohustus omada lõpptarbimiseks alati garanteeritud kogus vesinikku. Kui võrrelda tootmiskahtu teise stsenaariumiga, siis vesiniku kogused jäid enam vähem samale tasemele, kuid keskmine aastane hind erineb lausa 2 korda. Siit ka erinevus vesiniku tootmishindades. Teise stsenaariumi puhul oli eeliseks see asjaolu, et vesiniku hoiustamine ei olnud piiratud võrreldes esimese stsenaariumiga, seega vesiniku sai toota suure varuga igal hetkel, kui elektri hind oli määratud elektri piirhinna madalam. Esimese stsenaariumi puhul on vesiniku hoiustamismahutite piirang toonud kaasa 20% suuremad tootmishinna. Stsenaariumid 2 ja 2a erinevad vaid elektri piirhinna väärtuses. Nagu näha, keskmine aastane elektri hind jääb stsenaariumite 1 ja 2a juhul umbes samale tasemele, kuid vesiniku tootmiskaht on teisel juhul üle 2 korda suurem. See toob vesiniku tootmishinda kohe üle 30% alla ning samuti põhjuseks on vesiniku hoiustamismahutite piirang. Siit võib teha järelduse, et tootmiskulude optimeerimise eesmärgil oleks mõistlik tagada süsteemi paindlikkust, sh kaaluda võimalust ladustamisvõime suurendamiseks.

Kui analüüsida vesiniku pideva tootmise stsenaariumi 3 silma torkavad nii kõrge keskmine aastane elektri hind, kui ka kõrged tootmiskulud. Vaatamata sellele, et antud stsenaariumiga saab toota rohkem vesiniku, utiliseerida soojuse ning säästa CO<sub>2</sub>

heitmeid ei tundu antud stsenaarium kuluefektiivne. Opereerimisstrateegia 24/7 oleks rakendatav vaid juhtudel, kui on kättesaadaval üleliigne elektrienergia, mida ei ole võimalik muul moel ära kasutada.

Tabel 5.5 Elektri hind ja vesiniku tootmiskulud

Parameeter	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 2a	Stsenaarium 3
Elektrolüüseri opereerimise põhimõte	6 h/ööpäev odavaima el.hinnaga	El.hinna piirmäär 60 EUR/MWh	El.hinna piirmäär 100 EUR/MWh	24/7 tootmine
Aastane vesiniku tootmiskaht, t H <sub>2</sub>	39.2	38.2	83.9	144.3
Elektrolüüseri töötundide arv aastas, h aastas	2178	2122	4663	8016
Keskmine aastane elektri hing, EUR/MWh	54.44	26.84	53.34	91.84
Vesiniku tootmishind, EUR/kg H <sub>2</sub>	8.41	6.80	5.69	26.29

Kõigi ülalmainitud järelduste põhjal saab väita, et jätkusuutliku süsteemi loomisel ning opereerimisstrateegia valikul, tuleb kaaluda kõik mõjufaktoreid ning tagada süsteemi piisava paindlikkuse. Optimaalse opereerimispõhimõte leidmine on hädavajalik, et süsteem oleks elujõuline pikas perspektiivis. See hõlmab ressursside efektiivset kasutamist ja kulude optimeerimist, mis võivad vähendada tegevuskulusid ja suurendada tootlikkust. Süsteemi piisava paindlikkuse tagamine on samuti ülioluline. Muutuvates oludes, nagu majanduslikud kõikumised peab süsteem olema võimeline kiiresti kohanema ja reageerima. See tähendab, et süsteemi kavandamisel tuleb arvestada erinevate stsenaariumitega ning töötada välja mitmekesised strateegiad, mis võimaldavad süsteemil säilitada oma funktsionaalsus ja efektiivsus ka muutuvates tingimustes. Paindlikkus aitab vältida riske ja vähendada võimalike häirete mõju.



## KOKKUVÕTE

Kliimakriisi üha süvenev tunnustamine on loonud aluse globaalsele üleminekule säästvatele ja vähese CO<sub>2</sub>-heitega energiasüsteemidele. Nende mõjude leevendamiseks on vajalikud kiireloomulised ja olulised meetmed, mis nõuavad üleminekut jätkusuutlikumatele energiaallikatele. Selles kontekstis on vesinikku järjest enam tunnustatud selle mitmekülgse tõttu puhta energia kandjana, mis töötab mängida kesksel rollil globaalsete süsinikuheidete vähendamisel erinevates sektorites, sealhulgas energiasalvestuses, transpordis ja tööstuses.

Käesoleva töö eesmärk oli uurida suhteliselt vähe puudutatud säästvate energiasüsteemide valdkonda – elektrolüüsi käigus tekkiva heitsoojuse integreerimist kaugküttevõrku Tallinna tegevuskeskkonnas. Uurimuse asjakohasus tuleneb praegusest globaalsest energiamuutusest, eelkõige rohelise vesiniku tootmistehnoloogiate märkimisväärsest kasvust ning sellega seotud väljakutsetest ja võimalustest.

Selles uurimistöös sai simuleeritud ning analüüsitud 1 MW<sub>el</sub> leeliselise elektrolüüseri heitsoojuse potentsiaali rakendus Tallinna kaugküttevõrgus, kasutades Eesti Vesiniku tervikahela pilootprojekti andmeid ning Tallinna kaugküttevõrgu tootmisprofiili. Uuring keskendus vesiniku tootmisprotsessi energiatõhususe, keskkonnamõjude ja majanduslike aspektide hindamisele sõltuvalt elektrolüüseri opereerimisstrateegiast.

Peamised küsimused, mis said käesoleva töö käigus vastused:

Kui palju heitsoojust saab Tallinna kaugküttevõrku sisestada ja kuidas see mõjutab elektrolüüseri tõhusust?

Elektrolüüsi protsessi käigus tekib aastas 350–2806 MWh<sub>th</sub> potentsiaalselt kasutatavat heitsoojust, sõltuvalt opereerimisstrateegiast. Enamiku sellest soojusenergiast saab rakendada kaugküttevõrgus, vaid 3-7% jääb kasutamata.

Heitsoojuse sisestamine kaugküttevõrku suurendab elektrolüüseri kasuteguri keskmiselt 17% eluea alguses ja kuni 30% eluea lõpus.

Kui palju saab vähendada CO<sub>2</sub> heitmeid, asendades maagaasiga toodetud soojusenergiat elektrolüüseri heitsoojusega?

Sõltuvalt opereerimisparameetritest umbes 75–78% kaugküttevõrku utiliseeritud heitsoojusest, ehk 257 – 2061 MWh<sub>th</sub>, saab kasutada maagaasiga toodetud soojusenergia asendamiseks, mis võimaldaks aastas säästa 58-589 tonni CO<sub>2</sub>.

Kuidas mõjutab opereerimisstrateegia vesiniku tootmiskulusid?

Majandusliku analüüsi kohaselt mõjutavad vesiniku tootmishinda märkimisväärselt elektri hind ja opereerimisstrateegia. Kui vesiniku ladustamisvõime on piiratud ja tootja peab alati tagama kindla koguse vesinikku päevas ja seega toota vesiniku iga päev madalaima võimaliku tunnipõhise elektri hinna 6 tunnistel vahemikel, võivad

tootmiskulud ikka olla kõrged. Paindlikuma strateegia korral, kus vesinikku toodetakse suure varuga madala elektri hinna perioodidel, on võimalik tootmiskulusid oluliselt vähendada. Pideva tootmise strateegia, kus vesinikku toodetakse ööpäevaringselt börsipõhise elektri hinnaga, toob kaasa kõrged tootmiskulud, mistõttu see ei ole majanduslikult tasuv. See strateegia võiks olla rakendatav vaid siis, kui on saadaval odav üleliigne elektrienergia, mida muul moel kasutada ei saa.

Kokkuvõttes näitab analüüs, et vesiniku tootmiskulude optimeerimiseks on oluline tagada süsteemi paindlikkus ja kaaluda vesiniku ladustamisvõime suurendamist.

Käesolevas töös tehtud järelduste põhjal võib öelda, et jätkusuutliku süsteemi loomisel ja strateegia valikul tuleb arvestada kõiki olulisi tegureid ning tagada süsteemi paindlikkus. Optimaalse opereerimispõhimõtte leidmine on oluline pikaajalise elujõulisuse tagamiseks, hõlmates ressursside tõhusat kasutamist ja kulude optimeerimist. Süsteem peab suutma kiiresti kohaneda majanduslike kõikumiste ja muude muutustega, säilitades oma funktsionaalsuse ja efektiivsuse.

Käesolev töö on valgustanud mitmeid huvitavaid aspekte, mis puudutavad elektrolüüsi käigus tekkiva jääksoojuse utiliseerimist kaugküttes. Samas on see valdkond ulatuslik ja keerukas, mistõttu on vajalikud edasised põhjalikud uuringud. Loodan, et antud uurimus panustab säästvate energialahenduste akadeemilisse ja praktilisse arutellusse, toetades globaalset energiasiiret ja roheline vesiniku rolli tulevastes energiasüsteemides ning inspireerib töö edasisi uuringuid ja projekte, edendades säästvat linnaenergiat Eestis ja rahvusvaheliselt.

## SUMMARY

The increasingly recognized climate crisis has laid the foundation for a global transition to sustainable and low-CO<sub>2</sub> energy systems. To mitigate these effects, urgent and significant measures are required, necessitating a shift to more sustainable energy sources. In this context, hydrogen is increasingly acknowledged for its versatility as a clean energy carrier, promising to play a significant role in reducing global carbon emissions across various sectors, including energy storage, transportation, and industry.

This study aimed to explore a relatively under-researched area of sustainable energy systems: the integration of waste heat from electrolysis into the district heating network in Tallinn. The relevance of this research stems from the current global energy transition, particularly the significant increase in green hydrogen production technologies and the associated challenges and opportunities.

In this study, the potential utilization of waste heat from a 1 MW<sub>el</sub> alkaline electrolyzer in Tallinn's district heating network was simulated and analyzed using data from the Estonian Hydrogen Value Chain pilot project and the production profile of Tallinn's district heating network. The research focused on assessing the energy efficiency, environmental impacts, and economic aspects of the hydrogen production process depending on the operating strategy of the electrolyzer.

Key questions addressed in this study:

How much waste heat can be integrated into Tallinn's district heating network, and how does this affect the efficiency of the electrolyzer?

The electrolysis process generates 350–2806 MWh<sub>th</sub> of potentially usable waste heat annually, depending on the operating strategy. Most of this thermal energy can be utilized in the district heating network, with only 3-7% remaining unused.

Integrating waste heat into the district heating network increases the efficiency of the electrolyzer by an average of 17% at the beginning of its life and up to 30% at the end of its life.

How much can CO<sub>2</sub> emissions be reduced by replacing natural gas-produced heat with electrolyzer waste heat?

Depending on the operating strategy, approximately 75–78% of the waste heat utilized in the district heating network, or 257 – 2061 MWh<sub>th</sub>, can replace heat produced from natural gas, potentially saving 58-589 tons of CO<sub>2</sub> annually.

How does the operating strategy affect hydrogen production costs?

Economic analysis shows that hydrogen production costs are significantly influenced by electricity prices and the operating strategy. If hydrogen storage capacity is limited and

the producer must guarantee a certain daily amount of hydrogen, production costs can be high even with the lowest possible hourly electricity prices for six-hour periods.

A more flexible strategy, where hydrogen is produced in larger quantities during low electricity price periods, can significantly reduce production costs.

Continuous production with market-based electricity prices results in high production costs, making it economically unviable unless there is cheap surplus electricity available that cannot be used otherwise.

In conclusion, the analysis shows that optimizing hydrogen production costs requires ensuring system flexibility and considering the expansion of hydrogen storage capacity. Based on the conclusions of this study, it can be stated that creating a sustainable system and selecting a strategy requires considering all significant factors and ensuring system flexibility. Finding the optimal operating principle is crucial for long-term viability, involving efficient use of resources and cost optimization. The system must be able to quickly adapt to economic fluctuations and other changes, maintaining its functionality and efficiency.

This study has highlighted several interesting aspects related to utilizing waste heat from electrolysis in district heating. However, this field is extensive and complex, requiring further in-depth research. I hope this research contributes to the academic and practical discussion on sustainable energy solutions, supports the global energy transition, and the role of green hydrogen in future energy systems, and inspires further studies and projects, promoting sustainable urban energy in Estonia and internationally.

## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

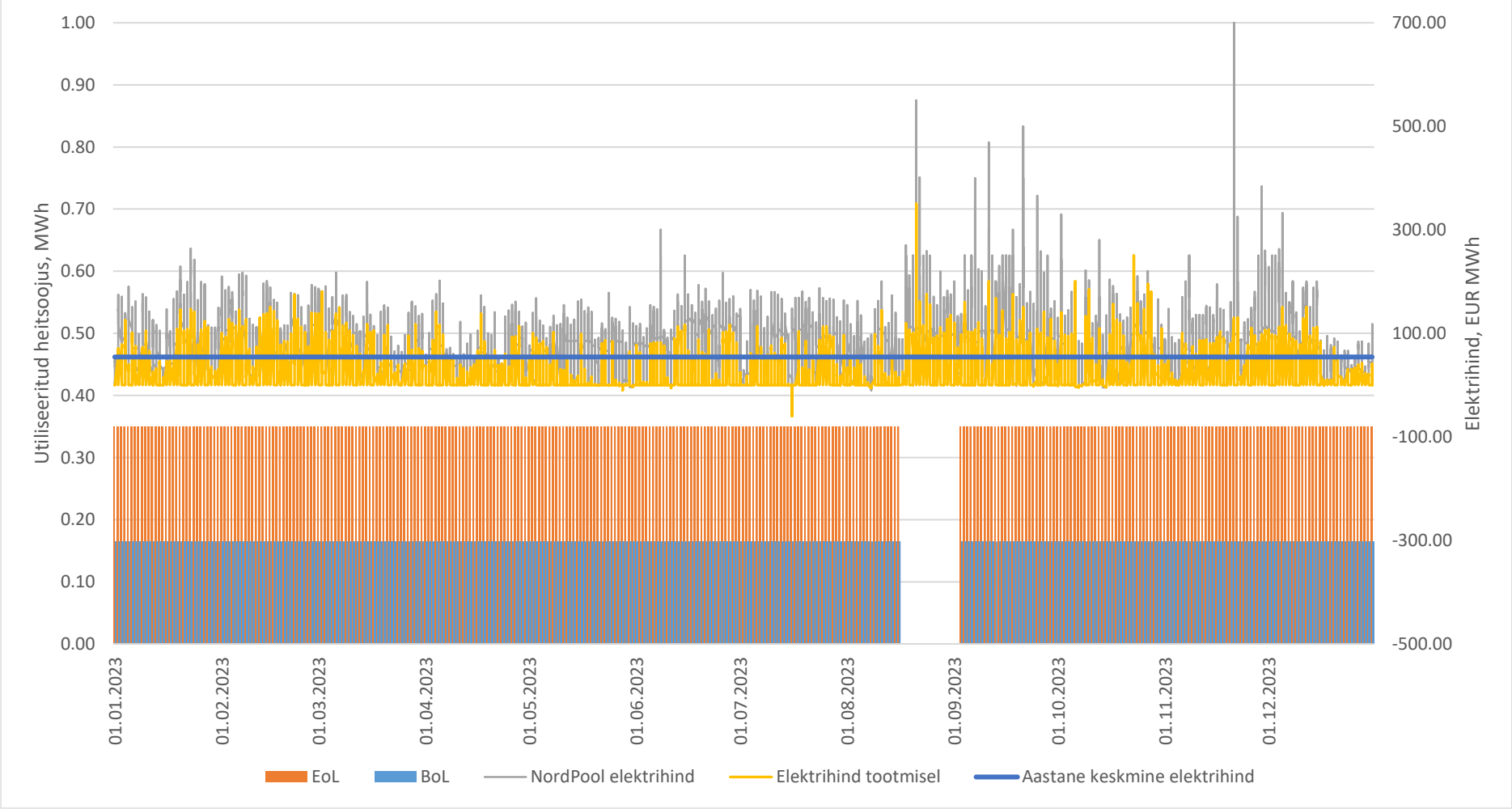
- [1] E. van der Roest, R. Bol, T. Fens, A. van Wijk, Utilisation of waste heat from PEM electrolyzers – Unlocking local optimisation, *Int J Hydrogen Energy* 48 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.374>.
- [2] N. Knetsch, M. Holst, WASTE HEAT UTILISATION OF POWER TO HYDROGEN PLANTS FOR LOCAL AND DISTRICT HEATING, n.d. [www.ptg-bw.de](http://www.ptg-bw.de).
- [3] H. Böhm, S. Moser, S. Puschnigg, A. Zauner, Power-to-hydrogen & district heating: Technology-based and infrastructure-oriented analysis of (future) sector coupling potentials, *Int J Hydrogen Energy* 46 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.233>.
- [4] L. Cioccolanti, M. Renzi, G. Comodi, M. Rossi, District heating potential in the case of low-grade waste heat recovery from energy intensive industries, *Appl Therm Eng* 191 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116851>.
- [5] I. Pakere, M. Feofilovs, K. Lepiksaar, V. Vītoliņš, D. Blumberga, Multi-source district heating system full decarbonization strategies: Technical, economic, and environmental assessment, *Energy* 285 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129296>.
- [6] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J.E. Thorsen, F. Hvelplund, B.V. Mathiesen, 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems., *Energy* 68 (2014) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
- [7] J.M.M. Arcos, D.M.F. Santos, The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production, *Gases* 3 (2023) 25–46. <https://doi.org/10.3390/gases3010002>.
- [8] International Renewable Energy Agency, Green hydrogen: a guide to policy making, 2020.
- [9] Colors of hydrogen, (n.d.). <https://whatswatt.com.au/true-colours-what-do-the-different-colours-of-hydrogen-mean/> (accessed May 17, 2024).
- [10] International Energy Agency IEA, Global Hydrogen Review 2023, 2023. [www.iea.org](http://www.iea.org).
- [11] Kliimaneutraalse Euroopa vesinikustrateegia, n.d. <https://www.eu2018.at/calendar-events/political->.
- [12] European Commission, A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe, [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/865942/EU\\_Hydrogen\\_Strategy.Pdf.Pdf](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/865942/EU_Hydrogen_Strategy.Pdf.Pdf) (2020).
- [13] Keskkonnaministeerium ning Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Eesti vesiniku teekaart, 2013.

- [14] Piia Viks-Binsol (Civitta), Martti Rell (Civitta), Renar Uibooss (Civitta), Alo Treial (Civitta), Lauri Tammiste (SEI), Kerli Kirsimaa (SEI), Adil Aslam (SEI), Tayyab Ehsan Butt (SEI), Ivar Kruusenberg (KBFI), Reio Praats (KBFI), EESTI VESINIKURESSURSSIDE KASUTUSELEVÕTU ANALÜÜS LÕPPARUANNE, 2021.
- [15] Marius Holst, Stefan Aschbrenner, Tom Smolinka, Christopher Voglstätter, Gunter Grimm, COST FORECAST FOR LOW TEMPERATURE ELECTROLYSIS-TECHNOLOGY DRIVEN BOTTOM-UP PROGNOSIS FOR PEM AND ALKALINE WATER ELECTROLYSIS SYSTEMS, Freiburg, 2021.
- [16] F. Kayali, Integrating Waste Heat from Hydrogen Production into District Heating, Lund, 2023.
- [17] <https://www.plansee.com/en/company/news/2023/co2-free-hydrogen.html>, Plansee Project in Reutte, Tyrol, (n.d.). <https://www.utilitas.ee/utilitas-ja-ug-investments-rohevesiniku-tervikahela-projekt-sai-positiivse-rahastusotsuse/> (accessed May 20, 2024).
- [18] J. Ziemele, E. Dace, An analytical framework for assessing the integration of the waste heat into a district heating system: Case of the city of Riga, Energy 254 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124285>.
- [19] Andmed ettevõttelt Stargate Hydrogen Solutions OÜ, (n.d.).
- [20] Green hydrogen Esslingen, (n.d.). <https://green-hydrogen-esslingen.de/> (accessed May 24, 2024).
- [21] Real-world examples from Denmark, (n.d.). <https://online.flippingbook.com/view/1004219426/4/> (accessed May 24, 2024).
- [22] 3H2 - Helsinki Hydrogen Hub, (n.d.). <https://www.helen.fi/en/news/2024/helen-to-invest-in-helsinkis-first-green-hydrogen-production-plant> (accessed May 24, 2024).
- [23] Vesiniku tervikahela projekt, (n.d.). <https://www.utilitas.ee/utilitas-ja-ug-investments-rohevesiniku-tervikahela-projekt-sai-positiivse-rahastusotsuse/> (accessed May 20, 2024).
- [24] Andmed ettevõttelt AS Utilitas Tallinn, (n.d.).
- [25] Utilitas koduleht, (n.d.). <https://www.utilitas.ee/> (accessed May 20, 2024).
- [26] Grete-Marie Kajandi, PÄIKESEENERGIA KASUTAMISE VÕIMALUSED TALLINNA KAUGKÜTTES, 2023.
- [27] Iru soojuselektrijaam, (n.d.). <https://www.energia.ee/irutuur/?language=et> (accessed May 20, 2024).
- [28] Võrguvee kvalitatiivse reguleerimise temperatuurigraafik soojusallikatest väljumisel, (n.d.). [https://www.utilitas.ee/wp-content/uploads/2023/04/AS-Utilitas-Tallinn-temperatuurigraafik\\_2022-12.pdf](https://www.utilitas.ee/wp-content/uploads/2023/04/AS-Utilitas-Tallinn-temperatuurigraafik_2022-12.pdf) (accessed May 20, 2024).

- [29] Kütuste süsiniku eriheide, (n.d.). [https://www.riigiteataja.ee/aktivilisa/1080/3201/9006/KKM\\_m86\\_lisa2.pdf#](https://www.riigiteataja.ee/aktivilisa/1080/3201/9006/KKM_m86_lisa2.pdf#) (accessed May 20, 2024).
- [30] E. Latõšov, S. Umbleja, A. Volkova, CO2 emission intensity of the Estonian DH sector, *Smart Energy* 6 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100070>.
- [31] Florian Nigbur, Martin Robinius, Patrick Wienert (all Umlaut), Matthias Deutsch, Levelised cost of hydrogen Making the application of the LCOH concept more consistent and more useful, Berlin, 2023. [www.agora-industry.org](http://www.agora-industry.org).
- [32] F. Ise, LEVELIZED COST OF ELECTRICITY RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES, 2021. [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de).
- [33] Soojusenergia müügihind, (n.d.). <https://www.utilitas.ee/kliendile/hinnad-ja-lepingud/> (accessed May 26, 2024).

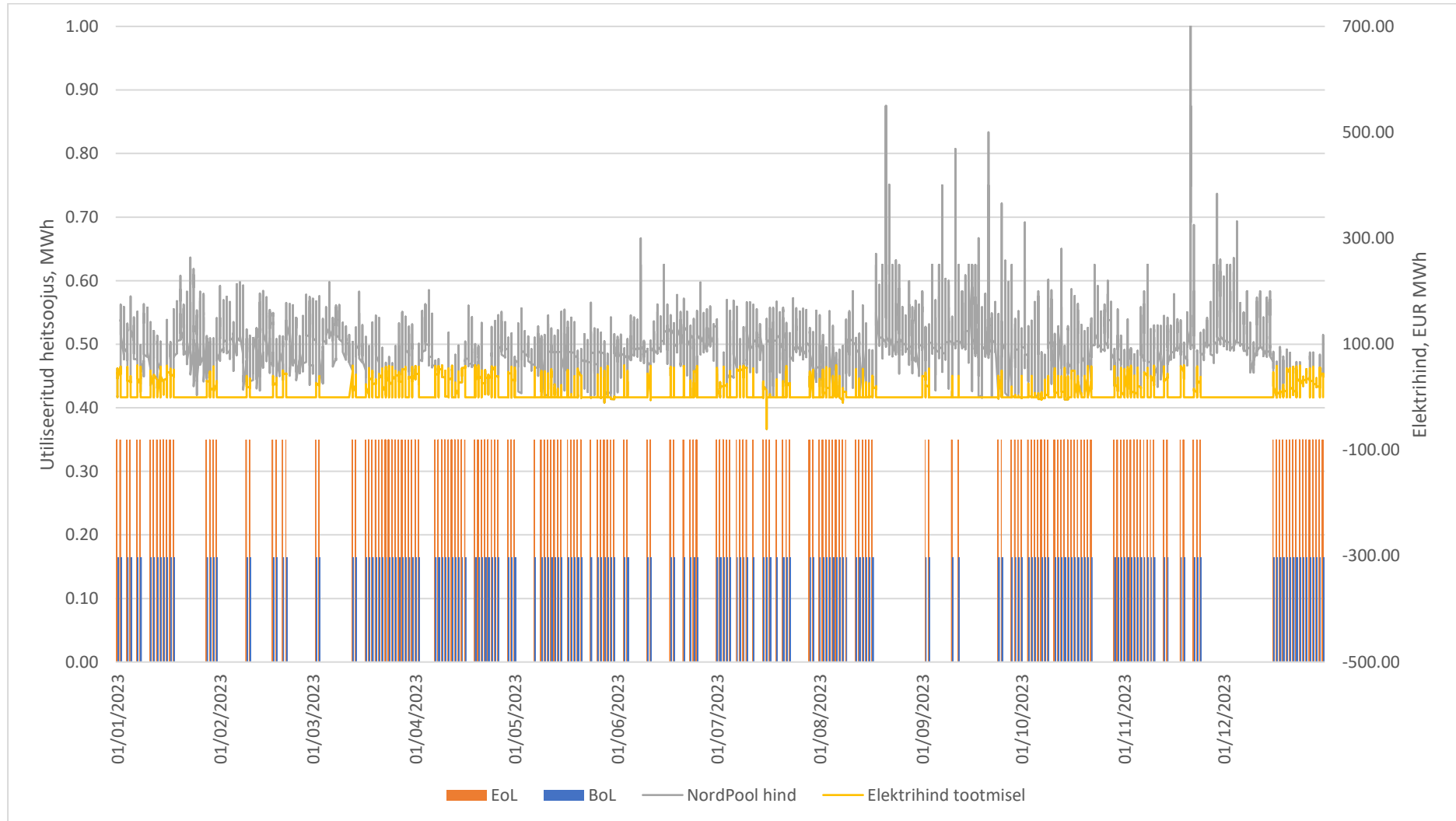
# LISAD

Lisa 1 Stsenarium 1

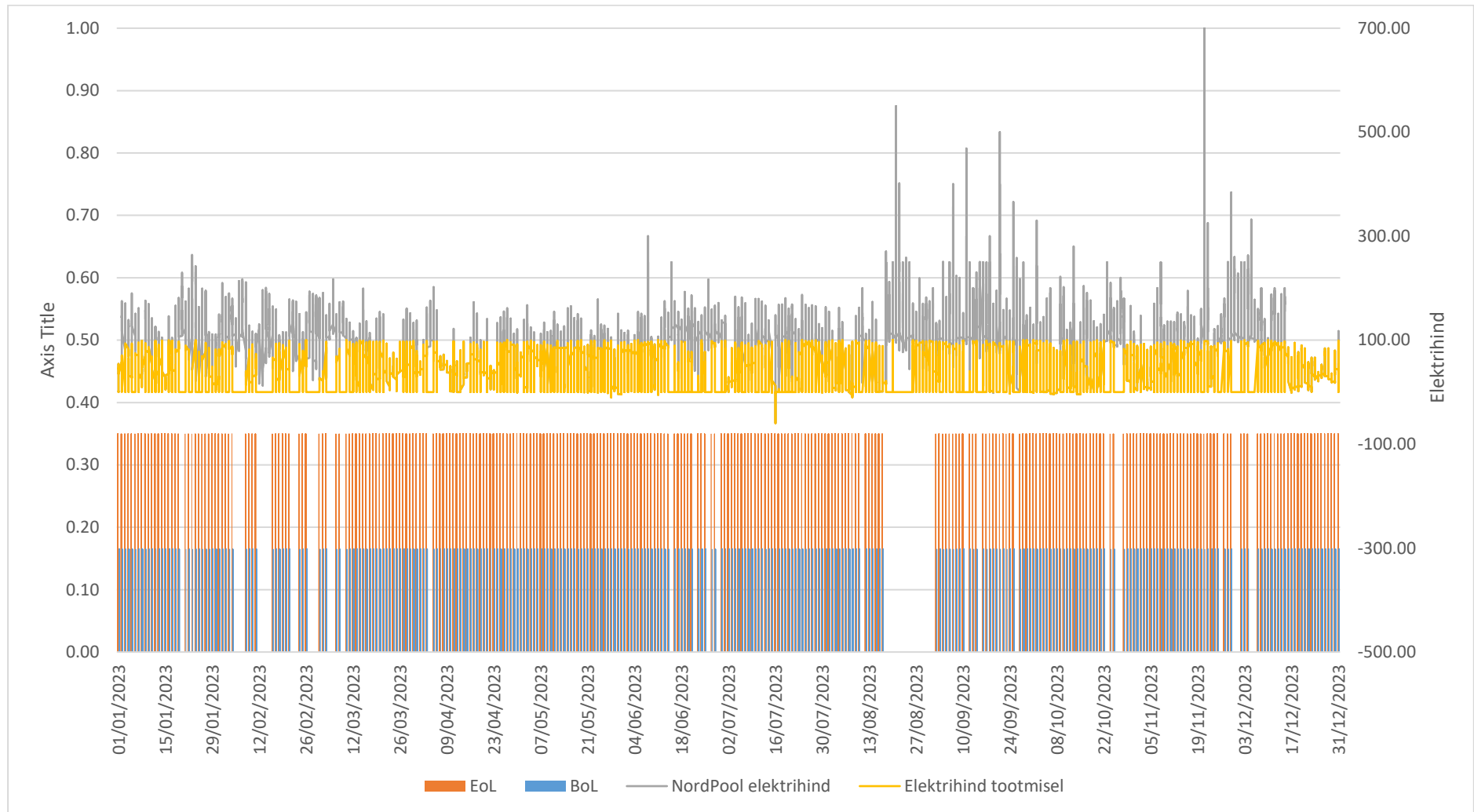




Lisa 2 Stsenaarium 2



Lisa 3 Stsenaarium 2a



Lisa 4 Stsenarium 3

