



VESINIKU JA SÜNTEETILISE GAASI KASUTAMISE POTENTSIAAL JA ÜHENDITEST TULENEV MÖJU ÜLEKANDETORUSTIKELE JA LÕPPTARBIJATE SEADMETELE

Uurimistöö aruanne

Leping nr 1.1-4/2020/98 / EE20026

04.detsember 2020

Uuringu tellija: Elering AS

Kontaktisik: Kristo Lillepõld

Uuringu autorid:

- **Dr Hannes Agabus**, uurimistöö juht, elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, energiamajanduse ekspert
- **Dr Jelena Šuvalova**, põhitäitja, elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, vanemlektor
- **Hardi Koduvere**, põhitäitja, elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, nooremteadur
- **Dr Andres Siirde**, põhitäitja, energiatehnoloogia instituut, direktor, professor, soojustehnika teadus- ja arenduskeskuse juht
- **Dr Eduard Latõsov**, põhitäitja, energiatehnoloogia instituudi dotsent

Projekti kestus: 13.02.2020 – 16.10.2020

Aruande versioon: v.1 – 16.10.2020

v.2 – 12.11.2020

v.3 – 04.12.2020



Tallinna Tehnikaülikool

Telefon: 620 2002

E-post: info@taltech.ee

Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn

Sisukord

Kommenteeritud kokkuvõte	4
Sissejuhatus.....	7
1. Ülevaade olemasolevatest tehnoloogiatest ja standarditest.....	8
1.1. P2G tehnoloogiate kaardistamine	8
1.1.1. Vesinik kütusena	8
1.1.2. Vesiniku kasutamine maailmas	9
1.1.3. Vesiniku tootmise tehnoloogiad	12
1.1.4. Elektrolüüsi tehnoloogiate võrdlus	14
1.1.5. Vesiniku salvestamine.....	17
1.1.6. Vesiniku transport	17
1.1.7. Metaan, selle tootmine ja tehnoloogiad	18
1.2. Eesti, regiooni ja Euroopa gaasivõrgu standardid ja kvaliteeditingimused	23
1.2.1. Eesti gaasivõrgu standardid	24
1.2.2. Regionaalsed gaasivõrgu standardid	25
1.2.3. Euroopa gaasivõrgu standardid	26
1.3. Eesti maagaasi ülekandesüsteemi ülevaade ja iseloomustus.....	27
1.3.1. Eesti maagaasi ülekandevõrk.....	27
1.3.2. Maagaasi tarbimine	29
1.3.3. Maagaasi tarbimise prognoos.....	35
1.3.4. Gaasi tarbijaseadmed	37
1.4. Vesiniku mõjude vähendamise tehnoloogiad.....	39
2. Ülevaade tehnilistest ja keemilistest tingimustest ning nende analüüs.....	40
2.1. Toodete keemilised/füüsikalised omadused ja võrdlus standarditega	40
2.2. Vesiniku ja süngaasi potentsiaalne mõju erinevate võrku antavate tasemete juures võrgule ja tarbijaseadmele.....	47
2.3. Maksimaalsed vesiniku ja süngaasi võrku andmise piirkogused	54
Kasutatud kirjandus	59
LISA 1 – Lisatud vesiniku energiasisalduse tegur vesiniku ja maagaasi segus sisalduva vesiniku energia koguse määramiseks sõltuvalt eeldatud vesiniku moolkontsentratsioonist	66

Kommenteeritud kokkuvõte

Uurimistöö on ajendatud Eleringi AS (edaspidi Elering) soovist leida võimalusi oma gaasi ülekandevõrgu varade mitmekesisemaks kasutamiseks seoses vesiniku ja sünteetilise gaasi (edaspidi süngaas) sisestamiseks Eesti maagaasi ülekandevõrku.

Uuringu eesmärgiks on välja selgitada võimalused, võimekused ja tingimused vesiniku ja süngaasi sisestamiseks Eleringi gaasivõrku. Selle töö rõhuasetus on vesiniku ja süngaasi võrku andmise maksimaalsete piirkoguste määramisel ning analüüsil, mis käsitleb vesiniku ja süngaasi potentsiaalset mõju võrgule ja lõpptarbijate seadmetele.

Uurimistöö aruande esimeses peatükis esitatakse ülevaade olemasolevatest *Power-to-Gas* (P2G) tehnoloogiatest ning kehtivatest standarditest ja kvaliteeditingimustest. Antakse ülevaade Eesti maagaasi ülekandesüsteemist ning tänasest gaasitarbimisest. Ühtlasi kaardistatakse sobivad vesiniku ja süngaasi potentsiaalsed mõjude vähendamise meetmete rakendamise seotud tehnoloogiad.

Peatükk 1.1 kirjeldab vesiniku tootmise võimalusi. Eelkõige käsitletakse elektrilüüsi tehnoloogiaid, mis kasutavad vesiniku tootmiseks sisendina elektrienergiat ja vett. Samuti vaadeldakse vesiniku metaaniks muundamise võimalusi. Kaardistatakse olulisemad elektrolüüsi tehnoloogiad, nende hinnad, parameetrid ning vaadeldakse nende väärtuste hinnanguid tulevikuks. Pikas ajaperspektiivis on hinnangute kohaselt kõige konkurentsivõimelisemad polümembraanelektrolüüdiga elektrolüüserid, millel on hinnangute kohaselt tulevikus pikk eluiga, keskmine elektrolüüsi kasutegur ning mõõdukad kapitalikulud. Konkurentsivõimeliseks hinnatakse ka tahkeoksiidelektrolüüdiga elektrolüüsereid, mille puuduseks on lühem eluiga, kuid mille kasutegur on tunduvalt kõrgem. Vesiniku metaanimise tehnoloogiatest on turul saadaval kaks – katalüütiline ja bioloogiline. Siinkohal nähakse tulevikus rohkem potentsiaali bioloogilise metaanimise vallas, kus vesinikku ja süsihappegaasi kombineerivad metaaniks anaeroobses keskkonnas mikroorganismid. Kõige atraktiivsem süsihappegaasi allikas protsessi sisendiks on tänapäeva tingimustes biogaasi või bioetanooli tootmisel tekkiv jääksüsihappegaas, kuid tulevikus on võimalik kasutada ka näiteks tsemenditööstusest või elektrijaamade süsinikupüüduritest pärinevat süsihappegaasi.

Peatükis 1.2 on välja toodud peamised Euroopa ja rahvusvahelised standardid, milledest tuleb juhendada gaasi infrastruktuuri arendamisel ja ekspluatatsioonis. Eestis kehtib Maagaasiseadus (MGS), mida reguleerib maagaasi impordi, ülekande, jaotamise ja müügiga seonduvaid tegevusi gaasivõrgu kaudu ning võrguga liitumist. Lisaks kehtib Seadme ohutuse seadus, mis reguleerib maagaasi taristu kasutamise ohutust. Samal ajal kehtivad Eestis ka Euroopa standardid EN ja CEN/TR, uute nimetustega EVS-EN. Siinjuures peaksid standardite kasutajad meeles pidama, et CEN-i (Comité Européen de Normalisation) liikmesriikides võivad olla kasutusel ka üksikasjalikumad rahvuslikud standardid ning riiklikud tegevuseeskirjad. Standard on mõeldud rakendamiseks koos selliste rahvuslike standardite ja/või riiklike tegevuseeskirjadega, mis täpsustavad ülalmainitud üldisi põhimõtteid.

Lisaks käesolevale aruandes esitatud standardite kokkuvõttele on töö tellijale esitatud MS Excel fail pealkirjaga „Eestis kehtivad standardid“, kust on leitav põhjalikum EVS-EN standardite sisukirjeldused koos täitja poolsete kommentaaridega. Samuti on tellijale esitatud MS Excel fail pealkirjaga „CEN riigid ja nende standardid“ kus on leitav põhjalik CEN riikides kehtivate standardite loetelu ning kirjeldused.

Peatükis 1.3 on esitanud Eesti maagaasi ülekandesüsteemi iseloomustus. Gaasi ülekandevõrk on üle 16-baarise tööõhuga gaasitorustike ja nendega kohakindlalt seotud ehitiste ning ülekandesüsteemi toimimiseks, haldamiseks ja arendamiseks vajalike juhtimis-, kaitse-, side- ja mõõtesüsteemide talitluslik kogum, mis on vajalik gaasi ülekandeks ning ühenduste loomiseks teiste riikide võrkudega või gaasi transiidiks. Eestis maagaasi tootmist ei toimu, kasutatakse gaasi imporditakse Venemaalt ja LNG maailmaturult. Kogu gaasi tarbimine on olnud Eestis alates 2008. aastal pidevas languses. 2019. aastal langes maagaasi tarbimine Eestis 2018. aastaga võrreldes ligikaudu 8%. Võrgugaasi lokaalne tarbimine (koosneb peamiselt tarbimisest kodumajapidamistes ning äri- ja avaliku teeninduse sektoris) kas jääb praegusele tasemele või jätkab mõõdukat kasvu. Kõige levinumad gaasi tarbijaseadmed on katlad, veesoojendid, erinevad küttesüsteemid (nt gaasikiirgurid, gaasipuhurid ja gaasipõletid) ning pliidid ja praeahjud. Baasprognoosi järgi jääb kuni 2025. aastani maagaasi tarbimine keskmiselt 5000 GWh tasemele.

Peatükis 1.4 vaadeldakse potentsiaalseid investeeringuid, mis on süsteemile võimalikud ning vajalikud, et vähendada vesiniku kontsentratsiooni mõju süsteemi osadele. Meetmete hulgas on nii gaasitaristu elementide uuendamine ja ümber ehitamine kui vesiniku separatsiooniseadmete paigaldamine. Separeerimise tehnoloogiatest praegusel hetkel kommersialiseeritud on eelkõige kulutõhusad väga suurte vesiniku kontsentratsioonide juures. Väikeste vesiniku kontsentratsioonide juures on potentsiaalselt kõige kulutõhusamad separatsiooni membraanid, kuid tehnoloogia pole veel laialdaselt implementeeritud ning nende kulude kohta on saadaval vähe informatsiooni.

Aruande teine peatükk käsitleb vesiniku ja süngaasi tehnilisi ja keemilisi tingimusi. Esitatakse maksimaalsed vesiniku ja süngaasi võrku andmise piirkogused. Töö lõpus analüüsitakse vesiniku ja süngaasi potentsiaalset mõju võrgule ning lõpptarbijate seadmetele.

Olulisemad vesiniku lisamist maagaasivõrku takistavad tegurid ja maagaasivarustuse ahela komponendid/elementid on koondatud tabelisse 0.1. Pakutud lubatud vesiniku kontsentratsioonid on indikatiivsed.

Eesti kontekstis on peamiseks takistavateks teguriteks CNG transpordiga seotud riskid (vesiniku lubatud kontsentratsioon kuni 2%mol).

Mõned allikad toovad väljagaaskromatograafide sobivusega vesiniku mõõtmiseks seotud riskid. Gaaskromatograafide projekteerimisel (kui eesmärgiks maagaasi mõõtmine) ei ole reeglina arvestatud vesiniku lisamisega (ei ole võimalised vesinikkomponenti eraldama ja kvantifitseerima). Reeglina on vajalik seadmete modifitseerimine või vahetus. Eleringi teatel Eesti gaasisüsteemis kasutatakse vesiniku osamahu määramiseks soojusjuhtivuse detektoriga (TCD-thermal conductivity detector) kromatograafe. Leegi ionisatsiooni detektoriga (FID- flame ionization detector) kromatograafid on kasutusel väavli

komponentide määramiseks, DIAL tüüpi seadmeid kasutuses ei ole. Seega Eesti gaasisüsteemis gaasi komponentide ja vesiniku määramisega probleeme ei pea esinema.

Kui aastal 2019 tarbitud võrgugaasil vesiniku kontsentratsioon oleks keskmiselt 2%mol normaaltingimustel, siis aastal 2019 oleks olnud võimalik võrku suunata umbes 30 000 MWh vesinikku (aasta keskmine võimsus 3.5 MW).

CNG transpordiga ja gaaskromatograafide sobivusega seonduvate riskide maandumisel oleks võimalik arutada vesiniku kontsentratsiooni tõstmist kuni 5%mol.

Tabel 0.1 Olulisemad vesiniku lisamist (kontsentratsioonil kuni 5%mol) maagaasivõrku takistavad tegurid ja maagaasivarustuse ahela komponendid/elemendid

Takistavad tegurid, komponendid/elemendid	Lubatud kontsentratsioon		
CNG transport	kuni	2	%mol
Gaasiturbiinid	kuni	2	%mol
Maagaasi kui tooraine kvaliteedile tundlikud tööstustarbijad	juhtumipõhine, reeglina kuni	2	%mol
Kompressorid (maagaasi ülekandevõrk)	kuni	5	%mol
Vesiniku ja maagaasi segu suhtelise tiheduse vastavus nõudmistele	kuni	5	%mol
FID ja DIAL tüüpi maagaasi tuvastamisseadmed	ei tuvasta vesiniku või käituvad ebakorrektselt		
Sondisõlm ("pigging" station)	informatsioon puudub		
Maagaasi malmtorustik	informatsioon puudub		
Poorsed maa alused maagaasihoidlad	vastuoluline informatsioon		

Kui vesiniku kontsentratsioon ületab 5%mol, siis vesiniku ja maagaasi segu suhteline tihedus ei vasta kehtivatele nõudmistele. Kui aastal 2019 tarbitud võrgugaasil vesiniku kontsentratsioon oleks keskmiselt 5%mol normaaltingimustel, siis aastal 2019 oleks olnud võimalik suunata võrku umbes 77 510 MWh vesinikku (aasta keskmine võimsus 8.9 MW).

Sissejuhatus

Tulenevalt Euroopa Liidu ja Eesti kliimapoliitilistest eesmärkidest ja sellest tuleneva võimaliku inverterpõhiste elektritootmiseseadmete suuremahulistest kasutuselevõtust võib juba lähitulevikus tekkida vajadus energia salvestamiseks gaasivõrgus vesiniku ja süngaasi kujul. Ühtlasi vajab märkimist, et gaasi infrastruktuuri arendamine on üheks innovatsiooni võimaldajaks, aidates vähendada õhku paisatavaid heitkoguseid.

Täna on gaasi- ning elektrisüsteemide omavahelise sidumise energiamajandusliku potentsiaali ja tehniliste võimaluste kaardistamine Eestis veel algusjärgus. Siiski on uuringutega juba algust tehtud, mida imestab hästi ka käesolev töö.

Vesiniku ja süngaasi sisestamine maagaasi terastorustikust ülekandevõrku on Euroopas muutunud aktuaalseks viimasel kümnendil, mistõttu vastavasisulistele probleemidele ja võimalustele on alles hiljuti hakatud pöörama suuremat tähelepanu.

Tulenevalt vesiniku ja süngaasi ühendite erinevusest maagaasist on täiendavad ohud nii ülekandetorustikele läbi korrosiooni ja plahvatus- ning põlemisriski suurenemise kui ka lõpptarbijate seadmetele. Eesti puhul on lisaks oluliseks mõjuteguriks madal gaasitarbimine, mis tähendab omakorda, et gaaside segunemist ei toimu piisaval määral, mille tulemusena võib tekkida olukord, et erinevate gaaside kontsentratsioon võib olla teatud torulõikudes kuni 100% kogumahust.

Käesoleva uuringu eesmärgiks on välja selgitada võimalused, võimekused ja tingimused vesiniku ja sünteetilise gaasi sisestamiseks Eesti maagaasi ülekandevõrku.

Uuringu aruanne on jaotatud kaheks. Esimeses osas antakse ülevaade olemasolevatest P2G tehnoloogiatest ning kehtivatest standarditest ja kvaliteeditingimustest. Antakse ülevaade Eesti maagaasi ülekandesüsteemist ja tänasest gaasitarbimisest. Ühtlasi kaardistatakse sobivad vesiniku ja süngaasi potentsiaalsed mõjude vähendamise meetmete rakendamisega seotud tehnoloogiad. Teises osas antakse ülevaade vesiniku ja süngaasi tehnilistest ja keemilistest tingimustest. Esitatakse maksimaalsed vesiniku ja süngaasi võrku andmise piirkogused ning analüüsitakse vesiniku ja süngaasi potentsiaalset mõju võrgule ja lõpptarbijate seadmetele.

1. Ülevaade olemasolevatest tehnoloogiatest ja standarditest

1.1. P2G tehnoloogiate kaardistamine

Käesolev peatükk annab lühiülevaate vesiniku kasutamisest maailmas. Käsitletakse vesiniku tootmine tehnoloogiad, lähemalt elektrolüüsi tehnoloogiad, mis heitmevaba elektrienergia olemasolul on võimelised tootma kasvuhoonegaaside mõjuta vesinikku. Vaadeldakse nii vesiniku tootmise, transpordi ja salvestamise tehnoloogiate hinda ning tootmistehnoloogiate hinnaprognose tulevikuks.

1.1.1. Vesinik kütusena

Vesinik on kõige lihtsam keemiline element, mille aatom koosneb ühest prootonist, ühest elektronist ning mõningal juhul ka üks kuni kaks neutronit. Vesiniku molekul on teada olevalt kõige väiksem molekul mis koosneb kahest vesiniku aatomist. Tavaolukorras tekib vesiniku oksüdeerimisel hapnikuga vesi. Vesiniku ülemine ja alumine kütteväärtus on vastavalt 142 MJ/kg ja 120 MJ/kg [1].

Kuigi vesiniku tarbimine 2020. aastal on kogu maailma mastaabis võrdlemisi väike, on vesinikutehnoloogiad praegusel ajal siiski kiires arengufaasis. Kui käesoleva aruande kirjutamise ajal on vesiniku kasutamine spetsiifiliste valdkondade ja protsesside pärusmaa, võib vesinik tulevikus mängida olulist rolli kogu energiasüsteemi kontekstis. Vesiniku abil on olemasolevate tehnoloogiate abil elektrisüsteemis energiat salvestada ja/või konverteerida teistes energiasektorites kasutamiseks. Vesinikutehnoloogiate eelised muude salvestustehnoloogiate ees on salvestuse madalam hind (võrdluses elektrokeemiliste akudega) ja teatud tehnoloogiad kasutades sõltumatus geograafilistest tingimustest (erinevalt näiteks pumphüdrolektrijaamadest). Puuduseks on elektrolüüsi ja kütuseelementide tehnoloogia kallis hind ja kogutsükli madalam kasutegur. Kuigi lühiperspektiivis näitavad elektrokeemilised akud näiteks transpordisektoris suuremat potentsiaali, nähakse vesinikus suurt rolli kaugemas tulevikus. Vesiniku olulisus võib ilmneda nüanssides, kus on suured energiatarbimised, nagu laevandus, või on oluline energiatihedus massi kohta, nagu lennundus.

Vesiniku kasutamise üks lisanduvaid potentsiaalseid hüvesid on sellest sünteetilise metaani loomise võimalus. Metaan on maagaasina üks maailmas enim kasutatud kütuseid, olles sobilik kasutamiseks nii kütte-, transpordi kui kodumajapidamiste lahendustes. Vesinikust toodetud sünteetilise metaani, või „süngaasi“ puuduseks on tänapäeval tema tootmise äärmiselt kallis hind võrreldes fossiilse maagaasiga. Sellegipoolest võib kogu protsess ühe aktiivsema kliimamuutuste vastu võitlemise kontekstis olla tulevikus perspektiivikas.

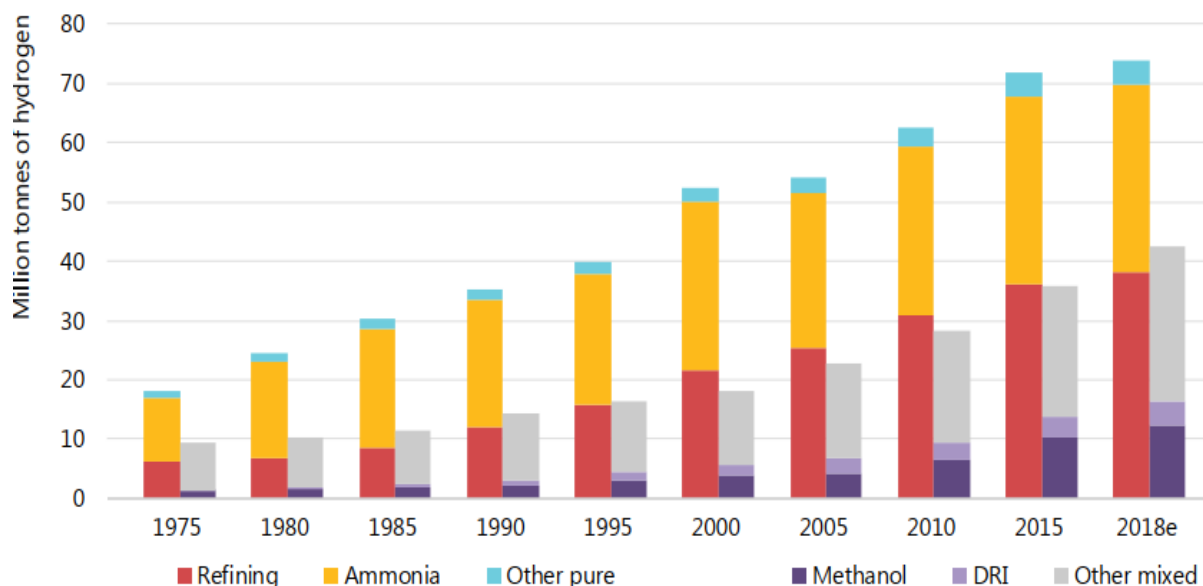
Käesoleva uuringu üheks eesmärgiks on kaardistada olulisemad olemasolevad tehnoloogiad vesiniku elektrolüüsamiseks, selle edasiseks muundamiseks metaaniks.

Vaadeldakse nii hiljuti realiseeritud projektide hindade analüüsi, millest kujuneb välja ligikaudne vesinikutehnoloogiate hind 2020. aastal, kui ka erinevate ekspertgruppide ja energiaorganisatsioonide hinnanguid tehnoloogiate arenguks tulevikus. Oluline osa on ka siinkohal hinnatud vesiniku kasutamisele energiamajanduses tulevikuks ja näiteks ka Euroopa Liidu vesinikustrateegia, mis valmis käesoleva aasta keskel.

1.1.2. Vesiniku kasutamine maailmas

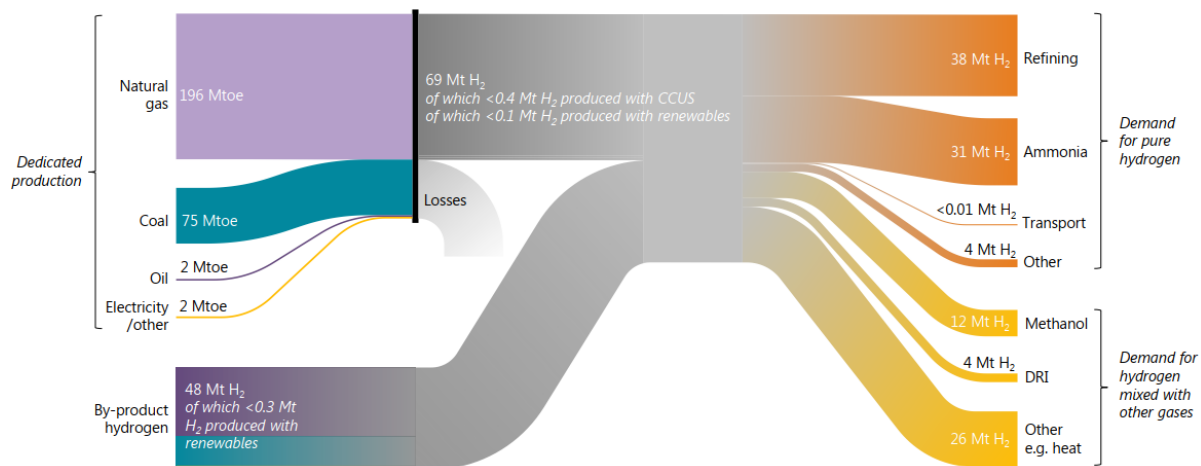
Vesinikku jagatakse selle tootmise viisi ja päritolu järgi mõtteliselt kolmeks. Valdav osa tänapäeval toodetud vesinikust toodetakse maagaasist metaani reformimise meetodil. Selle protsessi kõrval produktina tekib süsihappegaas, mis tähendab, et antud protsess on märkimisväärse mõjuga kliimasoojenemisele. Selline vesinik on klassifitseeritud „halliks“ vesinikuks. „Siniseks“ vesinikuks klassifitseeritakse vesinikku, kui seda tootes on eelnevalt kirjeldatud protsessiga soetud süsinikdioksiidi heitmete püüdmise lahendusi (CCUS), mille abil välditakse valdavat osa kasvuhoonegaaside heitmeid. „Roheliseks“ vesinikuks loetakse vesinikku, mis on toodetud elektrolüüsi meetodil veest, kui sisendelektrienergiaks kasutatav elektrienergia on toodetud taastuvatest allikatest.

Vastavalt Euroopa Komisjoni ülevaade vesiniku tootmisest kasutati Euroopa liidus 2019. aastal 339 TWh vesinikku [2]. Globaalselt on vesiniku tarbimine olnud stabiilses tõusutrendis (saavutades aastaks 2018 tarbimiskoguse ligikaudu 70 miljonit tonni aastas), peamised puhta vesiniku tarbijad on nafta rafineerimise tööstus ja ammoniaagi tootjad. Globaalset vesiniku tarbimise trendi iseloomustab Joonis 1.1.1. Kogu maailmas toodetud vesinikust umbkaudu 76% toodetakse maagaasist ja 23% kivisöest, mis tähendab, et praegune vesiniku globaalne tarbimine on peaaegu täielikult kaetud fossiilsetest kütustest, millega kaasneb oluline keskkonnamõju.



Joonis 1.1.1 Vesiniku tarbimine maailmas tarbimise liigi järgi [3]

Vesiniku tootmise ja tarbimise täpsemat väärtusahelat on kujutab Joonis 1.1.2. Lisaks tarbitakse vesinikku ka muude gaaside seguna. Enamasti on sel juhul tegu tööstusprotsessi jääkproduktina, mis kasutatakse samas tehases omakorda uuesti ära (hinnanguliselt ligikaudu 40 miljonit tonni aastas) [3].

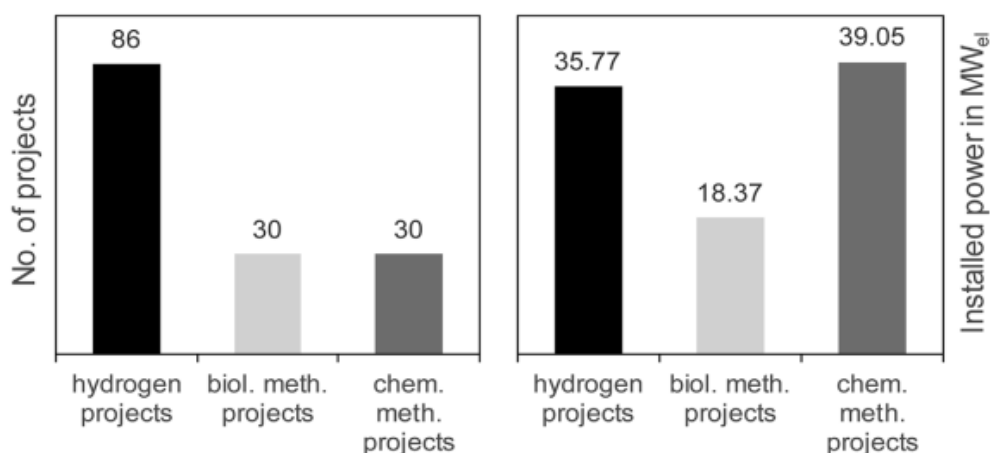


Joonis 1.1.2 Vesiniku globaalne väärtusahel [3]

Vesiniku tarbimise kogustega tulevikus on seotud suur ebamäärasus, kuna vesinik on tihedas konkurentsivõimelises teiste energiakandjatega, näiteks transpordisektoris on võimalik lisaks vesiniku kasutamisele ka laialdane elektrifitseerimine ja biokütuste kasutamine. Eraldiseisvalt vesiniku otsetarbimisest on võimalik vesinikku kasutada märkimisväärse energiasüsteemi paindlikkuse allikana, salvestades näiteks suure taastuvenergia tootanguga hetkedel energia läbi elektrolüüsi vesinikuna ning seda hiljem uuesti kasutades. Euroopa Komisjon on vesiniku olulist mõju, eriti seoses avameretuuleparkidega ning rasketranspordi dekarboniseerimisega rõhutanud ka 2020. aastal avaldatud Euroopa Liidu energiasüsteemide integreerimise strateegias. [4] Euroopa Liidu energiasüsteemide integreerimise strateegiaga samal ajal avaldati Euroopa Liidu vesinikustrateegia, kus on määratletud konkreetsete arväärtused lähiaastate vesinikupotentsiaali kasvatamiseks Euroopas ning samal ajal nenditakse tõsiasjana olulist vesinikutehnoloogia laienemise tempot 2020. aastal. [5] Euroopa Komisjoni ühisuuringute keskus JRC on avaldanud oma lühiülevaates, et Euroopa Liidu dekarboniseerimise stsenaariumanalüüsis on leitud vesiniku ja muude sünteetiliste kütuste turuosaks kuni 23% kogu Euroopa Liidu energia lõpptarbimisest aastaks 2050. Siinkohal nähakse jällegi vesiniku rolli raskeveonduses, aga ka laevanduses ning teatud määral ka sisendina sünteetiliste kütuste tootmises lennunduse jaoks. Täiendavalt nähakse võimalust vesiniku kasutamiseks hoonetes maagaasi asemel ning elektrisüsteemis pikaajalise elektrienergia salvestamise võimalusena [6].

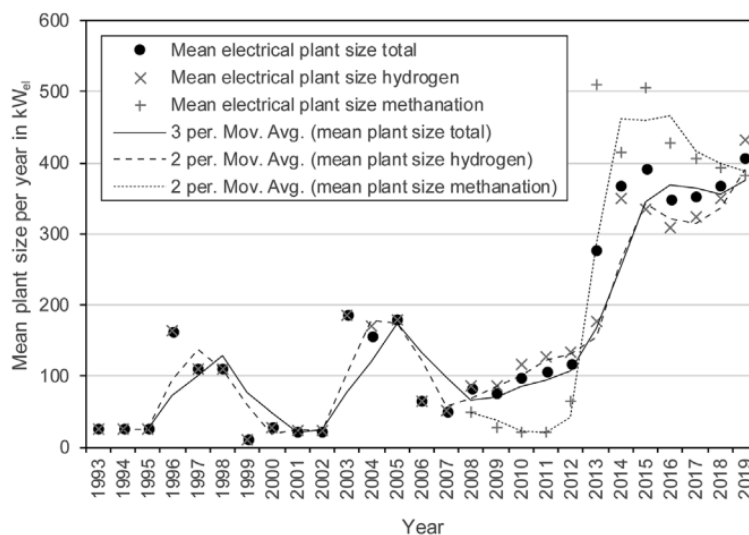
Teadusartiklis [7] on välja toodud põhjalik ülevaade maailmas realiseeritud, ehitusjärgus ja plaanimisjärgus olevate vesiniku ja vesinikust metaani tootmise projektid. Ühtekokku on kaardistatud 153 projekti erineva tootmisvõimsuse ja valmimisaastaga. Suurem osa kaardistatud projektidest toodab eksklusiivselt vesinikku, kuid 60 tegeleb ka vesinikust metaani tootmisega. Sealjuures kasutatakse kahte erinevat põhimõttelist protsessi: katalüütilist metaanimist, kus protsessi ajendiks on katalüsaator; ja bioloogilist metaanimist, kus metaanimise protsess kulgeb lihtsate mikroorganismide tegevuse

tagajärjel anaeroobses keskkonnas. Ülevaade projektide jagunemisest tegevusliigi kaudu arvuliselt ja elektrilise võimsuse järgi kirjeldab Joonis 1.1.3.



Joonis 1.1.3 Analüüsitud vesiniku ja metaani tootmise projektide jagunemine arvuliselt ja elektrilise võimsuse järgi [7]

Analüüsitud on ka realiseerunud projektide keskmise elektrilise võimsuse muutumist ajas, mille tulemust kujutab Joonis 1.1.4. Pildimaterjalilt kuvab läbi suur keskmise installatsiooni suuruse kasv viimase kuue aasta jooksul, mis ilmestab hästi praeguse ajahetke vesinikutehnoloogia suurt arenemiskiirust. Viimastel aastatel valminud seadmed ületavad juba megavati piiri, kui tavapärase suurus umbes 10 aastat tagasi oli vaid 100 kW.



Joonis 1.1.4 Vesiniku ja metaani tootmise realiseeritud projektide keskmise suuruse muutus ajas [7]

Suurimad praeguseks hetkeks kaardistatud ja realiseeritud vesiniku tootmise projektid on elektrilise võimsusega 6 MW. Näiteks asub Saksamaal Energiepark Mainz, mis sisaldab endas kolme PEMEC elektrolüüserit, igaüks elektrilise võimsusega 1,3 MW püsitalitluses ning kuni 2 MW tipuvõimsusega [8]. Suurim sünteetiliselt metaani tootev installatsioon asub Põhja-Saksamaal Werltes, kus on ühendatud kolm 2 MW elektrilise võimsusega AEC elektrolüüserit. Werltes toodetud vesinikust toodetakse edasi metaani [9].

1.1.3. Vesiniku tootmise tehnoloogiad

Olulisemad vesiniku tootmise tehnoloogiad saab jagada kaheks: sisendina metaani kasutatavad ning sisendina vett ja elektrienergiat kasutavad. Valdavalt on tänapäeval kasutuses sisendina metaani kasutatavad tehnoloogiad (olulisim neist Steam Methane Reforming – metaani reformimine). Tehnoloogia eeliseks on kõrge kasutegur, mis teeb sellest lahendusest ka hetkel kõige konkurentsivõimelisema vesiniku tootmise lahenduse. Metaani reformimise tehnoloogia on kõigist vesiniku tootmise tehnoloogiatest ka kõige arenenum, realiseeritavate rakenduste elektriline ühikvõimsus ulatub paarisaja megavatini [10].

Vett sisendina kasutatavad elektrolüüsi tehnoloogiad on hetkel väiksema kasuteguriga, kuid tehnoloogiad on kiires arengutempos. Laias laastus saab need jagada kolmeks rohkem levinud tehnologiaks: polümeermembraanelektrolüüdiga elektrolüüser (Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer Cell – PEMEC), leeliselektrolüüdiga elektrolüüser (Alkaline Electrolyzer Cell – AEC) ja tahkeoksiid elektrolüüdiga elektrolüüserid (Solid Oxide Electrolyzer Cell – SOEC).

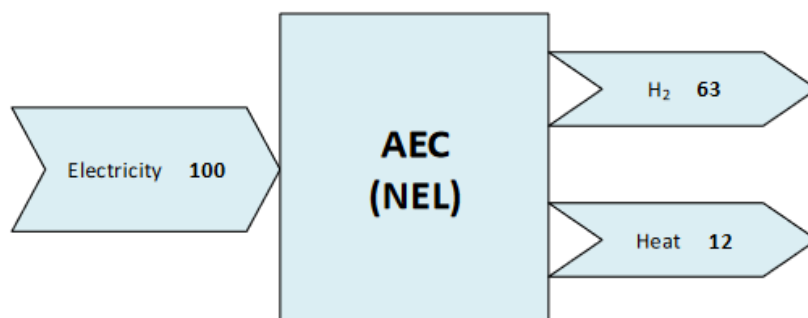
METAANI REFORMIMINE

Kõige küpsem vesiniku tootmise tehnoloogia tänapäeval on metaani reformeerimine, kus toodetud vesinik pärineb metaani molekulidest. Metaani reformimine on väga kõrge kasuteguriga protsess, protsessi kasutegurite hinnangud on üle 70%. Samuti on tegu võrdlemisi konkurentsivõimelise investeringukuluga tehnoloogiaga, mille ühikmaksumuseks on IEA hinnangu kohaselt 0,34-0,51 €/W [10].

Kuna kasutatav metaan pärineb üldjuhul maagaasimaardlatest ning üks jääkproduktidest on süsihappegaas, on tegemist märkimisväärse kasvuhuonegaaside allikana.

LEELISELEKTROLÜÜDIGA ELEKTROLÜÜSERID

Leeliseliselektrolüüdiga elektrolüüserid (Alkaline Electrolyzer Cell – AEC) on käesoleval hetkel maailmas kõige levinumad ja tehnoloogiliselt arenenumad elektrolüüserid. Enamus saadaval olevatest elektrolüüsi kommertsilahendustest kasutab AEC tehnoloogiat. Realiseeritud projektide suurim ühikvõimsus on juba ületanud ühe megavati piiri. AEC elektrolüüseri toimimise põhimõtteskeemi kirjeldab Joonis 1.1.5. Vesiniku tootmise kõrvalproduktina tekib väike kogus soojusenergiat, mida on võimalik protsessist eraldada ning kasutada näiteks kaugküttelahendustes. Üldjuhul kasutatakse AEC tehnoloogias anoodina nikliga kaetud terast ning katoodi materjalina terast [11].



Joonis 1.1.5 Leeliselektrolüüdiga elektrolüüseri sisend-väljundskeem [11]

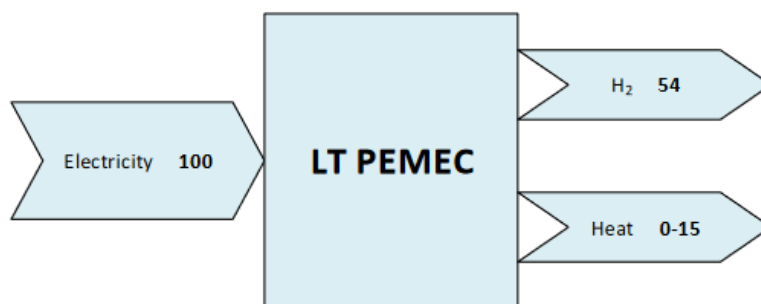
AEC elektrolüüserite töötemperatuur on tavapärasest atmosfääritemperatuurist mõnevõrra kõrgem, jäädes enamasti vahemikku 65-100 kraadi Celsiuse järgi. AEC elektrolüüserite üheks eripäraks on minimaalne stabiilne koormus; tavapäraselt ei ole neid võimalik opereerida alla 10-40% maksimaalsest võimsusest [12].

Erinevate AEC elektrolüüserite kommertspakkujate lahendusi uuriv kirjanduse ülevaade [13] viitab, et enamus turule pakutavaid lahendusi lubab väljundvesiniku puhtuseastmeks rohkem kui 99,8% mahu järgi, täiendavate puhastusseadmete olemasolul isegi kuni 99,999%. Raporteeritud kasutegurid jäävad ligikaudu 60% lähedale vesiniku alumise kütteväärtuse järgi. AEC tehnoloogia hind tänapäeval on umbkaudu 1 €/W [11].

POLÜMEMBRAANELEKTROLÜÜDIGA ELEKTROLÜÜSERID

Polümeermembraanelektrolüüdiga elektrolüüser (Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer Cell – PEMEC) on AEC kõrval teine suhteliselt madala töötemperatuuriga kütuseelemendi liik. Töötemperatuur jääb üldjuhul vahemikku 67-70 kraadi Celsiuse järgi. Elektrolüüseri sisendiks on demineraliseeritud vesi, väljundiks vesinik, hapnik ja teatud kogus soojusenergiat, mida on võimalik sobiva soojustarbiija olemasolul ära kasutada. PEMEC elektrolüüserite kõrgem hind võrreldes AEC elektrolüüseritega on tingitud tehnoloogia värskusest ning katalüsaatori komponentide kallidusest (peamiselt plaatina ja iriidium). Eeldatavat hinnalangust tulevikuks loodetakse saavutada peamiselt läbi tootmisprotsessi kulude alanemise ning potentsiaalselt ka odavamate katalüsaatorite välja töötamise [14].

PEMEC elektrolüüseri toimimise põhimõtteskeem on toodud välja Joonis 1.1.6.



Joonis 1.1.6 Polümeermembraaniga elektrolüüseri sisend-väljund põhimõtteskeem [11]

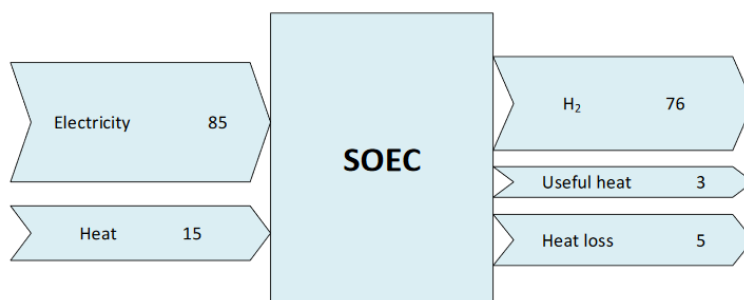
PEMEC elektrolüüserite üheks tugevaks küljeks on väga kõrge vesiniku puhtus väljundina ilma lisanduvaid puhastusseadmeid rakendamata. Erinevates allikates viidatakse puhtusele rohkem kui 99,99% ning osad tootjad lubavad väljundi puhtust isegi tasemel 99,998% mahu järgi [12].

Käesoleval hetkel on PEMEC elektrolüüserite hind veel kõrgem kui AEC elektrolüüserite oma, olles hinnanguliselt väärtuse 1,9 €/W lähedal [11].

TAHKEOKSIID ELEKTROLÜÜDIGA ELEKTROLÜÜSERID

Tahke-oksiid elektrolüüdiga kütuseelemendid (Solid Oxide Electrolyzer Cell - SOEC) on ainus märkimisväärse turuosaga kõrgtemperatuuriline elektrolüüsitehnoloogia. SOEC elektrolüüserid on käesoleval hetkel ka ainukesed olulise turuosaga elektrolüüserid, mis põhimõtteliselt võimaldavad mõlema suunalist protsessi, ehk üht tootmisseedet on

põhimõtteliselt võimalik kasutada nii kütuseelemendi kui elektrolüüserina. Elektroodidena kasutatakse nikli ja plaatina ühendeid, ning tavapärase töötemperatuur on umbkaudu 850 kraadi Celsiuse järgi. Elektrolüüs viiakse läbi aurustatud veega, kusjuures sisendiks on nii elektri-, kui soojusenergia. Soojusenergia on vajalik vee aurustamiseks enne elektrolüüsi protsessi. SOEC elektrolüüseri põhimõtteline tsisend-väljundskema kujutab Joonis 1.1.7. Protsessi täpne terminiline bilanss sõltub seadistatud töötemperatuurist ja rakendatavast pingest. Opereerides 1,29 V sisendpinge juures on protsess termoneutraalne 850 kraadi Celsiuse juures, endotermiline sellest madalamate temperatuuride juures ning kõrgemate temperatuuride juures eksotermiline [11].



Joonis 1.1.7 Tahkeksiid elektrolüüseri sisend-väljund põhimõtteskeem [11]

Käesoleval ajahetkel on tüüpilised SOEC elektrolüüserite ühikvõimsused ligikaudu 50 kW [11]. SOFC kütuseelementidel on reguleerimise suhtes paindlikud, olles võimelised käivituma ja saavutama täisvõimsust sekundite jooksul, eeldades, et seade on juba eelnevalt töötemperatuurini viidud. SOEC tehnoloogia on hetkel veel arengujärgus, hinnanguline investeeringukulu ühikvõimsuse kohta on üle 2 €/W. SOEC peamiseks eeliseks on tema kõrge potentsiaalne kasutegur, käesoleval ajal on see hinnangulisel 68% [11].

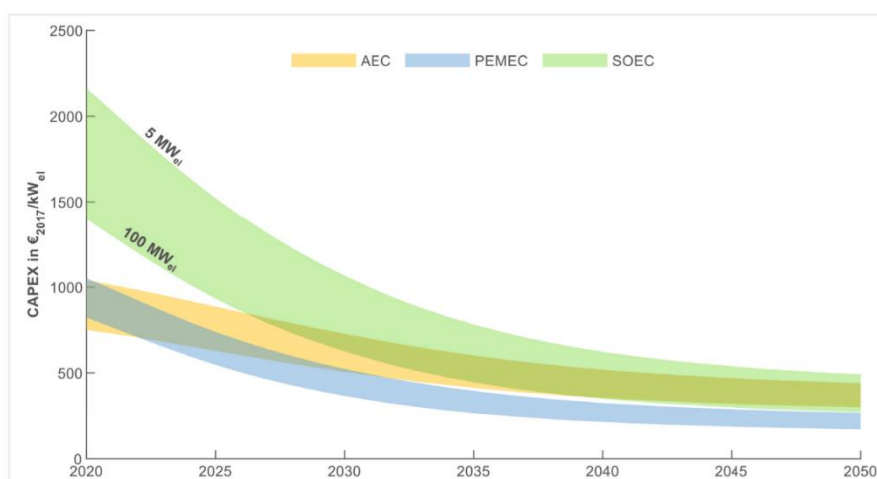
1.1.4. Elektrolüüsi tehnoloogiate võrdlus

Tehnoloogiate detailset võrdlust kujutab Tabel 1.1.1. Käesoleval ajahetkel on kõige enam arenenuks elektrolüüsi tehnoloogiaks hinnatud ka kõige rohkem kasutatud AEC elektrolüüserid. Neil on ka hetkel hinnanguliselt kõige madalam investeeringukulu ning pikem eluiga töötundides. Kõige värskem on SOEC elektrolüüsitehnoloogia, millel on hinnanguliselt väike eluiga töötundide arv, kuid kõige suurem kasutegur. TRL hinnangud erinevad allikate lõikes, kuid keskmiste hinnangute kohaselt on iga tehnoloogia vahe käesoleval ajahetkel umbes 1 TRL punkt.

Tabel 1.1.1 Elektrolüüsitehnoloogiate ülevaatlik võrdlus kirjanduse põhjal

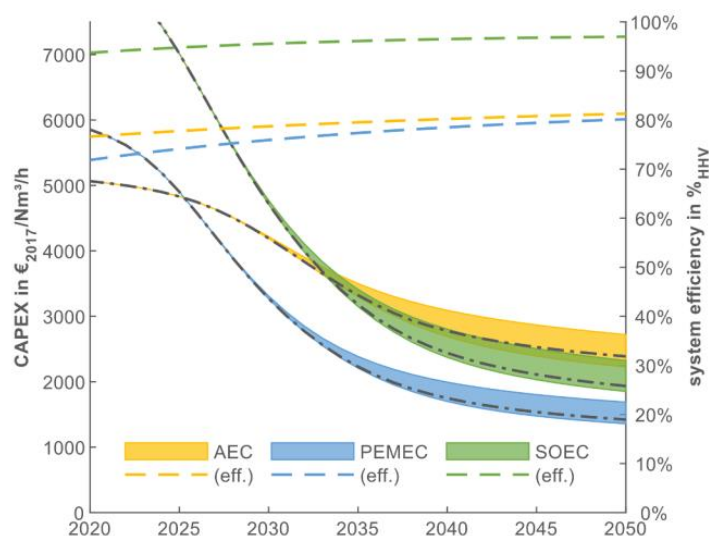
Tehnoloogia	Kasutegur %	Hind €/W	Töö-temperatuur	Eluiga- tuhanded töötunnid	Süsteemi paindlikkus	TRL
AEC	64 [11] 70 [14] 63-70 [2]	0,6 [11] 0,6-2,8 [2]	Madal	50-90 [2]	Väga suur	7-9 [14] 9 [15]
PEMEC	58 [11] 56-63 [2]	1,1 [11] 1,2-3,6 [2]	Madal	30-90 [2]	Suur	7-8 [14] 8 [15]
SOEC	76 [11] 74-81 [2]	2,2 [11] 1-3,6 [2]	Kõrge	10-30 [2]	Keskmine	6-7 [14] 6 [15]

Elektrolüüserite ehitushindade prognoosid tulevikuks sisaldavad endas märkimisväärset ebamäärasust. Sellegipoolest on erinevad aruanded püüdnud kaardistada tehnoloogiate kulusid tulevikuks. STORE&GO projektis on hinnatud kolme tüüpi elektrolüüserite kulude (elektrilise sisendvõimsuse kohta) langust vastavalt Joonis 1.1.8. Vastavalt välja toodud hinnangule langeb kõigi kolme elektrolüüseri tüübi hind 2050. aastaks alla 0,5 €/W taseme. Sealjuures on kõige suurema langemispotentsiaaliga elektrolüüseri tüübiks hinnatud PEMEC elektrolüüserid.



Joonis 1.1.8 Elektrolüüserite kapitalikulu hinnang aastani 2050 [15]

Lisaks investeeringute odavamaks muutumisele on eelduslikult tänu tehnoloogilistele täiendustele edusamme tegemas ka elektrolüüserite kasutegurid. Arvestades kasutegureid on hinnatud ka elektrolüüserite potentsiaalset hinnalangust väljundvõimsuse kohta (väljavõimsus vesiniku normaalkuupmeetreid tunnis). Asjakohase hinnangu toob siinkohal välja Joonis 1.1.9. Joonisel on välja toodud kasuteguri areng ülemise kütteväärtuse järgi. Alumise kütteväärtuse järgi kasuteguriks ümber arvatuna hinnatakse 2050. aastaks SOEC elektrolüüseri kasuteguriks ligikaudu 81% ja AEC/PEMEC elektrolüüserite jaoks umbes 67%.



Joonis 1.1.9 Elektrolüüserite kapitalikulu hinnang väljundi järgi ja kasuteguri hinnang aastani 2050 [16]

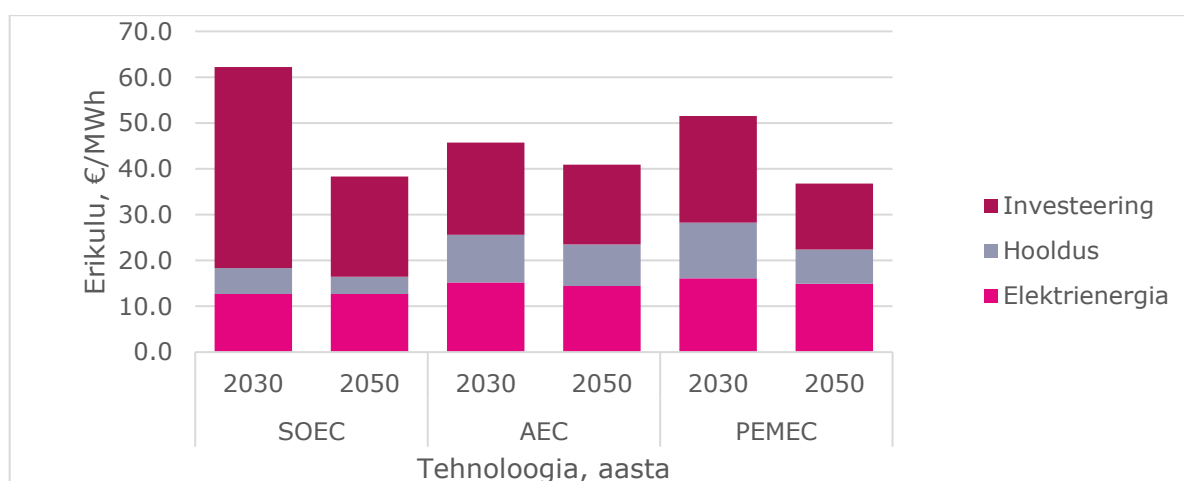
Joonis 1.1.9 viitab, et arvestades kasutegurit on hetke hinnangute kohaselt tulevikus kõige väiksemate kapitalikuludega elektrolüüsitehnoloogia PEMEC. Tänapäeval kõige konkurentsivõimelisem AEC tehnoloogia on hinnangute väljundina osutunud kõige kallimaks.

Sarnasel tasemel hinnangud on 2018. aastal antud Taani Energiaagentuuri ja Energinet.dk kütusetechnoloogiate ülevaates ja kuluhinnangutes, kus on PEMEC ja SOEC investeringukulud aastaks 2050 hinnatud sarnasele tasemele, AEC elektrolüüseri puhul mõnevõrra kõrgemaks. Sarnaselt eelnevaga on ka siinkohal SOEC potentsiaalset kasutegurit tulevikus hinnatud märkimisväärselt kõrgemaks kui konkurentidel. Täpsed arvud toob välja Tabel 1.1.2. Väike erinevus allikate [11] ja [16] vahel ilmneb SOEC tehnoloogia kuluhinnangus 2050. aastaks.

Tabel 1.1.2 Elektrolüüserite investeringukulude ja kasutegurite hinnangud aastateks 2030 ja 2050 [11]

Aasta	Investeeringu hind €/W		Kasutegur, %	
	2030	2050	2030	2050
SOEC	0,6	0,4	79	79
PEMEC	0,6	0,4	62	67
AEC	0,55	0,5	66	69

Et analüüsida lähemalt elektrolüüserite kulukomponente on tehtud läbi näidisarvutus allikas [11] toodud hinnanguliste tulevikuväärtuste kohaselt aastaks 2030 ja 2050. Arvutuses on hinnatud elektrolüüseri investeringukulu, hoolduskulu ja sisendelektrienergia hinna kulukomponentide väärtust väljundvesiniku energiaühiku kohta. Joonis 1.1.10 kujutab arvutuse tulemusi eeldusel, et elektrolüüserite aastane täistöötundide arv on 4000 ning sisendelektrienergia kaalutud keskmine hind on 10 €/MWh. Tähelepanu tuleb pöörata ka teatud ebamäärasusele elektrolüüserite elementide elueale. Valdavalt on SOEC kütuseelementide eluiga hinnatud tulevikuks madalamaks kui PEMEC ja AEC elementidel. Käesolevas arvutuses on lähtutud SOEC puhul investeringu elueaks 5 ja 7 aastat vastavalt 2030. ja 2050. aastal ning 15 aastat AEC ja PEMEC elektrolüüseritele.



Joonis 1.1.10 Elektrolüüsi teel toodetud vesiniku omahinna kujunemine hinnanguliselt aastatel 2030 ja 2050 ning elektrolüüseri tüübi järgi.

Joonisel välja toodud tulemused viitavad PEMEC elektrolüüseri kõige suuremale konkurentsivõimele aastal 2050, seda peamiselt kapitalikulude arvelt. SOEC elektrolüüseril on kõrgem kasutegur ning see muudab SOEC elektrolüüseri odavamaks lahenduseks juhul kui sisendelektrienergia hind on kõrge ja/või siis kui elektrolüüseri aastased täistöötunnid lähenevad väärtuseni 8000.

1.1.5. Vesiniku salvestamine

Seoses vesiniku molekuli füüsikaliste omadusega on vesiniku salvestamine võrreldes tavakasutuses olevate ainetega raskendatud. Realiseeritavad võimalused vesiniku salvestamiseks on salvestamine kõrgsurvepaakides, veeldamine, keemiline salvestamine ning salvestamine maa-alustes tühimikes.

Vesiniku salvestamine metallides keemiliste sidemete abil on üks praktilisemaid lahendusi vesiniku salvestamisel. Võimalik on kasutada näiteks magneesiumhüdriidi (MgH_2), naatriumhüdriidi (NaH) ja kaltsiumhüdriidi (CaH_2). Magneesiumhüdriidil on mitmeid häid omadusi, näiteks on võimalik selle abil salvestada võrdlemisi suurt vesiniku kogust (vesinik võib moodustada umbkaudu kuni 7% lõpliku hüdriidi massist) ning magneesium on odav, kättesaadav ja väikese eritihedusega. Puuduseks võib lugeda keemilistest eripäradest tingitud pikka vesiniku „laadimise“ aega magneesiumisse ning mõningast energiakulu vesiniku eraldamisel magneesiumis [17].

Vesiniku veeldamine on äärmiselt energiamahukas, eelkõige vesiniku väga madala aurustumistemperatuuri tõttu (atmosfäärirõhul 20,3 K ehk -250,15 C). Varasemad uuringud on hinnanud minimaalseks praktiliseks vesiniku veeldamiseks kuluvaks energiakuluks 30,3 MJ ühe kilogrammi vedela vesiniku kohta, mis moodustab koguni neljandiku vesiniku enda alumisest kütteväärtusest [17].

Maa-aluste tühimike kasutamise võimalikkus oleneb märkimisväärselt kohalike tingimuste olemusest. Võimalikud salvestamise paigad on ammendunud maagaasimaardlad ning soola- ja kivikoopad (salt *caverns*, rock *caverns*). Maa-alustest salvestusvõimalustest odavamaks on hinnatud maagaasimaardlaid, kus salvestuse hind on arvutuslikult 8-25 €/MWh vesiniku energia kohta, olenevalt kohalikest oludest ja salvestuse kasutamise aktiivsusest. Soola- ja kivikavanduse kasutamine on hinnanguliselt märkimisväärselt kallim, vahemikus 19-104 €/MWh [2].

1.1.6. Vesiniku transport

Vesinikku sisestatakse mitmetel juhtudel Euroopas otse maagaasivõrku, kus see seguneb maagaasiga. Puhta vesiniku jaoks aga laiapõhjaline transpordisüsteem käesoleval hetkel puudub. Eksisteerivad lokaalsed lahendused torujuhtmete või maanteetranspordi kujul.

Laialdase vesinikutööstuse tekkimise korral on perspektiivikas luua vesiniku transportimiseks torujuhtmete võrgustik, sarnaselt praegu eksisteeriva maagaasivõrgustikuga. Vesiniku torujuhtmete võrgustiku ehitamisel on võimalik ümber ehitada eksisteeriv maagaasivõrk või rajada uus võrk. Kuluhinnangud olenevalt tugevalt piirkonna tarbimistihedusest ja muudest parameetritest. Hinnanguliselt on eksisteeriva maagaasivõrgu ümber ehitamisel 100% vesiniku transportimiseks vesiniku transportimise

hind 3,7 €/MWh (600 km transpordidistantsi korral). [18] Uute, spetsiaalselt vesiniku jaoks rajatavate torujuhtmete maksumuseks on erinevate hinnangute tulemusena jõutud keskmise transpordikuluni vahemikus 4,6-45 €/MWh 600 km kohta [2].

Vesiniku veeldamine transpordi eesmärgil on analüüside kohaselt võrdlemisi kallis, hinnanguliselt 58-62 €/MWh 600 km kohta, tulenevalt vesiniku veeldamisega seonduvast energiakulust [18].

1.1.7. Metaan, selle tootmine ja tehnoloogiad

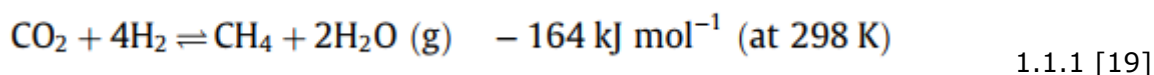
Valdav enamuse tänapäeval kasutatavat metaani ammutatakse maagaasi näol maagaasimaardlatest. Sellisena kasutatav metaan on fossiilse päritoluga ning kuna atmosfääri paisatakse varem maapõues peitunud süsinikust tekkinud süsihappegaas, on see ka olulise mõjuga kliima soojenemisele.

Lisaks fossiilsele metaanile on ka muid metaani allikaid, mis seni on jäänud võrreldes maagaasiga kallimaks. Näiteks on hakatud järjest enam kasutama hakatud bioloogiliste jäätmete lagunemisel tekkivad biogaasi, mille üks oluline komponent on metaan. Biogaasist metaani eraldamise ning puhastamise järel on seda võimalik ka sisestada maagaasi hulka maagaasivõrku.

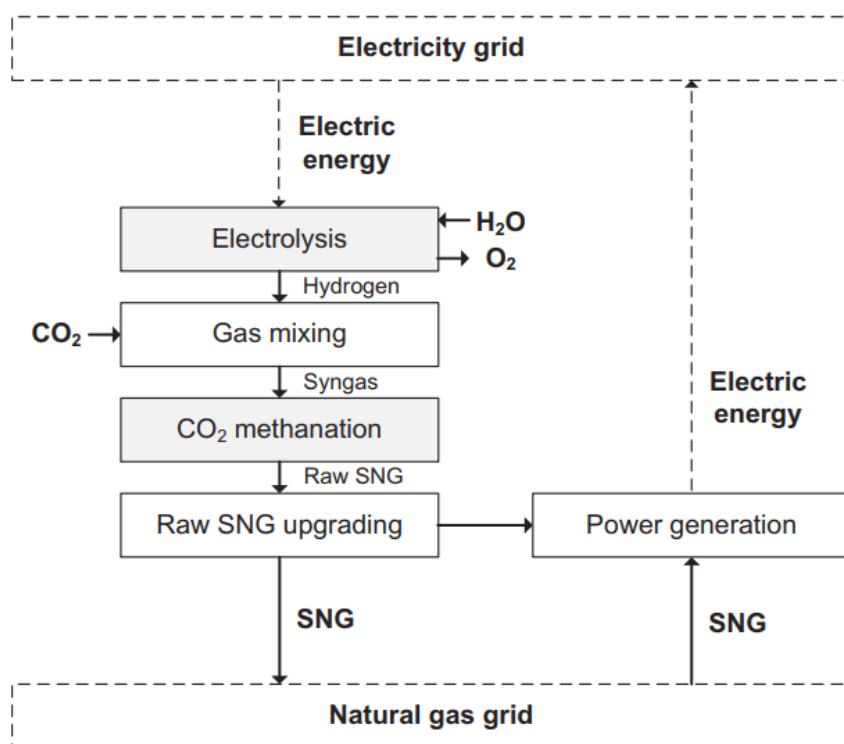
Järjest rohkem on hakatud rääkima aga sünteetilisest metaanist, kus metaani toodetakse sihipäraselt ja kontrollitud protsessides. Kui valdav osa energiast, mis metaani tootmiseks kulub, on päris elektrienergiast, nimetatakse kogu protsessi power-to-gas, ehk elektrist gaasi tootmine. Elektrienergia on tänapäeval väga mitmekülgne ja kõrgekvaliteetne kütus, kuid sellel on ka puudusi, nagu äärmiselt kallid salvestusvõimalused ning piiratud kasutusvõimalus rasketranspordis. Mõningaid nendest probleemidest saab power-to-gas tehnoloogiatega leevendada, kuna gaasi on elektrienergiast odavam salvestada ja teatud juhtudel on ka metaani tarbijaseadmed odavamad, kui elektrienergia puhul.

PROTSESSI ÜLDKIRJELDUS

Tänapäeval toodetakse sünteetilist metaani kahel viisil: süsinikmonooksiidi (CO) ja süsinikdioksiidi (CO₂) metaanimise teel. Esimesel juhul on vesiniku allikaks biomass või kivisüsi, teisel juhul elektrolüüsi teel toodetud puhas vesinik. Mõlemad mainitud metaanimise viisid on eksotermilised protsessid, mis tähendab, et protsessi käigus eraldub energiat soojusena. Üldjuhul on protsessi kulgu reguleerivaks parameetrik rõhk. Käesolevas analüüsis on fookuses vesiniku tootmine elektrolüüsist ja sellest edaspidine metaani tootmine, seega on lähemalt jälgitud ainult süsinikdioksiidi metaanimise protsessi. Süsinikdioksiidi metaanimise protsess koos energiabilansiga on toodud välja valemiga 1.1.1.



Süsinikdioksiidi metaanimise põhimõtteskeemi kirjeldab Joonis 1.1.11. Kõige olulisemad sisendid metaanimisel on vesinik ja süsihappegaas. Vesinikku on võimalik toota elektrolüüsist või metaani reformimise teel. Käesolevas uuringus on elektrolüüsist vesiniku tootmise võimalused kirjeldatud eelmistes peatükkides.



Joonis 1.1.11 Vesiniku tootmise ja metaneerimise põhimõtteskeem [19]

Teine oluline sisendkomponent sünteetilise metaani tootmisel on süsihappegaas. Olulisemad potentsiaalsed süsihappegaasi allikad metaanimiseks on:

- Süsinikdioksiid CCUS (näiteks süsiniku püüdmismehhanismidest fossiilkütuseid põletavates elektrijaamades);
- Süsinikdioksiid biomassist, eraldatuna kääritamise või gaasistamise teel;
- Süsinikdioksiid biogaasi või muu jäätmegaasi komponendina;
- Süsinikdioksiid tööstusprotsesside jääkproduktina;
- Süsinikdioksiid atmosfäärist. [12] [20] [7]

Süsihappegaasi allikast sõltuvalt on hinnanguline kulu selle hankimiseks ka drastiliselt erinev. Kõige kallimaks hinnatakse atmosfäärist süsihappegaasi püüdmist, kus on ühe tonni süsihappegaasi hankimise kuluks hinnatud 80-196 Eurot. Hetkel on konkurentsivõimelisemaks lahenduseks peetud biogaasi ja bioetanolli tootmisel tekkiva jääksüsihappegaasi kasutamist, mille hankimise kuluks on hinnatud 17-26 Eurot süsihappegaasi tonni kohta. Nimetatud lahendusi kasutab ka valdav enamus realiseeritud metaanimise projekte. Tööstusprotsesside jääkproduktina on perspektiivikas süsinikdioksiidi allikas näiteks tsemenditööstus, kus juba protsessi väljundina on süsihappegaasi kontsentratsioon küllaltki kõrge [3].

Kuna protsess on eksotermilise iseloomuga, ei ole üldjuhul protsessi sisendina vajalik suures koguses energiat. Väike kogus elektrienergiat kasutatakse üldiselt sisendiks protsessi haldamiseks (vedelike ja gaaside pumpamine, vedelike segamine, soojuse ära juhtimine). Protsessis esineb aga muid kadusid (lekked, ebaõnnestunud väljund) [11].

Kasutusel olevatest tehnoloogitest eristatakse kahte laiemat kategooriat: katalüütiline ja bioloogiline metaanimine, kus vastavalt kasutatakse kas katalüsaatorit või toimub keemiline reaktsioon tänu bioloogilistele protsessidele (elusorganismide kaasabil).

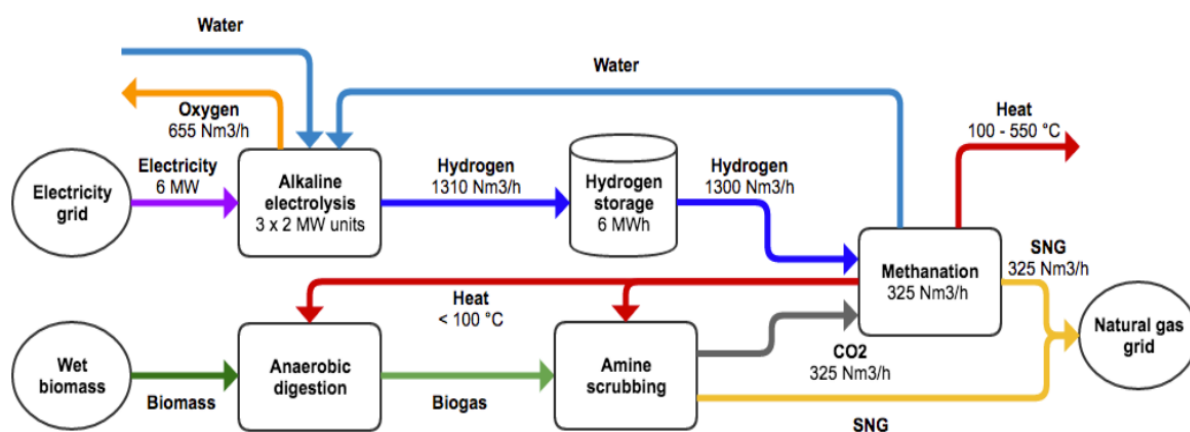
KATALÜÜTILINE METAANIMINE

Katalüütilise metaanimise puhul on protsessi edasi viivaks jõuks katalüsaator. Katalüsaatori kasutamisel on reaktsiooni toimumise temperatuur üldjuhul sadades kraadides Celsiuse järgi, olenevalt kasutatavast katalüsaatori tüübist. Kasutatakse erinevaid väärismetalleid (rhodium, pallaadium, ruteenium jt) või nikliühenditel põhinevaid katalüsaatoreid. Kasutatakse mitmeid erinevaid reaktorite tüüpe ning opereerimise rõhk võib sõltuvalt protsessi tüübist olla vahemikus 1-100 bar [21] [22] [20].

Kuna metaanimise protsess on eksotermiline, on katalüütiliste protsesside puhul oluliseks probleemiks jääksoojuse ära juhtimine, kuna protsessi ülekuumenemine võib viia katalüsaatori hävimiseni [20].

Katalüütilise metaanimise puhul võib mõnel juhul olla probleemiks sisendsüsihappegaasi puhtus. Täpsemalt võib problemaatiline olla näiteks biogaasist pärineva süsihappegaasiga segunenud erinevad väevliühendid, mis võivad reageerida metallipõhiste metaanimise katalüsaatoritega [20].

Ühte valminud katalüütilise metaanimise tüüpi näidisprojekti illustreerib Joonis 1.1.12 [23]. Konkreetne lahendus asub Saksamaal, Werltes.



Joonis 1.1.12 Katalüütilise metaanimise teel gaasi tootmise projekti näidis [23]

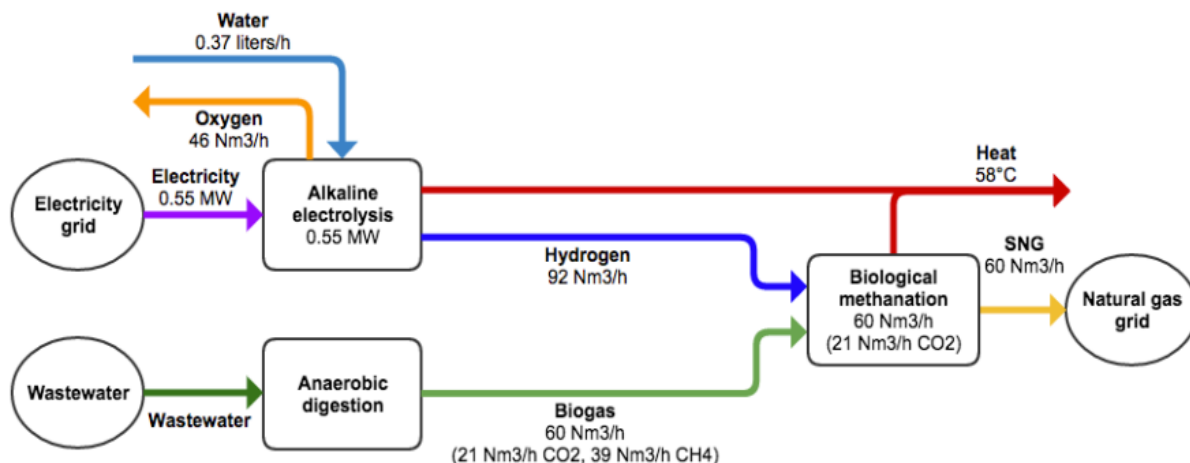
Antud lahenduses kasutatakse sisendvesiniku tootmiseks kolme 2 MW võimsusega AEC elektrolüüserit, elektrolüüsi hinnanguline kasutegur on umbes 70%. Elektrolüüserid asuvad lähedalasuva biogaasi töötlemise jaama lähedal, kus biogaasist eraldatakse biometaan ning järele jääv süsihappegaas suunatakse metaanimise tehasesse. Hinnanguline kasutegur metaanimise protsessis on 78%, kusjuures antud lahenduses kasutatakse metaanimise jääksoojust sisendina biogaasi tootmise ja puhastamise seadmetesse. Metaanimise reaktori väljund koosneb rohkem kui 91% metaanist, vähem kui 5% vesinikust ning vähem kui 6% süsihappegaasist. Antud juhul täidab gaas Saksamaa maagaasi võrgu nõuded ning täiendav gaasi puhastamine ei ole vajalik [23].

Katalüütilise metaanimise TRL hinnanguteks on kirjanduse põhjal 8-9 [24] ja 8 [15].

BIOLOOGILINE METAANIMINE

Biooloogiliselt juhitud metaanimise protsessis viivad protsessid läbi lihtsad organismid anaeroobses keskkonnas. Näiteks Taanis asuvas Electrochaea nimelises pilootprojekti kasutatakse spetsiaalselt arendatud ainurakseid, kes viivad protsess läbi temperatuuril

60-65 Celsiuse järgi, kuid protsessi võimaldavaid organisme on erinevaid. Üldjuhul jääb reaktsiooni temperatuur alla 100 kraadi Celsiuse ja rõhk vahemikku 1 kuni 10 bar [25] [20]. Bioloogilise metaanimise puhul on paljude tänapäeva tehnoloogiate korral vajalik ka metaani puhastamine, sest reaktsiooni väljundis võib metaani sisaldus olenevalt reaktsiooni tüübist tunduvalt erineda. Kirjanduses loetletud väärtused on vahemikus 13,4 kuni 98% [20].



Joonis 1.1.13 Bioloogilise metaanimise teel gaasi tootmise projekti näidis [23]

Ühe konkreetse elektrist vesiniku tootmise ja seejärel metaanimise projekti kujutab Joonis 1.1.13. Tegu on Taanis, Avedøres realiseeritud ja töötava lahendusega. Lahenduses kasutatakse vesiniku tootmiseks 1,2 MW võimsuses AEC elektrolüüsereid ligikaudse kasuteguriga 51%. Lisaks vesinikule kasutab metaanimise reaktor sisendina biogaasi, mille koostis on umbkaudu 65% metaan ja 35% süsihappegaas. Jaam on võimeline kasutama sisendina puhast süsihappegaasi, mis saab olla näiteks biogaasist biometaan tootmise jääkprodukt. Bioloogilise metaanimist viivad läbi mikroorganismid ning metaanimise protsessi kasutegur on hinnanguliselt 84%. Metaanimise reaktori väljundiks on 90-95% puhtusega metaan, mida puhastatakse membraani abil enne gaasivõrku suunamist. Gaasivõrku suunatud gaas sisaldab ligikaudu 98% metaani, 2% vesinikku, 1% CO₂ ja vähem kui 40 ppm H₂O [23].

Bioloogilise metaanimise TRL hinnanguks on kirjanduse põhjal 7 [15].

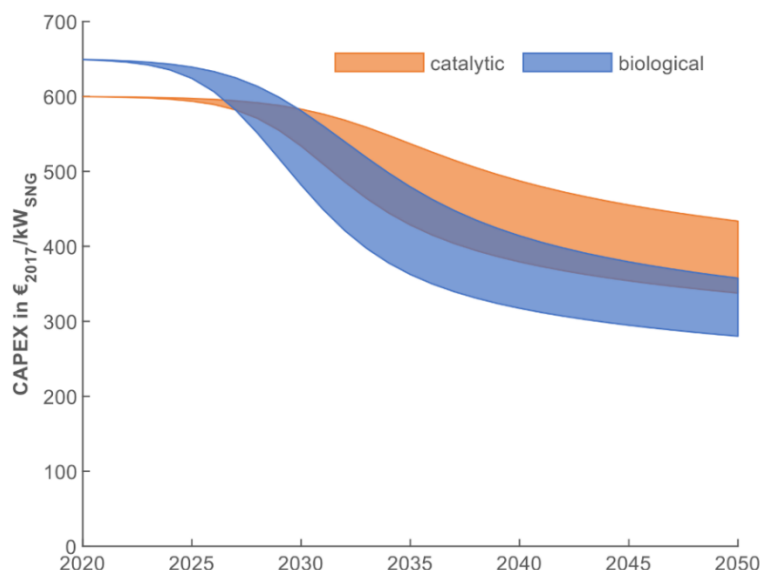
METAANIMISE TEHNOLOOGIATE KULUHINNANG TULEVIKUS

Nagu ka elektrolüüsitehnoloogiate puhul, on erinevate hinnangute põhjal alust oodata metaanimise tehnoloogiate odavamaks muutumist tulevikus.

2018. aastal on katalüütilise metaanimise lahenduse investeringukuluks hinnatud ligikaudu 1,09 €/W (väljundgaasi energiasisalduse kohta). Protsessi kasulikuks väljundiks on sünteetiline metaan energiakoguses 89% sisendite energiakoguste summast. Olulist kasuteguri muutumist tulevikuks ei ole analüüs ette näinud, kuid investeringukulu hinnang on 2050. aastaks langenud väärtuseni 0,45 €/W [11].

Metaanimise tehnoloogiate hinda tulevikuks on prognoositud näiteks STORE&GO projekti raames. Siinkohal nähakse suuremat kulude langemise potentsiaali bioloogilise metaanimise tehnoloogial, eelkõige lähtuvalt bioloogilise metaanimise tehnoloogia

uudsusest. Hinnaprognosid on loodud vahemikuna (keskmisest kõrge hinnani), lõplik hinnang tehnoloogia soetamise kulule 2050. aastal jääb ligikaudu 0,4 €/W juurde.



Joonis 1.1.14 Metaanimise tehnoloogiate kulude hinnang aastani 2050 [16]

Tootes metaani elektrolüüsitud vesiniku baasil, sõltub toodetud metaani hind paljuski sisendvesiniku hinnast. Nagu eelnevates peatükkides kirjeldatud, sõltub elektrolüüsist toodetud vesiniku hind jällegi paljudest parameetritest, nagu elektrilüüsi tehnoloogia aastane kasutatavuse tegur ning sisendelektrienergia hind. Teadusartiklis [26] on kaardistatud sünteetilise metaani tootmise hinnaindikatsioonid sõltuvalt olulisemate parameetrite muutumisest ning tulemusi kujutab Joonis 1.1.15.

Methane production costs operating strategy II based on a PtG plant size of 10 MW_{el}.

Electrolyser		H ₂ storage/h	Methanation				Methane production costs €/MWh _{SNG}					
FLH	HSH		Size MW _{SNG} 2030 2050	FLH	HSH	Electricity prices						
						0 €/MWh _{el}		10 €/MWh _{el}		25 €/MWh _{el}		
						2030	2050	2030	2050	2030	2050	
1000	7760	8.5	0.68 0.71	8500	260	183.46	96.58	200.59	113.05	226.27	137.74	
2000	6760	4.3	1.37 1.42	8500	260	94.55	47.69	111.67	64.15	137.36	88.85	
4000	4760	2.2	2.73 2.84	8500	260	54.85	26.41	71.97	42.88	97.65	67.57	
6000	2760	1.5	4.10 4.26	8500	260	42.32	19.79	59.44	36.25	85.12	60.95	

Joonis 1.1.15 Sünteetilise metaani tootmise kulude muutumine vastavalt sisendelektrienergia kulu muutumisele ja elektrilüüseri töötundidele [26]

Joonisel toodud tulemused viitavad, et selgelt on odavam sünteetiline metaan juhul, kui sisendelekter on tasuta ning elektrolüüser saab töötada suurel koormusel suurema osa aastast. Kuigi tuleviku energiasüsteemis võib eeldada suuremat elektrienergia hinna volatiilsust, ei pruugi see olla kõige realistlikum eeldus. Juhul kui ligikaudu neljandik aastast on võimalik taastuenergiaallikate suure toodangu tõttu elektriturult hankida elektrienergiat hinnaga 0 €/MWh, oleks 2050. aastaks sünteetilise metaani tootmise hind umbkaudu 48 €/MWh, mis on võrreldes tänapäevase maagaasi hinnaga umbes kolm korda kõrgem hind.

1.2. Eesti, regiooni ja Euroopa gaasivõrgu standardid ja kvaliteeditingimused

Tänapäeval on kasutusel mitmeid eri tüüpi standardid. Põhimõtteliselt sisaldavad standardid nõudeid ja/või soovitusi toodete, süsteemide, protsesside või teenuste osas. Standardid on loodud kas mõõtmis- või katsemetodi(te) kirjeldamiseks või ühise terminoloogia kehtestamiseks ühe konkreetse sektori piires.

Eesti koos teiste Euroopa riikidega on alati olnud proaktiivne oma torustike ja käitiste ohutuse tagamisel, järgides „isevastutuse“ põhimõtet, pühendudes gaasiseadme kõigi osade jaoks kohandatud tehnilistele nõuetele ja parimate tavade lahendustele standardimise kontekstis Riiklikul, Euroopa ja rahvusvahelisel tasandil.

Gaasitaristu osas peavad tänased võrguettevõtjad (gaasi ülekande- ja jaotusettevõtted) end vastutavaks kehtiva standardikomplekti säilitamise, arendamise ning vajaduse korral ka uute väljatöötamise eest.

Käesolevas peatükis on välja toodud peamised Eestis ja Euroopas kehtivad standardid, milledest tuleb juhinduda gaasi infrastruktuuri arendamisel ja eksploatatsioonis.

Peamised standardiorganisatsioonid on järgmised:

- Rahvusvaheline Standardimisorganisatsioon (International Organization for Standardization, ISO) - alates 1946. aastast sõltumatu valitsusväline rahvusvaheline organisatsioon, kus rahvusvaheliste standardite väljatöötamises oslevad 165 riigi riiklikud standardiorganid [27].
- Euroopa Standardimiskomitee (Comité Européen de Normalisation, CEN) - asutati aastal 1961 ja selle tegevusala langeb kokku ISO omaga. CEN National liikmed on siseriiklikud standardiorganisatsioonid: 27 Euroopa Liidu liikmesriigi, Suurbritannia, Põhja-Makedoonia Vabariigi, Serbia, Türgi ning kolme Euroopa Vabakaubanduse Assotsiatsiooni riigi (Island, Norra ja Šveits) riiklikud standardiorganid [28].
- International Electrotechnical Commission (IEC) - mittetulunduslik organisatsioon, mis asutati 1906. aastal ja arendab rahvusvahelisi standardeid ning haldab vastavushindamissüsteeme elektrotehnika valdkonnas. IEC-s on igast riigist üks liige. Enamik IEC standardeist transformeeruvad muutmatul või modifitseeritud kujul Euroopa standarditeks (EN) või (vähemal määral) harmoneerimisdokumentideks (HD) [29].
- Euroopa Elektrotehnika Standardimise Komitee (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique, CENELEC) - asutati 1. jaanuaril 1973 ja selle tegevusala langeb kokku IEC omaga. CENELECI liikmeteks on lisaks Euroopa Liidu liikmesriikidele veel Islandi, Norra ja Šveitsi standardiorganisatsioonid [30].

Iga Euroopa riigi standardiorganisatsioon koondab endasse kõik sidusrühmad ning on peamiseks juurdepääsuallikaks kooskõlastatud süsteemi, mis sisaldab piirkondliku

(Euroopa) ja rahvusvahelist (ISO) standardiseerimist. Euroopa ning riiklike standardite rakendamine on CENi liikmesriikide liikmete kohustus. Riiklikud standardiorganisatsioonid levitavad ja müüvad rakendatud Euroopa standardeid ning peavad samaaegselt kehtetuks tunnistama kõik vastuolulised riiklikud standardid.

1.2.1. Eesti gaasivõrgu standardid

1.04.2000 alustas Tehnilise normi ja standardi seaduse (RT I 1999, 29, 358) [31] alusel tööd mittetulundusühing Eesti Standardikeskus (EVS). Kuni selle ajani korraldas standardimist Eesti Standardiamet.

Alates 01.07.2003 kehtib Eestis Maagaasiseadus (MGS). MGS reguleerib maagaasi impordi, ülekande, jaotamise ja müügiga seonduvaid tegevusi gaasivõrgu kaudu ning võrguga liitumist. Gaasisüsteem MGSe tähenduses on tehniline süsteem, mille moodustavad Eesti territooriumil asuvad võrgud koos asjakohaste juhtimis-, kaitse-, side- ja mõõtesüsteemidega. (4. jagu §13) [32].

Alates 18.02.2015 kehtib Eestis Seadme ohutuse seadus (SeOS). Seaduse järgi loetakse gaasiseadmeks gaasi tootmiseks, töötlemiseks, edastamiseks, ladustamiseks, kasutamiseks või gaasianumate täitmiseks kasutatavat seadet või nende süsteemi, sealhulgas küttegaasidest maa-, vedel-, bio- või tööstusgaasi anumad, torustiku, terminali, täitejaama, tanklat või gaasijaama. SeOS-ega reguleeritakse seadme kasutusele võtmist ja kasutamist ning seadmetööd [33].

Eestis on kasutusel „Gaasituru toimimise võrgueeskiri,“ 28.07.2017 [34] ning „Gaasisüsteemi sisestava gaasi kvaliteeditingimused,“ 28.07.2017 [35].

Alates 03.10.2017 kehtib Eestis standard EVS 884:2017 „Maagaasitorustik. Projekteerimise põhinõuded üle 16 bar töö rõhuga torustikele“ [36]. Käesolev standard sätestab ühtsed projekteerimisnõuded üle 16 bar töö rõhuga gaasitorustikele, et tagada gaasitorustike ehitamisel torustike kasutuskindlus, inimeste ohutus, keskkonnakaitse ja õnnetusjuhtumite vältimine.

Eestis kehtivad veel Euroopa standardid EN ja CEN/TR, uute nimetustega EVS-EN. Siinjuureks peavad standardi kasutajad olema teadlikud, et nendele lisaks võivad Eestis kehtida üksikasjalikumad standardid ja/või eeskirjad. Iga standard on mõeldud kasutamiseks koos riiklike standardite ja/või eeskirjadega, mis konkretiseerivad ülalnimetatud põhiprintsiibid.

Järgmisena on esitatud kõik Euroopa standardite EN eestikeelsed versioonid. Tekstide tõlke on avaldanud Eesti Standardikeskus ning nendel on samaväärne staatus ametlike versioonidega [37]:

- EVS-EN 12007-1:2012 Gaasitaristu. Torustikud maksimaalse töö rõhuga kuni 16 bar (kaasa arvatud). Osa 1: Üldised talitluslikud nõuded;
- EVS-EN 12007-2:2012 Gaasitaristu. Torustikud maksimaalse töö rõhuga kuni 16 bar (kaasa arvatud). Osa 2: Talitluslikud erinõuded polüetüleentorustikele (MOP kuni 10 bar [kaasa arvatud]);

- EVS-EN 12279:2007 Gaasivarustussüsteemid. Gaasi tarnetorustike rõhureguleerpaigaldised. Talituslikud nõuded;
- EVS-EN 12327:2012 Gaasitaristu. Surveproov, kasutusse võtmine ja kasutusest eemaldamine. Talituslikud nõuded;
- EVS-EN 12732:2013+A1:2014 Gaasivarustussüsteemid. Terastorustiku keevitamine. Talituslikud nõuded;
- EVS-EN 15001-1:2009 Gaasi infrastruktuur. Üle 0,5 bar töö rõhuga tööstuslike gaasipaigaldiste torustikud ning tööstuslike ja mittetööstuslike üle 5 bar töö rõhuga paigaldiste torustikud. Osa 1: Üksikasjalikud talituslikud nõuded projekteerimisele, materjalidele, ehitamisele, ülevaatusele ja katsetamisele;
- EVS-EN 15001-2:2008 Gaasi infrastruktuur. Üle 0,5 bar töö rõhuga tööstuslike gaasipaigaldiste torustikud ning üle 5 bar töö rõhuga tööstuslike ja mittetööstuslike paigaldiste torustikud. Osa 2: Üksikasjalikud talituslikud nõuded kasutuselevõtule, kasutamisele ja hooldamisele;
- EVS-EN 15341:2019 Hooldus. Hoolduse võtmenäitajad;
- EVS-EN 1594:2014 Gaasitaristu. Torustikud maksimaalse töö rõhuga üle 16-baari. Talituslikud nõuded [38];
- EVS-EN 16348:2013 Gaasitaristu. Gaasi ülekandetaristu ohutuse juhtimissüsteem (SMS) ja torustiku terviklikkuse juhtimissüsteem (PIMS) gaasi ülekandetorustikele. Talituslikud nõuded
- EVS-EN 16723-1:2016 Transpordis kasutatav maagaas ja biometaan ning maagaasivõrku sisestatav biometaan. Osa 1: Maagaasivõrku sisestatava biometaani spetsifikatsioon;
- EVS-EN 1775:2008 Gaasivarustus. Hoone gaasitorustik. Maksimaalne töö rõhk kuni 5-baar. Talituslikud soovitusel
- EVS-EN 16314:2013 Gaasiarvestid. Lisafunktsionaalsused;
- EVS-EN 437:2018 Katsetusgaasid. Katsetusrõhud. Tarvitite kategooriad;
- EVS-EN ISO 14001:2015 Keskkonnajuhtimissüsteemid. Nõuded koos kasutusjuhistega.

Lisaks käesolevale aruandes olevale loetelule on töö tellijale esitatud MS Excel fail pealkirjaga „Eestis kehtivad standardid“, kust on leitav põhjalikum EVS-EN standardite sisukirjeldused koos täitja poolsete kommentaaridega.

1.2.2. Regionaalsed gaasivõrgu standardid

Käesoleva töö raames on regionaalse gaasivõrguna määratletud järgmised riigid: Soome, Läti, Leedu ja Poola. Nendes riikides on kasutusel samuti EN standardid, mis algavad:

- Soomes – SFS-EN

- Lätis – LVS-EN
- Leedus – LST-EN
- Poolas – PN-EN

Põhiliselt on kasutusel ingliskeelsed versioonid. Mõned standardid on tõlgitud vaid konkreetse riigi keelde. Rohkem erinevusi saab välja tuua ainult Soome puhul ning need on leitavad CEN/TR 13737 [39]:

- Asjakohased viimistletud õigusaktid/määrused ja standardid gaasijuhtmete, mille maksimaalne töö rõhk on suurem kui 16 bar ja millele kohaldatakse EN 1594; rangemad nõuded Soome õigusaktides/määrustes (lk. 20–21);
- Asjakohased Soome gaasi kokkusurumise õigusaktid/määrused, mille suhtes kohaldatakse EN 12583; rangemad nõuded Soome õigusaktides (lk. 150);
- Asjakohased Soome õigusaktid/määrused terastorustike keevitamiseks, mille suhtes kohaldatakse EN 12732; rangemad nõuded Soome õigusaktides/määrustes (lk. 160-161);
- Asjakohased Soome õigusaktid/määrused gaasi ülekandetaristu ohutuse juhtimissüsteemi ja gaasi ülekandetorustike torujuhtmete terviklikkuse haldamise süsteemi kohta, millele kohaldatakse EN 16348; rangemad nõuded Soome õigusaktides (lk. 192).

1.2.3. Euroopa gaasivõrgu standardid

Gaasitaristu ehitamisel ja käitamisel kasutatavate toodete kohta on Euroopas palju asjakohaseid ning tunnustatud standardeid. Näiteks: alates 05.08.2013 kehtiv standard EVS-EN 16348:2013 „Gaasitaristu. Gaasi ülekandetaristu ohutuse juhtimissüsteem (SMS) ja torustiku terviklikkuse juhtimissüsteem (PIMS) gaasi ülekandetorustikele. Talitluslikud nõuded.“ See Euroopa standard määrab kindlaks nõuded, mis võimaldavad ülekandesüsteemi käitajal (TSO) välja arendada ja ellu viia ohutuse juhtimissüsteemi, mis sisaldab torustikele mõeldud terviklikkuse juhtimise süsteemi [40].

Põhjalik standardite loetelu ning kirjeldused on leitavad töö tellijale täiendavalt esitatud MS Excel tabelis pealkirjaga „CEN riigid ja nende standardid“.

Standardi kasutajad peaksid meeles pidama, et CEN-i liikmesriikides võivad olla kasutusel üksikasjalikumad riiklikud standardid ja riiklikud tegevuseeskirjad. Standard on mõeldud rakendamiseks koos selliste riiklike standardite ja/või riiklike tegevuseeskirjadega, mis täpsustavad ülalmainitud üldisi põhimõtteid. Kui riiklike õigusaktide/eeskirjade nõuded on selle standardiga võrreldes piiravamad, on eelistatud riiklikud õigusaktid/eeskirjad, nagu on kirjeldatud dokumendis CEN/TR 13737 (kõik osad). CEN/TR 13737 sisaldab:

- riikides rakenduvate asjassepuutuvate seaduste/määruste selgitusi;
- asjakohastel juhtudel rangemaid riiklikke piiranguid;
- riiklike kontaktpunkte päevakohase teabe saamiseks [39].

EL liikmesriikidele kehtivad samaaegselt veel:

- Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrus (EÜ) nr 715/2009, 13. juuli 2009 , maagaasi ülekandevõrkudele juurdepääsu tingimuste kohta ning millega tunnistatakse kehtetuks määrus (EÜ) nr 1775/2005 (EMPs kohaldatav tekst) [41];
- Komisjoni määrus (EL) nr 984/2013, 14. oktoober 2013 , millega kehtestatakse gaasi ülekandesüsteemide võimsuse jaotamise mehhanismide võrgueeskirjad ning täiendatakse Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrust (EÜ) nr 715/2009 (EMPs kohaldatav tekst) [42].

1.3. Eesti maagaasi ülekandesüsteemi ülevaade ja iseloomustus

Käesolevas peatükis esitatakse Eesti maagaasi ülekandesüsteemi kokkuvõtlik iseloomustus. Lähteandmed, millest lähtutakse maksimaalse vesiniku ja süngaasi võrku andmise piirkoguste arvutamisel/analüüsis on esitatud peatükis 2.3, kus hinnatakse maksimaalsed vesiniku ja süngaasi võrku andmise piirkogused.

1.3.1. Eesti maagaasi ülekandevõrk

Gaasi ülekandevõrk on üle 16 bar tööõhuga gaasitorustike ja nendega kohakindlalt seotud ehitiste ning ülekandesüsteemi toimimiseks, haldamiseks ja arendamiseks vajalike juhtimis-, kaitse-, side- ja mõõtesüsteemide talitluslik kogum, mis on vajalik gaasi ülekandeks ning ühenduste loomiseks teiste riikide võrkudega või gaasi transiidiks [43].

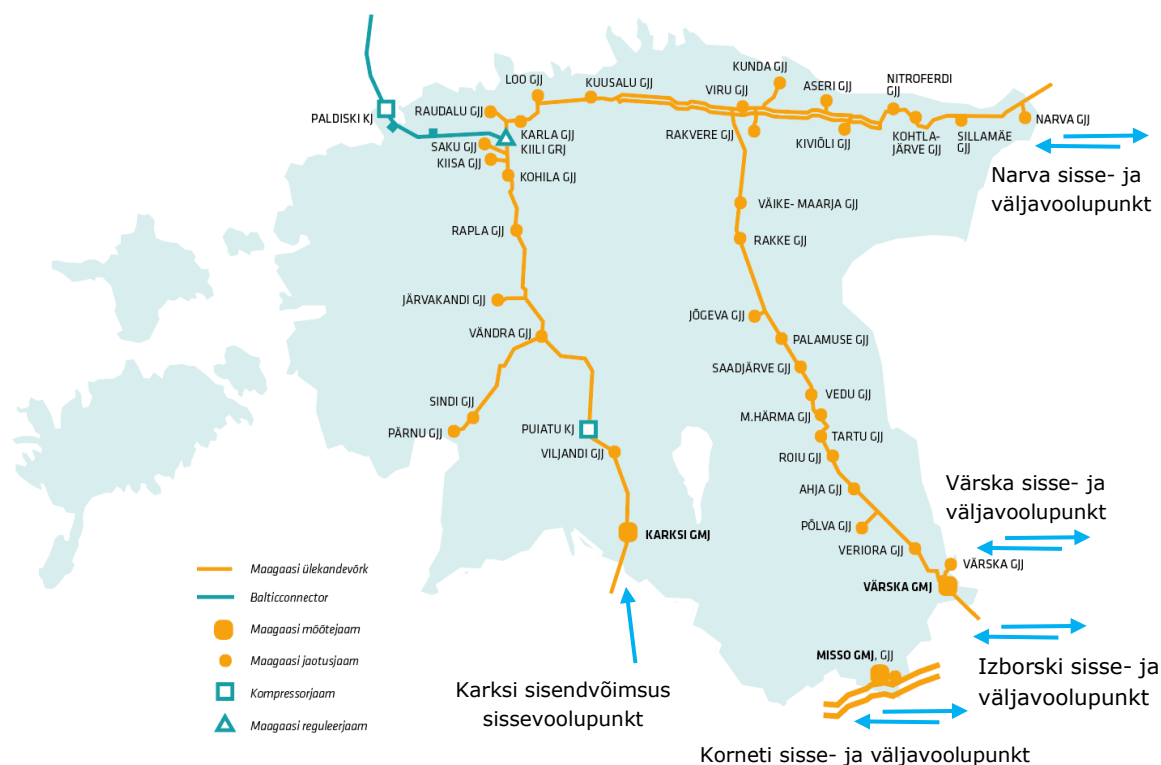
Eestis on maagaasiseaduse kohaselt ainult üks ülekandevõrgu operaator – Elering AS. Maagaasi ülekandevõrkudele juurdepääsu tingimusi ja võimsuse jaotamise põhimõtteid käsitlevad nii määrus 715/2009 [41] kui ka CAM (Capacity Allocation Mechanism) võrgueeskiri (määrus 984/2013) [42]. Kui esimene on Eestile vastavalt maagaasiseadusele kohalduv, siis CAM rakendub alles peale erandi lõppemist.

Eesti maagaasi ülekandevõrgu üldised andmed [44] ja [45]:

- Gaasitorustiku pikkus - 977,4 km
- 3 gaasimõõtejaama (GMJ) ülekandevõrku siseneva gaasi koguste mõõtmiseks ja gaasi kvaliteedi määramiseks.
- 2020. aasta teises pooles valmib Paldiski gaasimõõtejaam, mis võimaldab mõõta Eesti poolel Balticconnectorit läbivat gaasi kahesuunaliselt. Vastava kokkuleppe alusel toimuvad 2020. aastal gaasikoguste mõõtmised Soome poolel, Inkoo gaasimõõtejaamas ning 2021. aastal Eesti poolel, Paldiski gaasimõõtejaamas. Ka edaspidi vahetatakse mõõtmiste juhtimist üle aasta.
- 36 gaasijaotusjaama (GJJ), ülekandevõrgust väljuva gaasi rõhu redutseerimiseks, koguste mõõtmiseks, lõhnastamiseks ja kokkulepitud tarbimisrežiimi tagamiseks.

- 1 gaasireguleerjaam (Kiili GRJ), mis võimaldab ülekandevõrgu osasid juhtida erinevatel tööõhkudel. Samuti toimub Kiili GRJ-s Balticconnector süsteemi torustikust väljuva gaasikoguse mõõtmine, kuid Kiili GRJ ei liigitu otseselt gaasimõõtejaama alla.
- Eesti gaasiülekandevõrgu sisendpunktid on järgmised:
 - Balticconnector (BC)
 - Värskas
 - Karksi
 - Kagu-Eestis asuvad paralleeltorustikud (Irboska-Inčukalns ja Pihkva-Riia) on Murati ühenduspunktis ühendatud Lätiga ja Luhamaa ühenduspunktis Venemaaga.

Eesti maagaasi ülekandevõrgu põhimõtteskeem koos maagaasi sisse- ja väljavoolupunktidega on esitatud joonisel 1.3.1.



Joonis 1.3.1 Eesti maagaasi ülekandevõrk koos gaasisüsteemi sisse- ja väljavoolupunktidega [44] [45]

Käesolevad paralleeltorustikud pole ülejäänud Eesti gaasiülekandevõrguga ühendatud ning neid kasutatakse eelkõige gaasi transportimisel Venemaa ja Läti vahel. Misso GMJ kaudu on ühendus Läti ülekandevõrguga (Valdai-Pihkva-Riia ja Izborsk-Riia, kaks paralleel-torustikku DN 700) Misso piirkonna gaasiga varustamiseks (jaotusvõrk 3,7 km, 110 tarbijat, võimsus kuni 1000 m³/h). Misso ühendusel puudub ühendus Eesti ülekandevõrguga [45].

Narva ühendus on kasutatav ainult tehnilisel eesmärgil ehk torustikel läbiviidavatel hooldus- või remonditöödel ning ka avariikorral. Alates 2019. aastast Narva ühendus ei ole kasutatav Gazpromi poolt teostatava renoveerimise tõttu [44].

2019. aasta seisuga puudub Eesti gaasisüsteemil oma kompressorjaam. Gaasi ülekandeks vajalik rõhk tagatakse Venemaa ülekandesüsteemis asuvate kompressorjaamadega või Lätis asuva Inčukalnsi maa-aluses gaasihoidlaga.

Eesti gaasiühenduste läbilaskevõimsused ööpäevas on järgmised [45] [46]:

- Karksi ühendus Lätiga 68,3 GWh/päev (sisendrõhul 45 bar) või 7 mln kuupmeetrit (sisendrõhul 40 bar)
- Värska ühendus Venemaaga 38,9 GWh/päev (sisendrõhul 45 bar) või 4 mln kuupmeetrit (sisendrõhul 40 bar)
- Narva ühendus Venemaaga 24,2 GWh/päev (sisendrõhul 30 bar) või 3 mln kuupmeetrit (sisendrõhul 22 bar) (Alates 2019. aastast pole Narva ühendus kasutatav)

Käesolev Eesti gaasiülekandevõrgu arengukava [46] annab ülevaate Eleringi lähiaastate gaasiülekandevõrku tehtavatest investeeringutest ja hindab varustuskindluse olukorda täna ning järgneva kümne aasta lõikes, lähtudes värskendatud lähtelinformatsioonist ja tulevikustsenaariumitest.

1.3.2. Maagaasi tarbimine

Gaasi tarbimine on olnud Eestis alates 2008. aastal pidevas languses. 2019. aastal langes maagaasi tarbimine Eestis 2018. aastaga võrreldes ligikaudu 8% (vt. Tabel 1.3.1). 2018. ja 2019. aasta maagaasibilansid ja nende võrdlus on esitatud tabelis 1.3.1.

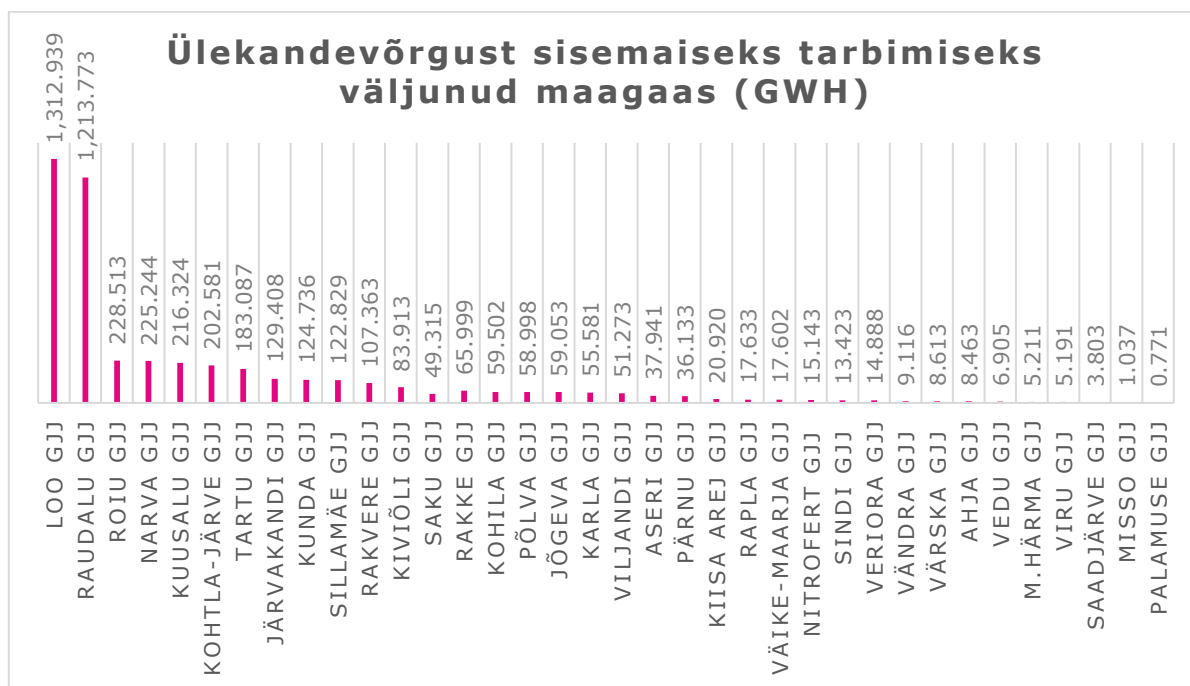
Tabel 1.3.1 Maagaasibilanssi 2018. ja 2019. aasta võrdlus [47]

Gaasibilanss, GWh	2018	2019	Muutus, %
Transiitvoog	15154,5	19180,2	27%
Ülekandevõrku piiriüleselt sisenenud gaas	5241,0	4808,3	-8%
Ülekandevõrgust sisemaiseks tarbimiseks väljunud gaas	5216,4	4773,2	-8%
Ülekandevõrgu kadu, sh omatarve	12,4	12,6	2%
Ülekandevõrgu mahuvaru muutus	3,5	8,3	137%

Joonisel 1.3.2 on välja toodud Eesti maagaasi tarbimine vahemikus 2008 – 2018. Energia kogus MWh-des gaasijaotusjaamade (GJJ-de) lõikes 2019. aastal on esitatud Joonisel 1.3.3, mille andmed anti Eleringi poolt täitjale käesoleva töö käigus.



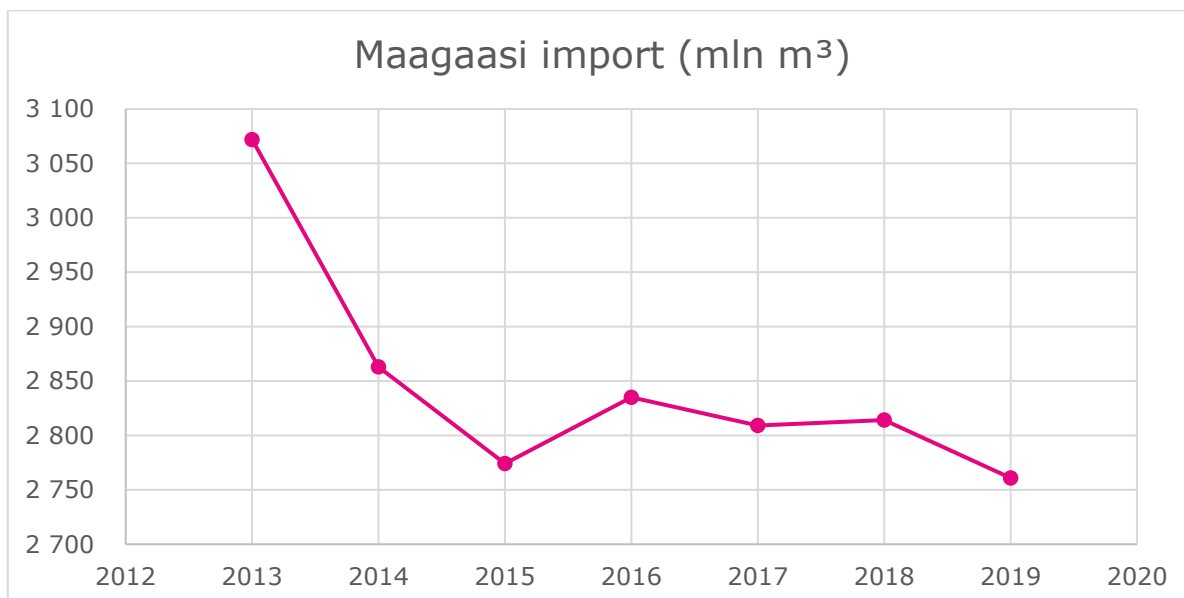
Joonis 1.3.2 Gaasi tarbimine 2008-2018 [46]



Joonis 1.3.3 Ülekandevõrgust sisemaiseks tarbimiseks väljunud maagaas

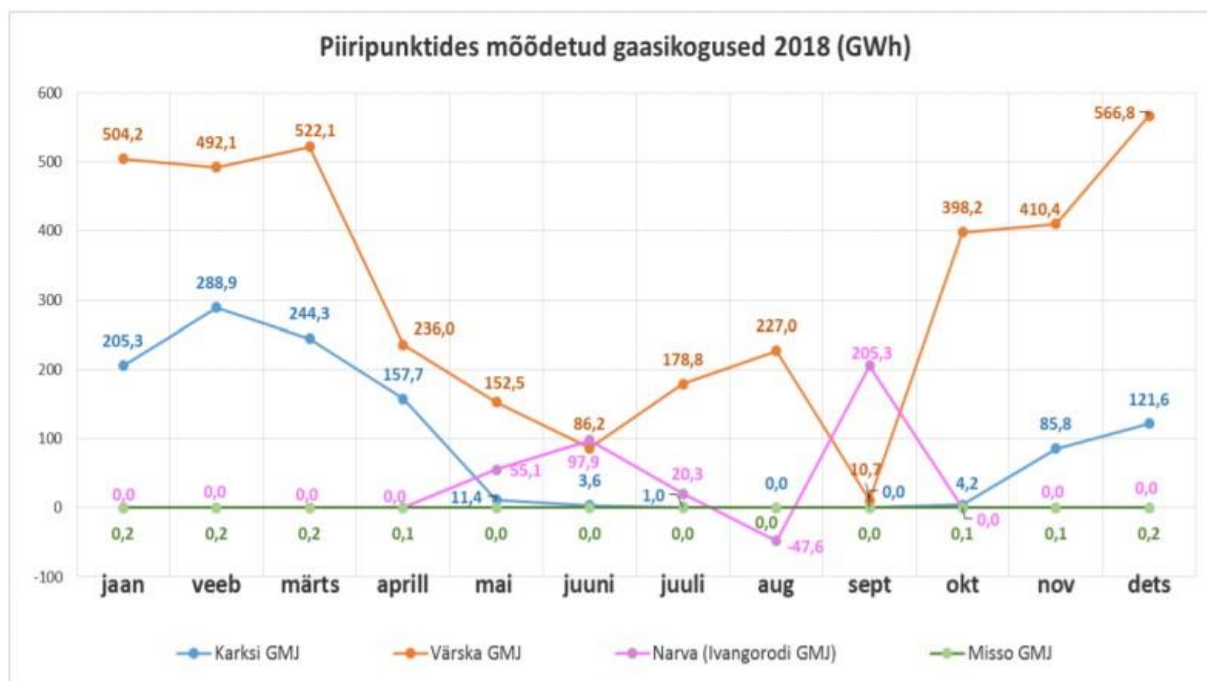
Kvaliteedinõuded on sätestatud Gaasituru toimimise võrgueeskirja paragrahvis 19 ja võrgueeskirja lisas [48] ning annavad juhised ülekandevõrku sisestatava ja selle kaudu edastatava gaasi kvaliteedi näitajate määramiseks. Maagaasi kvaliteeditunnistus avaldatakse esimesel tööpäeval pärast arvestuskuu lõppu. Elingi lehel [49] on võimalik leida kvaliteedi tunnistusi alatest 2016. aasta Detsembrist.

Eestis ega ka Lätis, Leedus ja Soomes maagaasi tootmist ei toimu. Regioonis kasutatakse gaas imporditakse Venemaalt ja LNG maailmaturult. Venemaal toodetud maagaas imporditakse Soome, Eestisse, Lätisse ja Leedusse kasutades kõrgsurve torustike. LNG maailmaturult soetatud gaas tuuakse veeldatud kujul (LNG) laevadega Leedus asuvasse Klaipeda LNG terminali, mis omakorda on ühendatud regiooni maagaasivõrgustikuga. Alloleval joonisel 1.3.4 on näidatud 2013-2019 aasta gaasi import.



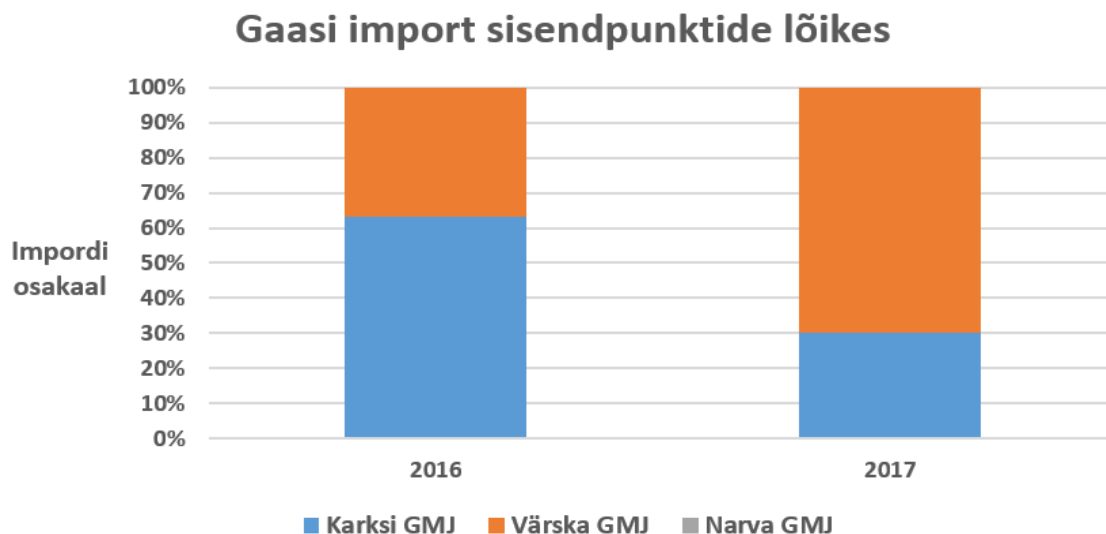
Joonis1.3.4 Maagaasiga varustatus [50]

Joonisel 1.3.5 on esitatud 2018. aasta kuude lõikes piiripunktides mõõdetud gaasikogused.



Joonis 1.3.5 Piiripunktides mõõdetud gaasikogused [46]

2016. ja 2017. aasta import sisendpunktide lõikes on välja toodud joonisel 1.3.6.



Joonis 1.3.6 Gaasi import sisendpunktide lõikes [45]

Võimsuse puudujääki gaasi importimisel ei esine, sest gaasivõrk on üles ehitatud märksa suurema nõudluse tagamiseks. Eesti ülekandevõrgu läbilaskevõime sisendrõhul 40 bari on kuni 14 miljonit kuupmeetrit ööpäevas. Võrdluseks võib tuua, et Läti puhul on samal rõhul maksimaalne ööpäevane impordi kogus 26,48 miljonit kuupmeetrit. Leetu imporditava gaasi rõhk on 54 bari ning maksimaalne imporditav kogus on 37,44 miljonit kuupmeetrit ööpäevas [46].

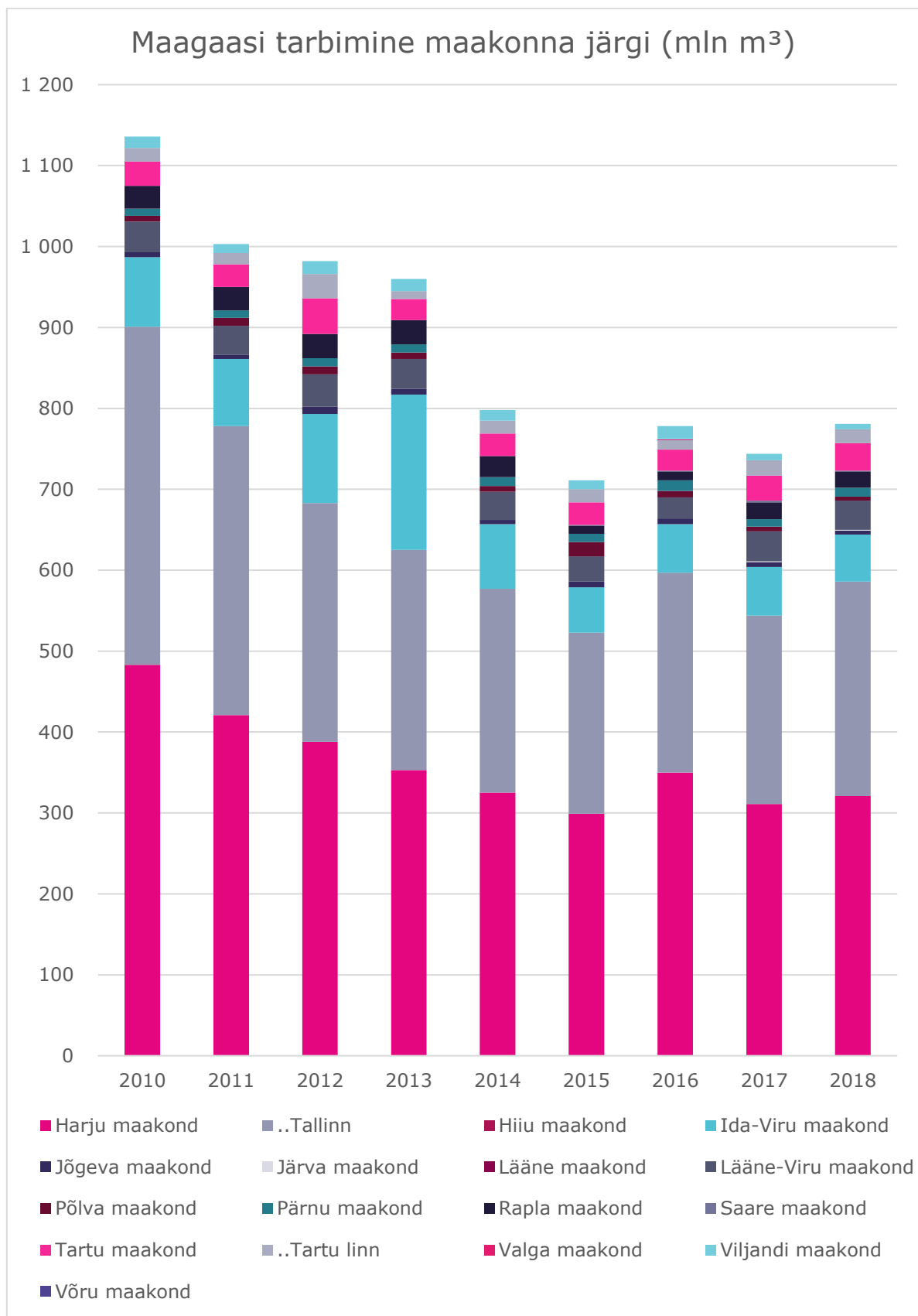
Eesti gaasiturul on avatud alates 2007. aastast. Avatud gaasiturul saab iga tarbija valida endale sobiva gaasi müüja, sealjuures ei ole oluline, kelle võrguga on tarbimiskoht ühendatud.

2018. aastal tegutsesid aktiivselt jaemüüjatena 8 müüjat ja 18 võrguettevõtjat. Gaasi ostjate arv gaasi jaeturul on 51,8 tuhat klienti, kellest 47,7 tuhat on kodutarbijad. 2018. aastal vahetas gaasimüüjat 2058 tarbijat, neist 1827 kodutarbijat (2017. aastal vahetas gaasimüüjat 3029 tarbijat, neist 2798 kodutarbijat). Seega 2018. aastal vahetas gaasi tarnijat 4% klientidest [51].

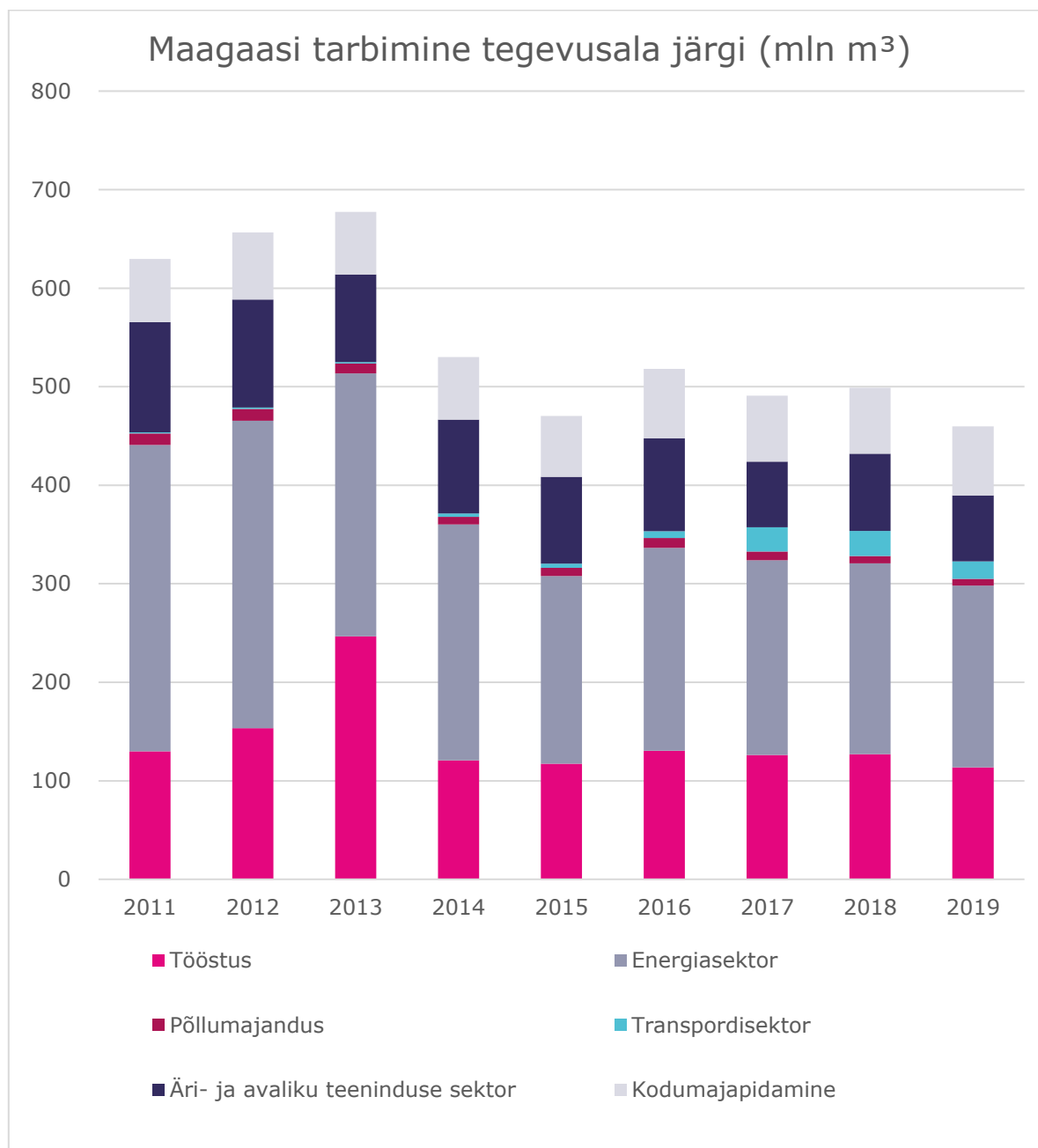
Suurimad maagaasi tarbijad Eestis [45], sh:

- Ülekandevõrguga ühendatud jaotusvõrguettevõtted on Adven Eesti AS, AS Gaasivõrgud, AS Termox, Gaasienergia AS, Tarbegaas OÜ;
- Ülekandevõrguga ühendatud tarbijad on Eastman Specialties OÜ, Enefit Green (endine Enefit Taastuvenergia OÜ) (endine Eesti Energia AS) Iru EJ, Enefit Energiatootmine AS (endine Eesti Energia Narva Elektriijaamad AS), Elering AS (Kiisa avariireservelektriijaam), AS Nitrofert, Remeksi Keskus AS;
- Ülekandevõrgu omatarve.

Joonistel 1.3.7 ja 1.3.8 on välja toodud Eesti gaasitarbimine maakonna ja tegevusala järgi.



Joonis 1.3.7 Maagaasi tarbimine maakonna järgi [50]



Joonis 1.3.8 Maagaasi tarbimine tegevusala järgi [50]

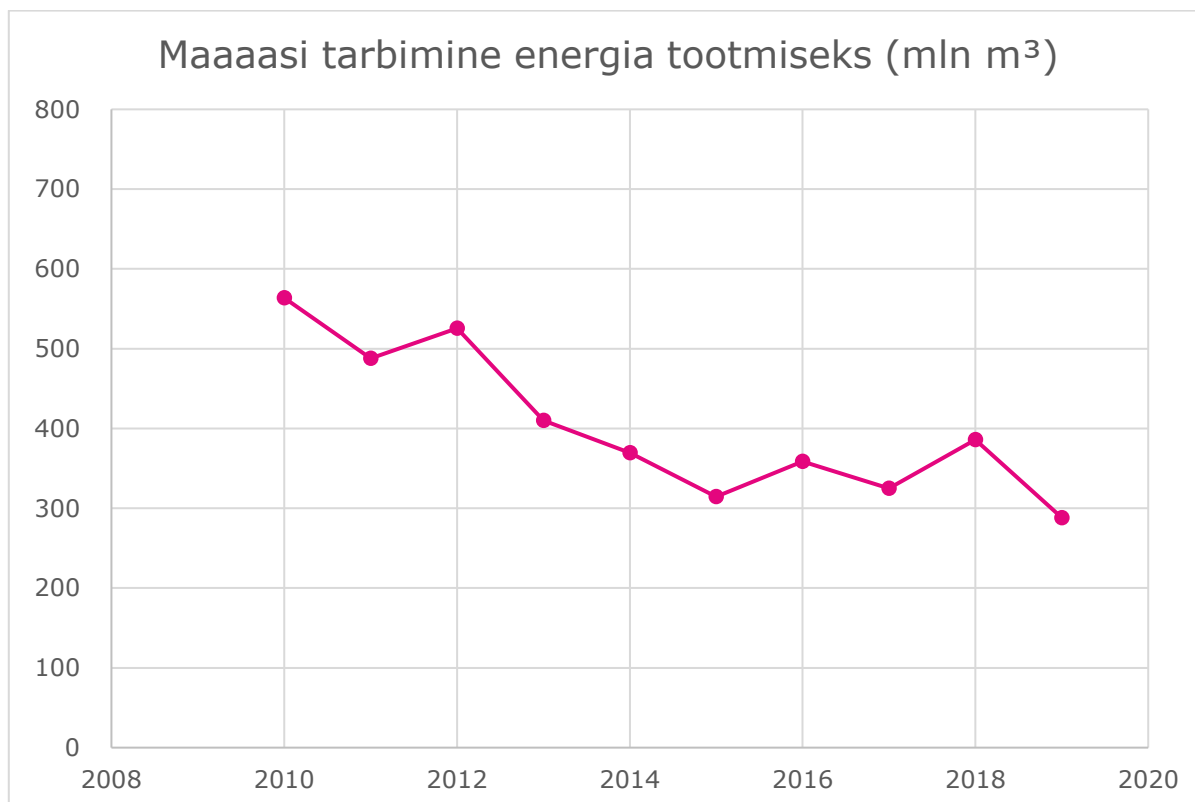
Võrgugaasi lokaalne tarbimine (koosneb tarbimisest kodumajapidamistes ning äri- ja avaliku teeninduse sektoris) kas jääb praegusele tasemele või jätkab mõõdukat kasvu.

Võrgugaasi lõpptarbimine tööstussektoris on tugevas sõltuvuses AS Nitrofert töötamisest. Nitrofert mõjuga mitte arvestades jääb statistiline tarbimiskogus suhteliselt stabiilseks. Sõltuvalt stsenaariumist moodustab võrgugaasi tarbimine tööstussektoris 2025. aastaks 275–715 GWh (tarbimine aastal 2014 moodustas 462 GWh, ehk 8–9% kogu võrgugaasi tarbimisest).

Võrgugaasi tarbimine ülejäänud gruppides (transpordisektoris, põllumajandus- ja kalandussektoris ning tarbimine tooraineks) moodustas 2014. aastal 41 GWh, ehk alla 1%

kogu võrgugaasi tarbimisest. Sõltuvalt stsenaariumist moodustab võrgugaasi tarbimine ülaltoodud gruppides 2025. aastaks 170–1030 GWh, kus peamine eeldatav kasv on seotud võrgugaasi tarbimisega transpordisektoris. Maagaasi tarbimine Eesti transpordisektoris on väga tagasihoidlik.

Joonisel 1.3.9 on esitatud maagaasi tarbimine energia tootmiseks aastatel 2010–2019. Tarbimine elektri ja soojuse tootmiseks on olnud pidevas languses, mis tõenäoliselt jätkub.

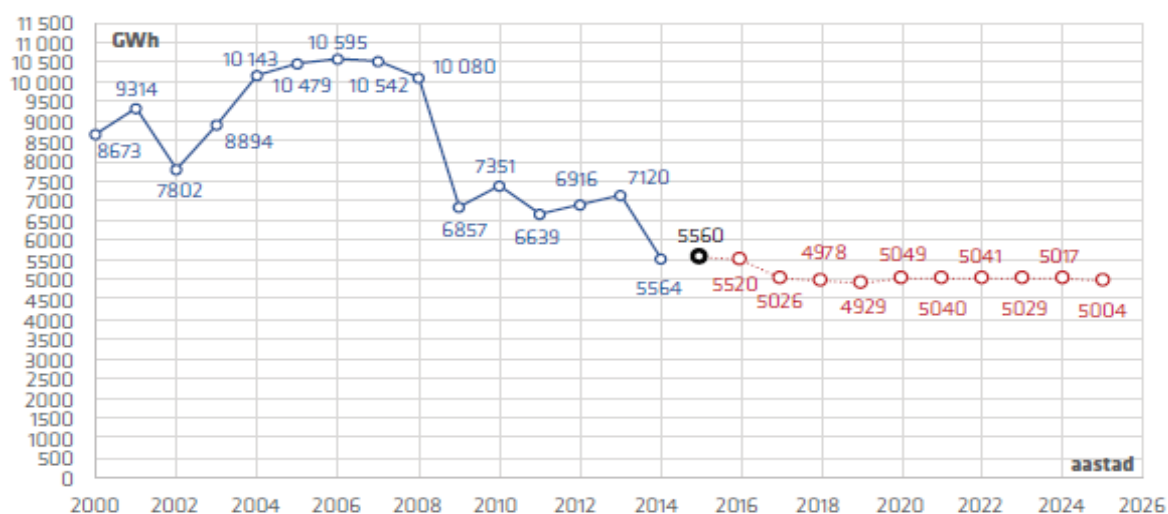


Joonis 1.3.9 Maagaasi tarbimine energia tootmiseks [50]

1.3.3 Maagaasi tarbimise prognoos

Viimane usaldusväärne tarbimise prognoos pärineb 2016. aastast [52]. Põhistsenaariumides vaadeldakse gaasitarbimise tundlikkust erinevate mõjutegurite suhtes ja koostatakse stsenaariumid ning neile vastavad tarbimisprognoosid. Stsenaariumid lähtuvad mõjutegurite eelduste muutmise baasprognoosiga (konservatiivne ehk baasstsenaarium) võrreldes. Käsitatud on Optimistlik stsenaarium (OS) ja Pessimistlik stsenaarium (PS). Optimistliku stsenaariumi korral on arvestatud erinevate tegurite (majanduslikud ja poliitilised) võimalike kasulike koosmõjudega gaasitarbimisele. See tähendab, et võrreldes baasprognoosiga (konservatiivne stsenaarium) on hinnangud võimalike tarbimist soodustavate mõjude rakendamisele realistlikult positiivsed. Pessimistlik stsenaarium on n.ö eelmise pöördstsenaarium, s.t on arvestatud erinevate tegurite (majanduslikud ja poliitilised) võimalike kahjulike koosmõjudega gaasitarbimisele.

Joonisel 1.3.10 on näidatud võrgugaasi aastane kogutarbimine. Koosneb põhistsenaariumidest baasstsenaariumi ja Balticconnectori baasstsenaariumi kombinatsioonina ilma ASi Nitrofert taaskäivitamiseta.

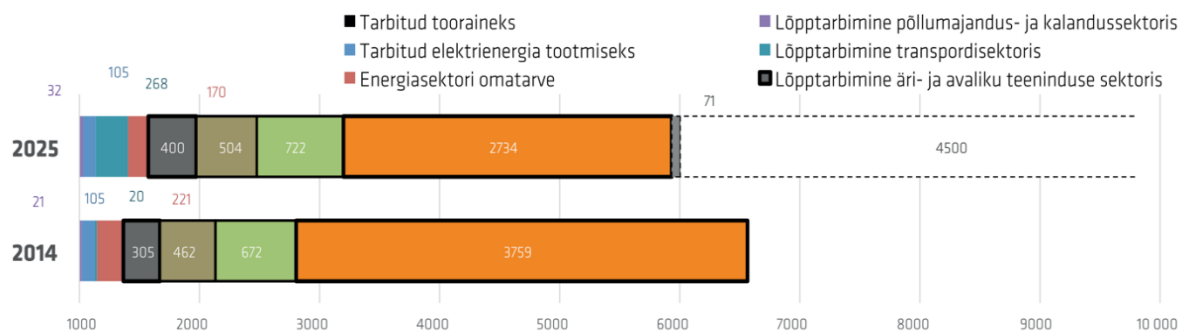


Joonis 1.3.10 Võrgugaasi koondtarbimise aastased kogused (GWh, ülemine kütteväärtus) [52]

Baasprognoosi koostamiseks on kogu tarbimine jagatud gruppidesse vastavalt kasutusalaadele/tarbijatele:

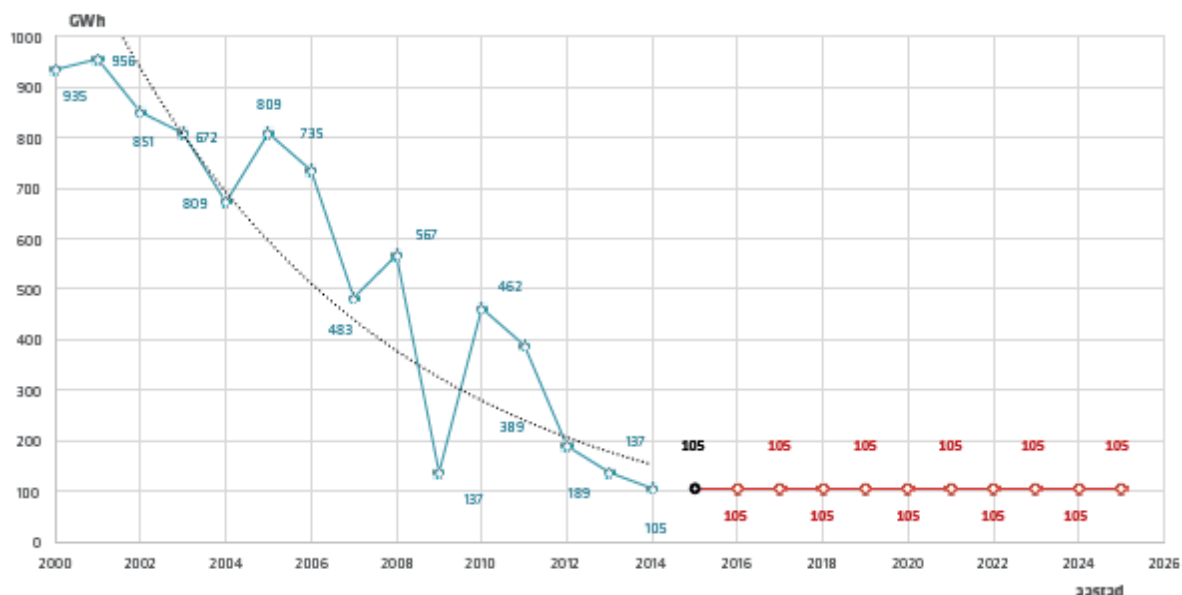
- võrgugaasi kasutamine energeetikas (elektri tootmine, energiasektori omatarve, soojuse tootmine);
- võrgugaasi lokaalne tarbimine;
- tööstustarbimine ja tarbimine tooraineks;
- tarbimine transpordisektoris;
- tarbimine põllumajandus- ja kalandussektoris.

Joonisel 1.3.11 on võimalik näha võrgugaasi koguseid statistiliste gruppide lõikes aastal 2025. Koosneb põhistsenaariumidest baasstsenaariumi ja Balticconnectori baasstsenaariumi kombinatsioonina ilma ASi Nitrofert taaskäivitamiseta.



Joonis 1.3.11 Võrgugaasi kogused statistiliste gruppide lõikes aastal 2025 (GWh, ülemine kütteväärtus) [52]

Eeldati baasprognoosi koostamisel, et maagaasi tarbimine elektri tootmiseks jääb keskmiselt 105 GWh tasemele (vt. Joonis 1.3.12). Võrgugaasi tarbimise võimalik kasv elektri tootmiseks on seotud pigem Iru KTJ maagaasikatelde tööga. See omakorda on võimalik siis, kui elektri ja maagaasi hinnad võimaldavad kasumi saamist. Baasprognoosi koostamisel eeldati, et lähiaastatel selline olukord pigem ei realiseeru.



Joonis 1.3.12 Võrgugaasi tarbimise prognoos elektri tootmiseks (GWh, ülemine kütteväärtus) [52]

1.3.4 Gaasi tarbijaseadmed

Kõige levinumad on katlad, veesoojendid, erinevad küttesüsteemid (gaasikiurgurid, gaasipuhurid ja gaasipõletid) ning pliidid ja praeahjud.

Eestis tohib müüa ainult Euroopa Liidus kehtivate ühtsete standardite alusel turule lubatud gaasiseadmeid. Seadmed peavad olema varustatud etiketiga ja tähisega CE.

Joonis 1.3.13 illustreerib seadme etiketti, mis peab sisaldama minimaalsel hulgal standardiga sätestatud informatsiooni.

Seadme nimetus	StarLux 7025
Toote ID number	CE 0085BP5278
Sihtmaa	AT,CH,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,GB,GR,IE,IT,LT,LU,LV,NO,RO,SE,SI,SK,PT,TR
Kategooria	I_{2H}/I_{2E}
Gaasi nimirõhk	20 mbar
Seadme liik	B_{11BS}
Vee rõhk	0,3 ÷ 10 bar

Joonis 1.3.13 Gaasiseadme etikett [53]

Joonisel toodud märksõnade ja numbrite selgitused:

- ametlik toote nimetus või kaubamärk, mille alusel ta on sertifitseeritud
- CE 0085 – tunnustatud asutuse (milline on antud toote sertifitseerinud) rahvusvaheline kood
- BP5428 – sertifitseerimise ID number ehk kood
- Sihtmaade loend, millistele turgudele on toode lubatud
- Seadme kategooria - I2H tähendab seda, et seade on mõeldud tööks ainult ühe perekonna gaasiga, 2H täpsustab, et seade on häälestatud tööks 2. perekonna H-grupi gaasiga
- Nimi- ehk nominaalne gaasi rõhk on 20 mbar
- B11BS tähendab seda, et tegemist on B-grupi seadmega, indeks 11 näitab, et seade töötab loomuliku ventilatsiooniga (ilma ventilaatorita) ning BS tähistab tõmbeanduri olemasolu
- Normaalseks tööks vajalik vee rõhk küttesüsteemis (soojavee süsteemis)

Gaasitarbimise pikaajaline prognoosis [52] mainitakse, et peamisteks tarbijateks jäävad gaasimootorite baasil töötavad seadmed ning muudel kütustel töötavad elektrijaamad, kus võrgugaasi kasutakse jätkuvalt käivituskütusena. Võimalike uute tootmiseseadmete (väiksemad gaasimootorid) poolt tingitud lisatarbimine kompenseeritakse olemasolevate gaasimootoritega soojuse tootmise energiasäästust tingitud langusega, mis omakorda mõjutab ka elektri tootmist.

Põlemisel juhitavad kondensatsioonikatel (CCCB) on tehnoloogia, mis võib pakkuda suurt paindlikkust erinevatest allikatest pärinevate gaaside ja taastuvenergia tootmise (biometaan ja vesinik) kasutamisel. Tehnoloogia on juba mõnel Euroopa turul kasutusele võetud sh Eestis. Siiski toimub pidevalt tehniline edasiarendus. CCCB tehnoloogia võeti esmakordselt turul kasutusele 2001. aastal ning vahepeal on seda 11 Euroopa tootjat edasi arendanud ning täna on neil pakkunud väga erinevate võimsustega katlaid. Nimetatud Tootjatel on Euroopas erinevad turustuspiirkonnad ja praegu tarnib igasse 26 Euroopa riiki vähemalt üks tootja [54].

1.4. Vesiniku mõjude vähendamise tehnoloogiad

Vesiniku väikesed kontsentratsioonid ei avalda üldjuhul suurt mõju gaasisüsteemile. Kõige tundlikumad elemendid vesiniku sisalduse kohta süsteemis on tööstustarbijad, kelle toorainele on väga kõrged puhtuse standardid ning kromatograafid maagaasivõrgus. Suuremate kontsentratsioonide korral võib tekkida ka muid mõjusid gaasivõrgu elementidele ja tarbijatele, nagu torustik, kompressorid, liitmikud, CNG sõidukite kütusepaagid, gaasiturbiinid ja muud.

Vesiniku mõjusid gaasisüsteemi kriitiliste elementide ja olulisemate tarbijaseadmete suhtes kirjeldatakse detailselt peatükis 2.2.

Sisendi koha pealt tundlike tööstustarbijate mõjude leevendamiseks või elimineerimiseks on võimalik kasutada vesiniku separaatoreid. Separaatorite tüüpe on erinevaid, näiteks separatsiooni membraanid, elektrokeemiline eraldamine ning erinevad kompressoritel töötavad lahendused. Kasutatavatest tehnoloogiatest kõige küpsem on PSA (*Pressure Swing Adsorption*), mida kasutatakse enamasti SMR kütuselementides väljundvesiniku puhastamiseks muudest ainetest. PSA tööpõhimõte seisneb mitmes kompressoris, mis esialgu veeldavad gaasisegust muud gaasid peale vesiniku ning peale eraldamist sisestavad need uuesti maagaasivõrku. PSA lahendus töötab kõige paremini kõrgete vesinikukontsentratsioonide juures ning hinnanguliselt on tehnoloogia väga kalliskasutades seda madalamatel vesiniku kontsentratsioonide korral sisendgaasides (alla ~20%). Ühe uuringu arvutuste põhjal maksab vesiniku separeerimine PSA meetodil vähemalt 51- 200 €/MWh vesiniku kütteväärtuse kohta (olenevalt vesiniku kontsentratsioonist ning installatsiooni suuruselt. Kui tehnoloogiat on võimalik rakendada rõhu alandamise punktis ning seetõttu hoitakse PSA süsteemis kokku energiat ning tehnikat maagaasi süsteemi tagasi suunamise arvelt, on hinnanguliselt võimalik vesiniku separeerimise kulu tuua isegi 5 €/MWh juurde [55] [56].

Separatsioonimembraanide kulutõhususe kohta on saadaval väga vähe praktilisi analüüse, kuid üks 2020. aastal avaldatud teadusartikkel on hinnanud erinevate membraanikonfiguratsioonide abil separeeritud vesiniku hinnaks 3,56-9,8 €/kg (ligikaudu 100-300 €/MWh) [55].

Gaasivõrgu individuaalsete elementide ümber ehitamise või asendamise kulud on kirjanduses võrdlemisi vähe uuritud. On analüüsitud gaasisüsteemi tervikuna täielikult vesiniku transportimisele konverteerimist. Arvutused on üldiselt kontekstipõhised, aga arvestades vesiniku transportimise vajadust 600 km kaugusele, on maagaasivõrgu ümber ehitamisel vesiniku transportimise kuludeks hinnatud 3,7 €/MWh ning uue võrgu rajamisel erinevad sarnased hinnangud vahemikus 4,6-45 €/MWh [2] [18].

Rahvusvahelise Energiaagentuuripoolt tellitud analüüsis on ka välja toodud gaasi kromatograafide asendamise hinnang, mille kohaselt on kromatograafi asendamise ühikhind ligikaudu 13 000€. nimetatud uuringus on antud ka lihtsustatud hinnang mõningate tarbijaseadmete välja vahetamiseks ja ümber seadistamiseks [57].

2. Ülevaade tehnilistest ja keemilistest tingimustest ning nende analüüs

2.1 Toodete keemilised/füüsikalised omadused ja võrdlus standarditega

Uute gaasiliste kütuste ja toodete omadused erinevad maagaasi näitajatest. Vesiniku, süngaasi ja biometaanilise lisamisel ülekandevõrku muutub gaaside segu koostis ja omadused. Üksikelementide ja nende segude omaduste mõistmine on hädavajalik selleks, et tagada gaasivarustuse elementide jätkusuutlikkus ja välistada lisariskide teke.

Gaasivõrku gaasi sisestamise eelduseks on, et oleks täidetud gaasi kvaliteedi ja omaduste kohta kehtestatud nõuded. Võrgugaasi kvaliteedinõuded määrab ja avalikustab võrguettevõtja, kelle võrku soovitakse gaasi sisestada lähtuvalt Euroopa standardis EVS-EN 16726:2015²³ toodud soovistest ja võrguga liitunud tarbijate kasutuses olevatest gaasitarvititest.

Eestis kehtivad nõudmised gaasisüsteemi sisestatava gaasi kvaliteetidele on toodud *Eesti Maagaasiseaduse* [32] alusel koostatud *Gaasituru toimimise võrgueeskirja* [34] lisas *Gaasisüsteemi sisestava gaasi kvaliteeditingimused* [35]. Maagaasi kvaliteedi pidevalt mõõdetakse ja kvaliteeditunnistus avaldatakse esimesel tööpäeval pärast arvestuskuu lõppu maagaasi põhivõrgu operaatori (Elering AS) kodulehel [49].

Kvaliteedi määramise ja jälgimise eesmärgiks kindlustada võrgugaasi kvaliteedi vastavus olemasolevates gaasiseadmetes kasutuseks sobiva gaasi omadustele ning gaasivõrkude ja -seadmete kahjustamise vältimine korrosiooni tekitavate vedelike ja saasteainete poolt. Kvaliteedi tingimuste tagamine on oluline uutest tarneallikatest gaasi ülekandevõrku sisestamise võimaldamiseks.

Maagaasi koostis, mis määrab selle omadusi on suhteliselt stabiilne ja seda saab näha gaasi kvaliteeditunnistustest. Eeldades, et süngaas on metaneerimise tulemusena (CO₂ muundamine metaaniks) saadud metaan (sünteetiline metaan), siis ka süngaasi omadused on hästi määratletavad (ühinevad metaaniga) ja väga lähedased maagaasiga (metaani sisaldus reeglina üle 95%_{mol}¹).

Vesiniku omadused on hästi teada. Eeldades, et toodetud vesinikus põhimõtteliselt ei sisaldu muid komponente, võib selle koostist lugeda stabiilseks. Siiski võib mõnedel juhtudel vesiniku omadused erineda maagasi/metaani omadustest, mille puhul on vajalik eraldisesva analüüsi teostamine.

¹ - edaspidi gaasi parameetrid on gaasi temperatuuril 20°C ja absoluutsel rõhul 101,325 kPa, kui ei ole öeldud teisiti

Suurimad võimalikud koostise kõikumised on seotud biogaasiga. Samas, biogaasi sisestamine gaasisüsteemi on võimalik vaid siis, kui biogaas vastab ülalmainitud gaasisüsteemi sisestatava gaasi kvaliteeditingimustele. Miinimumnõuetele vastava biogaasi, ehk biometaaniga koostis võib oluliselt erineda, samas jäädes miinimumnõuete piiridesse.

Arvestades ülaltooduga, toome eraldi välja peamised metaani ja vesiniku erinevused ja eripärad (vt tabel 2.1.1).

Tabel 2.1.1 Vesiniku ja metaani peamised omadused

Omadused	Vesinik (H ₂)	Metaan (CH ₄)	Ühik
Molaarmass	2.02	16.04	g/mol
Kriitilise punkti parameetrid			
Temperatuur	33.2	190.65	K
Rõhk	13.15	45.4	bar
Tihedus (T = 293.15 K ja P = 1 bar)	0.0838	0.651	kg/m ³
Erisoojus (T = 293.15 K ja P = const)	14.4	2.21	kJ/(kg×K)
Alumine kütteväärtus (1 atm)	120	48	MJ/kg
	11	35	MJ/m ³
Ülemine kütteväärtus (1 atm)	142	53	MJ/kg
	13	39	MJ/m ³
Maksimaalne leegi temperatuur	1800	1495	K
Plahvatuse piirid	18.2–58.9	5.7–14	% _{vol} õhus
Minimaalne hapniku sisaldus põlemiseks	5	12	% _{vol}
Põlemispiirkond	4.1–74	5.3–15	% _{vol} õhus
Isesüttimise temperatuur	560	600	°C
Lahjendatud gaasi viskoossus T = 299 K	9 × 10 ⁻⁶	11 × 10 ⁻⁶	Pa × s
Molekulaarne difusioon õhus	6.1 × 10 ⁻⁵	1.6 × 10 ⁻⁵	m ² /s
Lahustuvus vees	0.0016	0.025	kg/m ³

Leke ja hajumine. Iseloomult on vesinik maagaasist ja õhust kergem ning selle leke torujuhtmetest on umbes 1,3–2,8 korda suurem kui metaani leke ja neli korda suurem kui õhul samades tingimustes [58]. Vesiniku hajuvus õhus on suurem kui maagaasil.

Seetõttu annab vesiniku lisamine maagaasile kergema segu, millel on suurem difusioonikordaja ja suurem mahuline voolukiirus võrreldes metaaniga sama rõhu ja lekkekoha suuruse korral [59].

Tule- ja plahvatusohtlikkus ning ohtude tuvastamine. Vesinik ja metaan on tuleohtlikud gaasid. Tuleohtlikkuse piiride teadmine on aluseks asjakohaste ohutusmeetmete rakendamiseks.

Vesinikurajatiste peamiseks ohtudeks on kontrollimatust eraldumisest (vt eelpool toodud Leke ja hajumine) ja süttimisest põhjustatud tulekahjud ja plahvatused. Kuigi isesüttimine on alati võimalik iga tuleohtliku gaasi korral, on vesinik selle nähtuse suhtes eriline. Selle põhjuseks on vesiniku madal süttimisenergia ja asjaolu, et erinevalt enamikust gaasidest vesiniku temperatuur suureneb paisumisel kõrgemast rõhust madalamale [60].

Suletud keskkonnas on igasuguse suurusega vesiniku leke murettekitav, kuna inimene ei ole võimeline vesinikku tuvastama ja see võib süttida õhus väga laia kontsentratsiooni vahemikus. Pealegi põleb vesinik kahvatu sinise leegiga, mis ei ole päevavalguses nähtav, puudub ka suits ning leek kiirgab süsivesinikega võrreldes vähem soojuskiirgust.

Maagaas on samuti lõhnatu, kuid maagaasi lisatakse väävlit sisaldavat lõhnaainet, et inimesed saaksid maagaasileket tuvastada. Täna ei kasutata lõhnaaineid koos vesinikuga, kuna pole teadaolevaid lõhnaaineid, mis oleksid piisavalt kerged selleks, et liikuda koos vesinikuga samal dispersioonikiirusel. Praegused lõhnaained saastavad ka kütuseelemente, mis on vesiniku tarbimise mõistes väga oluline seade.

Gaasi tuvastamise seadmed, mis on arendatud töötamiseks maagaasiga, võivad olla mitte tundlikud erinevatele maagaasi ja vesiniku segudele (kaasaarvatud puhas vesinik).

Vesiniku lisamine maagaasile vähendab segu soojuskiirgust (seda väiksem mida suurem on vesiniku sisaldus) [59]. Seega vesiniku põlemine (tulekahju) ja selle levik võib jääda tuvastamata [61].

Käeoleva uurimistöö raames teostatud gaasisegude analüüsiks koostati lihtsustatud mudel MS Exceli põhjal. Arvutuste aluseks on võetud gaaside segu moodustavate gaaside (komponentide) moolkontsentratsioonid, moolmassid ja põlemissoojused.

Muud arvutusteks vajalikud sisendandmed on koondatud tabelis 2.1.2 (sinise taustaga väärtused on sisendid ja valge taustaga arvutustulemused).

Tabel 2.1.2 Sisendandmed gaasisegu omaduste arvutamiseks

Temperatuur, t	20	°C
	293.15	K
Rõhk, p	101.325	kPa
Universaalne gaasikonstant, R	8.31451	J/mol.K
kt (1/Vm)	0.041571	kmol/m ³
Molaarruumala, Vm	24.05525	m ³ /kmol
Õhu tihedus (normaaltingimustel) põhk	1.205	kg/m ³
Süsiniku sisaldus, C	12.011	g/mol
Vesiniku sisaldus, H	1.00794	g/mol
Hapniku sisaldus, O	15.9994	g/mol
Lämmastiku sisaldus, N	14.00674	g/mol

Peamised näitajad gaasisegude analüüsiks on Wobbe arv, suhteline tihedus, metaanarv ja kütteväärtus. Vastavalt Majandus- ja taristuministri 28.07.2017 määruse nr 41 „Gaasituru toimimise võrgueeskiri“ lisale „Gaasisüsteemi sisestava gaasi kvaliteeditingimused“ on mainitud suurused järgmised:

- **Wobbe arvu** lubatud vahemik on (13,06 – 14,44) kWh/m³. Wobbe arv on küttegaaside vahetatavuse näitaja, mida kasutatakse erineva koostisega küttegaaside põlemisenergia väljundi võrdlemiseks seadmes. Wobbe arv arvutatakse võrgugaasi mahu kohta väljendatud kütteväärtuse ja suhtelise tiheduse alusel.
- **Suhtelise tiheduse** lubatud vahemik on (0,55-0,7) ja see arvutatakse gaaskromatograafi kontrolleriis vastava koostise alusel.
- **Metaanarvu** lubatud piirväärtus on (>65). Metaanarvu piirväärtusest kõrgemal hoidmine on vajalik seoses Eestis võrgugaasi kasutamisega mootorkütusena (surugaasi tanklad). Võrgugaasi metaanarv on analoogne bensiini oktaanarvuga ja piirväärtuse esitamine peab välistama gaasimootorites detonatsiooni tekkimist. Madal metaanarv on seotud gaasis kõrgemate süsivesinike suurema osakaalu tulemusena. Metaanarv arvutatakse standardi EVS-EN 16726 kohaselt gaaskromatograafi mõõtetulemuste alusel.
- **Kütteväärtus** on võrgugaasi mahu või massiühiku põletamisel maksimaalselt saadav energiahulk. Kütteväärtuse määramine on vajalik võrku sisestatud ja võrgust väljastatud gaasi energia määramiseks ning Wobbe arvu arvutamiseks. Lubatud ülemine kütteväärtus on >9.69 kWh/m³.

Kütteväärtus, suhteline tihedus, süsivesinike kuni C6 ja inertgaaside osamahud saadakse gaaskromatograafi mõõtetulemustena.

Wobbe arv saadakse läbi alljärgneva valemi:

$$I_w = V_c \cdot \sqrt{G_s}$$

kus I_w – Wobbe arv; V_c – ülemine kütteväärtus; G_s – erikaal (suhteline tihedus õhu tiheduse suhtes).

Tabelis 2.1.3 on toodud maagaasi kütteväärtuse, tiheduse, suhtelise tiheduse ja Wobbe arvu arvutustulemused, kus sinise taustaga väärtused on sisendid ja valge taustaga arvutustulemused. „Süsivesiniku fraktsioonid C6 ja kõrgemad“ lahtritesse on sisestatud heksaani näitajad. Arvutuste ja tulemuste võrdluse aluseks on võetud juuli 2020.a. maagaasi kvaliteeditunnistus (tabel 2.1.4) [62].

Tabel 2.1.3 Maagaasi kütteväärtuse, tiheduse, suhtelise tiheduse ja Wobbe arvu arvutustulemuste tabel

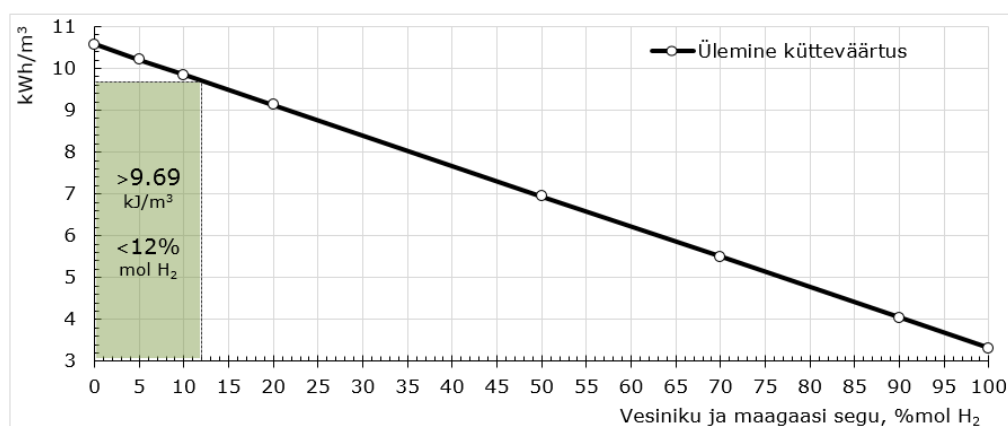
Koostis	Kontsentratsioon				Kütteväärtus					Tihedus, kg/m ³	Suhteline tihedus
	%mol	%maht	%mass	Moolmass, g/mol	kJ/mol _a	kJ/mol _ü	MJ/m ³ _a	kWh/m ³ _a	kWh/m ³ _ü		
Metaan CH ₄	95.855	95.86	91.52	16.04	803	893	33.4	9.27	10.31	0.667	0.553
Etaan C ₂ H ₆	2.398	2.398	4.29	30.1	1428	1564	59.4	16.49	18.06	1.250	1.037
Propaan C ₃ H ₈	0.652	0.652	1.71	44.1	2043	2224	84.9	23.59	25.68	1.833	1.521
Butaan C ₄ H ₁₀	0.099	0.099	0.342	58.1	2653	2879	110.3	30.64	33.25	2.416	2.005
2-metüülpropaan CH ₃ CH(CH ₃)CH ₃ ²	0.103	0.103	0.356	58.1	2869	3095	119.2	33.12	35.73	2.416	2.005
Lämmastik N ₂	0.676	0.676	1.13	28.0	0	0	0.0	0.00	0.00	1.165	0.966
Süsihappegaas CO ₂	0.175	0.175	0.458	44.0	0	0	0.0	0.00	0.00	1.830	1.518
2,2-dimetüülpropaan CH ₃ C(CH ₃) ₂ CH ₃	0	0	0	72.2	3253	3524	135.2	37.56	40.70	2.999	2.489
2-metüülbutaan CH ₃ CH(CH ₃)CH ₂ CH ₃ ²	0.018	0.018	0.0773	72.2	3503	3775	145.6	40.46	43.59	2.999	2.489
n-pentaan n-C ₅ H ₁₂	0.0120	0.012	0.0515	72.2	3251	3522	135.1	37.54	40.67	2.999	2.489
Vesinik H ₂	0	0.0	0.0	2.0	242	287	10.1	2.79	3.32	0.084	0.070
Süsi vesiniku fraktsioonid C ₆ ja kõrgemad	0.0120	0.012	0.0615	86.2	4163	4480	173.1	48.07	51.73	3.582	2.973
Summa	100	100	100	Keskmine	824.1	915.8	34.26	9.52	10.58	0.698	0.580
Wobbe	13.9										

Arvutustulemused (tabel 2.1.3) ja reaalsed gaasi kvaliteedi tunnistusel olevad väärtused (tabel 2.1.4) sarnase sisendkoostisega on liigilähedased. Sama arvutamise loogika on rakendatud erinevate maagaasi ja vesiniku kontsentratsiooniga segude omaduste leidmiseks. Tulemused on koondatud joonistel 2.1.1 – 2.1.3. Metaanarvu muutuse (tabel 2.1.5) iseloomustamiseks on kasutatud Wärtsilä metaanarvu kalkulaatorit [63].

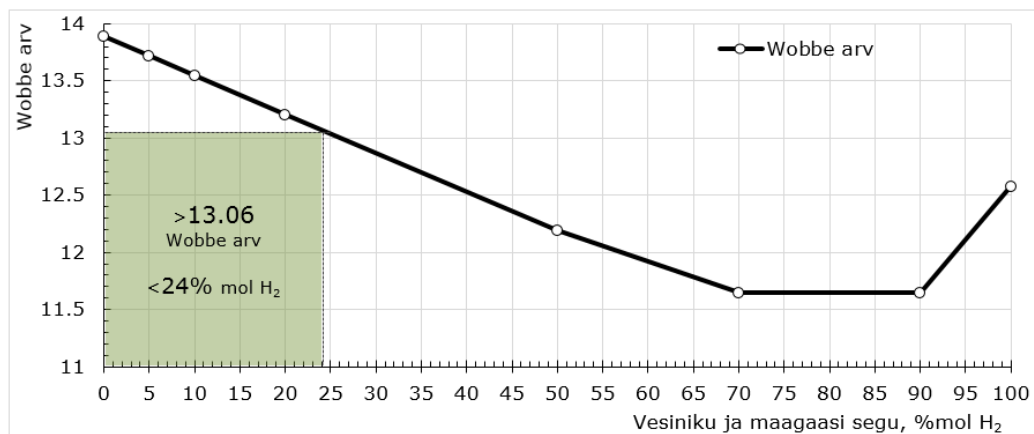
Tabel 2.1.4 Maagaasi kvaliteeditunnistus juuli 2020.a.

GAASI KVALITEEDI TUNNISTUS		
juuli 2020.a.		
1. Kuu keskmine koostis		[mol %]
metaan	CH ₄	95,855
etaan	C ₂ H ₆	2,398
propaan	C ₃ H ₈	0,652
n-butaan	n-C ₄ H ₁₀	0,099
2-metüülpropaan	CH ₃ CH(CH ₃)CH ₃	0,103
lämmastik	N ₂	0,676
süsihappegaas	CO ₂	0,175
2,2-dimetüülpropaan	CH ₃ C(CH ₃) ₂ CH ₃	0,000
2-metüülbutaan	CH ₃ CH(CH ₃)CH ₂ CH ₃	0,018
n-pentaan	n-C ₅ H ₁₂	0,012
süsvesiniku fraktsioonid	C ₆ ja kõrgemad	0,012
Kokku		100,000
2. Kuu keskmine kütteväärtus		
2.1. alumine kütteväärtus		9,528 kWh/m ³ (34,30 MJ/m ³)
2.2. ülemine kütteväärtus		10,56 kWh/m ³ (38,02 MJ/m ³)
3. Kuu keskmine tihedus		
3.1. tihedus		0,6999 kg/m ³
3.2. suhteline tihedus		0,5811
4. Kuu keskmine Wobbe arv		
		13,85 kWh/m ³ (49,86 MJ/m ³)

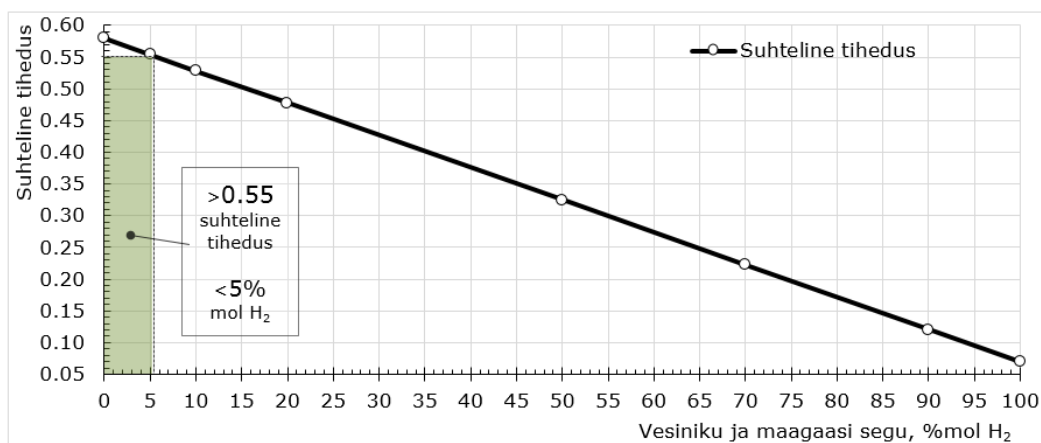
Märkus: Gaasi parameetrid on gaasi temperatuuril 20°C ja absoluutsel rõhul 101,325 kPa



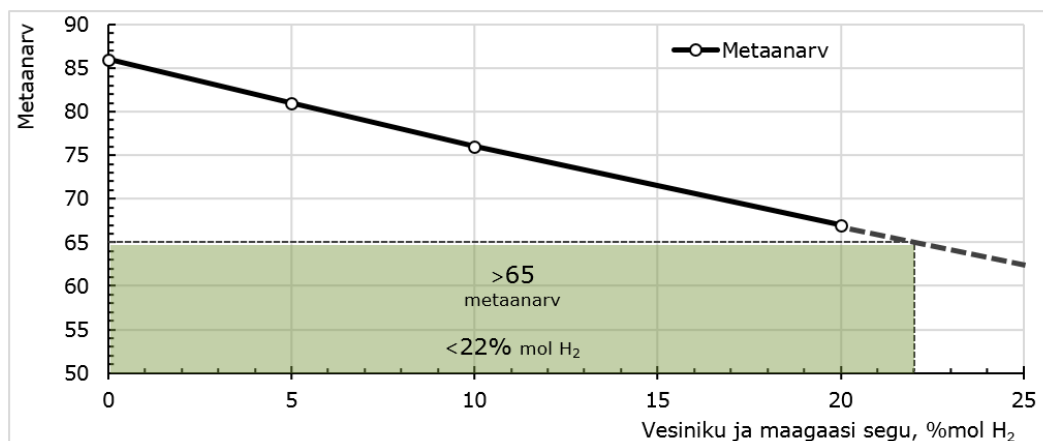
Joonis 2.1.1 Vesiniku ja maagaasi segu ülemise kütteväärtus sõltuvalt vesiniku kontsentratsioonist



Joonis 2.1.2 Vesiniku ja maagaasi segu Wobbe arv sõltuvalt vesiniku kontsentratsioonist



Joonis 2.1.3 Vesiniku ja maagaasi segu suhteline tihedus sõltuvalt vesiniku kontsentratsioonist



Joonis 2.1.4 Vesiniku ja maagaasi segu metaanarv sõltuvalt vesiniku kontsentratsioonist

Joonistel 2.1.1 – 2.1.4 on näha, et gaasisüsteemi sisestatava gaasi kvaliteedi tagamiseks maksimaalne vesiniku kontsentratsioon (aluseks metaanarv, kütteväärtus, Wobbe indeks ja suhteline tihedus) on piirides 5-24%_{mol} H₂. Koondtulemused koos 100% metaani näitajatega on koondatud tabelisse 2.1.5.

Tabel 2.1.5 Maagaasi, metaani ja maagaas/vesinik segude metaanarv, kütteväärtus, Wobbe arv ja suhteline tihedus

Näitajad	Lubatud vahemik ²	Metaan	Maagaas	Vesiniku ja maagaasi segu, %mol vesinik						
				5	10	20	50	70	90	100
Ülemine kütteväärtus, kWh/m ³	>9.69	10.314	10.575	10.21	9.85	9.12	6.95	5.49	4.04	3.32
Wobbe arv, kWh/m ³	13,06-14,44	13.863	13.890	13.72	13.55	13.20	12.19	11.65	11.64	12.58
Suhteline tihedus	0.55-0.7	0.553	0.580	0.55	0.53	0.48	0.32	0.22	0.12	0.070
Metaanarv	>65	100	86	81	76	67	märkus ¹			0

¹ - Kasutatud Wärtsilä metaanarvu kalkulaator ei võimalda arvutamist metaani sisaldusega alla 70%mol

²- Majandus- ja taristuministri 28.07.2017 määruse nr 41 „Gaasituru toimimise võrgueeskiri“ lisale „Gaasisüsteemi sisestava gaasi kvaliteeditingimused“

Puhta metaani kasutamisel on täidetud kvaliteeditingimused. Vesiniku ja maagaasi segu ei vasta suhtelise tiheduse nõudmistele alates vesiniku kontsentratsioonist 5%_{mol}.

2.2 Vesiniku ja süngaasi potentsiaalne mõju erinevate võrku antavate tasemete juures võrgule ja tarbijaseadmele

Peatükk 2.2 põhineb enamasti Marcogaz (Technical Association of The European Natural Gas Industry) poolt avaldatud (01.10.2019) infomaterjalil [64]. See annab ülevaate aruande kirjutamise hetkel Marcogaz poolt analüüsitud allikate katsete tulemustest ning vesiniku kontsentratsiooni piirväärtuste mõjudest maagaasi infrastruktuurile ja lõpptarbijatele. Ülevaate infomaterjali koostamiseks kasutatud allikatest on leitud Marcogaz kodulehelt [65].

Allpool esitatud joonised annavad ülevaate gaasi infrastruktuuri ja tarbijate tehnilisest valmidusest maagaasi ja vesiniku segu vastu võtta erinevate gaasivarustuse tasemete juures. Tulemus on fokuseeritud segu mõjudele materjalide ja elementide toimimise printsiipidele ja ei arvesta mõjudega kasuteguritele, tootlikustele/jõudlusele. Enamikke vaadeldud elementide oluliseks osaks on erinevat tüüpi tihendid. Nende vastupidavus vesinikule omab olulist rolli kogu elemendi sobivusele teatud vesiniku kontsentratsioonile. Samas, leitud ja analüüsitud allikates vesiniku mõjude kirjeldused on suunatud reeglina tervikule elementidele. Seega edaspidiselt elementide tihenditega seotud eripärad on mainitud vaid siis, kui need olid viidatud allikates eraldi väljatoodud.

Lisaks Marcogaz infomaterjalile on uuritud uuemaid, aastal 2020 avaldatud töid mis käsitlevad vesiniku potentsiaalset mõju erinevate maagaasivõrku antavate tasemete juures võrgule ja tarbijaseadmetele.

Maagaasi võrk, rõhu reguleerimine ja mõõtmine. Üks piiravatest faktoritest on vesiniku gaasivõrku sisestamisest tulenevad ohud olemasolevate torustikute vastupidavuse osas. Koondandmed vesiniku kontsentratsiooni mõju kohta maagaasi võrgu elementidele on toodud joonisel 2.2.1.

Peamiseks probleemiks vesiniku lisamisel maagaasivõrku on vesinikhaprumine (vesiniku lahustamine metallis), mis võib esineda rauast ja terasest valmistatud torudes ning võib põhjustada pragude teket torustikus [56], [66]. Vesinikhaprumine on ainus vesiniku poolt tekitatud kahjustuse tüüp, mille korral keemilisi reaktsioone ei toimu ning seega ei moodustu teisi ühendeid. Seetõttu on vesinikhaprumise jälgimine ja tuvastamine keeruline. Vesinikhaprumine tuleneb vesinikusüsteemi pikaajalisest kasutamisest, mille tulemuseks on materjalide mehaaniliste omaduste vähenemine [67].

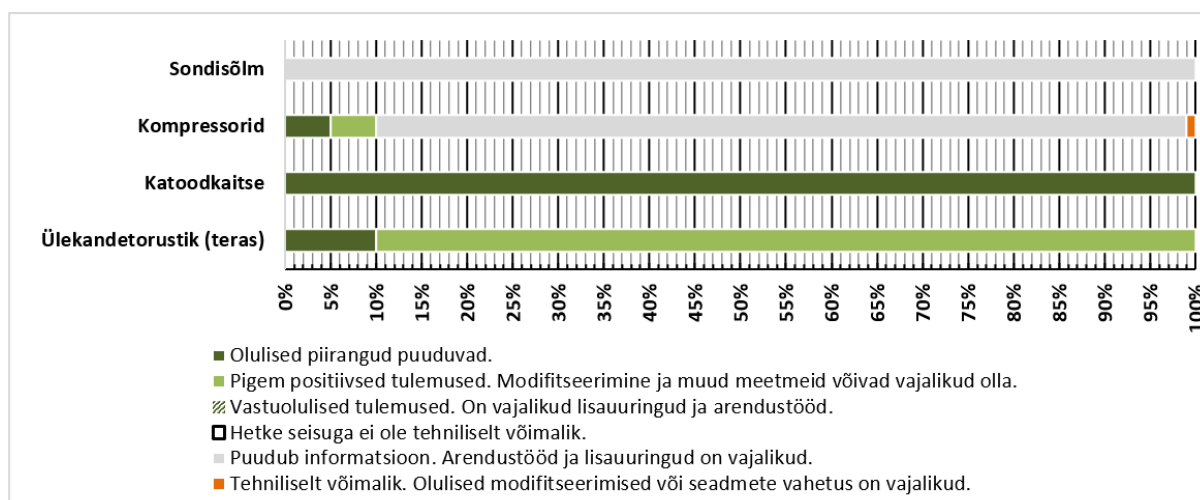
Vesinikhaprumine mõjutab vesiniku sisaldavate gaaside säilitamise ja edastamise süsteemide toimivust [59].

Mõju sõltub terase margist, vesiniku kontsentratsioonist, torustiku vanusest, valmistamise tehnoloogiast, rõhust, temperatuurist, välistingimustest, töötingimustest (töörõhu muutus) ja seda tuleb uurida iga juhtumipõhiselt [68]. Probleemiks on see, et puudub pikaajaline kogemus vesiniku mõjudest vesiniku erinevate kontsentratsioonidega gaasisegude korral maagaasi edastamiseks kasutusel olevate torustikutele.

Need teadmised on vajalikud potentsiaalselt ohtlike torustiku lõikude asendamiseks või tugevdamiseks. See oleks kulukas, kuid need kulud on täiesti uue võrgu ehitamisega võrreldes tagasihoidlikud.

Üldiselt on kokku lepitud, et ilma tõsiste ohutusprobleemideta saab vesinikku ülekandevõrku lisada madala kontsentratsiooniga. Täpne tase ei ole lõplikult kokku lepitud. Uuringu [66] kohaselt peaks olema lubatud vesiniku lisamine kuni kontsentratsioonini 15-20%_{vol}. Marcogaz poolt analüüsitud allikate kohaselt maagaasi ja vesiniku segu alla 10%_{vol} kasutamine terasest ülekandetorustikus on lubatud oluliste piiranguteta.

Maagaasi ja vesiniku segu mõjusid ülekandetorustikutele uuritakse aktiivselt ning on tähelepanuväärseid arenguid. Näiteks hiljuti (15.08.2020) avaldatud uurimustulemused [69] näitavad, et vesiniku ja maagaasi segu mõju torustikule (testimise objektiks GB20 terastoru) on oluliselt kõrgem, kui puhta vesiniku korral. See viitab asjaolule, et maagaasis sisalduvad lisaühendid (ennekõike CO₂) kiirendavad metalli vananemist.

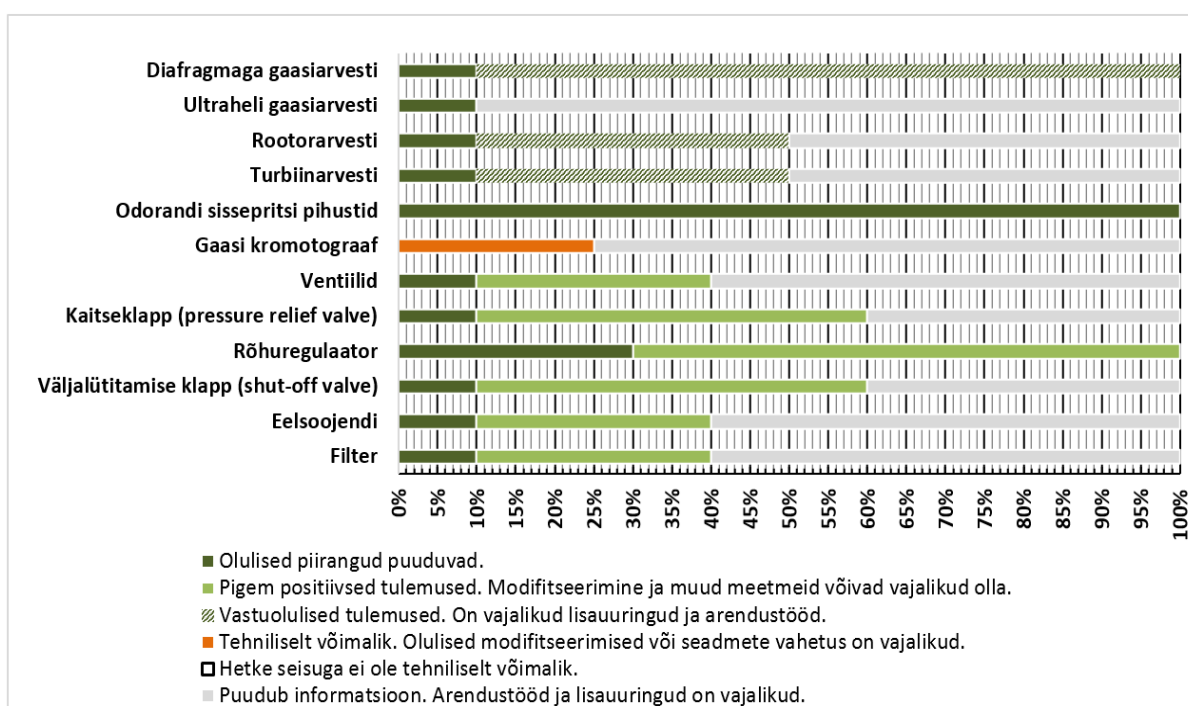


Joonis 2.2.1 Vesiniku kontsentratsiooni (%_{vol}) mõju maagaasi võrgu elementide kasutamise ohutusele/võimekusele

Kompressorite jaoks oluliste piirangute tasemeks loetakse vesiniku kontsentratsiooni 5%_{vol}. Vahemikus 5-10%_{vol} võib olla vajalik modifitseerimine ja muud meetmed. Juuni 2020 avaldatud North Sea Energy hinnangute kohaselt [70] on lubatud olemasolevatele mehaanilistele kompressoritele kuni 10%_{vol} vesiniku kontsentratsioon. Täiendavat uurimist vajaksid kompressori tihendite kaudu tekkiv vesiniku kadu.

Samuti vajavad täiendavat uurimist mõned lisaelemendid, näiteks sondisõlme („pigging” station) tihenduse käitumine kõrgemate vesiniku kontsentratsioonidega. Käesoleva uurimistöö käigus ei õnnestunud leida selle kohta täiendavat informatsiooni.

Koondandmed vesiniku kontsentratsiooni mõju rõhu reguleerimise ja mõõtmise põhielementidele on toodud joonisel 2.2.2.



Joonis 2.2.2 Vesiniku kontsentratsiooni (%_{vol}) mõju peamiste rõhu reguleerimise ja mõõtmise elementide kasutamise ohutusele/võimekusele

Enamus elemente saab kasutada oluliste piiranguteta kui vesiniku kontsentratsioon maagaasi/vesiniku segus ei ületa 10%_{vol}.

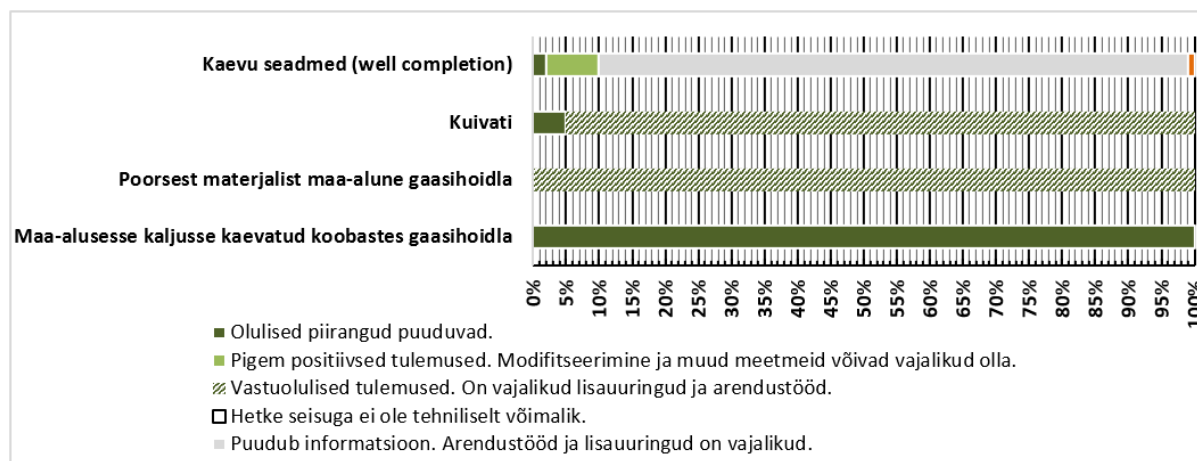
Tundlikuks elemendiks on gaasi kromatograaf. Enamike töös olevate gaasi kromatograafide projekteerimisel (kui eesmärgiks on maagaasi mõõtmine) ei ole arvestatud vesiniku lisamisega. Seega ei ole need gaasi kromatograafid võimelised vesinikkomponenti eraldama ja kvantifitseerima ning ei saa seetõttu mõõta vesiniku ja maagaasi segu kütteväärtust.

Siinjuures on otstarbekas uurida Eestis kasutusel olevate võrgugaasi mõõtmisel kasutatavate gaasi kromatograafide spetsifikatsiooni ja hinnata nende vahetamise vajadust olukorras, kus hakatakse segama vesiniku maagaasivõrku.

Tähelepanu väärt ka gaasi kokkusurutavuse arvutusmeetodite kasutamine. Standardis EVS-EN ISO 12213 toodud arvutusmeetodid on kasutatavad kuni vesiniku osamahuni

10%_{mol} (kokkusurutavuse arvutus toimub gaasi mahu teisendusseadmetes (õigusaktides nimetatud leppekoguse mõõturid) gaasi arvesti mõõdetud gaasikoguse teisendamisel leppetingimustele või normaaltingimustele. Ehk siis vesiniku osamahul üle 10%_{mol} ei saa kasutada olemasolevaid leppekoguse mõõtureid ja need tuleb välja vahetada (praegu ei ole ka Euroopa/Eesti standardiga määratletud arvutusmetoodikat, mis võimaldaks kokkusurutavuse arvutamise, kui vesiniku osamaht on suurem 10%_{mol}).

Maagaasi salvestamine. Koondandmed vesiniku kontsentratsiooni mõju kohta maagaasi salvestamisega seotud põhielementidele on toodud joonisel 2.2.3.



Joonis 2.2.3 Vesiniku kontsentratsiooni (%_{vol}) mõju maagaasi salvestamise peamiste elementide kasutamise ohutusele/võimekusele

Eestis puuduvad suuremahulised maa-alused maagaasi salvestamise objektid. Uuringud ja praktika näitavad vastuolulisi tulemusi poorsest materjalist maa aluste gaasihoidlate sobivusest vesiniku ja maagaasi segudele.

Vesiniku ja maagaasi segu kasutamisega peaks arvestama võimalikke tulevaste maagaasi salvestamise projektide arendamisel. Riskide hindamisel võib arvestada uuringu [71] tulemustega.

Maagaasi jaotus ja kodupaigaldised. Koondandmed vesiniku kontsentratsiooni mõju kohta maagaasi jaotuse ja kodupaigaldiste põhielementidele on esitatud joonisel 2.2.4.

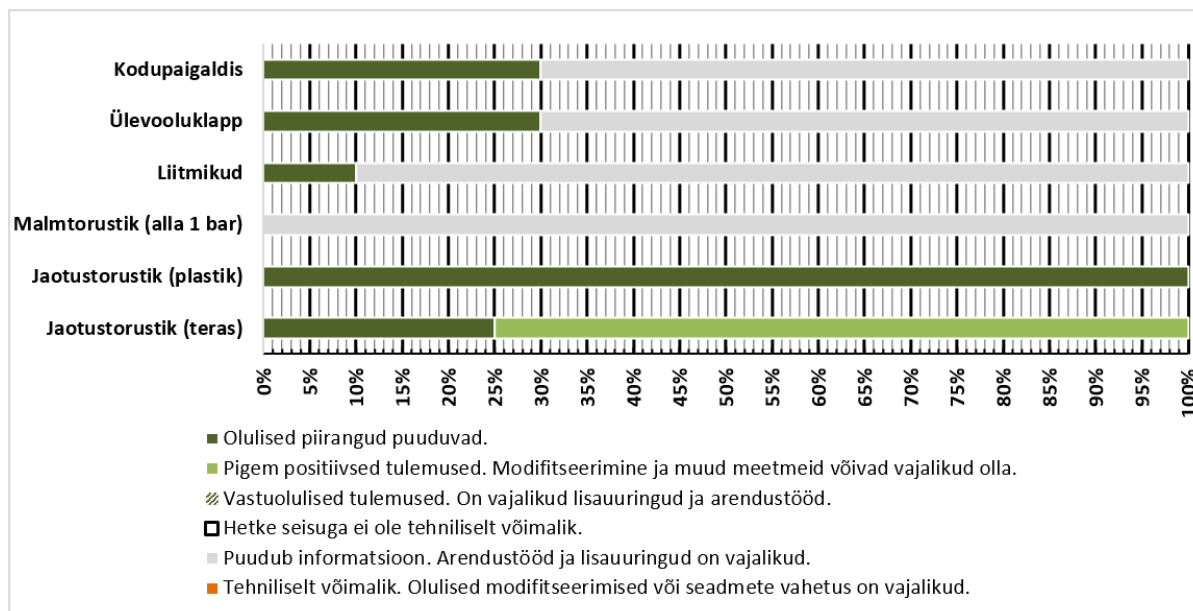
Tänapäeval kasutatakse jaotusvõrkudes sagedamini polüetüleenist gaasitorustike. Vesiniku mõju polüetüleenist gaasitorustikule pidevalt uuritakse. Tuginedes teadaolevatele uuringutele ei ole polüetüleenist gaasitorustik vesiniku suhtes vastuvõtlik [66].

Marcogaz poolt läbiviidud kirjanduse analüüsist selgub, et:

- Enamus maagaasi jaotuse elementidest ja kodupaigaldistest saavad töötada oluliste piiranguteta vesiniku kontsentratsioonil kuni 25-30%_{vol}. Riskide vähendamiseks tuleb vesiniku kontsentratsioonil alates 5%_{vol} näha ette kodugaasiseadete modifitseerimine st põleti düüside ja/või põlemisseadmete vahetus/ümberseadistus.
- Informatsioon maagaasi ja vesiniku segu mõjude kohta madalsurve malmtorustikutele puudub. On teada, et Euroopa on enamus malmtorustikust

asendatud kas plast- või terastorudega. Andmed malmtorustiku kasutamise kohta Eesti maagaasi jaotusvõrkudes puuduvad.

- On vaja läbi viia täiendavaid uuringuid liitmikute vastupidavuse kohta vesiniku ja maagaasi segudele üle 10%_{vol} (alla 10%_{vol} loetakse oluliste piiranguteta kasutamise piirkonnaks).



Joonis 2.2.4 – Vesiniku kontsentratsiooni (%_{vol}) mõju maagaasi jaotuse elementide ja kodupaigaldiste kasutamise ohutusele/võimekusele

Mitmed teised uuringud toetavad joonisel 2.2.4 pakutud tulemusi. Näiteks, NaturalHy projekti tulemusena võib järeldada, et kaasaegsed kodupaigaldised on reeglina suutelised põletama gaasi vesiniku sisaldusega kuni 20%_{vol}. Üle selle kasvab tõenäosus, et paigaldised vajavad ümberseadistamist või väljavahetamist (mis on tõsisem ja kallim ettevõtmine) [66].

Tarbijad. Koondandmed vesiniku kontsentratsiooni mõju kohta kodu- ja tööstustarbivate seadmetele on toodud joonisel 2.2.5.

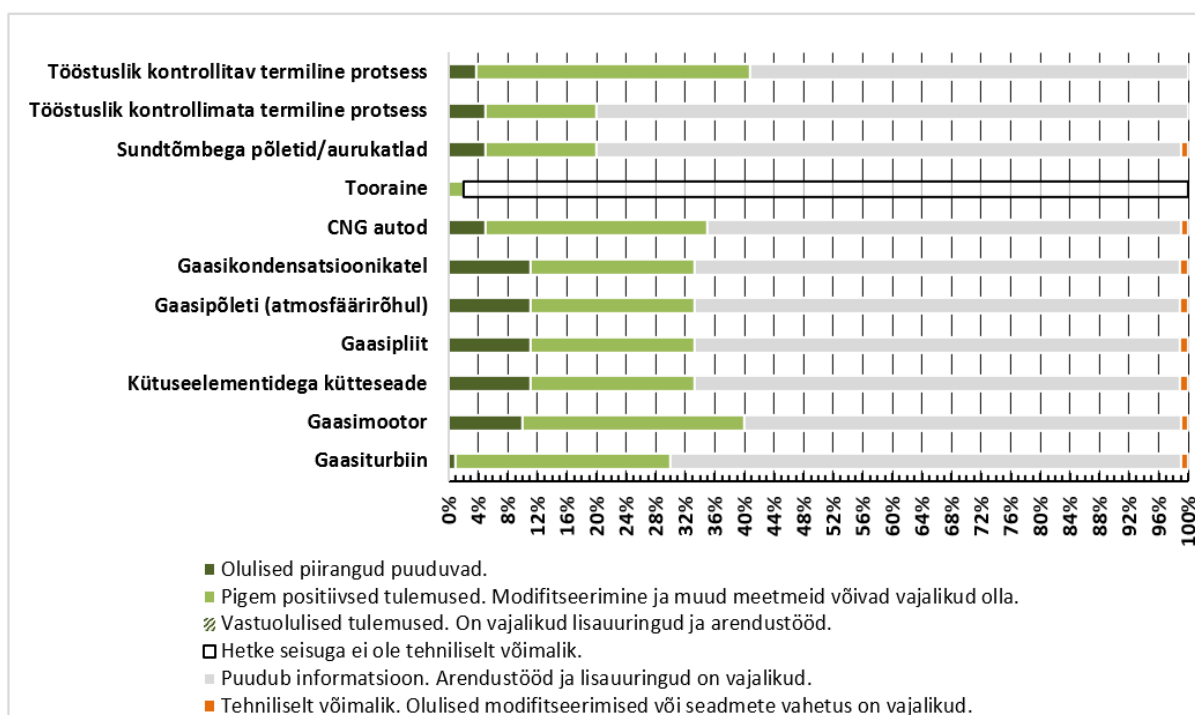
Kodutarbijad. Mitmed gaasiseadmed võivad kasutada maagaasi ja vesiniku segusid. Kaasaegsed kodupaigaldised peavad olema sertifitseeritud vastavalt Euroopa parlamendi ja nõukogu määrusele 2016/426 [72]. Standardis EN 437:2018 Katsetusgaasid. Katsetusrõhud. Tarvitite kategooriad leegi tagasilöögi testimiseks on määratud 23%_{vol} vesiniku sisaldusega G222 gaasisegu, 10%_{vol} vesiniku sisaldusega gaasisegu G28.3B, 20%_{vol} vesiniku sisaldusega gaasisegu G28.4B. Ülekuumenemise testimiseks eeldatud 10%_{vol} vesiniku sisaldusega gaaside segud G28.3A ja G28.4A. Kui seadmed on testitud nende gaasidega, siis vastav vesiniku kontsentratsioon peaks olema lubatud.

Reeglina koduseadmed ei ole väga tundlikud vesiniku sisalduse suhtes ja saavad töötada vesiniku/maagaasi seguga. Mitmed uuringud näitasid, et vesiniku sisaldusel alla 20%_{vol} on üldjuhul võimalik ohutu mitmete kodutarbivate seadmete kasutamine [73].

Gaasimootorid ja gaasiturbiinid. Gaasimootorid ja gaasiturbiinid võivad olla tundlikud lisatud vesiniku suhtes [70]. Gaasimootoreid on võimalik projekteerida töötamiseks erinevate gaaside segudega, isegi puhtal vesinikul. Üldjuhul vajavad maagaasile projekteeritud statsionaarsed gaasimootorid ümberseadistamist vesiniku kontsentratsioonidel üle 10%-20%vol (sõltuvalt infoallikatest) [74].

Gaasiturbiinide töötamine vesiniku kontsentratsioonidel üle 30%vol eeldab pigem tõsisemaid muudatusi konstruktsioonis ja juhtimises.

Vesiniku kõrgem leegitemperatuur võib põhjustada kõrgemaid NO_x heitmeid, mis omakorda võib nõuda täiendavate NO_x vähendamise meetmete rakendamist (näiteks vee sissepritse).



Joonis 2.2.5 – Vesiniku kontsentratsiooni (%vol) mõju tarbijate kasutamise ohutusele/võimekusele

Tööstuslikud tarbijad. Tööstuses maagaasi kasutatakse reeglina kas toorainena (näiteks, vesiniku või ammoniaagi tootmiseks) või kütusena tööstuslike protsesside varustamiseks soojusega [73].

Statistikaameti andmetel ei kasutata viimastel aastatel Eestis maagaasi toorainena [75]. Kui oleksid olemas maagaasi kui tooraine kvaliteedile tundlikud tööstustarbijad, siis üheks lahenduseks oleks vesiniku konverteerimine sünteetiliseks metaaniks ja teiseks separatsioonimembraanide kasutamine vesiniku kontsentratsiooni vähendamiseks [64].

Vesiniku mõju tööstuspõletitele (modelleerimise ja katsetulemuste alusel) on detailselt käsitletud uuringus [76]. Üldiselt tööstuspõletitele ja nende komponentidele esitatakse kõrged nõudmised efektiivsuse, toodangu kvaliteedi ja heitmete osas (näiteks NO_x). Uuringu tulemused näitavad, et sõltuvalt põleti juhtimisest (juhtimisloogikast) on vesiniku kriitiliseks piiriks 10% - 50%vol.

Kõrgemad vesiniku kontsentratsioonid on võimalikud siis, kui on olemas kindel informatsioon kasutatava gaasi koostisest ja omadustest (koostis on aluseks põleti tööparameetrite seadistamiseks).

Üheks riskiks on esile toodud temperatuuripõhise reguleerimisega tööstuslikud termilised protsessid (ahjus asuvaid temperatuuri andureid kasutatakse seadepunktina). Kui temperatuur langeb ahjus allapoole seadme töötemperatuuri, siis gaasikulu kasvab ja vastupidi. Maagaasi korral selline reguleerimisviis on põhjendatud, kuna on olemas hea sõltuvus maagaasi alumise kütteväärtuse ja põlemistemperatuuri vahel. Vesiniku lisamisel on saavutatav kõrge põlemistemperatuur vaatamata vähenenud gaasisegu kütteväärtusele. See omakorda võib põhjustada automaatika vale toimimist (vähendatakse kütuse kulu vaatamata alandatud kütteväärtusele mis omakorda vähendab energia lisamist ahju).

Üldjuhul vesiniku kontsentratsiooni mõju tööstuspaigaldistele peab olema hinnatud juhtumipõhiselt, kuna gaasi kasutamine tööstuses on väga mitmekülgne ning üldiste järelduste tegemine on keeruline [56], [76].

CNG autod. CNG auto elementide projekteerimisel arvestatakse maksimaalse vesiniku sisaldusega 2%_{vol} (Euroopa standardid). Seega võivad kõik CNG autode elemendid olla potentsiaalselt ohtlikud töötamisel kõrgema vesiniku sisaldusega kütusega.

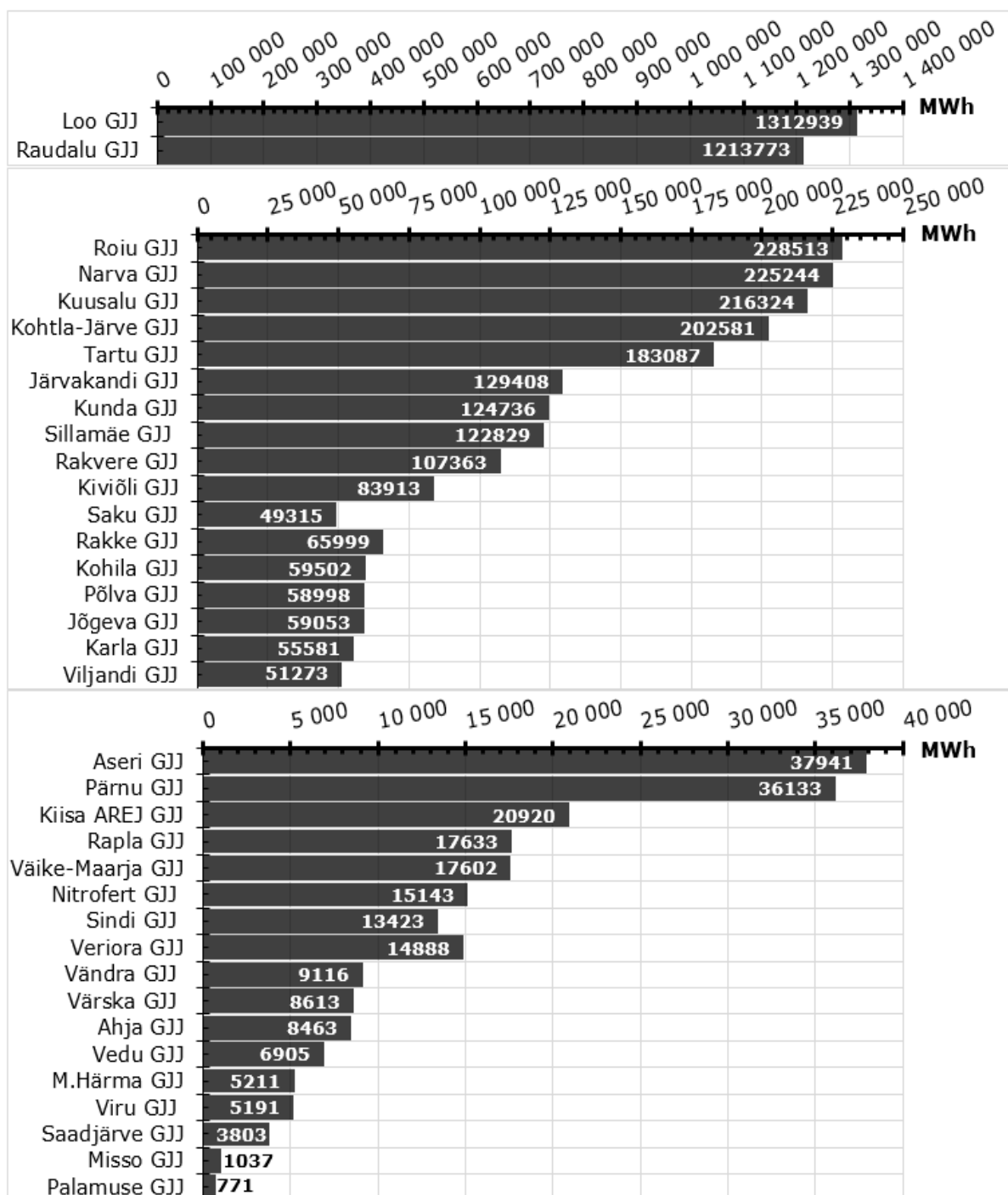
Siinjuures on oluliseks aspektiks see, et Ühinenud Rahvaste Organisatsiooni Euroopa Majanduskomisjoni (UNECE) reeglite kohaselt vastutavad auto tootjad autokomponentide sobivuse eest, sealhulgas CNG paakide eest. See tähendab, et maagaasil töötavaid sõidukeid saaks täna kasutada vesinikku sisaldusega üle 2%_{vol} ainult siis, kui mahukad testid on kinnitanud, et see on ohutu ja täna kehtivaid eeskirju on võimalik muuta. Lisaks CNG paagile võib osutada probleemiks nii metallist kui ka polümeerist valmistatud tihendite leke kuna kõik sõiduki sees olevad gaasi kandvad komponendid on projekteeritud ja testitud maksimaalselt vesinikku sisaldusega üle 2%_{vol}. Seetõttu on kõik sellised komponendid potentsiaalselt kriitilised ja tuleb eelnevalt läbi viia mahukaid katseid nende võime hindamiseks kõrgemate vesiniku kontsentratsioonidega toime tulemiseks. Samas, on leitud, et üldjuhul võiks CNG autode põhielementide lubatud vesiniku sisaldus olla kuni 5%_{vol}. Peamiseks ohuteguriks on terasest kütusepaagid (tüüp 1 CNG paak), millega kaasnevad kõrgendatud vesinikhaprumise riskid. Riske saab välistada, asendades terasest paagid komposiitmaterjalidest paakide vastu. See võib omakorda osutada tõsiseks väljakutseks (näiteks, ainult Saksamaal on umbes 80 300 CNG sõiduautot ja enamus nendest on varustatud tüüp 1 CNG paakidega) [77].

Inimeste ohutus. Võrku sisestatava gaasi nõuete osas on olulisimaks punktiks ohutus inimesele. See tähendab, et kõik gaasituvastusega seotud gaasituvastamise seadmed, mis ei ole tundlikud vesinikule (ei mõõda või käituvad ebakorrektselt), vajavad kaardistamist ja asendamist. Näiteks on nendeks enamus varem mainitud maagaasi koostist mõõtvad gaaskromatograafid, FID ja DIAL tüüpi maagaasi tuvastamiseseadmed.

2.3 Maksimaalsed vesiniku ja süngaasi võrku andmise piirkogused

Aastal 2019 tarbiti Eestis 4 773 222 MWh võrgugaasi (põhivõrgu gaasijaotusjaamade summaarsed kogused).

Gaasi tarbimine gaasijaotusjaamade (GJJ) lõikes on toodud joonisel 2.3.1.



Joonis 2.3.1 Gaasi tarbimine GJJ-de lõikes, MWh (2019)

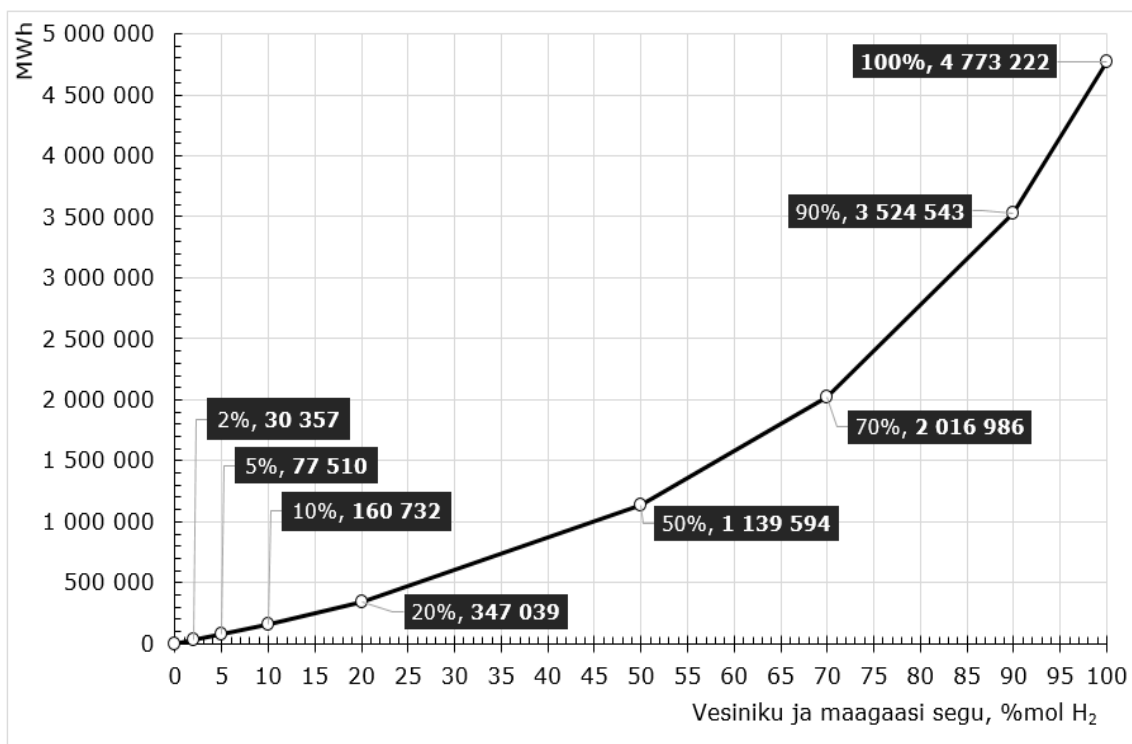
Võrgugaasi tarbimine erineb aasta lõikes oluliselt. Suurim tarbimine on külmematel perioodidel, kuna suur osa tarbitud gaasist kasutakse soojuse tootmiseks kaugkütte katlamajades, eramutes ning äri- ja avaliku teeninduse sektoris (tööstuse ja transpordisektori osakaal ainult umbes 30%) [44].

Maagaasi tarbimist kuude kaupa GJJ lõikes on iseloomustatud tabelis 2.3.1 (protsent näitab tarbitud maagaasi osakaalu aastasest maagaasi tarbimisest GJJ-st).

Tabel 2.3.1 Gaasi tarbimine GJJ-de lõikes kuude kaupa, % aastasest maagaasi tarbimisest GJJ-st (2019)

		Kuu											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Loo GJJ	23%	16%	15%	8%	5%	0%	0%	4%	6%	12%	6%	5%
2	Palamuse GJJ	23%	16%	15%	7%	1%	0%	0%	0%	2%	10%	13%	14%
3	Roiu GJJ	11%	2%	12%	9%	10%	6%	8%	7%	8%	7%	9%	10%
4	Ahja GJJ	16%	10%	10%	8%	5%	2%	4%	7%	7%	12%	10%	9%
5	Aseri GJJ	12%	11%	12%	10%	2%	1%	7%	7%	8%	11%	11%	9%
6	Jõgeva GJJ	14%	9%	9%	7%	7%	3%	3%	9%	10%	10%	9%	10%
7	Järvakandi GJJ	9%	8%	9%	9%	8%	7%	9%	9%	8%	9%	8%	9%
8	Karla GJJ	15%	11%	11%	8%	6%	3%	4%	4%	6%	9%	12%	12%
9	Kiisa AREJ GJJ	4%	4%	3%	5%	7%	18%	12%	27%	4%	3%	4%	9%
10	Kiviõli GJJ	11%	10%	11%	9%	7%	6%	7%	6%	6%	8%	9%	10%
11	Kohila GJJ	9%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	8%	9%	9%
12	Kohtla-Järve GJJ	11%	10%	11%	9%	7%	6%	7%	6%	6%	8%	9%	10%
13	Kunda GJJ	11%	9%	10%	8%	8%	6%	7%	8%	7%	8%	8%	9%
14	Kuusalu GJJ	9%	8%	9%	7%	4%	8%	9%	8%	8%	9%	11%	10%
15	M.Härma GJJ	18%	14%	13%	7%	5%	2%	2%	2%	4%	8%	11%	13%
16	Misso GJJ	19%	14%	13%	7%	4%	1%	1%	1%	4%	9%	13%	15%
17	Narva GJJ	3%	6%	3%	2%	6%	10%	9%	9%	11%	7%	2%	31%
18	Nitrofert GJJ	13%	11%	12%	8%	5%	5%	5%	5%	6%	9%	10%	12%
19	Põlva GJJ	16%	12%	11%	7%	5%	5%	5%	7%	5%	6%	10%	11%
20	Pärnu GJJ	18%	8%	7%	9%	5%	4%	15%	5%	5%	7%	8%	8%
21	Rakke GJJ	9%	9%	9%	8%	8%	7%	8%	10%	10%	8%	8%	6%
22	Rakvere GJJ	15%	11%	11%	7%	5%	3%	4%	7%	7%	8%	10%	11%
23	Rapla GJJ	9%	8%	9%	8%	6%	5%	7%	7%	11%	9%	10%	10%
24	Raudalu GJJ	17%	12%	12%	8%	6%	4%	3%	0%	0%	2%	17%	19%
25	Saadjärve GJJ	15%	11%	11%	5%	4%	1%	5%	11%	8%	8%	10%	10%
26	Saku GJJ	14%	11%	11%	8%	7%	5%	6%	6%	7%	9%	8%	8%
27	Sillamäe GJJ	17%	14%	13%	7%	6%	4%	4%	3%	6%	7%	9%	9%
28	Sindi GJJ	11%	9%	9%	9%	8%	6%	6%	6%	8%	10%	9%	8%
29	Tartu GJJ	28%	22%	10%	3%	0%	0%	0%	0%	3%	9%	13%	12%
30	Vedu GJJ	18%	14%	13%	7%	4%	1%	1%	1%	4%	9%	12%	13%
31	Veriora GJJ	9%	8%	9%	8%	5%	5%	8%	10%	10%	11%	11%	6%
32	Viljandi GJJ	15%	10%	9%	7%	7%	5%	6%	9%	8%	8%	8%	8%
33	Viru GJJ	17%	8%	8%	10%	11%	4%	4%	7%	7%	9%	9%	7%
34	Väike-Maarja GJJ	11%	9%	9%	4%	7%	4%	5%	15%	10%	9%	7%	9%
35	Vändra GJJ	18%	14%	14%	9%	4%	1%	1%	1%	4%	9%	12%	13%
36	Värskas GJJ	15%	12%	12%	8%	6%	3%	4%	4%	6%	8%	11%	12%
	Keskmine	28%	19%	20%	12%	9%	5%	5%	6%	7%	12%	16%	19%

Selleks, et hinnata maksimaalsed vesiniku võrku andmise kogused erinevatel vesiniku ja maagaasi kontsentratsioonidel, arvestame 2019. aasta võrgugaasi tarbimisandmetega. Lisaks sellele eeldame, et maagaasi asendav vesiniku ja maagaasi segu energia kogus on võrdne maagaasi energiaga (joonis 2.3.2).



Joonis 2.3.2 Vesiniku ja maagaasi segus sisalduva vesiniku energia kogus (MWh) sõltuvalt vesiniku moolkontsentratsioonist

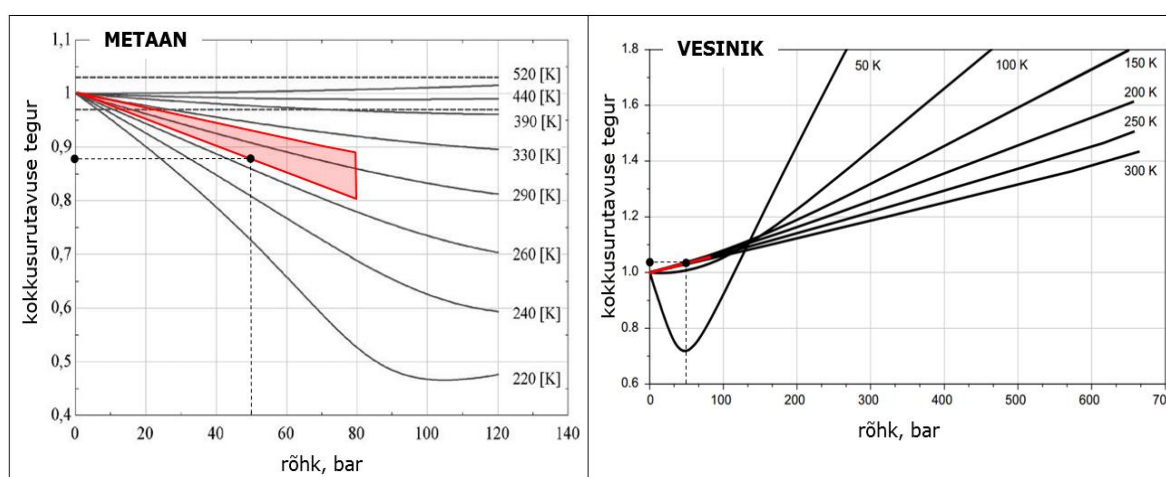
Arvutustulemused näitavad, et kui 2019. aastal tarbitud võrgugaasil vesiniku kontsentratsioon oleks keskmiselt 2%_{mol} normaaltingimustel, siis aastal 2019 oleks võimalik võrku suunata umbes 30 000 MWh vesinikku (aasta keskmine võimsus 3.5 MW). Vesiniku kontsentratsioonil 5%_{mol} ja 10%_{mol} oleksid vesiniku energiakoguse väärtused vastavalt umbes 77 500 ja 161 000 MWh. Lisas 1 on toodud Joonise 2.3.2 alusel koostatud diagramm vesiniku ja maagaasi segus sisalduva vesiniku energia koguse määramiseks sõltuvalt eeldatud vesiniku moolkontsentratsioonist segus. Diagrammis näidatud joone kuju on sama mis joonisel 2.3.2. Selleks, et leida milline oleks vesiniku ja maagaasi segus vesiniku energiakogus (normaaltingimustel) etteantud vesiniku ja maagaasi moolkontsentratsiooni korral tuleb:

1. Leida graafikust vesiniku energiasalduse tegur sõltuvalt eeldatud vesiniku moolkontsentratsioonist vesiniku ja maagaasi segus.
2. Korrutada läbiva/tarbitava maagaasi energiasaldus (normaaltingimustel, enne segunemist vesinikuga) vesiniku energiasalduse teguriga. Tulemuseks on vajalik vesiniku energia kogus etteantud vesiniku moolkontsentratsiooniga vesiniku ja maagaasi segus (kogu segu energiasaldus on võrdne läbiva/tarbitava maagaasi energiasaldusega enne segunemist). Siinjuures tuleb mainida, et kuna vesiniku mahuline kütteväärtus on

maagaasi mahulisest kütteväärtusest oluliselt madalam, siis vesiniku kontsentratsiooni tõstmisel suureneb ka transportiva võrgugaasi maht sama energiakoguse edastamisel.

Allpool on toodud hinnangud metaani ja vesiniku mahu suurenemisele normaaltingimustel ja rõhul 50 bar ning temperatuuril 0°C (273,15 K). Arvutustes on võetud arvesse metaani ja vesiniku kokkusurutavuse tegurid, mis näitavad ideaalgaasi ja reaalse gaasi või gaasisegu tiheduse erinevust etteantud rõhul ja temperatuuril (vt joonis 2.3.3).

Rõhu valiku aluseks (50 bar) on see, et Eesti maagaasi ülekandevõrgu torustiku maksimaalne töö rõhk on piirides 30 – 54 bar, väljaarvatud Balticconnector off-shore osa (kuni 80 bar). Temperatuur 0°C sai valitud, kuna gaasisüsteemi sisestatava gaasi temperatuur peab olema piirides 0–40°C [34] ja suurim erinevus kokkusurutavustegurite vahel on 0°C juures (vt joonis 2.3.3).

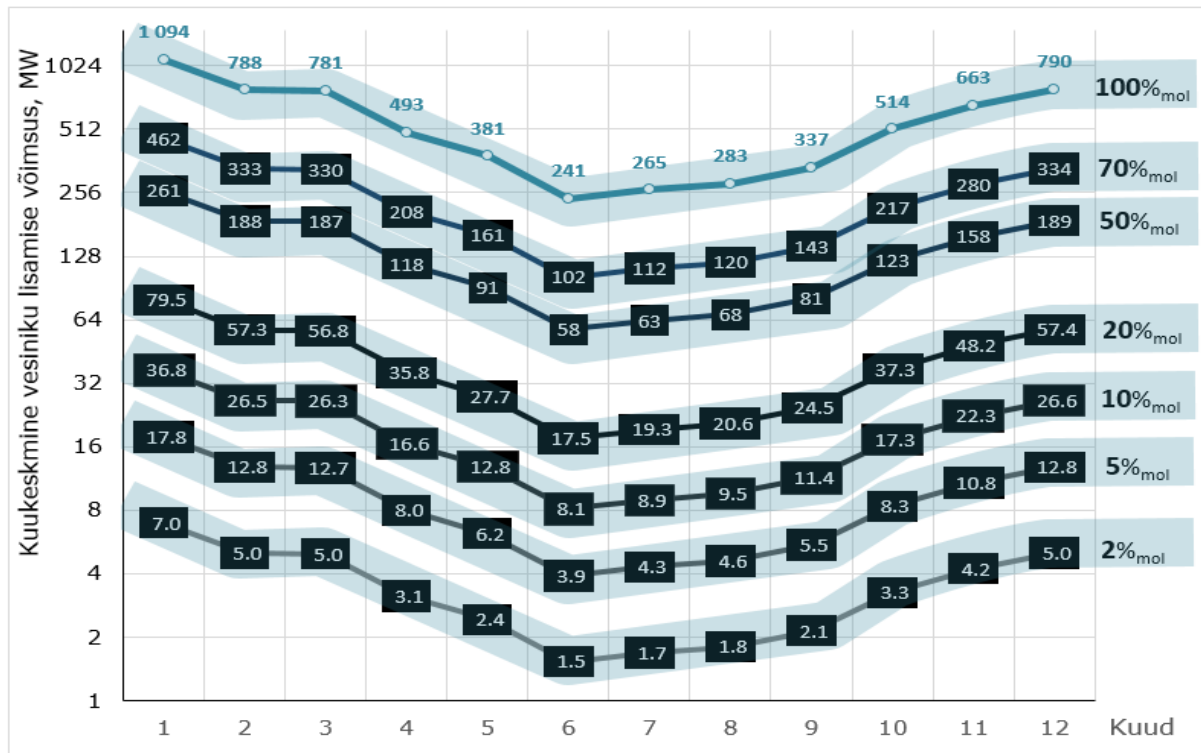


Joonis 2.3.3 Vesiniku ja metaani kokkusurutavuse tegurid vastavalt rõhust ja temperatuurist [78] [79]

Arvutustulemused näitavad, et metaani ja vesiniku kokkusurutavuse tegurite ebasoodne erinevus ning vesiniku madalam kütteväärtus toovad kaasa vesiniku ja metaani segu energiatiheduse vähendamise ($\text{kWh/m}^3_{\text{transportitav}}$) võrreldes puhta metaaniga. Vesiniku mahuline erisoojus normaaltingimustel on 3.1 korda madalam võrreldes metaaniga. Rõhul 50 bar ja temperatuuril 0°C erinevus suureneb 4.9 kordseks (vt tabel 2.3.2). Vesiniku lisamisel maagaasi võrku tuleb arvestada mahulise erisoojuse vähenemisest tulenevate mõjudega.

Tabel 2.3.2 Metaani ja vesiniku mahulised kütteväärtused normaaltingimustel ja parameetritel - rõhk 50 bar ja temperatuur 0°C

	Ülemine kütteväärtus, kWh/m ³	
	Normaaltingimused	50 bar, 0°C
Metaan	10.3	62.1
Vesinik	3.3	12.5
Mahu erinevus metaani ja vesiniku vahel sama energiaühiku edastamisel, korda	3.1	4.9



Joonis 2.3.4 Kuu keskmine vesiniku sisestamise võimsus erinevate vesiniku kontsentratsioonidega (aluseks 2019.a. maagaasi tarbimise andmed)

Kuu keskmist vesiniku sisestamise võimsust erinevate vesiniku kontsentratsioonidega iseloomustab joonis 2.3.4.

Kasutatud kirjandus

- [1] Pacific Northwest National Laboratory, „Hydrogen Tools - Lower and higher heating values of fuels,” Pacific Northwest National Laboratory, [Võrgumaterjal]. Available: <https://h2tools.org/hyarc/calculator-tools/lower-and-higher-heating-values-fuels>. [Kasutatud 4 10 2020].
- [2] European Commission, „Hydrogen generation in Europe: Overview of costs and key benefits,” Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
- [3] International Energy Agency, „The Future of Hydrogen,” International Energy Agency, 2019.
- [4] European Commission, „Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration,” 2020.
- [5] European Commission, „A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe,” 2020.
- [6] JRC, „Hydrogen Use in EU decarbonisation scenarios, JRC116452,” JRC, 2019.
- [7] F. B. M. S. M. Thema, „Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kd. 112, nr 112, pp. 775-787, 2019.
- [8] Energiepark Mains, „Technische Daten des Energieparks,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.energiepark-mainz.de/wissen/technische-daten/>. [Kasutatud 02 10 2020].
- [9] R. Otten, „The First Industrial PtG plant - Audi e-gas as driver for the energy turnaround,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.cedec.com/files/default/8-2014-05-27-cedec-gas-day-reinhard-otten-audi-ag.pdf>. [Kasutatud 1 10 2020].
- [10] International Energy Agency, „Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells,” International Energy Agency, Paris, 2015.
- [11] Danish Energy Agency, Energinet.dk, „Technology data - Renewable Fuels,” Danish Energy Agency and Energinet.dk, Copenhagen, 2020.
- [12] A. Mazza, E. Bompard ja G. Chicco, „Applications of power to gas technologies in emerging electrical systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kd. 92, pp. 794-806, 2018.
- [13] A. Ursua, L. M. Gandia ja P. Sanchis, „Hydrogen Production from Water Electrolysis: Current Status and Future Trends,” *Proc IEEE*, kd. 100, pp. 410-426, 2012.
- [14] A. M. Bazzanella, F. Ausfelder ja DECHEMA, „Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry,” Frankfurt, 2017.

- [15] STORE&GO Project, „Innovative Large-Scale Energy Storage Technologies and Power-to-Gas Concepts After Optimisation,” DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn, 2019.
- [16] H. Böhm, A. Zauner, D. C. Reosenfeld ja R. Tichler, „Projecting cost development for future large-scale power-to-gas implementations by scaling effects,” *Applied Energy*, kd. 264, 2020.
- [17] A. Roes ja M. Patel, „Ex-ante environmental assessments of novel technologies - improved caprolactam catalysts and hydrogen storage,” *Cleaner Production*, kd. 19, pp. 1659-1667, 2011.
- [18] Navigant, „Gas for Climate - The Optimal Role for Gas in a net-zero Emissions Energy System,” Utrecht, 2019.
- [19] J. S. S. M. M. S. M. G. J. L. P. P. S. B. Stefan Rönsch, „Review of methanation - From fundamentals to current projects,” *Fuel*, nr 166, pp. 276-296, 2016.
- [20] M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. M. Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert ja T. Kolb, „Renewable Power-to-Gas: A Technological and economic review,” *Renewable Energy*, kd. 85, pp. 1371-1390, 2016.
- [21] A. M. M. F. P. N. Patrizia Frontera, „Supported catalysts for CO₂ Methanation: A Review,” *Catalysts*, kd. 7, nr 59, 2017.
- [22] B. Lecker, L. Illu ja H. O. Andreas Lemmer, „Biological hydrogen methanation - A Review,” *Bioresource Technology*, kd. 245, pp. 1220-1228, 2017.
- [23] D. Sveinbjörnsson ja E. Münster, „Upgrading of Biogas to Biomethane with the addition of Hydrogen from Electrolysis,” 2017.
- [24] S. M. Jarvis ja S. Samsatli, „Technologies and infrastructures underpinning future CO₂ value chains: A comprehensive review and comparative analysis,” *Renewable and Sustainable Reviews*, kd. 85, pp. 46-68, 2018.
- [25] BioCatProject, „Technology components,” [Vörgumaterjal]. Available: <http://biocat-project.com/about-the-project/technology-components/>. [Kasutatud 4 10 2020].
- [26] J. Gorre, F. Ortloff ja C. v. Leeuwen, „Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage,” *Applied Energy*, kd. 253, 2019.
- [27] International Organization for Standardization, „About us: International Organization for Standardization,” 1946. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.iso.org/home.html>. [Kasutatud 2020].
- [28] European Committee for Standardization, „Who we are: European Committee for Standardization (CEN),” 1961. [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.cen.eu/Pages/default.aspx>. [Kasutatud 2020].

- [29] International Electrotechnical Commission (IEC), „About the International Electrotechnical Commission (IEC),” 1906. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.iec.ch/>. [Kasutatud 2020].
- [30] European Committee for Electrotechnical Standardization, „About CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization,” 1 January 1973. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.cenelec.eu/>. [Kasutatud 2020].
- [31] Riigikogu, „Tehnilise normi ja standardi seadus (lühend - TNSS),” 10 January 2010. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/13327885>. [Kasutatud 2020].
- [32] Riigikogu, „Maagaasiseadus (lühend - MGS),” 01 January 2019. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/112122018052>. [Kasutatud 2020].
- [33] Riigikogu, „Seadme ohutuse seadus (lühend - SeOS),” 18 Veebruar 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/SeOS>. [Kasutatud 2020].
- [34] Majandus- ja taristuminister, „Gaasituru toimimise võrgueeskiri,” 28 July 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/126062019012>. [Kasutatud 2020].
- [35] Majandus- ja taristuminister, „Gaasisüsteemi sisestava gaasi kvaliteeditingimused,” 28 July 2017. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.riigiteataja.ee/akt/1290/7201/7006/MKM_m41_Lisa.pdf#. [Kasutatud 2020].
- [36] Eesti Standardikeskus MTÜ, „EVS 884:2017: Maagaasitorustik. Projekteerimise põhinõuded üle 16 baarise tööõhuga torustikele,” 03 October 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-884-2017>. [Kasutatud 2020].
- [37] Eesti Standardikeskus MTÜ, „About us: Standardikeskusest,” Eesti Standardikeskus MTÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et>. [Kasutatud 2020].
- [38] Eesti Standardikeskus MTÜ, „EVS-EN 1594:2014: Gaasitaristu. Torustikud maksimaalse tööõhuga üle 16 bar. Talitluslikud nõuded,” 04 March 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-1594-2014>. [Kasutatud 2020].
- [39] Eesti Standardikeskus MTÜ, „CEN/TR 13737-2:2014: Gas infrastructure - Implementation Guide for Functional Standards prepared by CEN/TC 234 - Part 2: National Pages related to CEN/TC 234 standards,” 04 February 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/cen-tr-13737-2-2014>. [Kasutatud 2020].
- [40] Eesti Standardikeskus MTÜ, „EVS-EN 16348:2013: Gaasitaristu. Gaasi ülekandetaristu ohutuse juhtimissüsteem (SMS) ja torustiku terviklikkuse

- juhtimissüsteem (PIMS) gaasi ülekandedorustikele. Talitluslikud nõuded," 05 August 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-16348-2013>. [Kasutatud 2020].
- [41] European Parliament; European Council, „Regulation (EC) No. 715/2009," 2009 July 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?qid=1602193463854&uri=CELEX%3A32009R0715>. [Kasutatud 2020].
- [42] European Commission, „Regulation (EU) No. 984/2013," 14 October 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX:32013R0984>. [Kasutatud 2020].
- [43] Konkurentsiamet, „ELERING AS GAASI ÜLEPIIRILISE ÜLEKANDETEENUSE TÕÜPTINGIMUSED," 17 May 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/elering_as_gaasi_ulepiirilise_ulekandeteenuse_osutamise_tuupitingimused_otsus_nr_7-10_2018-015_17.05.2018.pdf. [Kasutatud 2020].
- [44] Elering, „EESTI GAASIÜLEKANDEVÕRGU ARENGUKAVA 2020-2029," Tallinn, 2020.
- [45] Elering, „Gaasituru käsiraamat," [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/sites/default/files/gaasituru-kasiraamat.pdf>. [Kasutatud 2020].
- [46] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Gaasiturg," [Võrgumaterjal]. Available: <https://mkm.ee/et/tegevused-eesmargid/energeetika/gaasiturg>. [Kasutatud 2020].
- [47] Elering, „ELERINGI MAJANDUSAASTA ARUANDE TEGEVUSARUANNE," Elering, Tallinn, 2019.
- [48] Majandus- ja taristuminister, „Gaasituru toimimise võrgueeskiiri," 28 July 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/129072017006>. [Kasutatud 2020].
- [49] Elering, „Võrgugaasi kvaliteet," Elering, [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/vorgugaasi-kvaliteet>. [Kasutatud 2020].
- [50] [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/>. [Kasutatud 2020].
- [51] Konkurentsiamet, „Valdkonna tutvustus," Konkurentsiamet, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.konkurentsiamet.ee/et/elektermaagaas/maagaas/valdkonna-tutvustus>. [Kasutatud 2020].
- [52] Elering, „EESTI PIKAAJALINE GAASI TARBIMISE PROGNOOS," Elering, Tallinn, 2016.

- [53] „Küttegaas kortermajas – praktilisi nõuandeid gaasitorustike ja gaasiseadmete omanikele ja kasutajatele,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.tallinn.ee/est/g7718s53911>. [Kasutatud 2020].
- [54] S. Carpentier, P. Milin, N. Mostefaoui, P. Nitschke-Kowsky, J. Schweitzer, S. Negar ja O. Thibaut, „Self-regulated gas boilers able to cope with gas quality variation State of the art and performances,” October 2018. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/CCCB_Report_final.pdf. [Kasutatud 2020].
- [55] M. Nordio, S. A. Wassie, M. V. S. Annaland, D. A. P. Tanaka, J. L. V. Sole ja F. Galluci, „Techno-economic evaluation on a hybrid technology for low hydrogen concentration separation and purification from natural gas grid,” *International Journal on Hydrogen Energy*, 2020.
- [56] M. W. Melaina, O. Antonia ja M. Penev, „Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues,” 2013.
- [57] H. d. Laat, J. Stappenbelt, P. Peereboom, W. Bouwman, B. d. Bruin, C. Pulles ja M. Hagen, „Reduction of CO₂ emissions by adding hydrogen to natural gas,” 2003.
- [58] F. Rigas ja P. Amyotte, „Myths and Facts about Hydrogen Hazards,” *Chemical Engineering Transactions*, kd. 31, pp. 913-918, 2013.
- [59] Z. L. Messaoudani, F. Rigas, M. D. B. Hamid ja C. R. Che Hassan, „Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: A critical review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, kd. 41, nr 39, pp. 17511-17525, 2016.
- [60] EIGA: EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION, „Hydrogen Transportation Pipelines: IGC Doc 121/04/E,” 2004. [Võrgumaterjal]. Available: https://h2tools.org/sites/default/files/Doc121_04%20H2TransportationPipelines.pdf. [Kasutatud 2020].
- [61] HySafe, „Chapter V: Hydrogen Safety Barriers and Safety Measures,” May 2006. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.hysafe.org/download/1200/BRHS_Chap5_V1p2.pdf. [Kasutatud 2020].
- [62] Elering, „GAASI KVALITEEDI TUNNISTUS,” July 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/sites/default/files/public/Gaas/Gaasis%C3%BCsteem/Maagaasi%20kvaliteeditunnistus%20juuli%202020.pdf>. [Kasutatud 2020].
- [63] Wärtsilä, „Wärtsilä Methane Number Calculator,” Wärtsilä, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wartsila.com/marine/build/gas-solutions/methane-number-calculator>. [Kasutatud 2020].
- [64] Marcogaz, „Overview of available test results and regulatory limits for Hydrogen admission into existing natural gas infrastructure and end use,” 01 October 2019. [Võrgumaterjal]. Available:

https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/energy_climate_change_environment/events/documents/02.c.03_mf33_background_-_marcogaz_-_infographic_hydrogen_admission_-_j_dehaeseleer_g_linke.pdf. [Kasutatud 2020].

- [65] Marcogaz, „Infographic on Hydrogen injection,” Marcogaz, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.marcogaz.org/publications-1/documents/hydrogen-infographic/>. [Kasutatud 2020].
- [66] S. Samsatli ja C. J. Quarton, „Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling?,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kd. 98, pp. 302-316, 2018.
- [67] F. Taminiau, N. G. Díez, R. Peters ja S. Rudolf, „Hydrogen admixture in the Dutch gas grid,” Amsterdam, TNO, 2017.
- [68] GRTgaz, „Technical and economic conditions for injecting hydrogen into natural gas networks,” 2019.
- [69] J. Shang, W. Chen, J. Zheng, Z. Hua, L. Zhang, C. Zhou ja C. Gu, „Enhanced hydrogen embrittlement of low-carbon steel to natural gas/hydrogen mixtures,” *Scripta Materialia*, kd. 189, pp. 67-71, 2020.
- [70] N. G. Díez, S. V. d. Meer, J. Bonetto ja A. Herwijn, „Technical assessment of Hydrogen transport, compression, processing offshore,” North Sea Energy, 2020.
- [71] Ministry of Economic Affairs, „The effects of hydrogen injection in natural gas networks for the Dutch underground storages,” Netherlands Enterprise Agency, The Hague, 2017.
- [72] European Parliament; European Council, „Regulation (EU) 2016/426,” 09 March 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32016R0426>. [Kasutatud 2020].
- [73] Marcogaz, „Impact of hydrogen in natural gas on end-use applications,” 23 October 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.marcogaz.org/app/download/7928117663/UTIL-GQ-17-29.pdf?t=1541666775>. [Kasutatud 2020].
- [74] J. R. Anstrom ja K. Collier, „8 - Blended hydrogen–natural gas-fueled internal combustion engines and fueling infrastructure,” %1 *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Energy Conversion, Volume Three*, kd. 3, Woodhead Publishing, 2016, pp. 219-232.
- [75] Statistika andmebaas, „KE0230: Energiabilanss kütuse või energia liigi järgi (Eurostati meetodika),” Statistika andmebaas, [Võrgumaterjal]. Available: <http://andmebaas.stat.ee/Index.aspx?lang=et&DataSetCode=KE0230>. [Kasutatud 2020].

- [76] J. Leicher, T. Nowakowski, A. Giese ja K. Görner, „Hydrogen in natural gas: how does it impact industrial end users?,” %1 *World Gas Conference 2018*, Washington DC, 2018.
- [77] Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), „Hydrogen in the Public Gas Grid: A Challenge for CNG Transport,” 25-29 June 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/messen/682-wgc-2018-brandes-hydrogen-gas-grid.pdf>. [Kasutatud 2020].
- [78] M. Hirscher ja H. Katsuhiko, *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2010.
- [79] J. N. d. Almeida, J. A. Velasquez ja R. Barbieri, „A Methodology for Calculating the Natural Gas Compressibility Factor for a Distribution Network,” *Petroleum Science and Technology*, kd. 32, nr 21, pp. 2616-2624, 2014.

LISA 1 – Lisatud vesiniku energiasalduse tegur vesiniku ja maagaasi segus sisalduva vesiniku energia koguse määramiseks sõltuvalt eeldatud vesiniku moolkontsentratsioonist

