

TTÜ Energiatehnoloogia instituut

**VESINIK GAASITARNE TORUSTIKES
HYDROGEN IN GAS GRID**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Toomas Toimetaja

Üliõpilaskood: 204013MASM

Juhendaja: Eduard Latõšov,
dotsent/programmijuht

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

Autor: Toomas Toimetaja

/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

Juhendaja: Eduard Latõšov

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

Kaitsmiskomisjoni esimees: Eduard Latõšov

/allkirjastatud digitaalselt/

TAL TECH Energiatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Toomas Toimetaja, 204013MASM (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: MASM02/18 – Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika
(kood ja nimetus)

Juhendaja(d): Eduard Latõšov, dotsent/programmijuht, 6203908
(amet, nimi, telefon)

Konsultant: Ain Laidoja, tegevdirektor (nimi, amet)
Eesti Vesinikutehnoloogiaste Ühing, 5017615, ain.laidoja@h2est.ee
(ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Vesinik gaasitarne torustikes
(inglise keeles) Hydrogen in natural gas grid

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kuidas muudab vesiniku lisamine gaasivõrku gaasisegu omadusi.
2. Kuidas lisada vesinikku tarnetorustikesse ja kuidas mõjutab torustike seisukorda.
3. Vesiniku kasutamise väljavaated Eestis.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö struktuur ja teemade valik.	12.05.21
2.	Lõplik vormistamine.	25.05.21
3.	Retsensioon.	28.05.21

Töö keel: Eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg:

“25”mai 2021.a

Üliõpilane: T. Toimetaja /allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: E.Latõšov /allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: E.Latõšov /allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

EESSÕNA	5
SISSEJUHATUS	6
1. VESINIK JA SELLE TOOTMISE TEHNOLOOGIAD.....	7
1.1 Ajaloost	7
1.2 Füüsilised ja keemilised omadused	8
1.3 Vesiniku tootmine tööstuslikult	10
1.4 Uued tootmise tehnoloogiad	11
1.4.1 Polümeermembraanelektrolüüdiga elektrolüüser	11
1.4.2 Leeliselektrolüüdiga elektrolüüser.....	12
1.4.3 Tahkeoksiid elektrolüüdiga elektrolüüser	12
1.4.4 Maagaasi pürolüüs.....	13
1.4.5 Muud tehnoloogiad	13
1.5 Vesiniku tootmise hind	14
1.6 Vesiniku arengukava	15
1.7 Vesiniku hoiustamine ja transportimine	16
1.7.1 Torustikud.....	17
1.8 Vesiniku tarbijad.....	19
1.9 Vesiniku tulevikusuunad	22
2. VESINIKU LISAMINE MAAGAASILE GAASITARNE TORUSTIKES	25
2.1 Maagaas	25
2.2 Gaasitarne torustikud	26
2.3 Vesinik ja metaan	27
2.4 Segugaasi kütteväärtuse teoreetiline kontroll	30
2.5 Olemasolevate gaasitarne torustike sobivus vesiniku sisaldusele.....	34
2.6 Muud gaasipaigaldised ja torustiku osad	36
2.7 Ohutus	38
2.8 Olukord maailmas	42
2.9 Vesiniku eraldamine segugaasiga torustikust.....	43
3. VESINIKU KASUTAMINE EESTIS	45
3.1 Vesiniku tootmine Eestis	51
3.2 Vesiniku kasutamine ja tarbimine Eestis	52
3.3 Vesinik Eesti gaasitarne torustikes	52
3.4 Eraldi vesiniku torustikud Eestis.....	54
KOKKUVÕTE	57
SUMMARY IN ENGLISH	58
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	59

EESSÕNA

Vesinik on suure kütteväärtusega aine, millel on väga suured energeetilised tuleviku väljavaated. Praeguseks välja arenenud maagaasi infrastruktuur on kõige lähedasem valdkond, mis võib (ja peab) aitama vesinikku populariseerida, aitab kaasa tehnoloogiate arengule (eriti tootmistehnoloogiale) ja aitab kasutada vesiniku tehnoloogia plusse, näiteks keskkonnamõju. Seega oleks vesiniku lisamine olemasolevasse gaasitarne torustikku parimaks vahe-etapiks eraldiseisvate vesiniku torustike võrgu arendamisele. Rohelise vesiniku tehnoloogia on tänapäeval veel kallid, kuid planeerimiseks ja visiooni koostamiseks on käes viimane aeg. Just praegu võib olla ka parim hetk õppida teiste riikide kogemustest ja vigadest ning alustada Eesti enda vesiniku tootmistehnoloogia arendamisega.

Magistritöö teema on inspireeritud püüdlusest siduda töö autori olemasolevat töökohast tulenev spetsiifika AS EG Ehitus Harju piirkonna võrguhoolduse juhina ja seni veel arengujärgus vesinikutehnoloogia.

Lõputöö koostamisel on kasutatud Eesti Vesiniku Tehnoloogiate Ühingu (Ain Laidoja) materjale ja nõuandeid, vesiniku tööstuse kohta leitavaid materjale internetist, teadusartikleid, võrguvaldajate infot, töö autori isiklike kogemusi ja järeldusi.

SISSEJUHATUS

Vesinik on kõige lihtsama aatomi struktuuriga normaaltingimustes gaasiline aine. Kuid lihtsa elemendi ehituse taga peitub äärmiselt energiatihed aine.

Vesinikku oleks kõige jätkusuutlikum toota taastuvatest elektrienergia allikatest, millest saadud vesinikku saab nimetada roheliseks vesinikuks. Sellisel juhul võib vesinikku vaadelda ka kui väärindatud elektrit, mis tähendab võimalust elektri energia salvestamiseks vesinikuna. Kuigi vesiniku tootmiseks kulub rohkem elektrienergiat, kui sellest hiljem kätte oleks võimalik saada, on see arvestatav alternatiiv liigse elektrienergiaga salvestamiseks akupankade ja pump-hüdrojaamade kõrval. Suurimat efekti omaks selline energia tootmine siis, kui ühendada tsüklilised rohelise elektri tootmise üksused (tuule ja päikese-pargid) vesiniku tootmisega/salvestamisega.

Vesiniku laialdasema kasutamise eelduseks on küllaldase elektrienergia olemasolu. Eesti on 2021. a elektrienergia importija, kuid piisava hulga tsüklilise rohe-energia tootmise (tuulikud, päikese-pargid) lisandumisel oleks energia muundamine elektrist vesinikuks vägagi aktuaalne ja vajalik. Kuid selle eelduseks on esmalt Eesti elektrienergia defitsiidi lahendamine. Seejärel oleks võimalik edasi liikuda liigse elektrienergia muundamiseks vesinikuks. Seda kõike eeldusel, et otstarbekam ei oleks üleliigset elektrienergiat eksportida.

Puhta vesiniku tarbimine ja otsene vajadus on tänapäeval võrdlemisi väike, kuid tegu on tuleviku tehnoloogiatest kõige perspektiivsema ja keskkonnasõbralikuma arengusuunaga. Vesiniku kasumlikkus ja vajalikkus ilmneb peamiselt keskkonnasäästuna võrreldes fossiilsete kütustega.

Lõputöös on autori ülesandeks tuua välja viimased arengud seoses vesiniku tootmise ja ülekandega. Analüüsida ja võrrelda optimaalset/võimalikku vesiniku sisalduse piirmäära maagaasivõrgus, sh torustike, paigaldiste, tarbijate sobivuse kohta, kui kasutada vesiniku sisaldusega gaasisegu. Lisaks vesiniku tootmise ja tarnimise perspektiividest Eestis – nii segatuna gaasitarne torustikes kui ka puhtalt.

Jätkusuutliku arengu tagamiseks on möödapääsmatu energeetika rohepöörde, dekarboniseerimine. Tähtis on riigi ja erasektori (sh seadmete tootjate, tarbijate, projekteerijate) ühine pingutus selle tehnoloogia arendamise ja populariseerimise suunas.

1. VESINIK JA SELLE TOOTMISE TEHNOLOOGIAD

Käesolev lõputöö ei käsitle üheaatomilise molekuliga monovesinikku ehk atomaarset vesinikku (H). Vesinikku mainites viidatakse divesinik ehk molekulaarne vesinik H₂-le, mis on normaaltingimustel (0 °C, 1 atm) värvitu ja lõhnatu gaas.

1.1 Ajaloost

Vesinik avastati juba 17. sajandil. Tööstuslikult hakati seda kasutama 18.saj. Oma kerge kaalu tõttu esmalt õhusõidukites – õhupallid, tsepeliinid.

1930-ndatel hakati vesinikku kasutama tööstuses – generaatorites ja muudes tööstuslikes seadmetes. [1]



Joonis nr 1: Vesinikuga tsepeliin 1930.a. Tallinna kohal. [2]

Enne maagaasi laialdast kasutuselevõttu gaasivõrgus (ca 1970-ndad) kasutati Eestis põlevkivist toodetud gaasi, milles vesiniku sisaldus oli mahu järgi ca 20-25%. Antud gaasisegu oli kasutusel ka Leningradi(Peterburi) varustamiseks gaasiga. Selles gaasisegus oli ka palju ebavajalikke ühendeid (väävelvesinik, gaasbensiin). [3] Mõndades lõikudes Ida-Virumaal on samast ajast torustiku lõigud veel kasutusel tänapäevalgi.

Esimene päikeseenergia baasil rohelise vesiniku tootmisjaam käivitati 1990. aastal Saksamaal - Solar-Wasserstoff-Bayer vesinikujaam/pilootprojekt. Projekti rahastajateks olid Saksamaa suurkontsernid, nt BMW, Linde AG, Siemens. Elektri tootmiseks kasutati 5000m² päikesepaneele. Projekti peamine eesmärk oli katsetada vesiniku sobivust autotööstusele. [4]



Joonis nr 2. Vesiniku jõul töötava BMW 735i tankimine, 1993.a. [4]

1.2 Füüsilised ja keemilised omadused

Vesinik H₂ on värvitu ja lõhnatu gaas. Süttimispiir õhusegus 4%-75%. Vesinik põleb päevavalguses nähtamatu leegiga. Plahvatuspiir õhusegus 18%-59%. Isesüttimise temperatuur 560°C.

Vesinik H₂ on gaasidest kõige väiksema struktuuriga element ehk vesinik on kõige kergem gaas. Molaarmass on 2,01588 g/mol.

Normaalrõhul, temperatuuril 20,268 K (-252,882 °C) kondenseerub vesinik vedelikuks, mis tahkub temperatuuril 14,025 K (-259,125 °C).

Alumine kütteväärtus 120MJ/kg, ehk 33,33kWh/kg;

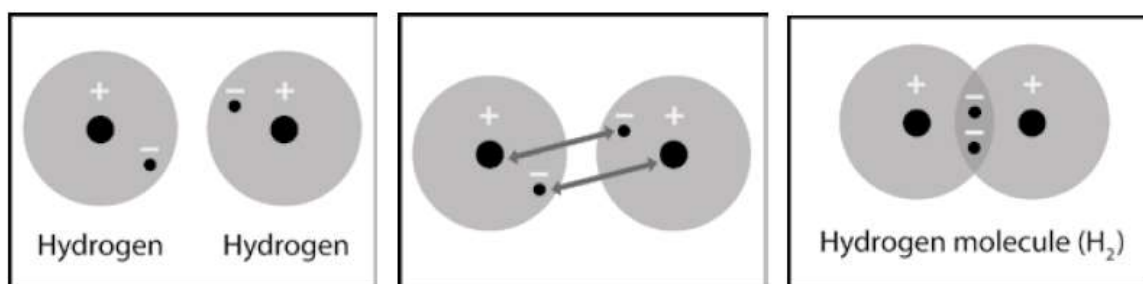
Ülemine kütteväärtus 142MJ/kg, ehk 39,44kWh/kg.

Väga kõrge rõhu all (vesinikust koosnevate suurte taevakehade tuumas, nt Jupiter) muutub divesinik metalliliseks vedelikuks (metalliline vesinik). Seda põhjusel, et suure rõhu all surutakse elektronid vesiniku aatomist välja. Vähem ekstreemsetes tingimustes leidub vedelal kujul vesinikku paljudel taevakehadel ja suurter kogustes („ookeanid“) – Saturn, Jupiter. Väga madala rõhu all (näiteks maailmaruumis) esineb vesinik atomaarse vesinikuga H, sest vesinikuaatomite kohtumise ja ühinemise tõenäosus on väike. [5]

Tabel nr 1. Vesiniku tähtsamad füüsikalised omadused vastavalt rõhule ja temperatuurile. [6]

Kütus	Keemiline koostis	Tihedus (kg/m ³)	Kütteväärtus (kWh/kg) _{HHV}	Kütteväärtus (kWh/kg) _{LHV}	Energiatihedus (kWh/m ³) _{HHV}	Energiatihedus (kWh/m ³) _{LHV}
Vesinik @ NTP	H ₂	0.083755	39.39	33.32	3.299	2.791
Vesinik @ 50 bar/20°C	H ₂	4.0151	39.39	33.32	158	134
Vesinik @ 100 bar/20°C	H ₂	7.7968	39.39	33.32	307	260
Vesinik @ 200 bar/20°C	H ₂	14.707	39.39	33.32	579	490
Vesinik @ 250 bar/20°C	H ₂	17.864	39.39	33.32	704	595
Vesinik @ 300 bar/20°C	H ₂	20.840	39.39	33.32	821	694
Vesinik @ 350 bar/20°C	H ₂	23.651	39.39	33.32	932	788
Vesinik @ 500 bar/20°C	H ₂	31.219	39.39	33.32	1230	1040
Vesinik @ 700 bar/20°C	H ₂	39.693	39.39	33.32	1564	1323
Vesinik @ 800 bar/20°C	H ₂	43.388	39.39	33.32	1709	1446
Vesinik @ 900 bar/20°C	H ₂	46.790	39.39	33.32	1843	1559
Vesinik @ 1000 bar/20°C	H ₂	49.939	39.39	33.32	1967	1664
Vesinik(l) @ 1 atm/ -252,78°C	H ₂	70.850	39.39	33.32	2791	2361

Kuumutamisel reageerib vesinik paljude ainetega. Reaktsioon hapnikuga eraldab soojust, mistõttu vesinik õhus või hapnikus põleb ning tema segud hapniku või õhuga põlevad. Vesinik põleb 4-75% õhu segus, seega on kergesti süttiv aine.



Joonis nr 3. Vesiniku molekulaarstruktuur. [7]

Kui monovesiniku aatomid satuvad piisavalt lähedistiku, tõmbuvad nende elektronid teise aatomi tuumas oleva prootoni poole. Kuna mõlema aatomi välise energiataseme vahel on aatomite vahel piisavalt tugev külgetõmme ja ka ruumi elektroni jaoks, tekitab see aatomite vahel kovalentse sideme – tekib H₂. [7]

Inimese organism vesinikku ei omasta - see on biokeemiliselt inertne aine.

Suures kontsentratsioonis sisse hingatuna on vesinik lämmatav. Väikses koguses sissehingates tekib Heeliumiga sarnane efekt – väikse tiheduse tõttu häältepaelte juures võimenduvad kõrged toonid ja tuhmuvad madalamad toonid. [8]

1.3 Vesiniku tootmine tööstuslikult

Vesiniku saamise tehnoloogia järgi jaguneb toodetav vesinik järgmiselt:

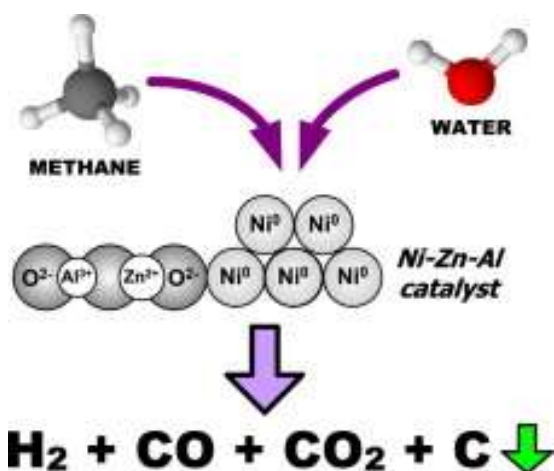
Hall vesinik - fossiilse maagaasi reformimisel, kõrvalproduktina eraldub CO₂;

Sinine vesinik - sarnane hallile vesinikule, kuid kaasatakse CO₂ heitmete püüdmise meetodeid;

Roheline vesinik – tootmiseks kasutatakse taastuvaid energiaallikaid (tuulepargid, päikesepargid).

Majandusliku otstarbekuse ja tehnoloogia lihtsuse tõttu on tänapäeval kõige levinum **metaani reformimine** (SMR). Antud tehnoloogia on kõrge kasuteguriga - üle 70%. Probleemiks on süsiniku sidumine, mida tekib tootmisprotsessis ca 330gCO₂/kWh. CO₂ heitmed lastakse majandusliku otstarbekuse tõttu atmosfääri. Selliselt saadud vesinik on **hall vesinik**. [9]

Metaani reformimisel saadakse tänapäeval ca 80-85% toodetud vesinikust. [10]



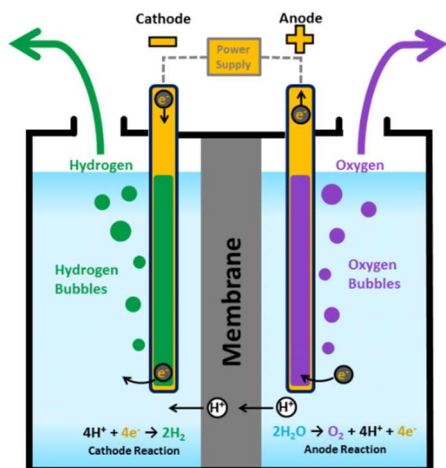
Joonis nr 4. Metaani reformimine. [10]

Kui metaani reformimise tehnoloogiale lisada süsiniku püüdmise tehnoloogia (CCS), siis saadakse **sinine vesinik**. CO₂ tuleb utiliseerida isoleerituna atmosfäärist. Selleks on vaja rajada maa-alused või mere-alused hoidlad.

1.4 Uued tootmise tehnoloogiad

Vee ja elektri põhjal vesiniku tootmist (elektrolüütiline tootmine) takistab tänapäeval veel oluliselt kallim hind, kuid tehnoloogia on perspektiivikas ja kiires arengus. Paljud pilootprojektid on käivitatud ja materjalitehnoloogia osas käib pidev arendustegevus.

Elektrolüüs on protsess, mille käigus elektrienergia abil jagatakse vesi vesinikuks ja hapnikuks. [11]



Joonis nr 5. Vesiniku elektrolüüsi mudel. [11]

Elektrolüsaatorid koosnevad elektroodiga eraldatud anoodist ja katoodist. Erinevad elektrolüsaatorid toimivad veidi erineval viisil, seda peamiselt tänu erinevat tüüpi elektrolüüdi ja membraani materjalidele.

Enim levinud elektrolüüsi tehnoloogiad vesiniku tootmiseks on: **Polümeermembraanelektrolüüdiga elektrolüüser** (PEMEC; Polymer Electrolyte Membrane Electrolyzer Cell);

Leeliselektrolüüdiga elektrolüüser (AEC; Alkaline Electrolyzer Cell);

Tahkeoksiid elektrolüüdiga elektrolüüser (SOEC, Solid Oxide Electrolyzer Cell).

1.4.1 Polümeermembraanelektrolüüdiga elektrolüüser

Polümeerelektrolüütmembraani (PEM) elektrolüsaatoris on elektrolüüt tahke erimaterjal. Vesi reageerib iriidumist anoodi juures, moodustades hapniku ja positiivselt laetud vesiniku ioone (prootoneid). Elektronid voolavad läbi välise vooluahela ja vesinikioonid liiguvad valikuliselt üle PEM katoodi. Platinast katoodil ühenduvad vesinikioonid välise vooluringi elektronidega, moodustades vesiniku gaasi. Membraanina kasutatakse fluoritud membraanimaterjale. Seadme eluiga on sellisel tehnoloogial suhteliselt lühike. Kasutegur on 56-63%. [11]

Anoodreaktsioon: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Katoodireaktsioon: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$

Kuna protsess sisaldab erilisi ja vähelevinud materjale, on see hetkel kallis. Toormaterjalide hindade langemisel ja masstootmise tekkimisel langeb ka tootmise hind oluliselt.

Praegused arendustegevused on suunatud süsteemi keerukuse vähendamiseks, hinna alandamiseks ja odavamate materjalide leidmiseks. Peamine arendustegevus toimub tahke polümeerelektrolüüt membraani keemiliselt ja termomehaaniliselt vastupidavamaks muutmisega ja muude sobivate katalüsaatorite leidmisega (peale plaatina ning iriidiumi). [11]

1.4.2 Leeliselektrolüüdiga elektrolüüser

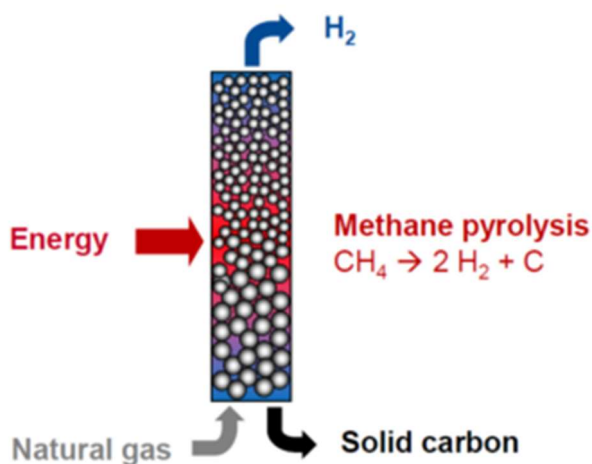
Leeliselised elektrolüsaatorid toimivad hüdroksiidioonide (OH^-) transportimise põhimõttel läbi elektrolüüdi katoodilt anoodile (nikliga kaetud teras), katoodi poolel (teras) tekib vesinik. Elektrolüsaatorid kasutavad elektrolüüdina naatrium- või kaaliumhüdroksiidi vedelat leeliselist lahust. Protsessis tekib kõrvalproduktina soojus, mida oleks võimalik ära kasutada tootmisüksuse lähipiirkonna kaugküttes. Kasutegur on 64-70%. [11]

1.4.3 Tahkeoksiid elektrolüüdiga elektrolüüser

Tahkete oksiidide elektrolüsaatorid, mis kasutavad elektrolüüdina tahket keraamilist materjali, juhivad selektiivselt negatiivselt laetud hapniku ioone (O^{2-}) kõrgendatud temperatuuridel. Katoodi vesi ühendub välise vooluringi elektronidega, moodustades gaasilise vesiniku ja negatiivselt laetud hapnikuioonid. Hapniku ioonid läbivad tahke keraamilise membraani ja reageerivad anoodil, moodustades hapnikugaasi ja genereerides välise vooluahela jaoks elektrone. Tahkete oksiidide elektrolüsaatorid peavad töötama piisavalt kõrgel temperatuuril, et tahked oksiidmembraanid saaksid korralikult töötada (umbes $700\text{--}800^\circ\text{C}$, võrreldes PEM-elektrolüsaatoritega, mis töötavad temperatuuril $70\text{--}90^\circ\text{C}$ ja leeliselektrolüsaatoritega, mis töötavad temperatuuril $100\text{--}150^\circ\text{C}$). Tehnoloogia sobib näiteks tuumajaama kõrvaltööstusena. Kasutegur antud tehnoloogial on ca 75-80%. [11]

1.4.4 Maagaasi pürolüüs

Uued tehnoloogilised lahendused ei ole tavaliselt kiiresti kättesaadavad ja kulu-efektiivsed. Heaks alternatiiviks rohelisele vesinikule üleminekuperioodil kallite elektrolüüserite kõrval oleks maagaasi pürolüüs. Selle põhimõtte seisneb selles, et CH₄ koostisest kasutatakse ära ainult H₂+H₂ ilma CO₂ emisioonita. CO₂ väljub tootmistsüklist süsinikuna. Antud tootmisüksuse saab paigutada olemasolevale maagaasi torustikule, mis aitab tarbijate gaasitarves suurendada vesiniku osakaalu ja vähendada CO₂ heitme koguseid või edastada tarbijatele puhast vesinikku (nt tanklad, eritööstused). Kuna tooraineks on sellisel juhul fossiilne maagaas, oleks tegemist **sinise vesiniku** tehnoloogiaga. [12]



Joonis nr 6. Maagaasi pürolüüsi tehnoloogiline skeem. [13]

1.4.5 Muud tehnoloogiad

Lisaks eelmainitud tehnoloogiatele on arengujärgus biomassist vesiniku tootmine, biokeemiline tootmine, plasma gaasifikatsioon. [11]

Tehnoloogiaid ja arengusuundi on mitmeid. See, milline tehnoloogia osutub kõige jätkusuutlikumaks ja efektiivsemaks, vajab pidevat katsetamist, pilootprojekte ja rahastust.

Tabel nr 2. Erinevate uute vesiniku tootmise tehnoloogiate võrdlus. [14] [15] [16] [17] [18]

Tootmise tehnoloogia	Tehnoloogiline valmidus tase (TLR)	Kasutegur, %
PEM (Polümeer-membraanelektrolüüdiga elektrolüüser)	4-8	60-80
SOEC (Tahkeoksiid elektrolüüdiga elektrolüüser)	3-5	90
AE (Leeliselektrolüüdiga elektrolüüser)	7-9	64-70
SMR (Metaani reformimine)	9	74-85
Biomassi gasifitseerimine	4-9	30-40
Metaani pürolüüs	3-4	58-62

1.5 Vesiniku tootmise hind

Vastavalt *International Energy Agency* uuringule [19] kujuneb vesiniku tootmise hind vastavalt selle toorainele/ energia allikale alljärgnevalt:

Maagaasist: 27,3 – 82,0 EUR/MWh;

Maagaasist koos süsiniku püüdmisega: 41,0 – 82,0 EUR/MWh;

Kivisöest koos süsiniku püüdmisega: 30,0 – 60,1 EUR/MWh;

Taastuvenergia allikatest: 81,9 – 205 EUR/MWh.

Vesiniku energeetiline hind on arvutatud selle alumise kütteväärtuse järgi (33,3kWh/kg).

Erinevate tehnoloogiate võrdlusest järeldub, et vesiniku tootmine vee elektrolüüsimisega on eelmainitud tehnoloogiatest kõige kallim. Seega taastuvenergia baasil vesiniku tootmise tehnoloogiad vajavad kindlasti riigi või EU poolset toetust, et need suudaksid konkureerida fossiilsete toorainete tehnoloogiatega. Teine lahendus oleks fossiilkütuste baasil töötavatel tehnoloogiatel tõsta jõuliselt CO₂ makse.

Soodsatel tingimustel (jätkuv tehnoloogia areng, vähesed maksud, soodne majandusruum) on prognoositud vesiniku tootmishindade langus alljärgnevalt. [20]

Tabel 3. Taastuvenergiast ja fossiilkütustest toodetud vesiniku perspektiivne hinnavõrdlus. [20]

Energiaallikas	Hind EUR/MWh, 2030.a.	Hind EUR/MWh, 2040.a.	Hind EUR/MWh, 2050.a.
Fossiilkütused süsiniku salvestamisega	31-62 EUR/MWh	36-70 EUR/MWh	38 – 71 EUR/MWh
Tuuleenergia	42 -72 EUR/MWh	30 – 50 EUR/MWh	25 – 35 EUR/MWh
Päikeseenergia	43 – 75 EUR/MWh	32 – 60 EUR/MWh	26 – 50 EUR/MWh

1.6 Vesiniku arengukava

Vastavalt *Gas for Climate* [21] arengukavale, peaks vesiniku juurutamise arenguplaan välja nägema EU majandustsoonis järgnevalt:

1. 2021-2025. a ettevalmistused vesiniku tehnoloogiale üleminekuks.

Strateegiline, tehniline ja poliitiline planeerimine vesiniku suuremaks kasutuselevõtuks. Pikaajaliste infrastruktuuri strateegiade koostamine, sh torustikud, tootmine ja tarbimine. Vajalikud seadusemuudatused, mis soodustaks vesiniku tootmist, transporti ja tarbimist;

2. 2021-2029. a võimekuse suurendamine.

Suurendada oluliselt biometaani tootmisvõimekust, mille tõttu biometaani osakaal gaasitarvetes oluliselt suureneb. Vesiniku projektide käivitamine. Tarbijate ettevalmistus suurenenud vesiniku sisaldusega gaasi vastuvõtmiseks;

3. 2025-2033. a Vesiniku tootmise suurendamine.

Vesiniku tarneahelate loomine, vesiniku tootmise projektide käivitamine. Biometaanii tootmise suurendamine;

4. 2029-2038. a vesiniku nõudluse kasvatamine.

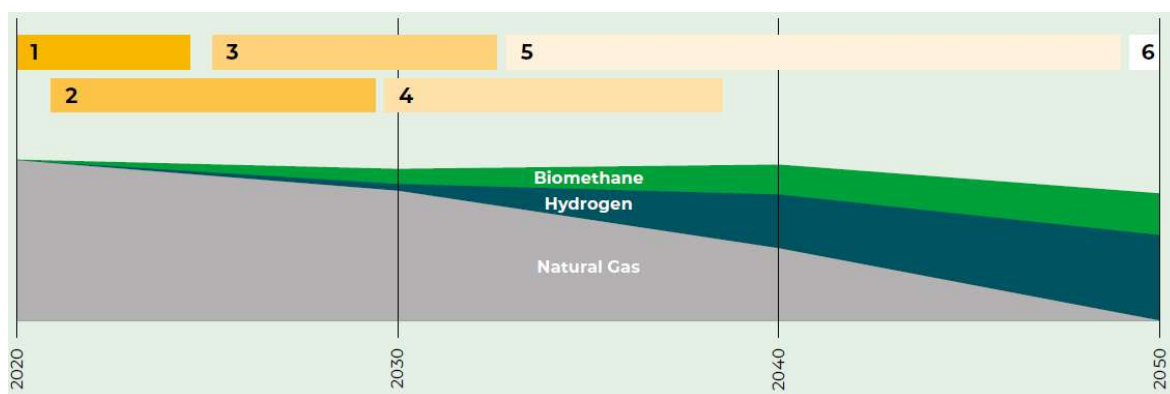
Nii tööstuslike kui ka väiketarbijate ümberseadistamine vesinikurikka gaasi tarbimiseks. Vesiniku sisaldus kuni 20% vol;

5. 2033-2050. a Eraldi vesiniku tarne torustike rajamine.

Suureneb nõudlus süsinikuvaba gaasi järele. Vesiniku tarnetorustikud pikenevad riikidevahelisteks;

6. 2050. a Täielik üleminek taastuvatele ressurssidele.

Vesiniku tarnetorustikke on arendatud suuremates linnades ja ühendatud riikide vaheliselt. Maagaasi kasutamine on vähenenud miinimumini ja seda on võimalik kasutada ainult arenenud süsiniku salvestamise tehnoloogiatega.



Joonis nr 7. Gaasi osakaal tarbimises ja sõltuvus arengukava punktidest. [21]

1.7 Vesiniku hoistamine ja transportimine

Kui vesiniku tootmine saab lähitulevikus majanduslikult otstarbeksks, peab see ka jõudma tarbijateni või peab vähemalt seda senikaua säilitama, kui selle tarbimise vajadus tekib. Selle jaoks on olemas mitmeid võimalusi, mis jagunevad põhisuunalt füüsikalisteks ja keemilisteks.

Füüsikalised: vesiniku hoistamine gaasiliselt või veeldatuna balloonides, paakides, hoidlates. Või transportituna torustikega tarbimiskohta.

Keemilised: hoistamine mõne keemilise ühendi koostises, kust on see hiljem võimalik puhtalt kätte saada (metallhübriidid, keemiline hoistamine nt ammoniaagina NH₃).

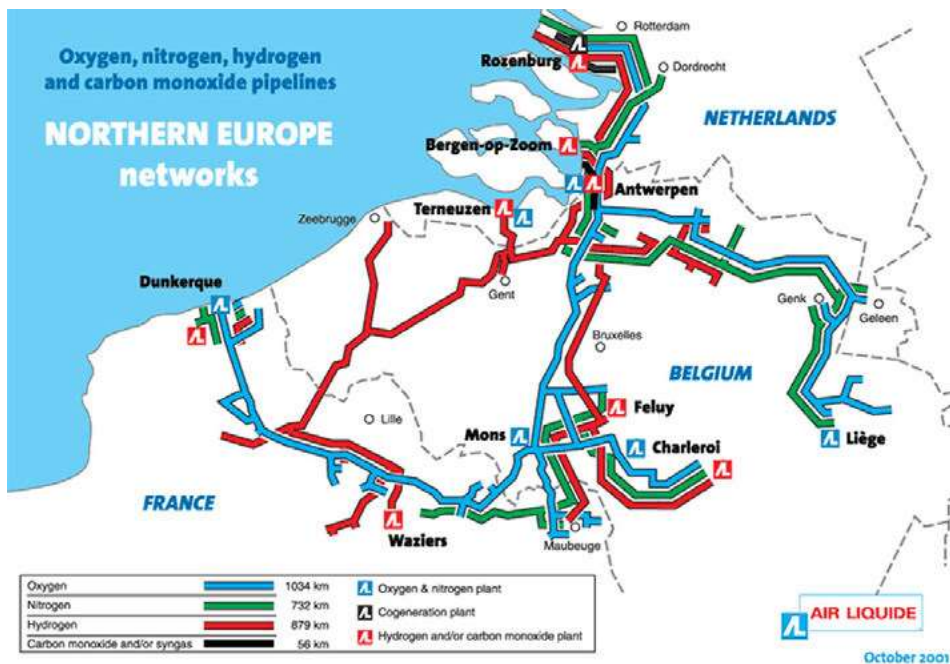
1.7.1 Torustikud

Pikimad vesiniku torustikud on Ameerikas ca 2600km, millest enamik on Mehhiko lahe piirkonnas. Suurtarbijateks on nafta rafineerimise ja ammoniaagi tehased. Enamik vesinikust toodetakse metaani reformimise meetodil (hall vesinik). Kuna Ameerika Ühendriikide valitsus viimastel aastatel ei tunnistanud kliimaprobleeme, siis alles hiljuti on hakatud tegema samme sinisele ja rohelisele vesinikule üleminekuks. [22]



Joonis nr 8. Vesinikutorustikud Ameerikas. [23]

Belgia-Prantsusmaa-Saksamaa-Hollandi piirkonnas on vesiniku torustike ca 900km.



Joonis nr 9. Torsutikud Madalmaade piirkonnas. [24]

Tänapäeval on maailmas vesiniku torustikke töös hinnanguliselt ca 5000km. Võrdluseks: maagaasi torustikke on maailmas ca 3 miljoni kilomeetri pikkuses. [25]

Madalasarvelise vesiniku transpordiks sobivad samad torud, mida kasutatakse gaasitarne torustikes – isoleeritud terastorud, PE (polüeteen torud). Torud peavad olema tihedad ja ilma leketeta.

Suure süsinikusisaldusega süsinikterasest torud on vastuvõtlikud vesinikust tingitud kahjustuste ja pragude tekkele madalal temperatuuril. Vedelate ja gaasilise kõrgsurve (100+bar) vesiniku torustike, ventiilide ja liitmike jaoks on sobilik kasutada roostevaba terasest materjale. [26]

Paljud toru tootjad tegutsevad spetsiaalselt vesiniku torude väljatöötamisega. Levinuim arengusuund on termoplast komposiit torud (mitmekihilised), mis taluvad töösurvet kuni 42bar. Eelkõige annab komposiit plastsüsteemide kasutamine eelise terastorude ees, sest komposiitkorudel on suurem lekkekindlus ja suurem paigalduskiirus, samal ajal töösurve osas tagasiandmisi tegemata. Puuduseks on piiratud diameeter ja sellest tulenev läbilaskvus. Sellist torustikku on võimalik paigaldada rullist, mis tähendab et jätkukohtasid on võrreldes terastoruga oluliselt vähem.



Joonis nr 10. Vesiniku termoplast komposiitkoru. [27]

1.8 Vesiniku tarbijad

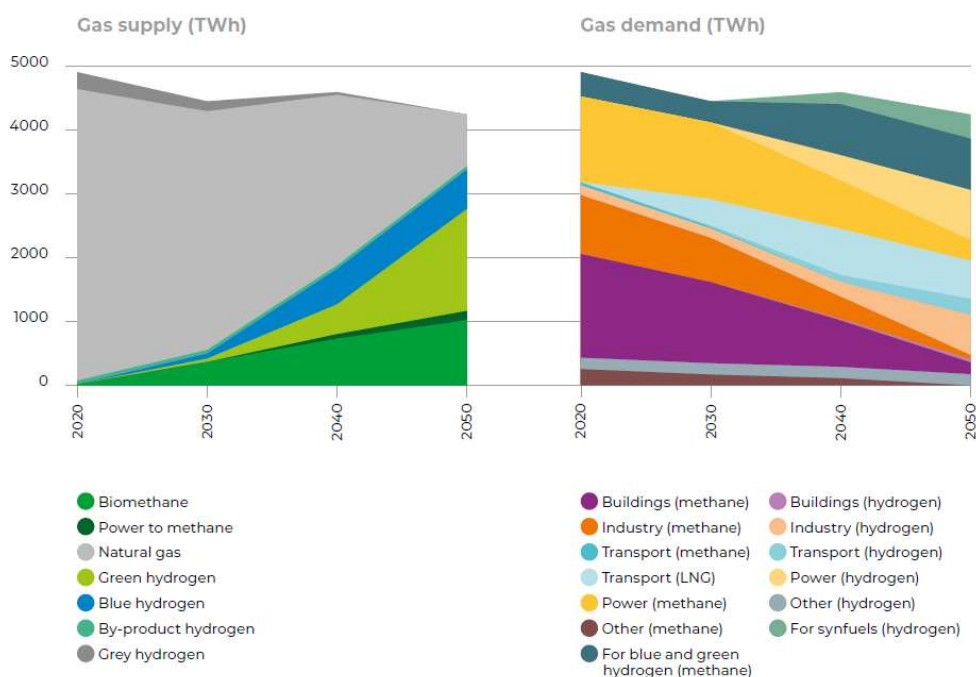
Peamiselt on tänapäeval vesiniku suurtarbijad ammoniaagi ja naftatöötlemistehased. Suured investeerimisplaanid on just naftatöötlemise ettevõtetele eelkõige selle tõttu, et neil on finantsvahendeid arendustegevuseks ja/või nõuded näidata osades oma tegevusvaldkondades keskkonnahoidu.

Tehnoloogiate arenedes (vajalik on ka odavnemine) on vesiniku tarbimise sihtrühm oluliselt laiem.

Näiteks:

- Transpordisektoris – lennundus, laevandus, rongid, bussid, autod;
- Majapidamiste tarvitid/põletid;
- Soojuselektrijaamad.

Gas for Climate on prognoosinud gaasienergia tarbimise nõudlust ja tootmist kuni 2050. a järgnevalt [21]:



Joonis nr 11. Euroopa gaasienergia nõudluse ja tootmise prognoos. [21]

Mitmed transpordisektori tootjad on kuulutanud välja enda vesiniku projektid. Vesiniku autod ja bussid on juba seeriatootmises. Ka lennukitootjad, nt Airbus, on oma pilootprojektid viimase aasta jooksul välja kuulutanud. [28]



Joonis nr 12. Airbus vesiniku lennuk. [28]

Peamine riskifaktor vesiniku transpordikütuses on kütusepaakide ja ühendustorude ohutus (nt avariolukorras). Mida väiksem on sõiduki kütuse (vesiniku) paak, seda suuremat survet see peaks taluma. Suurem surve omakorda tekitab suuremaid riskifaktoreid.

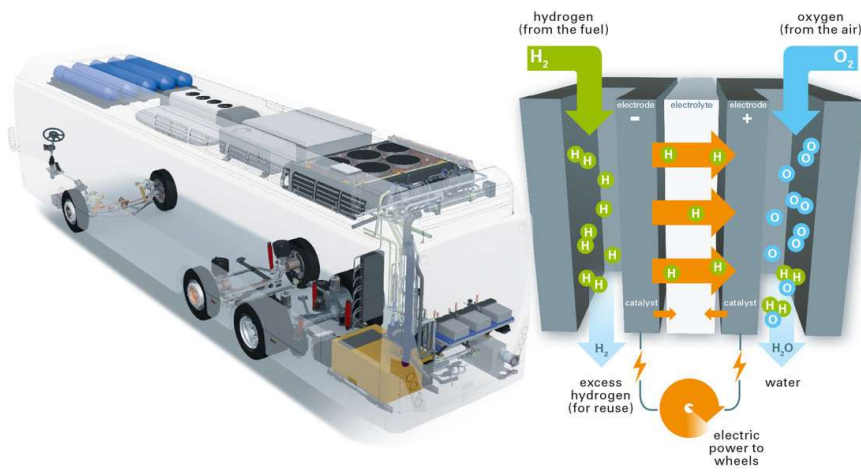
Lihtsaim/varaseim samm vesiniku tarbimise levitamiseks väljaspool tööstusettevõtteid on kasutada vesnikubusse ja -ronge. Euroopa Liidus on planeeringute järgi 2021. a lõpuks kasutuses ca 360 vesnikubussi. [29]

Maismaa transpordi osas on vesinike sõidukite näol tegemist oma olemuselt elektri autode/busside/rongidega, mis saavad elektrienergia „tagurpidi“ elektrolüüsist (võrreldes tootmisega). Võrreldes akudega elektriautosid ja vesinikuautosid, on vesinikuautode sõidu ulatus suurem ja auto kaal (akude arvelt) väiksem. Lisaks on vesiniku tankimine kordades kiirem, kui aku laadimine.

Suurimad vesnikubusside tootjad EU-s on Belgia ettevõtte VanHool, mudeliga A330 H2 ja Toyota, mudel Sora.



Joonis nr 13. VanHool vesinikubuss. [30]



Joonis nr 14. Vesinikubussi lihtsustatud tehniline skeem. [30]

1.9 Vesiniku tulevikusuunad

Enamik arenenud riigid on vastu võtnud süsiniku jalajälje vähendamise ja dekarboniseerimise eesmärgid. Vesiniku kasutamine, selle juurutamine ja populariseerimine on antud eesmärkide üks nurgakive.

Hollandis kavandatakse avamere tuulega töötavat maailma suurimat rohelist vesiniku tootmiskeskust. Aastaks 2030 on planeeritud ehitada 3–4 GW avamere tuulepark, mille kaudu suunata vesinikku tööstuslikuks kasutamiseks. Projekti on kaasatud naftahiid, nt Shell, BP ja Total, kes oma kontsernide süsinikdioksiidi heite vähendamise eesmärkide täitmiseks on nõus kaasama suuri investeeringuid.

2040. aastaks on sama projekti planeeritud laiendada 10 GW-i. [31]

Belgia Ostendi sadamasse kavandatakse ehitada 50-MW elektrolüsaatorit, mis töötaks samuti avamere tuuleenergia baasil. Tootmine on plaanitud käivitada 2025. a. [32]

Suurbritannia investeerib tohutult ainult vesiniku küttel piirkondade arendamisse. Vesinik selle jaoks saadakse maagaasi reformimisest koos süsiniku püüdmisega – ehk sinine vesinik. Selline tehnoloogia valik on heaks hüppelauaks üleminekuks rohelist vesiniku kasutamisele. [33]

Suuri ja auahneid projekte leiab üle maailma teisigi. Seal, kus on poliitiline tahe või suurte korporatsioonide ärihuvid, on ka tegevus ja tulemus.

Euroopa majandusruumis on suuremad gaasi ülekandevõrgu ettevõtted koondunud (sh Elering AS), et arendada Euroopa vesiniku selgroogu ehk „*European Hydrogen Backbone*.” Eesmärgiks on planeerida ja luua üleEuroopaline vesiniku torustiku võrgustik. Hetkel on projektiga liitunud 21 EU liikmesriiki ja planeeritava torustiku pikkus läbi nende riikide oleks ca 40 000km. Investeeringute kogumaksumus kuni aastani 2040. a on 43-81 miljardit eurot. [34] Kirjeldustest võib välja lugeda, et projekti peamine eesmärk on kliima eesmärkide saavutamine ja üleminek samm-sammult süsinikuvabale energiale. Siiski võiks lisada, et selle perspektiivse algatusega püütakse leevendada energia defitsiiti Kesk-Euroopas, mis praegu saab oma energia väga suures ulatuses Venemaalt tulevast gaasist (läbi Ukraina ja Nord Stream gaasitoru).

Mature European Hydrogen
Backbone can be created by
2040



Joonis nr 15. European Hydrogen Backbone visioon aastaks 2040. [34]

EU riikide ühine vesinikualane ettevõtmine on kordades efektiivsem, kui iga riigi omaette pingutamine.

Aruandest *European Hydrogen Backbone* selgub ka liikmesriikide ülekandevõrgu operaatorite iseseisvad eesmärgid ja võrgu arendusplaanid.

Näiteks selgub [34]:

- UK planeerib ühendada aastaks 2030 neli vesiniku torustiku piirkonda – UK sisene „selgroog“;
- Hispaania-Prantsusmaa-Saksamaa vesinikutoru koridor on plaanis töösse panna aastaks 2035;
- Rootsil on kavas saavutada süsinikuneutraalsus aastaks 2045; Soomel on kavas saavutada süsinikuneutraalsus juba aastaks 2035. Kuna Eesti ja Soome on omavahel seotud Baltic Connectori torustikuga, siis selle eesmärgi saavutamine/lahendamine peab toimuma koostöös Eestiga;
- Läänemere tuuleparkide elektrienergia potentsiaal vesiniku tootmiseks on aastaks 2030 ca 93GW;
- Põhjamere tuuleparkide elektrienergia potentsiaal vesiniku tootmiseks on aastaks 2050 ca 180GW.

Arvestades perspektiivikat vesiniku arengusuunda on EU riigid lubanud toetada oma vesiniku programme järgnevalt:

Tabel nr 4. Vesiniku investeeringukava. [35] [36] [37] [38] [39]

Riik	Investeering, miljard EUR	Investeering elaniku kohta, EUR
Saksamaa	9	109.-
Holland	9	527.-
Portugal	7	679.-
Prantsusmaa	7	105.-
Eesti, aastaks 2025 [37]	0,005 +	4.- +
EU RFF fondi toetus [39]	0,05	40.-

Täieliku vesiniku infrastruktuuri ülesehitamine maksab orienteeruvalt (eurodes) [34]:

Elektrolüüserid –26,2 miljardit;

Mere tuulepargid – 44,7 miljardit;

Maismaa tuulepargid – 37 miljardit;

Päikesepargid – 28,2 miljardit;

Olemasolevate vesinikjaamadele süsiniku salvestid – 20 miljardit;

Kivisöe/põlevkivi gaasistamine koos süsiniku salvestamisega – 12 miljardit.

2. VESINIKU LISAMINE MAAGAASILE GAASITARNE TORUSTIKES

Vesiniku lisamine maagaasile vähendab kasvuhoonegaaside heitkoguseid. Seega aitab vesiniku lisamine maagaasile täita kliima eesmärgi ja luua ülemineku keskkond vesiniku tootmise tööstustele.

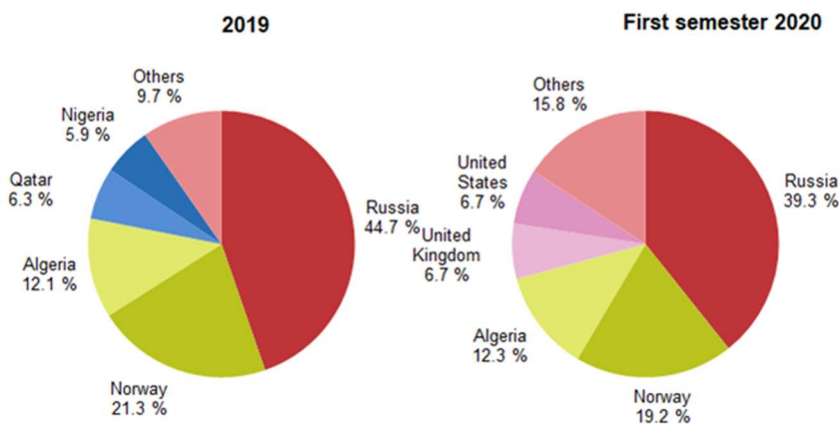
2.1 Maagaas

Tänu kõrgele kütteväärtusele ja suhteliselt madalale süsinikusisaldusele on maagaas optimaalsetest lahendustest küllaltki hea alternatiivkütus naftale ja kivisöele.

Põhiliselt metaanist koosnev maagaas on võrreldes teiste fossiilkütustega suhteliselt keskkonnasõbralik energiaallikas. [40]

40% Euroopas kasutatavast gaasist on pärit Venemaalt, ca 20% Põhjamere maardlatest ja 11% Alžeerias, 7% Ühendkuningriikidest ja 7% Ameerikast (LNG laevadega). [41]

Extra EU-27 imports of natural gas from main trading partners, 2019 and first semester 2020
(share (%) of trade in value)



Source: Eurostat database (Comext) and Eurostat estimates

Joonis nr 16. Gaasi import Euroopa Liitu. [41]

Kuigi maagaasil on mitmeid plusse teiste fossiilsete kütuste ees, siis EU hetkeseis on selline, et riik, kelle käitumismuster on Euroopa riikide jaoks vägagi ebastabiilne ja jõuline, kellele pidevalt kehtestatakse sanktsioone, kelle tootmistehnoloogia ei vasta EU keskkonna ja kvaliteedi nõuetele, on EU peamine gaasi energiaga varustaja.

Maagaasi tarbimine on riigiti väga erinev. Tasub võrrelda ka tarbimist elaniku kohta riikides. See annab ettekujutuse, kui arenenud on konkreetse riigi gaasivõrk ja gaasiga seotud tööstus.

Tabel nr 5. Maagaasi tarbimine. [42] [43] [44]

Riik	Tarbimine kokku, TWh	Tarbimine inimese kohta, MWh
Qatar	411	173,75
Saudi Araabia	1137	34,64
Kanada	9166	29,83
Belgia	175	14,02
Itaalia	708	10,81
Saksamaa	886	9,42
Eesti	5,2	3,64

2.2 Gaasitarne torustikud

Kogu Euroopa energiavajadusest transporditakse 25% gaasivõrgus. Ülekandevõrgud läbivad kõiki EU riike. Peamine transiidi kanal on Ida-Lääne suunaline.



Joonis nr 17. Euroopa gaasitorustike plaan. [45]

Kõige lihtsam esimene samm vesiniku tootmise hoogustamiseks (millele järgneb tarbimine) on vesiniku lisamine olemasolevale gaasivõrgule. See on efektiivne võimalus ühendada vesiniku tootjad suhteliselt väikeste täiendavate investeeringutega ühtsesse võrku. See lähenemisviis vähendab oluliselt esmaseid investeeringuvajadusi ülekandetorustike arendamiseks. Keskkonna seisukohast vesiniku lisamine maagaasile vähendab kasvuhoonegaaside heitkoguseid, kuid ainult juhul, kui vesinik on toodetud taastuvenergia allikatest tulnud energiaga (roheline vesinik) või süsiniku sidumise tehnoloogiaga (CCS) (sinine vesinik).

2.3 Vesinik ja metaan

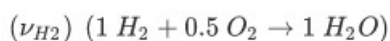
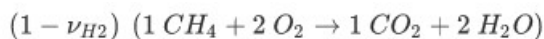
Vesinik ja metaan on mõlemad olulised energia-kandjad. Samal rõhul/temperatuuril on nad küllaltki sarnased, kuid osad nende parameetrid (kütteväärtus, tihedus) on vägagi erinevad.

Vesinik on umbes kolm korda vähem energiatihed kui metaan. See tähendab, et kui vesiniku suhe gaasisegus tõuseb, väheneb sama torujuhtme kaudu tarnitava energia kogus. Seega peab tõusma torustiku töösurve sama energiakoguse edastamiseks.

Tabel nr 6 Vesiniku ja metaani võrdlus. [46]

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

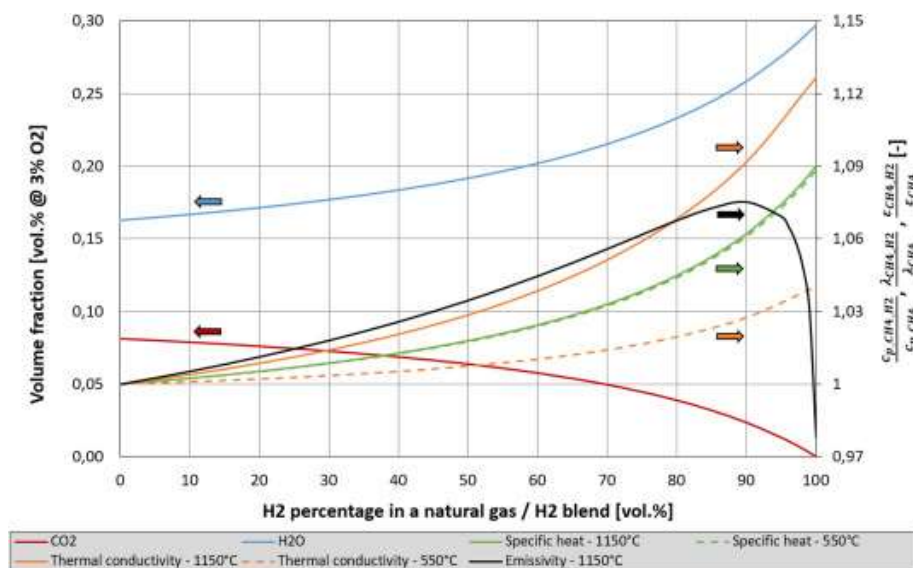
Vesiniku ja metaani gaasisegu põlemise põhivalem on:



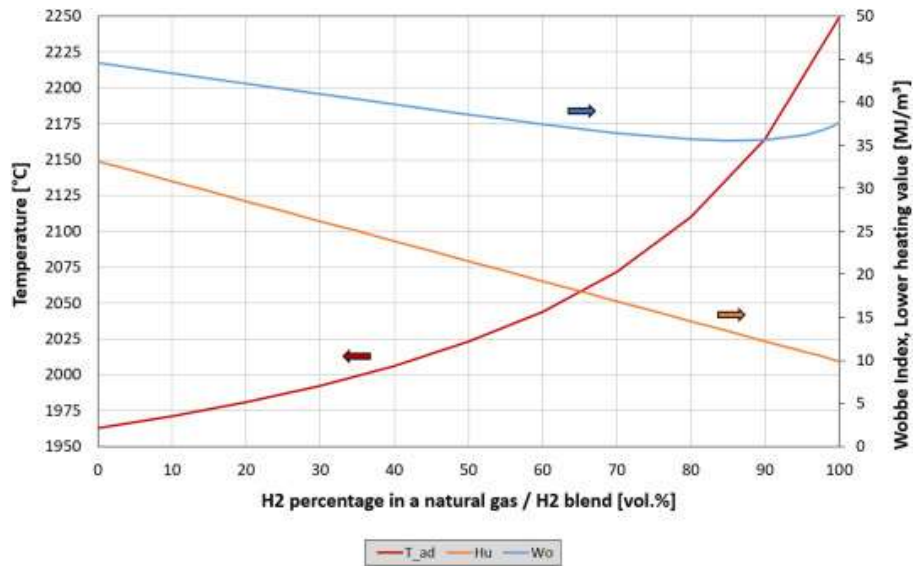
Vesiniku ja maagaasi segugaasi põlemisel tuleb arvestada vesiniku ja metaani erinevat mahulist kütteväärtust. Selle tõttu suureneks gaasi voolukiirus põletites ja pihustites, et tekiks sama soojushulk võrreldes puhta metaaniga.

Uuringu tulemusel [47], kus katsetati erineva vesinikusisalduse määraga gaasisegu põletis, selgub:

- CO₂ sisalduse märkimisväärne vähenemine (> 50%) on võimalik ainult siis, kui vesinikusisaldus on kütusegaasis üle 80 mahuprotsendi. 10 mahuprotsendi vesiniku sissevool maagaasivõrku, nagu näiteks Saksamaal kasutatakse, tähendaks süsinikdioksiidi vähendamist 10% võrra tööstuslikes põlemisprotsessides;
- Wobbe arv on segugaasil oluliselt väiksem;
- Mida suurem põleti võimsus, seda vähem tekib NO_x ühendeid võimsusühiku kohta;
- NO_x ühendite tekkimine vesiniku sisalduselt 0% tõstmisel 40% kasvas 14%.



Joonis nr 18. Erineva H₂/CH₄ segu juures tekkinud temperatuurid, jääkgaasid. [47]



Joonis nr 19. Erineva H₂/CH₄ segu põlemistemperatuurid. T_{ad} – adiabaatiline leegi temperatuur; H_u – madalam kütteväärtus; W_o – Wobbe indeks. [47]

Seega mida suurem vesiniku sisaldus, seda madalam kütteväärtus ja seda suurem adiabaatiline leegi temperatuur.

2.4 Segugaasi kütteväärtuse teoreetiline kontroll

Eesti ülekandevõrgu gaasi koostise aruanne on regulaarselt uuendatud ja leitav Eleringi kodulehelt. [48]

Tabel nr 7. Maagaasi koostis Eesti ülekandevõrgus. [48]

Kuu keskmine gaasi kvaliteet Average monthly gas quality		Aprill April	2021 2021		
Kuu keskmine gaasi koostis Monthly average gas composition		Kuu keskmised gaasi omadused Monthly average gas properties			
Komponent Component	mol % mole %	Gas parameter	Ühik Unit	25/0 °C	25/20 °C
metaan methane	96,557	Alumine kütteväärtus Inferior calorific value	kWh/m ³	10,15	9,454
etaan ethane	2,262	Ülemine kütteväärtus Superior calorific value	kWh/m ³	11,25	10,48
propaan propane	0,298	Wobbe arv Wobbe index	kWh/m ³	14,84	13,82
n-butaan n-butane	0,045	Metaani arv Methane number	-	88	
2-metüülpropaan i-butane	0,056	Tihedus Density	kg/m ³	0,7438	0,6927
lämmastik nitrogen	0,535	Suhteline tihedus Relative density	-	0,5753	0,5751
süsihappegaas carbon dioxide	0,216	Vee kastepunkt Water dew point H ₂ O DP	°C	-34,58	
2,2 dimetüülpropaan neo C5	0,001	Vee kastepunkti gaasi rõhk Gas pressure of H ₂ O DP	bar (abs)	32,69	
2-metüülbutaan i-pentane	0,007	Süsivesinike kastepunkt Hydrocarbons dew point HC DP	°C	-7,63	
n-pentaan n-pentane	0,005	Süsivesinike kastepunkti rõhk Gas pressure of HC DP	bar (g)	27,0	
süsivesinike fraktsioonid hydrocarbon fractions C6+	0,014	Kogu väävel Total Sulphur	mg/m ³	0,41	0,38
hapnik oxygen	0,003	Vesinik + karbonüülsulfiid Hydrogen+Carbonyl sulfide	mg/m ³	0,22	0,21
vesinik hydrogen	0,001	Merkaptaanväävel Mercaptan sulfur	mg/m ³	0,15	0,14

Tasub mainida, et Lääne- ja Kesk-Euroopas kasutataval võrgugaasil on metaani väärtus veidi madalam – ca 85-93%. [49]

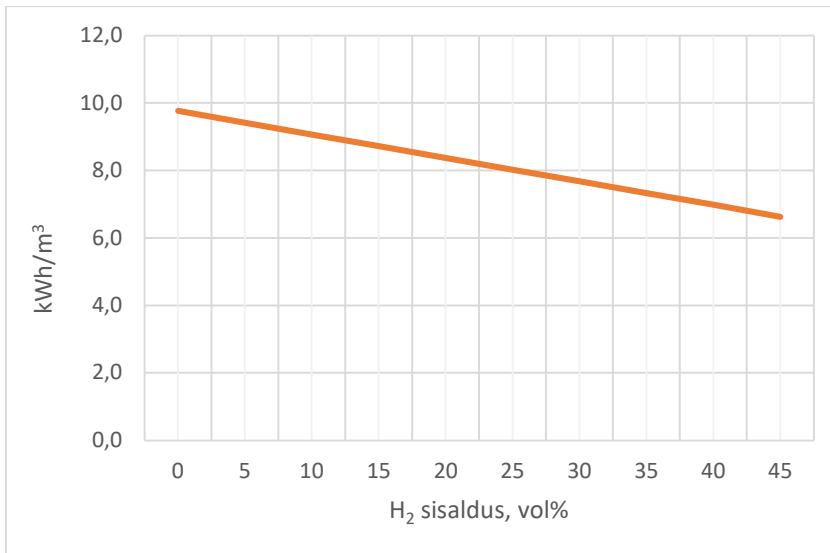
Tulenevate gaasi sisalduse % põhjal saab koostada kontrollarvutuse kütteväärtuse leidmiseks erinevate vesinikusisalduste juures. Valime segugaasi vol% vahemikuks 0-50vol%.

Tabel nr 8. Kütteväärtuse arvutuse tabel. H₂ on muutuv suurus 0-50vol%. [50]

Komponent	vol %	Mass M, g/mol	mass, g	massi %	Massi protsent süsinikus, weight %	Q ^r _{seg} (MJ/m ³)
1	2	3			$8=6 \times 4 / \Sigma 5$	$10=2 \times 10 / 100$
CO ₂	0,22	44,0098	0,0951	0,57	0,065	0,000
N ₂	0,54	28,0134	0,1499	0,90	0,000	0,000
H ₂	0,00	2,0159	0,0000	0,00	0,000	0,000
CH ₄	96,56	16,0428	15,4904	93,28	29,031	34,580
C ₂ H ₆	2,26	30,0696	0,6802	4,10	1,360	1,441
C ₃ H ₈	0,30	44,0965	0,1314	0,79	0,000	0,272
ΣC ₄ H ₁₀	0,10	58,1220	0,0587	0,35	0,000	0,120
Total	100		16,606	100,000	30,457	36,412

Tabel nr 9. Tulemused vesinikusisalduse muutmisega.

H ₂ sisaldus, % vol	Kütteväärtus (MJ/m ³)	Kütteväärtus kWh/m ³
0	36,4	10,1
5	35,1	9,8
10	33,9	9,4
15	32,6	9,1
20	31,4	8,7
25	30,1	8,4
30	28,9	8,0
35	27,6	7,7
40	26,4	7,3
45	25,1	7,0
50	23,9	6,6



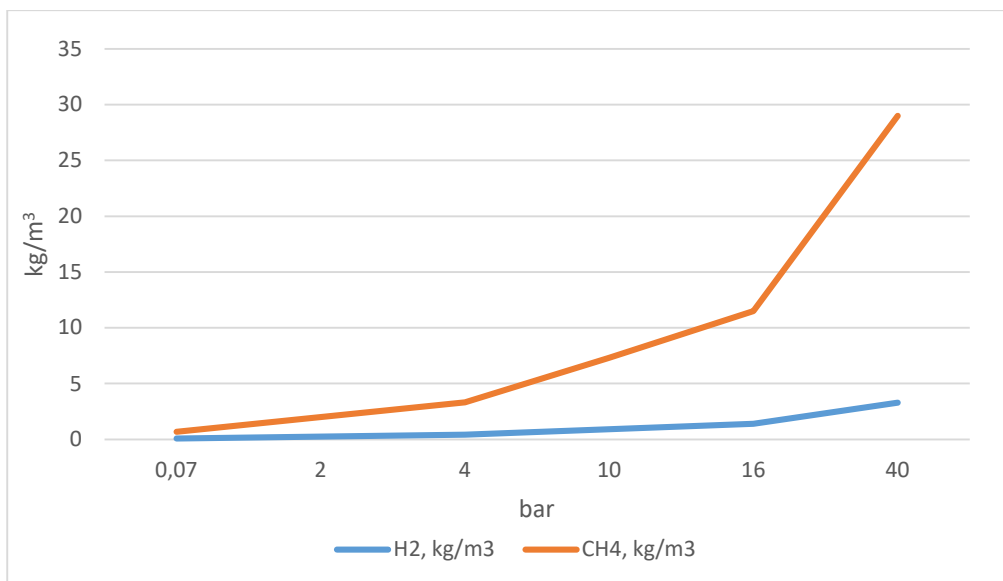
Joonis nr 20. Graafiline seos kontrollarvutusel energiatihedusel vesinikusisaldusega maagaasis (vol %).

Võib järeldada, et sama mahuühiku gaasisegude puhul vesiniku lisades kütteväärtus väheneb. See on ka mõistetav, sest vesiniku ja metaani kütteväärtus on erinev.

Eestis gaasitorde enimlevinud surveklasside arvutuse järgi ilmneb (tabel nr 10), et vesinik ja metaan on erinevates rõhuklassides erineva kaalulise mahutavusega. Ehk mida suurem on rõhk, seda erinevamad vesinik ja metaan oma koguse poolest (vol vs kg) on.

Tabel nr 10. Vesiniku ja metaani sisaldus erinevates surveklassides. [51]

bar	H ₂ , kg/m ³	CH ₄ , kg/m ³	CH ₄ /H ₂
0,07	0,09	0,71	7,89
2	0,25	1,99	7,96
4	0,41	3,31	8,07
10	0,9	7,3	8,11
16	1,39	11,5	8,27
40	3,3	29	8,79



Joonis nr 21. Graafiline seos surve ja kg sisaldusel m³ kohta.

Kui võtta eesmärgiks vesiniku lisamine gaasi ülekandevõrku, siis tuleks kontrollida, kas erinevate rõhkudele üleviimisel vesiniku ja metaani vol % muutub.

Kontrollarvutustega [51], kuidas käitub 80%/20% gaasisegu rõhu alandamisel 40bar -> 26/16/2/0,06bar.

Tabel nr 10. Gaasisegu koostise seos rõhust.

40 bar						26 bar					
H2			CH4			H2			CH4		
kg	m3	%	kg	m3	%	kg	m3	%	kg	m3	%
0,65	0,2	20	23	0,8	80	0,65	0,29	19,46%	23	1,2	80,5%

40 bar						16 bar					
H2			CH4			H2			CH4		
kg	m3	%	kg	m3	%	kg	m3	%	kg	m3	%
0,65	0,2	20	23	0,8	80	0,65	0,48	19,4%	23	2	80,6%

40 bar						2 bar					
H2			CH4			H2			CH4		
kg	m3	%	kg	m3	%	kg	m3	%	kg	m3	%
0,65	0,2	20	23	0,8	80	0,65	2,7	18,9%	23	11,55	81,1%

40 bar						0,06 bar					
H2			CH4			H2			CH4		
kg	m3	%	kg	m3	%	kg	m3	%	kg	m3	%
0,65	0,2	20	23	0,8	80	0,65	7,39	18,6%	23	32,34	81,4%

Seega vaadeldud surveklass kuni 40bar, kus vesiniku sisaldus on 20vol% ei muuda oluliselt gaasisegu koostist mahu % osas. Muutus on kuni 1,5vol%. Suuremal surveel on muutus suurem, kuid antud töö raames neid ei uurita. Eesti maismaa ülekandevõrgu suurim surve on tänapäeval ca 40bar.

Mida kõrgem on vesiniku osakaal segus, seda suurem on gaasikoostise segu osakaalu muutus rõhkude muutusel. Soovitatav oleks uutes regulatsioonides määrata lubatud vesinikusisalduse vol% vahemikuna, mitte kindla fikseeritud vol%-na.

2.5 Olemasolevate gaasitarne torustike sobivus vesiniku sisaldusele

Olemasolevate torustiku detailide, tihendite, tarvitite tootjad peavad liikuma oma tehnoloogias vesiniku sisalduse suurendamise suunas. Ilma tootjate poolse toeta ei ole vesiniku kasutamise levitamine jätkusuutlik. Seega antud nõuded tuleb kehtestada läbi EU standardite.

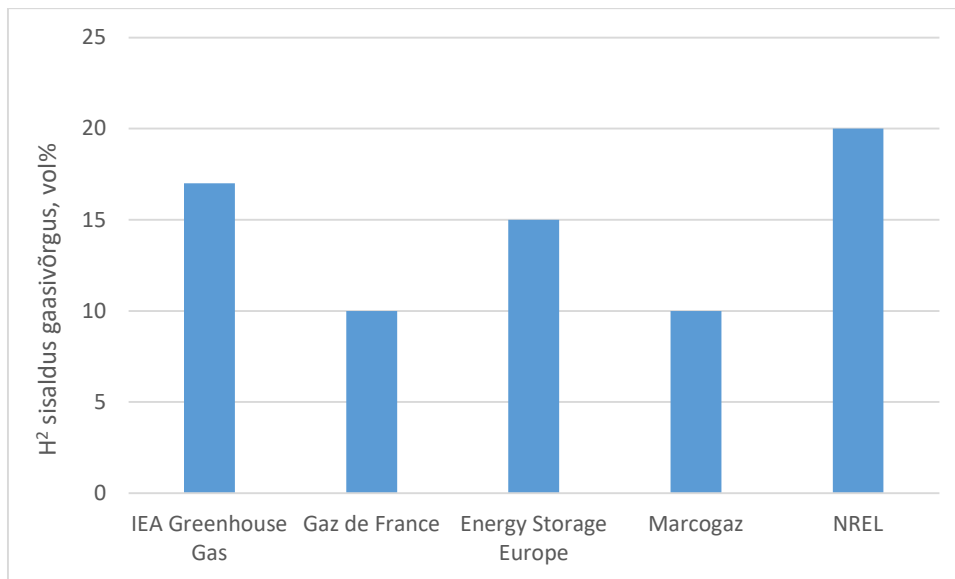
IEA Greenhouse Gas uurimistöö kohaselt on vesiniku gaasilekke määr 0,00005% vesinikusisalduse 17vol% juures. Kuigi gaasikadu torustikest on majanduslikult tühine, võib lekkimine kinnistesse ruumidesse tekitada plahvatus- või lämbumisohtu. [52]

Gaz de France uurimistöö uuris PE80 plasttorustiku lekkeid 10vol% vesinikusisalduse korral. Testitud rõhud olid (5, 9 ja 13 baari), millest järeldati, et vesiniku lekkimine on neli kuni viis korda suurem kui metaanil samadel tingimustel. [53]

Energy Storage Europe andmetel on optimaalseim vesiniku osakaal, mida saaks gaasivõrkudes segada, ca 15vol%. [54]

Vastavalt *Marcogaz* uuringule ei too kuni 10vol% vesiniku lisamine gaasitorustikele mingeid olulisi kõrvalmõjusid kaasa. [55]

National Renewable Energy Laboratory uurimistöös järeldati, et madalate vesinikukontsentratsioonide lisamine olemasolevatele maagaasitorustiku süsteemidele mahuga 20vol% või vähem suurenevad riskid vaid vähesel määral seoses suurema plahvatuspiiriga. [56]



Joonis nr 22. Erinevate uurimistulemuste tulemused H₂ sisalduse kohta torustikes. [52] [53] [54] [55] [56]

Joonis nr 22 põhjal võib järeldada, et enamik töötavatest ja korrasolevatest gaasitarne torustikest on valmis vesinikku vastu võtma vähemalt 10vol%.

Terastorusikud on vesiniku suhtes probleemsemad. Keevisliite mikropragudest, äärik- ja keermesliitmetest võib vesinik kergemini lekkida. Vesiniku määra suurenedes võib torudel tekkida nõ vesinikhaprumine, ehk pragude tekkimine. Lisaks on riskikohaks äärik- ja keermesliitmikud, mida leidub nii gaasiregulaatorjaamades kui ka tarbijate mõõdusõlmedes. Vesiniku lisamise eelduseks on terastorude lõikude renoveerimine või põhjalik kontroll ning äärik- ja keermesliitmikute likvideerimine.

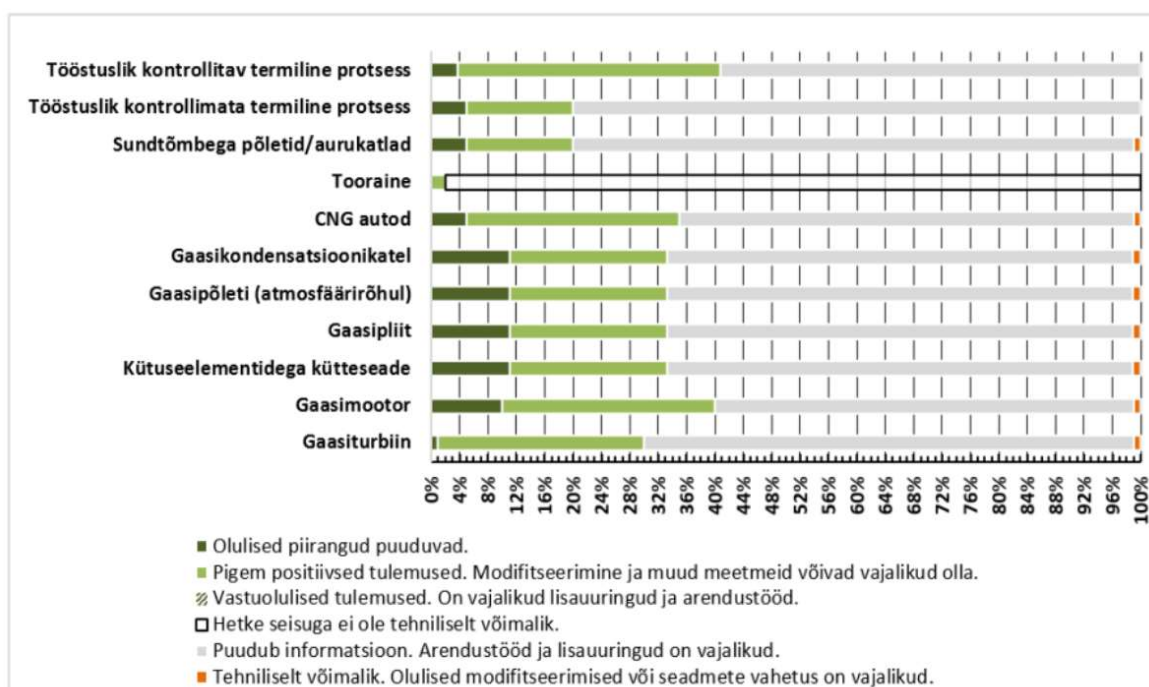
Edinburgi Ülikooli uurimistöös [57] analüüsitakse vesinikuga kokkusobivaid odorante. Ühelt poolt ei tohi odorant muuta/rikkuda gaasi põlemise kvaliteeti ega tekitada märkimisväärselt kõrvalprodukte. Teiselt poolt peab see andma edasi iseloomuliku lõhna, et võimaliku lekke korral inimesi eelhoiatada, enne kui kontsentratsioon muutub tule-/plahvatusohtlikuks. Uuringust selgus, et ka maagaasiga koos kasutatavad odorant THT (tetrahüdrotiofeen) töötab piisavalt tõhusalt vesiniku/maagaasi segus. Siiski rõhutatakse, et ruumid kus asuvad gaasiseadmed ja sisetorustikud peavad olema piisavalt ventileeritud. [57]

2.6 Muud gaasipaigaldised ja torustiku osad

Gaasi seadmetele ja tarvitajatele on oluliselt raskem vesiniku sisalduse sobivuse analüüsi teha, kuna gaasivõrguga seotud tooteid ja nende tootjaid on väga palju. Lisaks sõltub toote sobivus vesinikusisaldusega gaasisegule toote vanusest, korrasolekust/seisukorrast.

Marcogazi uuring [58] on välja selgitanud lisaks torustiku vastupidavuse vesiniku sisaldusele ka erinevate seadmete ja tarvitite taluvuse vesiniku sisaldusele.

Olulisemaks vesiniku suuremahuliseks võrku lisamise piiranguks on lõpptarbija vananevad seadmed.



Joonis nr 23. Erinevate gaasiseadmete vesinikusisalduse taluvus Marcogazi uuringus, vol%. Tõlge Eesti keelde Elering AS „Eesti Gaasiülekandevõrgu arengukava 2021-2030. [58]

Statsionaarsete gaasimootorite eelistatav töörežiim ei soosi vesiniku kontsentratsiooni muutusi. Neid seadmeid tuleb vastavalt tootja spetsifikatsioonidele muuta või kohandada. Kaasaegsetel gaasiturbiinidel on ranged kütusespetsifikatsioonid. Väljaspool neid spetsifikatsioone töötamine nõuab tootja loal juhtsüsteemide muutmist või kohandamist. Samuti on gaasiturbiinide jaoks vastuvõetamatud ootamatud vesiniku kontsentratsiooni kõikumised. [58]

Tabel nr 11. Erinevate võrguosade vastuvõtlikkus vesiniku sisaldusele [58]

Takistavad tegurid, komponendid/elementid	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		

Võttes arvesse lõppkasutajate seadmete või tööstusrajatiste vajalike muudatuste inertust, peab vesiniku segamine tõenäoliselt algama väga madalatel kontsentratsioonidel ja suureneb seejärel aja jooksul järk-järgult (kui see on õigustatud).

Praktiliselt ootaks ees põhjalik töö põletite ümberseadistamisel/väljavahetamisel. See oleks suur töö, kuid teostatav, kui regulatsioonid ja nõuded seda toetaks. Uued paigaldatavad põletid peaksid juba praegu olema vesinikusisalduse muutuseks kohaldatavad – hetkel puuduvad nõuded võrgu valdajate poolt.

Uuematel gaasimootoriga autodel ei ole probleemiks suurem vesinikusisaldus metaanis. Kuni 10vol% on tootjate poolt lubatud/garanteeritud. Kuid tuleb arvestada ka UN/ECE nr 110 eesikrjaga, kus sätestatakse, et CNG sõidukite paakide vesiniku sisaldus võib olla maksimaalselt 2vol%. Takistavaks faktoriks on terasmahutite haprumine. Tegemist on kõrge süsinikusisaldusega terasega. Tasub juhtida tähelepanu, et eeskiri on vastu võetud 2010. aastal ja vajaks uuendamist. [59]



Joonis nr 24. Scania P340 gaasimootoriga veoauto. Foto: autori erakogu.

Scania Eesti esinduse sõnul on hetkel Scania gaasimootorites ametlikult lubatud kasutada kuni 10vol% vesinikku. 2018. aastal testis Scania tehase arendusosakond gaasiveokeid ja -busse ka 20vol% vesinikusisaldusega metaanis, kuid ametlikku kasutusluba sellele veel ei ole. Kuigi otseseid probleeme ei ilmnenud.

Scania arendusosakonna hinnangul peaks nende gaasimootorid töötama kuni 30vol% vesinikuga, kuid see vajab veel pikemaids testsõite.

2.7 Ohutus

Peamised ohutegurid on põlemine/plahvatus ja vesiniku lekkimine. Kuigi vesinik hajub torustikust väikestes kogustes lekkides kiiresti, on ohuks ventilatsioonita siseruumid.

Vesinikul on võrreldes metaaniga erinevad põlemise näitajad.

Tähtsamad nendest on:

Vesinikul süttimistemperatuur 650 °C;

Metaani süttimistemperatuur 580 °C;

Metaani põlemisvahemik on 5-15vol% õhu segus;

Vesinik põleb 3-70vol% õhu segu;

Vesinikul on oluliselt kiirem leegi kiirus: H₂ – 300cm/s, CH₄ – 30cm/s.

Vesiniku lisamisel gaasivõrku peavad gaasijaotusjaamades ja rõhu reguleerimise jaamades olema võrreldes praegusega veelgi tundlikumad kaitseklapid, mis sulguvad automaatselt rõhu langedes. Ehk kui kuskil põhjustatakse torustiku vigastus (Tallinna piirkonnas juhtub seda 4-5 korda aastas), peavad kaitseklapid kohe tajuma rõhu langust ja sulguma gaasi edastamise vähendamiseks, et ära hoida suuremat õnnetust.

Gaasi ehitus- ja remonditöödel tuleb arvestada suuremat põlemise ja plahvatuspiiri. See eeldab tuletööde tegemisel veelgi suuremat tähelepanu ja ettevaatust. Vajalik oleks ka ehitus- ja paigaldusjuhendite täpsustamine.



Joonis nr 25. D-kategooria maagaasi toru sulgurpalli akna keevitamine maagaasi/õhu piiril 2016. a. Foto: Autori erakogu.

EU enimlevinud gaasitorude sulgemise tehnoloogia väljatöötaja Ravetti SRL teostab aktiivset arendustegevust, et seadmete tihendid taluks vesinikust tingitud eripärasid. Lõputöö autor on kasutanud ehitustöödel Ravetti tehnoloogiat nii gaasitorude kui ka kaugküttetorude sulgemisel.



Joonis nr 26. Ravetti Stop-System. [60]

Enamlevinud detektor gaasivõrkude lekete igapäevaseks kontrolliks on Sewerin PM4 detektor või auto külge ninasse kinnitatud Selma.



Joonis nr 27. Gaasi detektor Sewerin PM4. [61]

Oma väiksusest hoolimata on Sewerin PM4 väga tundlik ja reageerib juba väiksemalegi metaani olemasolule atmosfääris (alates 1PPM). Seade sobib nii maa-aluste trasside kontrollimiseks kui ka koht-kontrolliks (keevisliited, keermesliited). Harjumaa piirkonnas on igapäevaselt töös 4 gaasitrasside kontrollijat antud aparaadiga.

Lisaks kasutatakse Eestis gaasitorustike kontrollimisel auto külge kinnitatavat lasertehnoloogial põhinev detektorit Selma, mis suudab gaasilekke tuvastada mitmekümne meetri raadiuses tee-maalt ja sellega külgnevatel aladel.



Joonis nr 28. Auto külge kinnitatav gaasidetektor Selma. [62]

Kuna vesinik lekib mikropragudest kergemini oma väiksuse tõttu, oleks vaja üle minna vesiniku tundlikkusega seadmetele. Sarnaselt metaani detektoritele pakuvad tootjad kombineeritud H_2+CH_4 detektorit, nt Sewerin Variotev 460. Seade on võimeline tuvastama leket alates 0,1ppm H_2 .



Joonis nr 29. Metaani ja vesiniku kombineeritud detektor Sewerin Variotev 460. [61]

Gaasi jaamades asuvad statsionaarsed detektorid, mis saadavad lekke avastamise korral signaali dispetšerile. Antud seadmed tuleks vesiniku tundlikkusega seadmete vastu välja vahetada.

Vesinikusisaldusega gaasitorustike hoolduskulud tõuseksid, kuna neid torustikke ja süsteeme tuleb sagedamini kontrollida ja kontrollimise seadmed on kallimad. Autori hinnangul suurenevad jaotustorustike hoolduskulud ca 10-20% võrreldes praegusega. Lisaks suureneks tõenäoliselt lekete arv, mis omakorda toob võrguomanikule kaasa lisakulud torustiku remontimiseks.

2.8 Olukord maailmas

Osades EU riikides on vesiniku lisamine gaasitarne torustikele juba lubatud ja seda ka tehakse. [63]

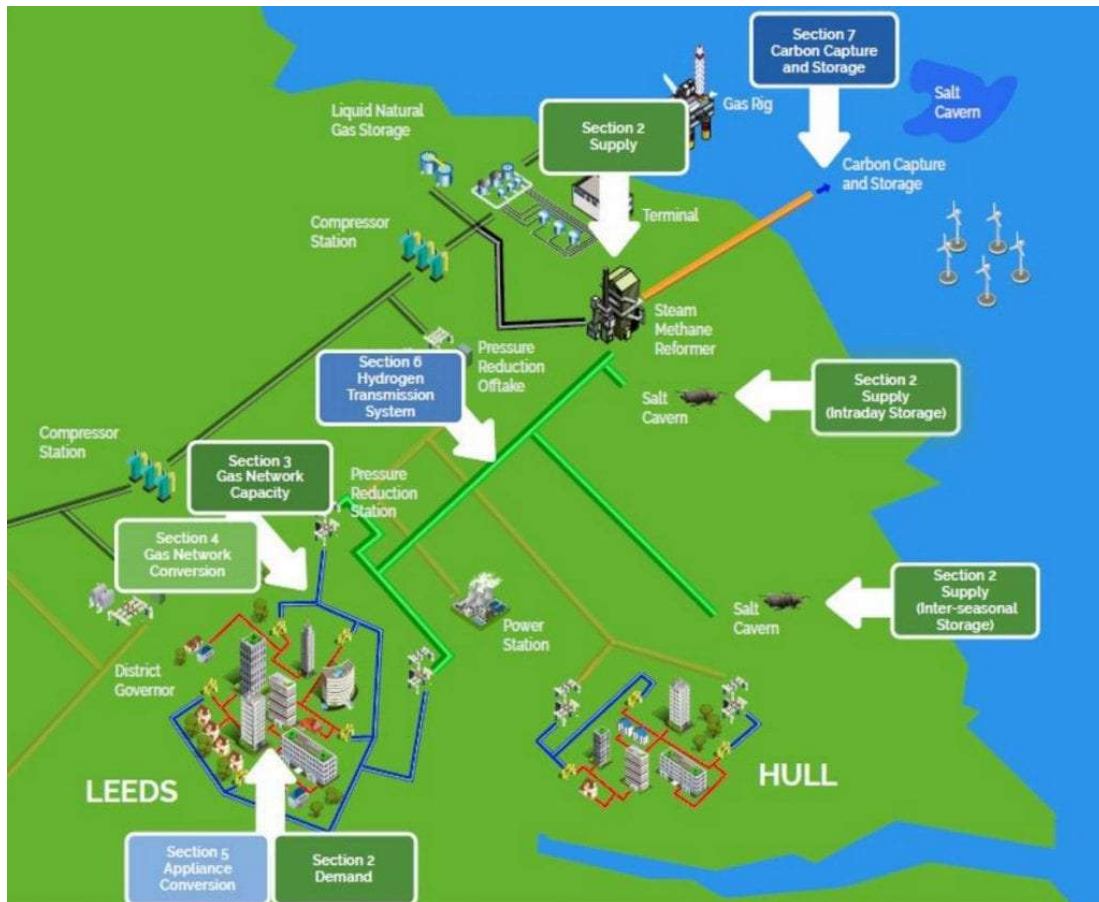
Tabel nr 12. Lubatud vesiniku sisalduse määr gaasitorustikes. [63] [64] [65] [66]

Riik	Lubatud H2 sisaldus, vol%	Märkus
Saksamaa	10%	Ainult juhul, kui konkreetse võrguga ei ole ühendatud gaasi tanklaid. Tanklatega ühenduses olevas võrgul lubatud 2vol%
Holland	12%	
Pransusmaa	6%	
Hispaania	5%	
Austria	4%	
Itaalia	3-10%	Katselõigud kuni 30vol%.

Itaalia suurim gaasitarne ettevõtte SNAM teostas hiljuti reaalseid katseid vesiniku lisamiseks maagaasi tarnetorustikesse kuni 30vol%. Vesiniku 10vol% sisaldus on paljudes piirkondades juba püsivalt. [66]

Vastavalt samale *Agency for the Cooperation of Energy Regulators* raportile on enamik EU liikmesriikide ülekandevõrgu operaatoreid nõus sellega, et vesinikusisaldust peaks reguleerima EU ühtselt, mitte üksikud võrguvaldajad iseseisvalt. [63]

Suurbritannias, gaasiettevõtted National Grid ja Scottish Gas Network segavad vesinikku maagaasi torujuhtmetesse mitte ainult elektrijaamade või tööstuslike tootmispiirkondade jaoks, vaid ka kodude ja ettevõtete jaoks. Tegu on sinise-vesiniku tootmise ja kasutamisega. Ehk vesiniku tooraineks on ikkagi maagaas koos süsiniku salvestamisega. [33]



Joonis nr 29. Leedsi linna gaasitarne võrgustik. Roheline – vesiniku torustikud. Kollased – maagaasi torustikud. Sinine ja punane – segugaasi torustikud. [33]

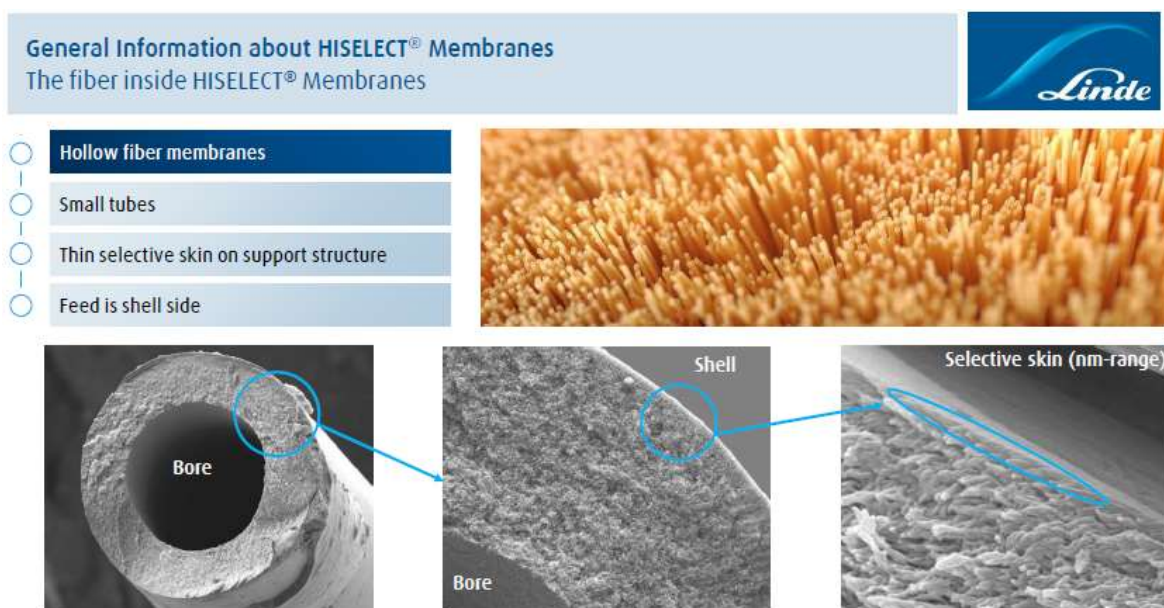
2.9 Vesiniku eraldamine segugaasiga torustikust

Kuna osad tööstused, sh sadamad, lennujaamad või tanklad sooviksid saada puhast vesinikku, siis ka selle suunaline arendustöö on materjali/keemiatööstuses käimas, et segugaasiga gaasitarne torustikest uuesti eraldada puhas vesinik.

Uurimistöös *Extraction of Hydrogen* [67] on uuritud 5-20vol% vesiniku ja metaani segust vesiniku eraldamist. Tulemuseks on kuni 74% vesiniku eraldamise efektiivsus. Traditsiooniliste eraldusprotsesside abil on vesinikku metaanisegust ekstraheerida raske, kuna vesinik on madala osarõhuga. Metallhüdriidid ($\text{LaNi}_{4.8}\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{0.1}$) neelavad selektiivselt vesinikku ja pakuvad võimalust ületada traditsiooniliste eraldamismeetodite

piirangud. Metallhüdriidi puhastamise eeliseks on väikese fraktsiooni imendumine pealevoolust, seega on see eelistatav lahjendatud segude jaoks ja see võib olla praktilisel otstarbel teostatav. Madala potentsiaaliga või heitsoojuse kasutamisega reaktsiooni käivitamiseks on võimalik suurendada vesiniku puhastamise efektiivsust metallhüdriidide abil.

Suur gaasi-kontsern *Linde* on välja töötanud oma vesiniku imbumise tehnoloogia kasutades peenikesi torusid, mis on tehtud spetsiaalsest materjalist, kust vesinik imub läbi, kuid metaan mitte. [68]



Joonis nr 30. Linde HISELECT Membraanid vesiniku eraldamiseks. [68]

Teised vesiniku eraldamise tehnoloogiad on PSA (*Pressure Swing Adsorption*), separatsioonimembraanide kasutamine ja elektrokeemiline vesiniku eraldamine (EHS või vesiniku pumpamine). Parim ekstraheerimismeetod sõltub torustikus oleva vesiniku segust. Kõik need tehnoloogiad on alles arengujärgus (early stage).

3. VESINIKU KASUTAMINE EESTIS

Vesiniku lisamine maagaasivõrku Eestis on täna piiratud gaasivõrgueeskirjaga, kus lubatud vesinikusisaldus Eestis on max 0.1 vol%. Kuid samas on Eesti süsinikuneutraalsuse saavutamise eesmärkides fikseeritud eesmärk saavutada 10% taastuvenergia osakaal tarbitavas gaasis 2030 aastal. See on hinnanguliselt 400GWh. Gaasivõrgu dekarboniseerimise eesmärgi saavutamiseks on oluline kõrvaldada seadusest tulenevad takistused ja ka tehnilised takistused. [69]

Vastavalt majandus- ja taristuministri määrusele on lubatud gaasi koostise piirmäärad järgnevad:

Tabel nr 13. Gaasisüsteemi sisestava gaasi kvaliteeditingimused. [70]

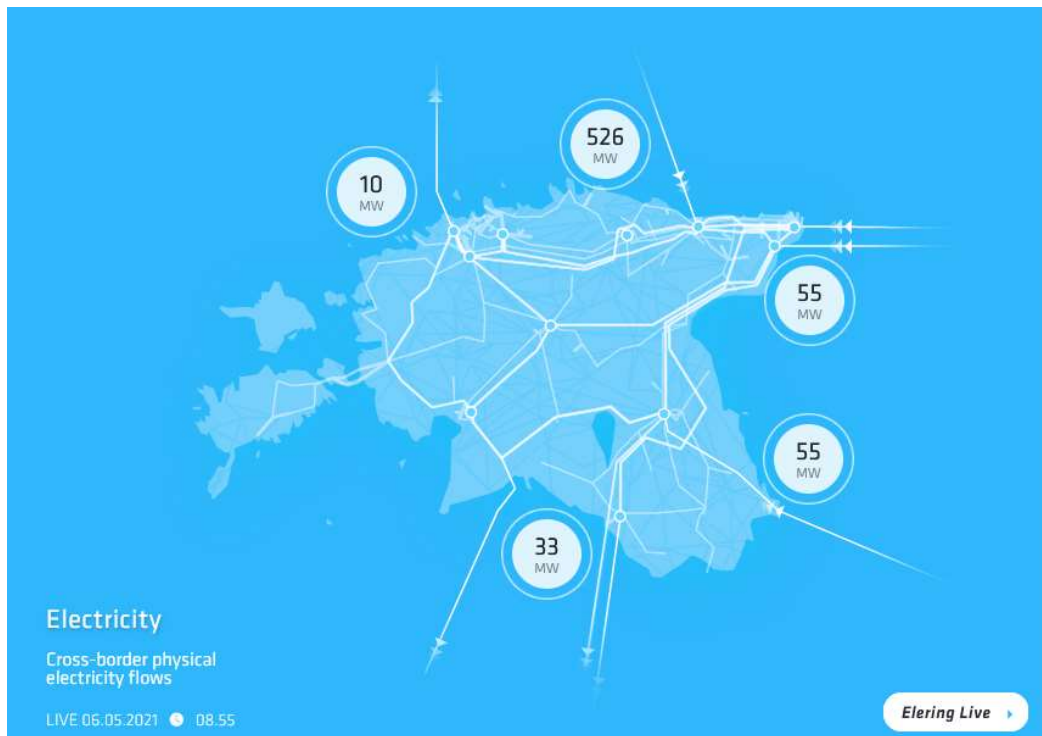
majandus- ja taristuministri
28.07.2017 määrus nr 41
„Gaasituru toimimise võrgueeskiri“
Lisa

Gaasisüsteemi sisestava gaasi kvaliteeditingimused

Parameeter	Ühik	Väikseim väärtus	Suurim väärtus
Ülemine kütteväärtus – H_s	kWh/m ³	9,69	-
Wobbe arv – WI	kWh/m ³	13,06	14,44
Suhteline tihedus – d	-	0,55	0,75
Lämmastikusisaldus – N₂	mol/mol	-	3%
Süsihappegaasi sisaldus – CO₂	mol/mol	-	2,5%
Hapnikusisaldus – O₂	mol/mol	-	0,02%
Vesinikusisaldus – H₂	mol/mol	-	0,1%
Üldise väävli sisaldus ilma odorandita – S	g/m ³	-	0,03
Väävelvesiniku ja karbonaatse väävli sisaldus – H₂S + COS	g/m ³	-	0,007
Merkaptaanväävli sisaldus ilma odorandita – RSH	g/m ³	-	0,016
Saasteainete osakeste sisaldus	g/m ³	-	0,001
Vee ja süsivesinike vedelate osakeste sisaldus	g/m ³	Mittelubatav	
Metaanarv	-	65	-
Süsivesinike kastepunkti temperatuur rõhul (0,1–7) MPa – HC DP	°C	-	-2
Vee kastepunkti temperatuur rõhul 7 MPa – H₂O DP	°C	-	-8

Tänapäeval on Eesti suures osas elektri ja gaasi importija. Eestis looduslikku maagaasi ei leidu (va Pranglil ja Hiiumaal väga vähestes kogustes).

Keskmine elektri defitsiit on ca 400-600MW.



Joonis nr 31. Elektri import, eksport ja transiit vastavalt Elering Live-le. [71]

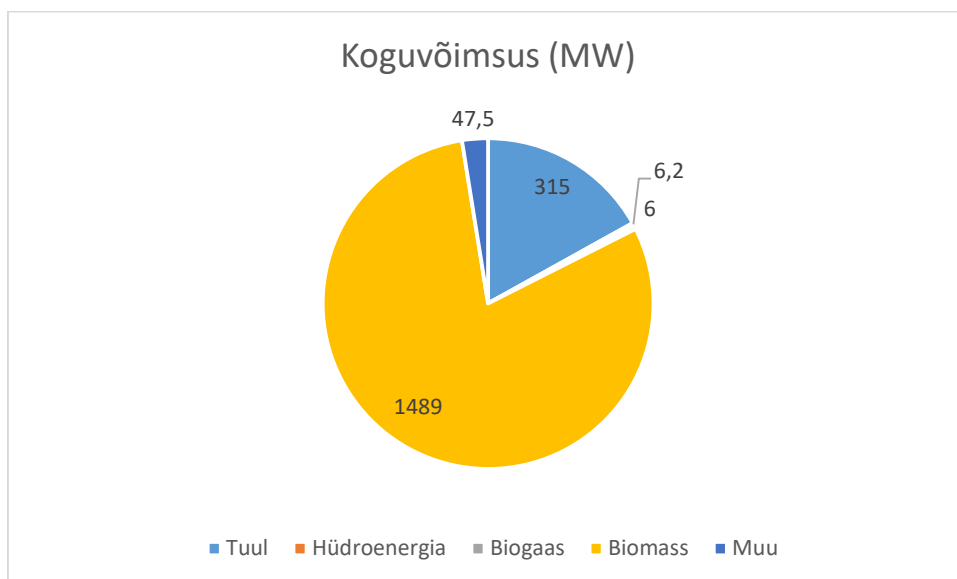
Gaasiga on olukord analoogne. Defitsiit on ca 350-400MW.



Joonis nr 32. Gaasi import ja transiit vastavalt Elering Live-le. [71]

Kokku tarbiti Eestis 2019. aastal elektrienergiat 8607GWh, millest taastuvenergia allikatest toodeti kokku 1970 GWh ehk 21% tarbimisest (sh tuulest ca 823GWh (2020. a), päikesest 54GWh, biomassist 1162GWh, hüdroelektrijaamadest 22GWh). [72]

Eesti kogu elektrienergia tarbimine koos võrgukadudega on 2020. aastal AS Elering andmetel 8,38Twh, millest taastuvatest energiallikatest toodeti elektrit 2224GWh. Taastuvenergia toormisvõimus jaguneb vastavalt skeem nr 20. [72]



Joonis nr 33. 2020. aastal päritolutunnuse järgi taastuvenergia tootmise jagunemine. [72]

Tasub ka mainimist, et osade teadlaste arvates ei ole biomass nii keskkonnasäästlik kütus, kui mõni ringkond seda väidab. See on küll taastuv ressurss, kuid mitte CO₂ neutraalne. Põletamine on hoopis intensiivsem, kui CO₂ sidumine puude kasvamisega. Lisaks ei võeta arvesse ka selle tootmiseks ja transportimiseks kulutatud fossiilset energiat, mis on materjali ekspordi korral märkimisväärne osa. [73]

Biometaani toodeti 2020. aastal ca 100GWh. Kokku tarbiti maagaasi (koos biometaaniga) 2020. aastal ca 52000GWh (5,2TWh) ehk biometaani osakaal oli tarbimises ca 0,02%. [74]

Tuuleparkide arendusprojekte on mitmeid. Tabel nr 14. Tuuleparkide planeeringud. [75]

Arenduspiirkond	Ettevõte	Tuulikute arv	Võimsus	Projekti algus
Hiiumaa	Enefit Green AS (endine Nelja Energia)	160	1100 MW	2006
Liivi laht	Eesti Energia	160	1000 MW	2009
Neugrundi madalik	Neugrund OÜ	40	380 MW	2010
Liivi laht	Tuuletraal	76	380 MW	2013
Liivi laht	Five Find Energy	1	4 MW	2011
Saaremaa	Saare Wind Energy	100	600 MW	2015
Saare-Liivi ja Sõrve	Utilitas	800	7800 MW	2020
Saaremaa läänerrannik	Sunly	169	1644 MW	2020
	KOKKU	1430	12908 MW	

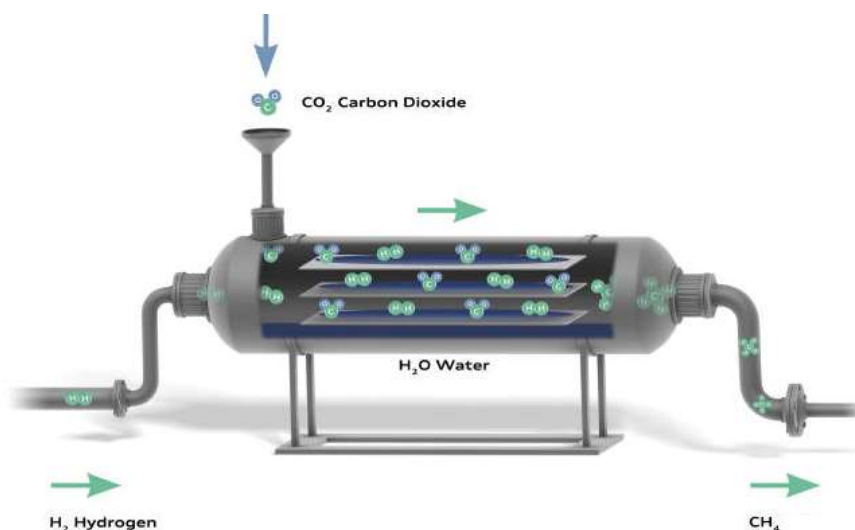
Kuigi kõikide planeeringute realiseerimine on vähe tõenäoline, on planeeritavate tuuleparkide kogu aastane tootmisvõimsus parimate ilmastikutingimuste (pideva tuule puhul) ja kasuteguri 32% puhul ca 36000 GWh.

Kui arvestada sellest maha elektrienergia aastane defitsiit (8600-2000=6600GWh), oleks elektrienergia ülejääk 24000GWh. Arvestades, et ka elektrile on ekspordinõudlus ca 50%, jääks potentsiaalseks vesiniku tootmiseks võimsust sa 12000GWh.

Arvestades vesiniku tootmiseks vajalikku kasutegurit (ca 0,65), saaksime vesiniku energiakoguseks $12000 \cdot 0,65 = 7800 \text{ GWh}$ (7,8TWh), mis on ca 140% Eesti gaasi tarbimisest (100% - 5,2TWh).

Kui eeldada, et kogu tuuleparkidest ülejääv energia kandub vesiniku tootmiseks ja uute tehnoloogiatega kasutegur paraneb, saaksime toodetavaks vesiniku energia hulgaks ca 18TWh. Mis oleks ca 350% eesti gaasi tarbimisest.

Vesiniku ülejäägi korral on üks alternatiivne lahendus vesiniku ekspordi kõrval sünteetilise metaani tootmine (SNG). Eeldatav maksumus on ca 65.-EUR/MWh. [76]



Joonis nr 34. Sünteetilise metaani tootmise reaktsioon. [77]

Arvestades, et eelnevalt uurimused kinnitavad, et gaasi tarnesüsteemid taluvad vesinikusisaldust maksimaalselt 20vol%, oleks Eesti sisetarbimine kaetud ja võimalus ekspordiks.

Tõenäolisemalt peaks Eesti liikuma esmalt sellist teed nagu Austria ja Prantsusmaa ning seadma eesmärgiks lisada gaasitarne torustikesse kuni 5vol% vesinikku. See ei tooks kaasa kardinaalseid võrgu ümberehitusi ega probleeme seadmetega.

5vol% vesinikusisaldus tähendaks energiasisalduse poolest 1,6%, ehk Eestile ca $5,2\text{TWh} \cdot 1,6\% = 0,083\text{TWh}$ vesinikuenergiat gaasivõrgus. Selle tootmiseks (roheline vesinik) kuluks ca 0,13TWh elektrienergiat, mille tootmiseks omakorda oleks vajalik elektrienergiat ca 47MW tuulepargist (ca 13 tuulikut). Tuuliku maksumus on ca 1,0milj eur/MW. Seega 13MW tuulepargi maksumus võib olla suurusjärgus 13 miljonit EUR. Jaotades investeeringud 20 aasta peale, saaksime aastaseks kuluks 0,65 mil eur, milles küll ei ole arvestatud omaniku kasumiootust ja käitamiskulusid.

Sellele lisandub vesiniku tootmise maksumus, mis võiks olla orienteeruvalt 50.-eur/MWh (P1.5) Seega 83GWh vesiniku tootmise hind oleks $83\,000\text{kWh} \cdot 50 =$ ca 4,1 milj eur. Kogumaksumus seega ca 0,65+4,1 milj eurot 83GWh (83 000MWh). Seega kujuneb vesiniku tootmise maksumuseks ca 60.-/MWh (koos kõigi investeeringutega).

Gaasibörsil on gaasi hind suurusjärgus 21-25.-/MWh. [78]

Arvestades, et CO₂ heitmekogus maagaasis MWh kohta on ca 200kg/MWh kohta [79] saaksime 5vol% vesiniku kasutamisel CO₂ kokkuhoidu ca 17 000 t/aastas.

CO₂ kvoodi hind on suurusjärgus 50.-EUR/t.

Seega ainult majanduslikust seisukohast vesiniku kasutamine lähitulevikus on ebaotstarbekas, so kallim kui fossiilenergiat kasutades. Seda senini, kuni CO₂ heide ei ole piisavalt maksustatud. Vaja on olulisi riigi või EU poolseid lisavahendeid või meetmeid, mis kallutaks tasakaalu soovitud suunas. Argumentideks keskkonnahoid, dekarboniseerimine ja energia julgeolek.

Taastuvatest allikatest toodetud „roheline“ vesiniku tootmiseesmärkide täitmist pärsib kõige rohkem liiga aeglane taastuenergiaallikatest toodetud elektri mahu kasv ning kohalike elanike, omavalitsuste ja ka nt kaitseministeeriumi vastuseis uutele tuuleprojektidele.

Arvestades taastuenergia eesmärke, siis enim, kui Eesti pole suutnud oluliselt hoogustada biometaani tootmist (kuni 40-50% tarbitud gaasi koostises), ei ole praktilist põhjust hakata pingutama vesiniku lisamisega gaasivõrku. Efekt oleks väike ja kallis. Biometaani majanduslikku äratasuvust antud lõputöö ei käsitle.

3.1 Vesiniku tootmine Eestis

Teadadaolevad Eesti suuremad vesiniku pilootprojektid on järgnevad:

Tabel nr 15. Vesiniku pilootprojektid. [80]

Ettevõtte	Sisu kokkuvõtte
Eesti Energia ja Alexela AS	Pakri vesinikutehase ehitamine ning kaasneva logistikasüsteemi rajamine, sh vesiniku tankla rajamine.
Elcogen AS	Uute kütuseelementide arendamine.
Estiko Energia AS	Tartus Raadi muutmine regionaalseks vesiniku-keskuseks.
LTH-Baas OÜ	Tööstusliku mereplatvormi väljaarendamine vesiniku tootmiseks ja punkerdamiseks.
OÜ Stargate Hydrogen Solutions	Uute leelis-elektrolüüserite väljaarendamine.
Tallinna Sadam AS	Vesiniku praami ehitamine. Pakriranna ja Paldiski vesinikuterminali rajamine.
Vesiniku Tehnoloogiad OÜ	Plasma-keemilisel meetodil põhineva tootmisjaama/tankla rajamine.

Tallinna Sadam on planeeringutes välja toonud võimaluse ehitada 10MW elektrilise võimsusega vesiniku salvestusjaam, mis võiks asuda Paldiskis või Muugal. [81]



Joonis nr 35. Fukushima vesinikujaam, mille analoogi võiks ehitada Eestisse. [82]

3.2 Vesiniku kasutamine ja tarbimine Eestis

Suurim potentsiaal vesinikule Eestis ekspordi kõrval on selle kasutamine transpordisektoris ja ammoniaagi tööstuslikus tootmises.

Vastavalt Eesti energia- ja kliimakava eesmärkide saavutamise kavale peaks 2030. aastaks taastuvatest energiaallikatest toodetud kütus moodustama tarbitavast transpordikütusest 14%. Sellest tulenevalt on majandus- ja kommunikatsiooniministerium käivitanud pilootprojekti mahuga 4,8 miljonit eurot rohevesiniku kasutuselevõtuks ühistranspordi sektoris. [82]

3.3 Vesinik Eesti gaasitarne torustikes

Kui jätta arvestamata vesiniku päritolu, siis Eesti gaasitarne torustike valmisolek vesiniku sisaldamiseks tekitab võrguvaldajates kahetisi tundeid.

Harjumaa piirkonna Gaasivõrk AS torustiku näitel oleks vesinikusisaldusele üleminekul suurimaks probleemiks mitukümmend aastat vanad terastorud, vanad hüdrolokud ja gaasisõlmedes keermesliited ja äärik-ühendused, mis on tõenäolised lekete allikad.

Adven Eesti AS arvates tekiks uuringutele vaatamata suured ja pidevad probleemid gaasitorustike leketega. Seega mida madalam vesinikusisaldus torustikes, seda parem.

Samas nagu P1.1 mainitud, kasutati Eestis aastakümneid põlevkivigaasi, kus vesiniku kontsentratsioon oli 20-25vol%. Kuigi puudub täpne andmebaas, on suurematest vesiniku leketest ja õnnetustest, mis oleks olnud seotud otselt vesinikuga, vähe informatsiooni.

Suurt rolli mängib ka torustike vanus. Eesti ülekandevõrgus on ca 50% torustike vanus üle 40aasta. [84] Ka jaotustorustikes on palju torulõike aastatest 1950-1960. Torustike rekonstrueerimiseks finantsvahendid peavad hetkel tulema ainult omanikult endalt. Euroopa abifondide ja Keskkonna Investeeringute Keskuse vahendid gaasitarne torustike rekonstrueerimiseks hetkel ei rakendu (erinevalt nt kaugkütte torustike uuendamisest). Gaasitorude uuendamiseks ja gaasi-energia dekarboniseerimise visiooni täitmiseks, peab selline suhtumine muutuma. Ilma investeeringuteta eesmäärke ei saavuta!

Arvestades kliima eesmärke, siis fossiilsete kütuste osakaal peab vähenema. Ainus jätkusuutlik gaasi-energia mudel peab sisaldama taastuvatest energiatest tulenevat vesinikku ja biometaani.

Lähtudes p2.3 analüüsist ei ole olulist vahet, kas vesinikku lisada maagaasi ülekandevõrku (40bar) või kohalikku jaotusvõrku (0,06-5bar). Jaotusvõrkude puhul oleks piiranguks ainult konkreetsete piirkondade tarbimise maht. Ülekandevõrku lisamise puhul sellist piirangut ei tekiks.

Tarbijatele vesiniku lisamine järk järgult läbi aastate olulist muudatust kaasa ei too. Tõenäoliselt peaks vahetama põleteid, kuid kui üleminek vesiniku osakaalu suurendamisele on piisavalt ajatatud, tuleb põletid perioodiliselt niikuinii välja vahetada.

Suurema läbimurde võivad tulevikus tuua vesiniku separaatorid, mida kirjeldati p2.9. Sellisel juhul ei muutuks tava-tarbijatel oluliselt midagi ning valdkonnad ja tehnoloogiad, mis vajavad puhast vesinikku, saavad seda otse segu-gaasi võrgust. Sel juhul peab olema võrgus fikseeritud vesiniku miinimumi ja maksimumi tase. Võrgus olevad seadmed ja tarvitid peavad olema suutelised sellega arvestama.

Puhtast vesinikust oleks huvitatud sadam, lennujaam, tanklad, kellest enamik ka praegu asuvad gaasivõrkude läheduses või on juba tarbijad (nt gaasitanklad).

Eleringi ülekandevõrgu arenguplaanis peaks olema fikseeritud ja määratud, mis aastast, mis vol% vesinik tohib võrgus olla või peab võrgus olema. Sisend peab tulema EU või valituse määrusest. Sellest tulenevalt saavad ettevalmistusi tegema hakata võrguvaldajad, projekteerijad, tootjad, tarbijad.

Tabel nr 16. Näidis vesiniku sisaldamise suurendamise nõuetest.

Vesiniku sisalduse ülempiiri ülekandevõrgu gaasis, vol%	Siht-aasta
5%	2025.a.
10%	2030.a.
15%	2035.a.
20%	2040.a.

3.4 Eraldi vesiniku torustikud Eestis

Nii nagu Euroopa või muu maailma näitel tasub lähitulevikus puhta vesiniku torustike ehitamine ära piirkondades, kus on kondenseeritult suur tarbimine. Eesti näitel võiks selleks olla ainult suured sadama alad, nt Muuga, Paldiski ja Sillamäe sadam, Virumaa keemiatööstus.

Olemasolevate gaasivõrkude ümberehitus vesinikutorustikeks ei ole otstarbekas. Lihtsam oleks uued võrgud ehitada, kui vanasid renoveerida ja remontida. Lisaks jääb maagaasi (või segugaasi) vajadus ilmselt alles.

Kui esmalt võib tunduda uue vesiniku torude lokaalse tootmise ja tarnetoru võrgustiku juurutamine kallis ja suur ettevõtmine, siis tegelikult on lähiminevikust hea näide olemas, kuidas täiesti uut tüüpi võrgu (nii torustik kui jaamad) arendus on saanud teoks tänu omanike taatele ja projekteerijate ning tarbijate toetusele - kaugjahutus. Ainult mõne aastaga on suudetud luua visioonist reaalsed objektid. Eestis on töös 4 külmajaama (Tartus, Pärnus, Tallinnas) ja kavandatakse juurde. Torustike ehitamise arendus jätkub kiiresti, kuna tootja on suutnud tarbijatele selgeks teha selle vajaduse.

Nii nagu kaugjahutus teenindab veel hetkel lokaalseid piirkondi, peaks ka vesiniku torustike ehitus algama kohalike piirkondade arendusega. Võrdlemisi lühikesed vahemaad tootmise ja tarbimise vahel. Selle jaoks oleks vaja piisavalt aktiivset võimekat omanikku, kes suudab ehitada tootmisjaamad ja ühendada need tarbijatega. Või võimekas tarbija, kes ehitab ise endale tootmisüksuse (nt sadam või sadamas tegutsev suurtööstus).

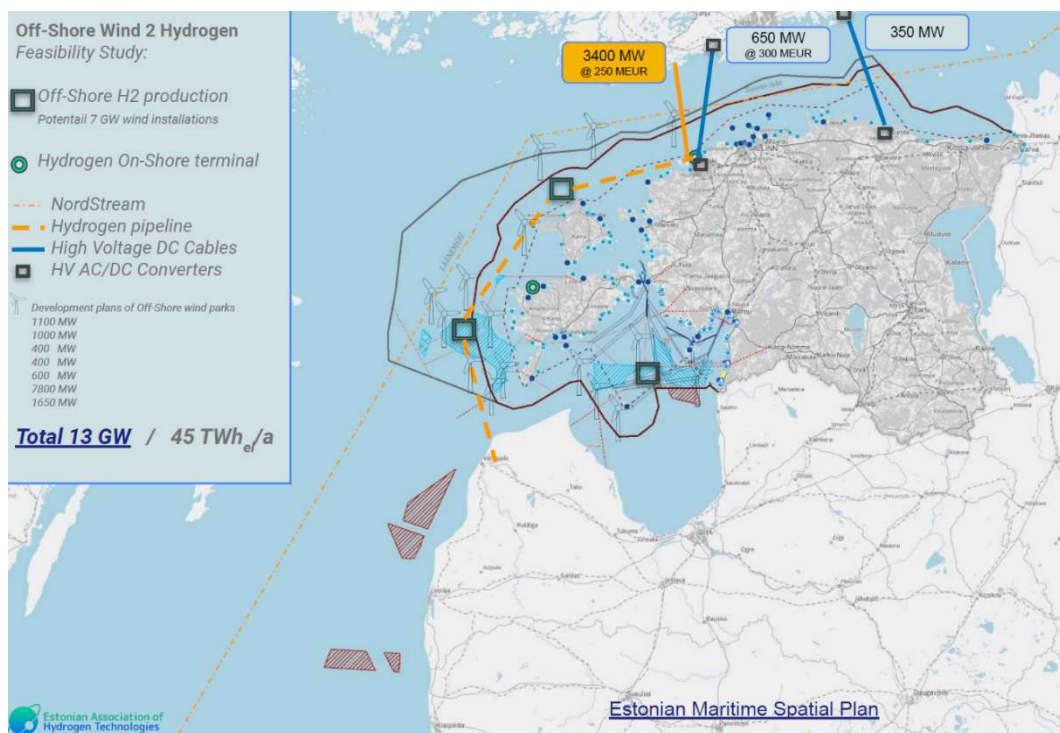
Kaugemas tulevikus, kui hakkab arenema ülekandevõrk linnade ja riikide vahel peaks vesiniku sisseost tootmisjaamadest olema lahendatud sarnaselt tänapäeval biometaani sisseostuga gaasi ülekandevõrku. Riikidevaheliste ühenduste olemasolu tähendaks seda, et ressursid liiguks suurema tarbimise poole – võimalus vesiniku toodangut turustada ja müüja, hindu konkurentsivõimelisena hoida. Eraldi vesinikutorustikud tagavad suurema tarnekindluse.

Rohelise vesiniku mõju energiamärgisele peaks motiveerima omanikke kaaluma seda võimaliku alternatiivina küttesüsteemide valikul. Selle jaoks on vaja luua olemasolevas energiatõhususe raamistikus uus kaalumistegur vesiniku jaoks vastavalt selle tootmisele. Nii nagu hetkel on „efektiivne kaugküte“, peab juurutama „efektiivne vesinikküte“ või „roheline vesinikküte“.

Eesti rannikualade tuuleenergia potentsiaal on 24TWh [85], mis on oluliselt suurem, kui riigisisene elektri tarbimine. Tuulest nii suurel hulgal elektrienergia võrku suunamine tooks kaasa suure tsüklisuse. Suure tuule korral on elektritootmine suur ja tuulevaikuse korral elektritootmist ei toimu. Selle tulemusena peab elektrivõrk ka „rohelistes tulevikus“ omama stabiilsust tagavaid ja reservelektrijaamasid. Nende kütuseks võiks olla omakorda vesinik.

Tuuleparkidest toodetava elektri vesiniku tootmiseks suunamine oleks oluliselt otstarbekam tarbijate ja võimaliku ekspordi suhtes. Kuna võrk oleks ühendatud teiste riikidega, liiguks ressurss alati selles suunas, kus seda puudu on. Seega, mida suurem võrk, seda suurem tarnekindlus. Eestit läbival vesiniku ülekandevõrgul oleks oluline tähendus Soomele selle ühendamisel muu Euroopa võrguga.

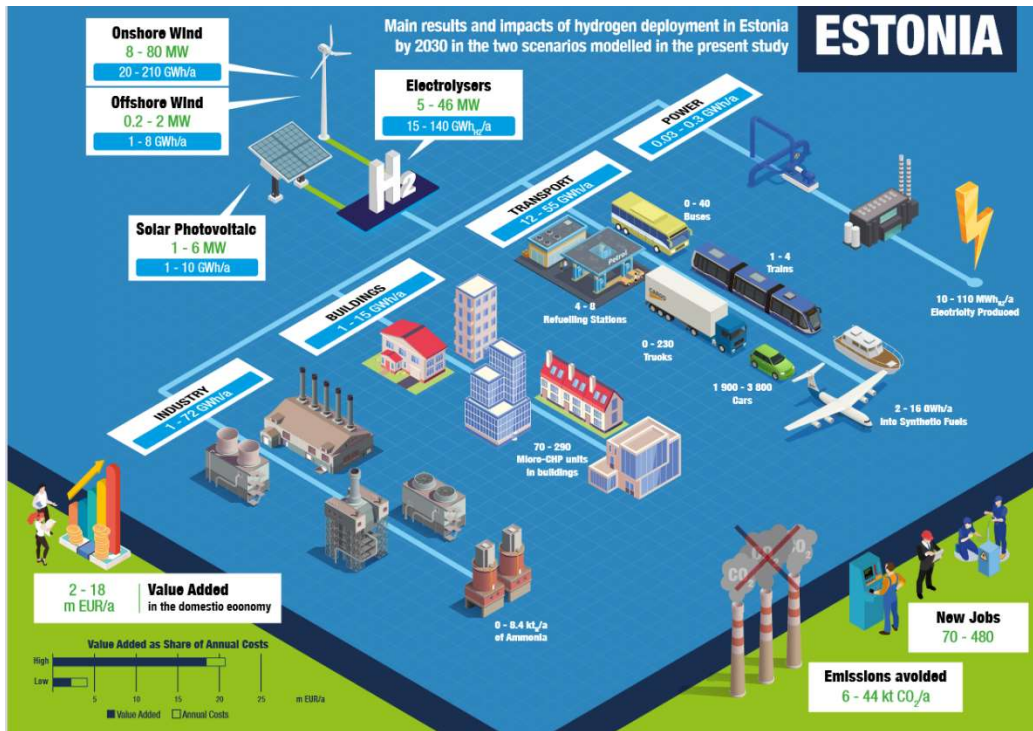
Eesti Vesinikuühingu eestvedamisel planeeritav Eestit hõlmav ülekandevõrk Ruh2no on osa üle Euroopalisest ja põhjala (Soome ja Rootsi) vesiniku võrgustikust.



Joonis nr 36. Ruh2no plaan. [86]

Ruh2no visiooni järgi võiks Eestisse rajada mere tuuleparke ühendav enamuse osas merealune vesiniku torustik. Sh asuksid vesiniku tootmisjaamad tuuleparkide juures meres. Maismaal asuksid jaotusjaamad. Kindlasti oleks kogu ülekandevõrk seotud Läti ja Soome torustikega, ning laiemalt omakorda ka veel Euroopa Vesiniku Selgrooga.

Eesmärkides ja visioonis peaks 2040-2050. aastatel Eesti vesiniku võrgustik lihtsustatuna välja nägema selliselt, kus vesinik on peaaegu kõigi valdkondade jaoks põhi energia allikaks. Sh toodetakse vajaduse korral võrku elektrit tootmisjaamades vesinikust.



Joonis nr 37. Vesiniku torustike skeem Eestis 2040-2050. [87]

Keskkonnaministeeriumi ning Majandus-ja Kommunikatsiooniministeeriumi koostöös koostatakse 2021.a. lõpuks vesiniku teekart, mille sihiks on kaardistada Eesti hetkeolukord ja vesinikutehnoloogiate potentsiaal, kus lepatakse kokku strateegilised valikud, milles Eestil on kõige perspektiivikam vesinikutehnoloogiaid arendada ja kasutada. Loodetavasti püsib antud teema aktuaalne ja liigub edasi erialade spetsialistide toel.

KOKKUVÕTE

Vesinik on ühelt poolt nii lihtne ja elementaarne ressurss, mida inimkond ei ole õppinud veel korralikult kasutama, kuid teiselt poolt on seda kallid ja keeruline integreerida.

Vesiniku laialdasema kasutuselevõtu esimeseks etapiks on vesiniku ja metaani segamine ja selle kontsentratsiooni samm-sammult suurendamine olemasolevas maagaasi jaotusvõrgus. See annab võimaluse ja väljavaate arendada vesiniku tootmist, samal ajal tekitades tarbijates suuremat huvi vesiniku kui kütuse ja toormaterjali vastu. Lisaks ei vaja see olulisi ülekandevõrgu ja gaasitarvitite ümbervahetamise investeeringuid. Nii mõnigi EU riik on vesiniku lisamisega gaasivõrku alustanud.

Vastavalt erinevatele uuringutele, oleks korrektselt toimivat gaasitarne torustikud tehniliselt valmis 10vol% vesiniku sisalduseks. Arvestades Eesti gaasitorustike vanust (nii ülekande- kui ka jaotustorustikud), mis piirkonniti on kuni 60-65.a. ja aeglast rekonstrueerimise kava, võiks realistlik eesmärk olla 5vol%, aastaks 2025. Sellest edasi peaks toimuma järkjärguline vesiniku sisaldamise suurendamine kuni 20vol% aastaks 2035-2040.

Täielikule vesiniku ülekande ja jaotustorustiku võrgustikule üleminek on oluliselt suurem ja keerulisem samm. Selle sammu tegemiseks on vajalik, et tasuvusarvutustes toimub mõne muutujaga oluline põhimõtteline muudatus. Selleks peaks olema tõsine soov rohepöördeks ja süsinikuneutraalsuseks. Samuti on see oluline ka energia julgekoleku seisukohalt ja ka fossiilkütuste ressursi kiire vähenemise tõttu. Kuid selge on see, et ilma olulise seadusandliku tahteta see visioon kiiret arengut ei tee.

Lähituleviku perspektiivis saavutaksime rohepöörde energeetikas siis, kui gaasitorustikes voolab roheline taastuv süsinikuneutraalne gaas. Teoreetiliselt teostatav, praktikas keeruline. Millal Eesti/maailm selleni jõuab, sõltub paljudest faktoritest – eelkõige majanduslikust huvist.

SUMMARY IN ENGLISH

Hydrogen is a simple and basic resource that humanity has not yet learned to use properly, and also at the same time, it is expensive and difficult to integrate.

The first step to the wider deployment of hydrogen is the mixing of hydrogen and methane and the gradual increase of its concentration in the existing natural gas grid. This provides an opportunity and a prospect for the development of hydrogen production, while generating greater consumer interest in hydrogen (as a fuel and/or raw material). In addition, it does not require significant investments in the transmission network and the replacement of gas network or appliances. Today, many EU countries have started adding hydrogen to the gas grid.

According to various studies, gas grid pipelines would be technically ready for a 10vol% hydrogen content. Considering the age of Estonian gas grid (both transmission and distribution pipelines), which in some sections are up to 60-65 years old, and a slow reconstruction plan, a realistic target could be 5vol% by 2025. From then on, there should be a gradual increase in hydrogen content up to 20vol% by 2035-2040.

The transition to a complete hydrogen transmission and distribution network is a much larger and more complex step. In order to take the step, it is necessary to have a significant fundamental change in the profitability calculations with some of the variables. For example there should be a strong desire for a green decarbonisation, energy supply security or some other argument, such as simply running out of fossil fuels. However, it is clear that this vision will not develop rapidly without significant government interaction.

In the near future, we would achieve a green decarbonisation in energy when the green renewable carbon-neutral gas flows in gas pipelines. Theoretically possible, difficult in practice. When does Estonia or the world achieves these goals depends on many factors - especially on economic interest.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] „The History of Hydrogen“, Jams Jonas, 2009. [Võrgumaterjal]
<https://www.altenergymag.com/article/2009/04/the-history-of-hydrogen/555/>
- [2] Eesti Ajaloo SA fotokogu
- [3] „Põhijooni põlevkiivõlitööstuse arengust Eestis“, Erki Tammiksaar/VKG, 2019
[Võrgumaterjal] <https://www.vkg.ee/wp-content/uploads/2019/10/pohijooni-polevkiivilitoostuse-arengust-eestis.pdf>
- [4] „Hysolar and Solar-Wasserstoff-Bayern,“ C.J.Winter, 1991. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/036031999190069U>
- [5] „A freaky Fluid inside Jupiter,“ Dauna Coulter, 2011. [Võrgumaterjal]
https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2011/09aug_juno3
- [6] Eesti Vesinikutehnoloogiaste Ühingu koduleht. [Võrgumaterjal]
<http://h2est.ee/vesinik/>
- [7] „Kovalentne side,“ Eve Wongworakul. [Võrgumaterjal]
<https://sites.google.com/a/student.isb.ac.th/eve-wongworakul-chemistry-unit/cova>
- [8] Hydrogen Details. [Võrgumaterjal]
<https://www.skai.co/hydrogen-details>
- [9] „Technology Roadmap – Hydrogen and Fuel Cells,“ Report, 2015. [Võrgumaterjal]
<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>
- [10] „Exergy analysis on hydrogen production via steam methane reforming,“ Adam P-Simpson, Andrew Lutz, 2007. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031990700482X>
- [11] Hydrogen Production: Electrolysis. [Võrgumaterjal]
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>
- [12] C-Zero tutvustus, koduleht. [Võrgumaterjal]
<https://www.czzero.energy/technology>
- [13] „Methane splitting and turquoise ammonia,“ C. Philibert, 2020. [Võrgumaterjal]
<https://www.ammoniaenergy.org/articles/methane-splitting-and-turquoise-ammonia/>
- [14] „Fueling the future of mobility: hydrogen electrolyzers“ artikkel. [Võrgumaterjal]
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/jp/Documents/international%20business%20support/gbs/jp-gbs-fueling%20the%20future%20of%20mobility-hydrogen%20electrolyzers.pdf>
- [15] „Methane Steam Reforming,“ Encyclopedia of Sustainable Technologies, 2017.
[Võrgumaterjal] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methane-steam-reforming>

- [16] „Hydrogen production by PEM water electrolysis,” S.Kumar, V.Himabindu, 2019. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300035>
- [17] „Gas Decarbonisation in Europe: Clean Hydrogen as the New Prospective Area for Russia-EU Cooperation,” artikkel, 2021. [Võrgumaterjal]
<http://www.konoplyanik.ru/ru/publications/OGEL%20SI%20H2-ov19-2-article06-Konoplyanik-final%20printed.pdf>
- [18] „State of the Art of Hydrogen Production via Pyrolysis of Natural Gas,” Stefan Schneider, 2020. [Võrgumaterjal]
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cben.202000014>
- [19] „The Future of Hydrogen,” artikkel, 2019. [Võrgumaterjal]
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [20] „Hydrogen: A Renewable Energy Perspective,” artikkel, 2019. [Võrgumaterjal]
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf
- [21] Gas for Climate, “2020 Gas Decarbonisation Pathways story,” 2020. [Võrgumaterjal] https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/2020-gas-decarbonisation-pathways-study/
- [22] Center for Hudsons Future, „Becoming a Global Hydrogen Hub,” artikkel, 2019. [Võrgumaterjal]
<https://static1.squarespace.com/static/5bd0cda394d71a3556faeb6c/t/6022ff8c59eed438f73aaeaa/1612906382736/Houston+Hydrogen+Whitepaper+Final.pdf>
- [23] „Pipeline Transportation of Hydrogen: Regulation, Research and Policy,” artikkel, 2021. [Võrgumaterjal] <https://www.everycrsreport.com/reports/R46700.html>
- [24] Pildi viide
https://www.researchgate.net/figure/Integrated-pipeline-network-of-Air-Liquide-in-the-Benelux-countries-The-red-lines_fig6_318179264
- [25] European Parliament, „EU hydrogen policy,” 2021. [Võrgumaterjal]
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI\(2021\)689332_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689332/EPRS_BRI(2021)689332_EN.pdf)
- [26] „Standart for Hydrogen Piping Systems at User Locations,” AIGA, 2012. [Võrgumaterjal]
http://www.asiaiga.org/uploaded_docs/AIGA%20087_14_Standard%20for%20Hydrogen%20Piping%20Systems%20at%20User%20Location.pdf
- [27] Toote tutvustus, SoluForce H2T. [Võrgumaterjal]
<https://www.soluforce.com/product-overview/pipe-types/hydrogen-tight.html>

- [28] Airbus koduleht. [Võrgumaterjal]
<https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>
- [29] „Fuel cell bus projects in the spotlight,” artikkel, 2021. [Võrgumaterjal]
<https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell-bus/fuel-cell-bus-hydrogen/>
- [30] Vanhool koduleht. [Võrgumaterjal]
<https://www.vanhool.be/en/public-transport/agamma/hybrid-fuel-cell>
- [31] „Shell Exploring Worlds Largest Green Hydrogen Project,” artikkel, 2020. [Võrgumaterjal] <https://www.greentechmedia.com/articles/read/shell-exploring-worlds-largest-green-hydrogen-project>
- [32] Koduleht, Hyport: Green hydrogen plant in Ostend. [Võrgumaterjal]
<https://www.deme-group.com/news/hyportr-green-hydrogen-plant-ostend>
- [33] Koduleht: H21. [Võrgumaterjal]
<https://h21.green/about/>
- [34] Gas for Climate, „European Hydrogen Backbone,” 2021. [Võrgumaterjal]
https://gasforclimate2050.eu/?smd_process_download=1&download_id=669
- [35] „Green Hydrogen Investments,” GTAI, 2020. [Võrgumaterjal]
<https://www.gtai.de/gtai-en/invest/industries/energy/green-hydrogen>
- [36] EU Investment Bank, „The EIB partners up with the Portuguese Republic to accelerate investments in the hydrogen sector,” 2021. [Võrgumaterjal]
<https://www.eib.org/en/press/all/2021-117-the-eib-partners-up-with-the-portuguese-republic-to-accelerate-investments-in-the-hydrogen-sector>
- [37] Rahandusministeerium, Riigi eelarvestrateegia 2022-2025. [Võrgumaterjal]
- [38] [Võrgumaterjal]
https://en.wikipedia.org/wiki/Demographics_of_the_European_Union
- [39] „Estonias EU recovery fund measures are promising yet potentially obstructive,” artikkel, 2021. [Võrgumaterjal] <https://bankwatch.org/blog/estonia-s-eu-recovery-fund-measures-are-promising-yet-potentially-obstructive>
- [40] Maagaasi tutvustus, AS Gaasivõrk koduleht. [Võrgumaterjal]
<https://www.gaas.ee/arikliendile/maagaas/>
- [41] Link pildile. [Võrgumaterjal] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Extra_EU-27_imports_of_natural_gas_from_main_trading_partners,_2019_and_first_semester_2020.png
- [42] [Võrgumaterjal] <https://ourworldindata.org/>

- [43] „Maagaasi tarbimine,” Elering, 2017. [Võrgumaterjal]
<https://elering.ee/gaasituru-kasiraamat/2-eesti-ja-regionaalne-maagaasisusteem/24-maagaasi-tarbimine>
- [44] „Statistical review of World Energy,” artikkel, 2020. [Võrgumaterjal]
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- [45] Link kaardile. [Võrgumaterjal]
https://www.entsog.eu/sites/default/files/2020-01/ENTSOG_CAP_2019_A0_1189x841_FULL_401.pdf
- [46] „Vesiniku ja sünteetilise gaasi kasutamise potentsiaal,” TTÜ, 2020. [Võrgumaterjal] https://elering.ee/sites/default/files/2021-01/ER%20P2G%20aruanne%20v3_detsember2020.pdf
- [47] „Experimental study of natural gas flame enriched by hydrogen and oxygen in a coaxial burner,” Z.Riahi, M. Mergheni, J. Sautet, S. Nasrallah, 2016. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116312108>
- [48] Maagaasi kvaliteeditunnus, Elering AS. [Võrgumaterjal]
<https://elering.ee/sites/default/files/public/Gaas/Gaasis%C3%BCsteem/Maagaasi%20kvaliteeditunnistus%20aprill%202021.pdf>
- [49] “Assessing the UKs gas quality measurement infrastructure”, artikkel. [Võrgumaterjal] https://www.effectech.co.uk/wp-content/uploads/Assessing_the_UKs_gas_quality_measurement_infrastructure.pdf
- [50] Tabel õppeainest “Kütused, kütuste põletustehnoloogiad, katelseadmed,” Andres Siirde.
- [51] Gas Calculator. [Võrgumaterjal] <https://cmwelding.com/technical/gas-calculator-gas-phase>
- [52] „Reduction of CO2 emission by addition of hydrogen to natural gas,” artikkel, 2007. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080447049500355?via%3Dihub>
- [53] „Durability and transport properties of polyethylene pipes for distributing mixtures of hydrogen and natural gas,” artikkel, 2006. [Võrgumaterjal]
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20946842>
- [54] „Could hydrogen piggyback on natural gas infrastructure?” artikkel, 2016. [Võrgumaterjal] <https://networks.online/gas/could-hydrogen-piggyback-on-natural-gas-infrastructure/>
- [55] Marcogaz koduleht. [Võrgumaterjal] <https://www.marcogaz.org/knowledge-hub/#publications>
- [56] „Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks,” M. Melaina, O. Antonia,

M-Penev, 2013. [Võrgumaterjal] <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/51995.pdf>

[57] „A Comparative study of odorants for gas escape detection of natural gas and hydrogen,” University of Edinburg, 2020. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921004079>

[58] „Eesti Gaasiülekandevõrgu arengukava 2021-2030,” Elering AS, 2021.
 [Võrgumaterjal] <https://elering.ee/sites/default/files/2021-03/Eesti%20gaasi%C3%BClekandev%C3%B5rgu%20arengukava%202021-2030.pdf>

[59] EU Teataja, „Surumaagaasi kasutamine mootorsõidukite kütusena,” 2010.
 [Võrgumaterjal] [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:42011X0507\(01\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:42011X0507(01)&from=EN)

[60] Ravetti SRL koduleht. [Võrgumaterjal] <https://www.ravetti.eu/>

[61] Sewerin koduleht. [Võrgumaterjal] <https://www.sewerin.com/en/products/gas>

[62] Pergam-Suisse koduleht. [Võrgumaterjal] <https://pergam-suisse.ch/selma#selmadetectors>

[63] „Hydrogen: The Burning Question,” M Menzies, 2019. [Võrgumaterjal]
<https://www.thechemicalengineer.com/features/hydrogen-the-burning-question/>

[64] „Agency for the Cooperation of Energy Regulators Report,” raport, 2020.
 [Võrgumaterjal]
https://www.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/ACER%20Report%20on%20NRAs%20Survey.%20Hydrogen,%20Biomethane,%20and%20Related%20Network%20Adaptations.docx.pdf

[65] „Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnance,” Graz University of Technology, 2021. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921012246>

[66] „Italys Snam in world first test of 30% gas-hydrogen blend in steel forgigng,” Reuters, 2021. [Võrgumaterjal] <https://www.reuters.com/business/italys-snam-world-first-with-test-30-gas-hydrogen-blend-steel-forging-2021-05-19/>

[67] „Extraction of hydrogen from a lean mixture with methane by metal hybride,” D. Dunikov, D.Blinov, 2019. [Võrgumaterjal]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920303797>

[68] H2TECH solutions esitlus, Dr O. Purrucker, Dr J. Balster - Hydrogen Extraction from Hydrogen Blended Natural Gas, 2021

[69] „Kliimasõbralik Gaasivõrk,” Ain Laidoja, 2020. [Võrgumaterjal]
<http://h2est.ee/kliimasõbralik-gaasivork/>

[70] „Gaasituru toimimise võrgueeskiri,” Majanuds- ja taristuministeerium, 2017.
 [Võrgumaterjal]
https://www.riigiteataja.ee/aktiivisa/1291/2202/0033/MKM_m41_Lisa.pdf#

- [71] Elering Live koduleht. [Võrgumaterjal] <https://dashboard.elering.ee/et>
- [72] „Elektri päritolutunnused,“ Elering AS. [Võrgumaterjal] <https://elering.ee/elektri-paritolutunnistused>
- [73] „Congress says Biomass in Carbon-Neutral, but Scientists Disagree,“ C. Harvey, 2018. [Võrgumaterjal] <https://www.scientificamerican.com/article/congress-says-biomass-is-carbon-neutral-but-scientists-disagree/>
- [74] Eesti Biogaasi Assotsiatsiooni uudiskiri, 2021. [Võrgumaterjal] http://eestibiogaas.ee/wp-content/uploads/2015/06/EBA-1_uudiskiri-jaanuar_m2rts_2021.pdf
- [75] Development projects, Tuuleenergia Assotsiatsioon. [Võrgumaterjal] https://tuuleenergia.ee/?page_id=1227&lang=en
- [76] „Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage,“ J. Gorre, F. Orloff, C. Leeuwen, 2019. [Võrgumaterjal] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919312681>
- [77] E-Gas project: methanation process. Koduleht. [Võrgumaterjal] http://www.autopressnews.com/2011/05/audi/e-gas_project_methanation.shtml
- [78] GET Baltic Prices. [Võrgumaterjal] <https://www.getbaltic.com/en/market-data/prices-of-balancing-gas/>
- [79] „The Emission Factors,“ artikkel. [Võrgumaterjal] https://www.covenantofmayors.eu/IMG/pdf/technical_annex_en.pdf
- [80] Vesiniku töөрühma loenguslaid, Keskkonnaministeerium, 2021.
- [81] „Tallinna Sadam plaanib vesinikterminali,“ S. Liiva, 2021. [Võrgumaterjal] <https://arileht.delfi.ee/artikkel/93069177/tallinna-sadam-plaanib-fukushima-sarnast-vesinikterminali-hind-pool-miljardit-eurot>
- [82] Viide pildile. [Võrgumaterjal] https://www.toshiba-energy.com/en/info/info2020_0307.htm
- [83] „Toetuse andmise tingimused rohevesiniku kasutuselevõtuks,“ eelnõu, 2021. [Võrgumaterjal] <https://eelvoud.valitsus.ee/main/mount/docList/33f05432-7e35-4956-a1ab-f6e993053031#DOVNqDvS>
- [84] „Eesti gaasisüsteemi energiatõhususe suurendamine,“ MKM, 2020. [Võrgumaterjal] https://www.mkm.ee/sites/default/files/1._lopparuanne_-_gaasisusteemi_energiatõhususe_suurendamine.pdf
- [85] „Offshore wind.“ Jaanus Uiga, 2020. [Võrgumaterjal] <https://reglobal.co/wp-content/uploads/2020/08/Estonia-Perspective-by-Jaanus-Uiga.pdf>
- [86] BotH2nia/RuH2no ettekanne, Eesti Vesinikuühing, 2021.
- [87] „Opportunities for Hydrogen Energy Technologies, Fuel Cells and Hydrogen,“

artikkel, 2020. [Võrgumaterjal]

https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/file_attach/Brochure%20FCH%20Estonia%20%28ID%209496897%29.pdf

Kõiki mainitud võrgumaterjale on kasutatud: Mai 2021.a.