

TTÜ Energiatehnoloogia Instituut

**KÕRGES ARENGUETAPIS OLEVATE
VESINIKUTEHNOLOOGIATE RISKIANALÜÜS**
**RISK ASSESSMENT OF ADVANCED HYDROGEN
TECHNOLOGIES**
BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Liise Marie Reinik

Üliõpilaskood 185609EACB

Juhendaja: Ivar Kruusenberg, vanemteadur

Juhendaja: Reio Praats, MSc

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.

03.06.2021

Autor: Liise Marie Reinik

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

03.06.2021

Juhendaja: Ivar Kruusenberg

Juhendaja: Reio Praats

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

“.....”.....2021

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Liise Marie Reinik (sünnikuupäev: 10.06.1999)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Kõrges arenguetapis olevate vesinikutehnoloogiate riskianalüüs, mille juhendajad on Dr. Ivar Kruusenberg ja Reio Praats, MSc.

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

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

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

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

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

/allkirjastatud digitaalselt/

03.06.2021

Taltech Energiatehnoloogia Instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Liise Marie Reinik, 185609 EACB (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava, peeriala: EACB 17/17 Keskkonna-, energia- ja keemiatehnoloogia, peeriala energiatehnoloogia

Juhendajad: Ivar Kruusenberg, +372 5036963

Reio Praats, +372 53453433

Lõputöö teema:

Kõrges arenguetapis olevate vesinikutehnoloogiate riskianalüüs

Risk Assessment of Advanced Hydrogen Technologies

Lõputöö põhieesmärgid:

Kõrges arenguetapis olevate vesinikutehnoloogiate uurimine;

Vesinikutehnoloogiate kasutuselevõttuga seonduvate riskide tuvastamine;

Tehnoloogilise ja ohutusalase riskianalüüsi koostamine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Riskianalüüsi meetodika valimine	01.03.2021
2.	Kirjanduse ülevaate koostamine ning riskide identifitseerimine	01.05.2021
3.	Tehnoloogiliste ja ohutusalaste riskide mõju hindamine ja lõputöö vormistamine	01.06.2021

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 03.06.2021 a

Üliõpilane: Liise Marie Reinik 03.06.2021 a

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Ivar Kruusenberg 03.06.2021 a

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja: Reio Praats 03.06.2021 a

/allkirjastatud digitaalselt/

Programmijuht: Oliver Järvik 03.06.2021a

/allkirjastatud digitaalselt/

SISUKORD

EESSÕNA	7
SISSEJUHATUS	9
1. VESINIKUTEHNOLOOGIATE ÜLEVAADE	10
1.1 Vesiniku tootmine	10
1.1.1 AE elektrolüüser	10
1.1.2 PEM elektrolüüser	11
1.2 Vesiniku salvestamine	12
1.3 Vesiniku transport	12
1.4 Vesiniku kasutamine transpordisektoris	13
1.5 Vesiniku kasutamine keemiatööstuses	15
2. METOODIKA KIRJELDUS	16
3. RISKID JA RISKIDE ANALÜÜS	21
3.1 Ühiskondlik aktsepteeritavus	21
3.1.1 Ühiskondlik suhtumine vesinikutehnoloogiasse	21
3.1.2 Ühiskondlik suhtumine rohelisest vesinikust toodetud ammoniaaki	22
3.1.3 Meetmed riskide maandamiseks	23
3.1.4 Järeldused	23
3.2 Vesiniku kasutamine transpordivahendite kütusena	24
3.2.1 Transpordivahenditega seotud tehnoloogilised riskid	24
3.2.2 Transpordivahendite ohutusalased riskid	29
3.2.3 Meetmed riskide ennetamiseks	31
3.2.4 Järeldused	32
3.3 Vesiniku tankimise ja tanklatega seotud riskid	35
3.3.1 Vesiniku transportimisega seotud riskid	35
3.3.2 Vesiniku hoiustamisega seotud riskid	35
3.3.3 Vesiniku tankimine	37
3.3.4 Vesinikutanklatega seotud ohutusalased riskid	38
3.3.5 Meetmed riskide ennetamiseks	38
3.3.6 Järeldused	39
3.4 Vesiniku lisamine maagaasitrassi	39

3.4.1 Kasutatavate tehnoloogiatega seotud riskid.....	39
3.4.2 Ohutus	42
3.4.3 Meetmed riskide leevendamiseks	42
3.4.4 Järeldused	43
3.5 Vesinikust ammoniaagi tootmine.....	44
3.5.1 Kasutatavate tehnoloogiatega seotud riskid.....	44
3.5.2 Ohutus	48
3.5.3 Ammoniaagi tootmise ja käitlemisega seonduvate riskide maandamine	49
3.5.4 Järeldused	49
3.6 Vesiniku kasutamine tagavarageneraatorite kütusena.....	50
3.6.1 Kasutatavate tehnoloogiatega seotud riskid.....	50
3.6.2 Järeldused	50
3.7 Alternatiivsete vesinikutehnoloogiate riskid	51
3.7.1 Tootmine	51
3.7.2 Salvestamine.....	52
3.7.3 Vesiniku transport.....	53
3.7.4 Kütuseelemendid	54
3.7.5 Kasutamine transpordisektoris.....	55
KOKKUVÕTE	56
SUMMARY	58
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	60
LISAD	68

EESSÕNA

Käeolev bakalaureusetöö on valminud Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituudis ning on aluseks „Eesti vesinikuressursside kasutuseelvõtu analüüsi“ riskide analüüsi osale. Lõputöö teema pakkus välja KBFI vanemteadur Ivar Kruusenberg. Andmete kogumisel tuginetakse kirjandusest leitavatele allikatele. Lõputöö juhendajateks on vanemteadur Ivar Kruusenberg ja doktorant Reio Praats.

Antud töös uuritakse kõrges arenguetapis olevate vesinikutehnoloogiatega seonduvaid tehnoloogilisi ja ohutusalaseid riske, mis võivad saada vesinikutehnoloogiatega implementeerimisel takistuseks. Töö käigus viiakse läbi riskianalüüs, kus tuvastatakse võimalikud riskide esinemise sagedused ja mõju ulatused.

Võtmesõnad: *Vesinikutehnoloogiad, tehnoloogilised riskid, kütuseelement, riskianalüüs, bakalaureusetöö*

Lühendite ja tähiste loetelu

AE – leeliseline elektrolüüser (ingl k *alkaline electrolyser*)

AEM – anioonvahetusmembraan (ingl k *anion exchange membrane*)

CCS – süsiniku sidumise tehnoloogia (ingl k *carbon capture and storage*)

DMFC - otsene metanool kütuseelement (ingl k *direct methanol fuel cell*)

ETA- sündmuse puu analüüs (inglise k *Event Tree Analysis*)PRA – tõenäosuslik riskihindamise meetod (ingl k *Probabilistic Risk Assessment*)

FMEA- Võimalike rikete ja nende mõjude analüüs, riskianalüüsi meetod (ingl k *Failure Mode and Effects Analysis*)

FTA- riskipuu analüüs (inglise k *Fault Tree Analysis*)

H₂FC- vesinikkütuseelement (inglise k *hydrogen fuel cell*)

HAZOP- Ohtude ja kasutatavuse analüüs, riskianalüüsi meetod (ingl k *Hazard and Operability Analysis*)

LH₂- Veeldatud vesinik (inglise k *liquid hydrogen*)

PEM – prootonvahetusmembraan (ingl k *proton exchange membrane*)

Ppm – osakesi miljoni osakese kohta (ingl k *parts per million*)

SMR – aurumetaani reformimine (ingl k *steam methane reforming*)

SOEC – tahkeoksiid elektrolüüser (ingl k *solid oxide electrolyzer cell*)

TPRD – temperatuuri- ja rõhualandusseadmed (ingl k *Thermal and Pressure Relief Device*)

TVT – tehnoloogilise valmiduse tase (ingl k *Technology Readiness Level, TRL*)

SISSEJUHATUS

Maailm seisab silmitsi mitmete tõsiste probleemidega nagu kliimamuutused, õhusaaste, mida osaliselt põhjustab aina suurenev fossiilsete kütuste kasutamine. Eelkõige toetub praegune transpordisektor fossiilkütustele, põhinedes peamiselt naftast toodetud bensiinil ja diisliil. Seetõttu on aina enam hakatud tähelepanu pöörama taastuenergiaallikate kasutuselevõtule [1].

Taastuenergiaallikad mängivad üha suuremat rolli puhtama ja keskkonnasäästlikuma energiasüsteemi arendamises, kuid selle peamiseks probleemiks on energiatootmise kõikumine ning energia salvestustehnoloogiate kättesaadavus. 2050. aastaks Pariisi kliimaleppe tingimuste täitmise tõttu oleks vaja kiirendada roheliste energiatehnoloogiate kasutuselevõttu. Üheks võimalikuks selliseks energiakandjaks on vesinik, mis võimaldaks salvestada taastuvatest energiaallikatest toodetud elektrit ning seejärel hiljem seda ära kasutada kas kütusena näiteks transpordisektoris või keemia tööstuses näiteks ammoniaagi tootmiseks [2]. Vesiniku väärtusahel jagunebki vesiniku tootmiseks, salvestamiseks, transportimiseks ning erinevateks rakendusvaldkondadeks, kus iga osaga on seotud erinevad tehnoloogiad ning riskid nende kasutamisel.

Käesoleva töö eesmärgiks on analüüsida erinevate kõrges arengujärgus olevate vesinikutehnoloogiate kasutuselevõtuga seonduvaid potentsiaalseid riske, neid hinnata, ning anda ülevaade võimalustest riskide maandamiseks. Riskid on jaotatud tehnoloogilisteks, ühiskonna aktsepteeritavusega seotud ning ohutusega seotud barjäärideks. Riskide hindamisel kasutatakse tõenäosusliku riskianalüüsi meetodit (ingl k *Probabilistic Risk Assessment, PRA*) mida kasutataksegi hindamaks tehnoloogiate kasutuselevõtuga seonduvaid võimalikke riske, nende riskide esinemise tõenäosusi ja mõju ulatust.

Analüüs koosneb kolmest osast, kus esimeses osas antakse kirjanduse lühiülevaade erinevatest vesinikutehnoloogiatest, teises osas selgitatakse riskianalüüsi läbiviimise metoodikat. Kolmandas osas kirjeldatakse vesiniku kasutuselevõtuga seotud riske ning analüüsitakse ühiskondlikke barjääre ja tehnoloogilisi riske ning ohtusid valdkondade kaupa ning määratakse nende riskide realiseerumise tõenäosust tuginedes kirjandusest leitavatele analüüsidele. Riskianalüüs on teemade kaupa ja tabelite kujul välja toodud lisades.

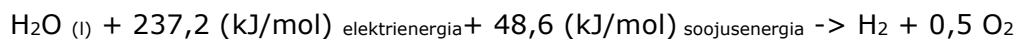
1. VESINIKUTEHNOLOOGIATE ÜLEVAADE

1.1 Vesiniku tootmine

Sõltuvalt tootmismeetodist jaotatakse vesinik tootmine kolme peamisse gruppi. Esiteks hall vesinik, mis on toodetud fossiilsetest kütustest, enamasti maagaasist või kivisöest, ja mille tootmise käigus eraldub palju süsinikdioksiidi. Teiseks sinine vesinik, kus vesinik toodetakse fossiilsetest kütustest, kuid kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamiseks kasutatakse süsiniku sidumise tehnoloogiaid (CCS). Kolmandaks on roheline vesinik, mida toodetakse veest elektrolüüsi teel, kus kasutatav elekter saadakse taastuvatest energiaallikatest või mõningal juhul ka bioenergiast, näiteks biometaani reformimise või tahke biomassi gaasistamise teel [3].

Elektrolüüsitehnoloogia on elektrokeemiline tehnoloogia, mis kasutab elektrit vee lõhustamiseks hapnikuks ja vesinikuks. See on vastukaaluks laiemalt levinud vesiniku tootmise meetoditele, mis nõuavad lähteainena süsivesinikke, näiteks metaani auru reformimine (SMR), osaline oksüdeerimine ja söe gaasistamine, mis eraldavad atmosfääri märkimisväärses koguses süsinikdioksiidi ja muid saasteaineid. Elektrolüüsi protsess võib olla keskkonnasõbralik süsinikuvaba tehnoloogia juhul, kui elektrit tarnitakse üksnes taastuvate ressursside kaudu. Praegu toodetakse ainult umbes 4% kogu maailma vesinikutarbimisest elektrolüüsisüsteemidest, samas kui umbes 96% toodetakse ülalmainitud tavapäraest fossiilkütustel põhinevatest tehnoloogiatega [4]. Vee elektrolüüsi tarbeks on vajalik alalisvooluallika olemasolu. Vee lõhustumine toatemperatuuril on väga väike, umbes 10 mol/L, kuna puhas vesi on väga halb elektrijuht. Seetõttu kasutatakse juhtivuse parandamiseks hapet või alust. Leeliselektrolüüseri puhul kasutatakse koos veega KOH või NaOH lahust [5].

Vesiniku tootmist elektrolüüsi teel võib kirjeldada järgneva võrrandiga [6]:



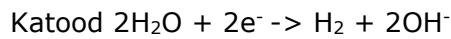
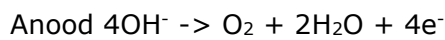
On olemas erinevaid vee elektrolüüsi protsesse, näiteks leeliseline elektrolüüs (AE), prootonvahetusmembraani elektrolüüs (PEM), tahke oksiid elektrolüüs (SOEC) ja leeliselise anioonvahetusmembraani (AEM) elektrolüüs [5]. Kuna AE ja PEM on senimaani kõige arenenumad tehnoloogiad, siis antud töös käsitletakse just nende meetodite rakendamist.

1.1.1 AE elektrolüüser

Leeliselektrolüüs on küps tehnoloogia, mida iseloomustab stabiilsus, pikk eluiga ja kulutõhusus. Aluselise elektrolüüsi meetodil alustati vesiniku ulatuslikku tootmist 20.

sajandi esimestel aastatel. AE puuduseks on väike maksimaalne võimsustihedus, mis on tingitud vedela elektrolüüdi piiratud massiülekanne võimest ning mullide moodustumisest elektrootodide vahele [7]. Elektrolüüsi käigus liiguvad veemolekulid difusiooni tulemusel katoodile ja hüdroksiidioonid liiguvad vastupidise laengu tõttu anoodile. Diafragma eraldab anoodi ja katoodi kambrit ning tekkinud gaasid kogutakse vastavalt vesinik katoodi poolele ja hapnik anoodi poolele. Elektrolüüdilahusena kasutatakse tavaliselt kaaliumhüdroksiidi kontsentreeritud lahuseid, kuna sel on kõrge juhtivus ning väiksem korrosioonioht. Madala hinna ja kõrge aktiivsuse tõttu kasutatakse elektrootodmaterjalina enamasti niklit [8].

Anoodi ja katoodi reaktsioon on kirjeldatud järgnevalt [6]:

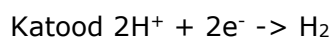
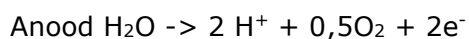


1.1.2 PEM elektrolüüser

General Electric töötas välja esimese vee elektrolüüseri, mis põhines tahke polümeeri elektrolüüdi kontseptsioonil. Hiljem kasutati selle tehnoloogia arendamisel elektrolüüdina tahket sulfoonitud polüstüreenmembraani ning seda uut tehnoloogiat hakati nimetama prootonvahetusmembraaniks (PEM). Membraani juhitakse ainult deioniseeritud vett ilma elektrolüütide lisanditeta. Membraan toimib nii gaasiseparaatori kui ka elektrolüüdina. PEM elektrolüüser pakub parimat alternatiivi AE elektrolüüseri tehnoloogiale. PEM-il on võrreldes AE elektrolüüsiga mõningad eeliseid, väiksem suurus ja mass, vesiniku kõrgem puhtusaste, väiksem energiatarve, kõrgem ioonjuhtivus, võimalus kasutada erinevaid elektrienergiaallikaid, töötab kõrgetel rõhkudel, ohutum, ning seda on lihtne käsitleda ja hooldada. PEMi käitamiskulud on küll võrdleavad AE omadega ning tehnoloogia on küps, kuid PEM elektrolüüsereid jätkuvalt uuritakse ja arendustegevused on eelkõige suunatud PEM tehnoloogiate odavamaks muutmisele [9].

Elektrolüüsi käigus laguneb vesi anoodil prootoniteks ja veemolekulideks. Veemolekulid kanduvad veetsirkulatsiooniga edasi ning prootonid liiguvad elektrivälja mõjul katoodile, kus tekivad vesinikumolekulid [8].

Anoodi ja katoodi reaktsioon on kirjeldatud järgnevalt [5]:



1.2 Vesiniku salvestamine

Vesinik on suurima energiasaldusega kütus massiühiku kohta, kuid selle tihedus on väiksem võrreldes teiste kütustega. Seetõttu tuleb vesinikku salvestada surugaasina või veeldatud kujul, kuid see nõuab lisaenergiat [10]. Vesiniku salvestamiseks on vajalik suurendada ennekõike vesiniku tihedust, kuna 1 kg vesiniku maht normaaltemperatuuril ja atmosfäärirõhul on 11 m³. Vesiniku salvestamiseks on kuus põhilist meetodit: vesiniku salvestamine surugaasina, vesiniku salvestamine veeldatud kujul, vesiniku adsorbeerumine materjali pinnale, vesiniku salvestamine metallhüdriidides, vesiniku salvestamine komplekshüdriidides ning keemiliste reaktsioonide abil. Nendest levinuimad on surugaasi ja veeldatud vesiniku meetodid [10].

Vesiniku komprimeerimine on tõhus salvestusmeetod, kuna vesiniku energiatihedus suureneb rõhu suurenedes. Vesiniku hoiustamiseks on välja töötatud nelja erinevat tüüpi surveanumaid. I tüüpi metallilist surveanumat kasutatakse enamasti tööstuslikes rakendustes rõhuga 20-30 MPa, kuid sellisel meetodil on salvestusefektiivsus piiratud. II tüüpi hoiupaak on lisaks ümbritsetud kiudvaigu komposiitkihiga. III ja IV tüüpi mahutid on täielikult komposiitmaterjalist valmistatud surveanumad, kus komposiitmaterjalideks on plast- või süsinikkiust polümeerstruktuurid ning need mahutid on mehaaniliselt väga vastupidavad. III tüüpi mahutite vooder on enamasti valmistatud metallist ning IV tüüpi mahutitel peamiselt polümeermaterjalist [11].

Vesiniku salvestamine selle veeldamisel temperatuurini -253°C on aeganõudvam ja energiakulukam võrreldes komprimeeritud gaasiga, kuid eelisteks on suurem vesinikutihedus ja säilitamise efektiivsus. Selleks, et vesinikku hoiustada -253°C juures, peab mahuti olema hästi isoleeritud ja selleks kasutatakse välist kaitsekesta. Sisemise anuma ja kaitsva kesta vahelist soojusjuhtivust on võimalik vähendada, kui mähkida see alumiinium fooliumi kihtidega. Aurustumise tõttu saab veeldatud vesinikku hoiustada vaid avatud süsteemides [11].

1.3 Vesiniku transport

Vesiniku transport on oluline lüli vesinikutehnoloogiate kasutamisel. Transpordiliigi valimisel tuleb arvestada tehnilisi tegureid, usaldusväärsust, ohutust ja keskkonnamõjusid [12]. Vesiniku transpordiks on kolm peamist viisi: surugaasimahutitega haagised, krüogeensed veokid ja gaasitorustikud. Vesinikutehnoloogiate esmasel kasutuselevõtul on soovituslik transportida vesinikku surugaasina, kuna nõudlus on väiksem ning seeläbi läheb vähem vesinikku aurustumise teel kaduma. Vesinikku on mõttekas transportida veeldatud

kujul, kui nõudlus on suurem ning vaja on transportida suuremaid koguseid pikema vahemaa taha. Torustikke kasutatakse vesiniku transpordiks väga suure nõudlusega piirkondadesse [13].

Teoreetiliselt suudab üks survestatud vesinikgaasi vedav haagis kergetes komposiitmahutites (500 bar) mahutada kuni 1100 kg vesinikku. Tihtipeale kehtivad aga eeskirjad, mis piiravad mahutite lubatud rõhku, mõõtmeid ja kaalu. Krüogeense vesiniku transpordiks kasutatakse hästi isoleeritud paakidega veokeid, mis mahutavad kuni 4000 kg vesinikku. Neid kasutatakse kuni 4000 km pikkuste vahemaade jaoks, kuna üle selle jõuavad paagid piisavalt palju soojeneda ning see põhjustab rõhu tõusu ja vesiniku aurustumist ja seeläbi kadusid [14].

Vesiniku lisamiseks mõeldud uued spetsiaalsed jaotustorustikud suurendaksid märkimisväärselt kapitalikulusid, eriti kui vesinikku kasutatakse laiemas ulatuses, näiteks hoonete soojusvarustuses. Üheks võimalikuks variandiks on ka vesiniku lisamine olemasolevasse maagaasi võrku, kuid see võib samuti tõsta maagaasi transpordihinda ning samuti puuduvad vastavad regulatsioonid vesiniku lisamiseks maagaasile. Kuna vesiniku energiatihedus on väiksem kui maagaasil, siis 3% vesiniku lisamine maagaasile vähendaks saadavat energiahulka 2% ja tarbijad peaksid tarbima suuremaid gaasikoguseid, et oma energiavajadusi katta. Peale selle tuleks kohaldada olemasolevaid seadmeid, mis pole seadistatud vesiniku ja maagaasi segu jaoks [14].

1.4 Vesiniku kasutamine transpordisektoris

Vesinikusõidukites kasutatakse kütuseelemente, kus vesinikkütus muundatakse elektrokeemilise protsessi tulemusel elektrienergiaks ja soojuseks ning mille jääkproduktiks on vesi. Hetkel on PEM kütuseelement transpordisektori jaoks parim valik, kuna see töötab madalatel temperatuuridel, on kõrge energiatihedusega ning madala korrosiivsusega [15].

Vesinikubussid on hetkel kõige laialdasemalt kasutusel olevad vesinikusõidukid. Vesinikubussid sõidavad enamasti kindlatel marsruutidel, mistõttu piisab vesinikubusside kasutuselevõtuks vaid mõnest tanklast linna piirkonna kohta. Lisaks on vesinikubusside kasutuselevõttu enim toetatud riiklikul tasandil just positiivse rohelise kuvandi tõttu [16].

Kütuselementide kasutamine veoautodes on suure potentsiaaliga, kuna kõrge energianõudluse tõttu puuduvad muud heitgaase vähendavad alternatiivid. Kergemaid kaubikuid, mis mõeldud lühemate vahemaade läbimiseks, on võimalik asendada ka akudega, kuid pikamaa raskesõidukite jaoks on vesinik parem lahendus. Pikamaaaveoste

jaoks on vajalik ka tanklavõrgustike laienemine ning kütuse hinna odavnemine. Kuid veoautode suure läbisõidu tõttu peab ka kütuseelement olema äärmiselt vastupidav ja pika elueaga [17].

Kütuseelemendil põhinev kahveltõstuk on alternatiiviks varasematele fossiilkütuste tõstukitele. Kütuseelementidel on sarnased omadused nagu akupõhistel tõstukitel, kuid nende eelisteks on kiirem tankimine. Vesinikutõstukid vaikselt töörežiimiga, ei eralda heitgaase ning tagavad pideva töö. Kütuseelementidel töötavad kahveltõstukid on võrreldes vesinikubusside ja veoautodega arenenumad vesinikupõhised tehnoloogiad ja tänu lühikesele tankimisajale võib nende populaarsus lähiaastatel kasvada [18].

Vesinikurongid oleks otstarbekas rakendada nendel marsruutidel, mida on keeruline või majanduslikult ebamõistlik elektrifitseerida näiteks marsruudi pikkuse tõttu. Vesinikurongid kasutaks ilmselt samu mahuteid ja kütuseelemente nagu bussid ja veoautod ning seega hind sõltub üldisest autotööstuste hindadest. Eeldatavalt on kütuseelementide rongid aga 50% kallimad kui diiselrongid, kuid majanduslik efektiivsus sõltub ka kütuse hinnast [17].

Laevandussektoris kasutatakse pea täies ulatuses fossiilseid kütuseid ning merendus on üks suurimaid süsinikdioksiidi heitme tekitajaid, mis paiskab atmosfääri ca 900 miljonit tonni CO₂ aastas. Laevandus on ka suur lämmastik- ja vääveloksiidide tekitaja. Rahvusvaheline mereorganisatsioon IMO on seadnud eesmärgiks 2050. aastaks heitmeid vähendada 50% võrra võrreldes 2008. aastaga. Vesinik on üheks võimalikuks alternatiiviks ning juba on läbi viidud mitmeid projekte, kasutades nii kütuseelemente kui lisades vesinikku sisepõlemismootoritesse. Kõige suurem pudelikael seejuures on aga vesiniku hoiustamine, kuna laevades tuleb isoleeritud keskkonnas hoiustada suures koguses vesinikku. Samas on seejuures massi- ja mahupiiranud väiksemad võrreldes autotööstusega [19].

Autonoomsed sõidukite puhul tuleb arvestada mitte ainult vesinikutehnoloogiate implementeerimise keerukuse vaid kogu süsteemi arendamisega. Autonoomsete vesinikusõidukite katsetamine on viimastel aastatel suurenenud nii erasektoris kui ka avalikus sektoris, kuid juhita sõidukite täielik kasutuselevõtt võtab ilmselt veel aastaid. Autonoomsete sõidukite kasutust takistavad ka mitmed õnnetusjuhtumid, näiteks 2018. aastal Arizonases jalakäija surmaga lõppenud õnnetus, mis tõstatab küsimuse kas tehnoloogia on valmis inimesele omast otsustusvõimet tehisintellektiga asendama [20].

1.5 Vesiniku kasutamine keemiatööstuses

Tööstussektor on hetkel maailmas suurim vesinikutarbija. Rafineerimistehastes kasutatakse vesinikku naftasaaduste väävlisisalduse vähendamiseks, et vastata keskkonnastandarditele. 1/3 vajaminevast vesinikust saadakse seejuures teiste rafineerimisprotsesside kõrvalsaadustena. Üheks vesiniku tööstuslikuks rakenduseks on veel terase tootmine läbi raua reduktsiooniprotsessi. Hetkel toodetakse selle tehnoloogia abil maailmas vähem kui 10% terasest, kuid see võib tulevikus suureneda tänu vajadusele tööstussektoreid dekarboniseerida. Vesinikku kasutatakse ka lähteainena ammoniaagi ja metanooli tootmiseks. Metanooli kasutatakse peamiselt väärtuslike kemikaalide tarbeks plastiku tootmisel ning ka kütuselisanditena. Ammoniaaki kasutatakse peamiselt väetiste tootmiseks [3]. Ammoniaak on lisaks ka potentsiaalne jätkusuutlik vesinikukandja. Vesinikukandjad muundavad vesiniku keemiliseks ühendiks, tänu millele on vesinikku kergem hoiustada ja transportida. Ammoniaaki toodetakse vesiniku ja lämmastiku sünteesil ning ammoniaaki on võimalik ka otse mootorites põletada. Kuna ammoniaak eraldab põlemisel vaid lämmastikku ja vesinikku ning ei sisalda süsinikku, siis on see võimalikuks alternatiivseks kütuses, mis aitab kaasa süsinikdioksiidi heitmete vähendamisele [21]. Taastuenergiaal toodetud ammoniaagi puhul toodetakse vesinikku elektrolüüsi teel. Lämmastik eraldatakse õhust ning toodetud lämmastik ja vesinik komprimeeritakse vastava rõhuni ning suunatakse seejärel Haber-Bosch sünteesireaktorisse, Haber-Bosch on aga väga energiakulukas protsess, kuna toimub kõrgetel temperatuuridel (450–500°C) ja rõhkudel (200 bar) [22].

2. METOODIKA KIRJELDUS

Riskianalüüs on defineeritud kui olemasoleva informatsiooni kasutamine, et ohte kindlaks teha ja hinnata võimalikke riske. See võimaldab tuvastada ohuallikaid, mis võivad kahjustada inimesi, hooneid või keskkonda ning selle abil on võimalik välja töötada meetmeid ohtude ennetamiseks. Seejärel on riskimaatriksi abil võimalik riske järjestada vastavalt nende riskide mõju suurusele. Riski hindamisel otsustatakse, kas risk on olemas ning milliseid kriteeriumeid tuleb täita, et risk oleks aktsepteeritav. Riskide vähendamine on defineeritud kui kõikide meetmete kogum, mis on vajalik, et kasutusele võtta ennetavad meetmed, et vähendada kindlate ohtudega seotud sündmuste toimumise tõenäosust või võtta kasutusele kaitsemeetmed ohtude mõju minimeerimiseks [23].

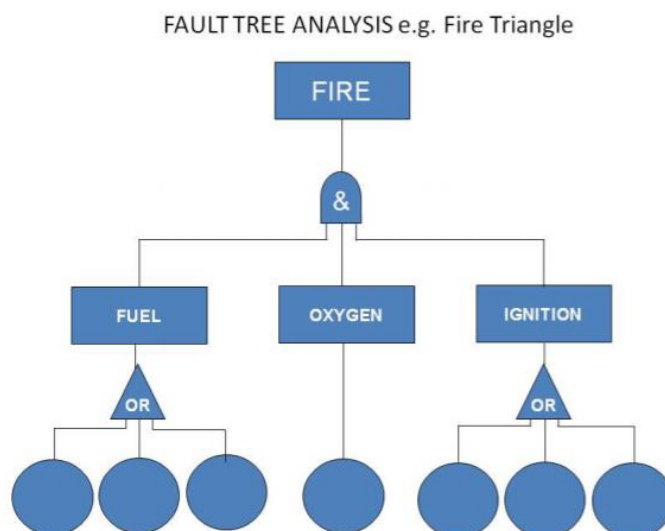
Riskianalüüsi koostamiseks on välja töötatud erinevaid meetodeid. Käesoleva töö läbiviimiseks uuriti erinevaid riskianalüüsi meetodeid nagu FMEA ehk võimalike rikete ja nende mõjude analüüs (ingl k *Failure Mode and Effects Analysis*), HAZOP ehk ohtude ja kasutatavuse analüüs, (ingl k *Hazard and Operability Analysis*), FTA ehk riskipuu analüüs (inglise k *Fault Tree Analysis*), ETA ehk sündmuse puu analüüs (inglise k *Event Tree Analysis*) ja PRA ehk tõenäosuslik riskihindamise meetodika (inglise k *Probabilistic Risk Assessment*).

FMEA töötati välja USA militaarteenistuse poolt 1940. aastatel ning selle võttis kasutusele riiklik aeronautika- ja kosmoseagentuur NASA kosmosemissioonide tarbeks 1960. aastatel. Hiljem on see kasutusele võetud ka teistes tööstussektorites [24]. FMEA eesmärgiks on identifitseerida võimalikud seadmete ja nende komponentide tööga seotud samm-sammulised ohu- ja rikkestsenaariumid. Seejärel tuvastatakse meetodid ohu raskusastme leevendamiseks ja riskistsenaariumite tõenäosuste vähendamiseks [25].

HAZOP on Ühendkuningriigis välja töötatud meetod keemiatehaste ohutuse hindamiseks. HAZOP on ajurünnaku meetod, kus tuvastatakse võimalikud kõrvalekalded protsessi tavaolekust ning selle järgi analüüsitakse võimalikke õnnetusstsenaariumeid ja tõrkeid tehaste töös ning uuritakse rakendatavaid ohutusmeetmeid [26]. Selle meetodi puhul kasutatakse juhtsõnu nagu vähem, rohkem (ingl k *less, more*) jm, et kirjeldada kõrvalekallet normaalolukorrast [27].

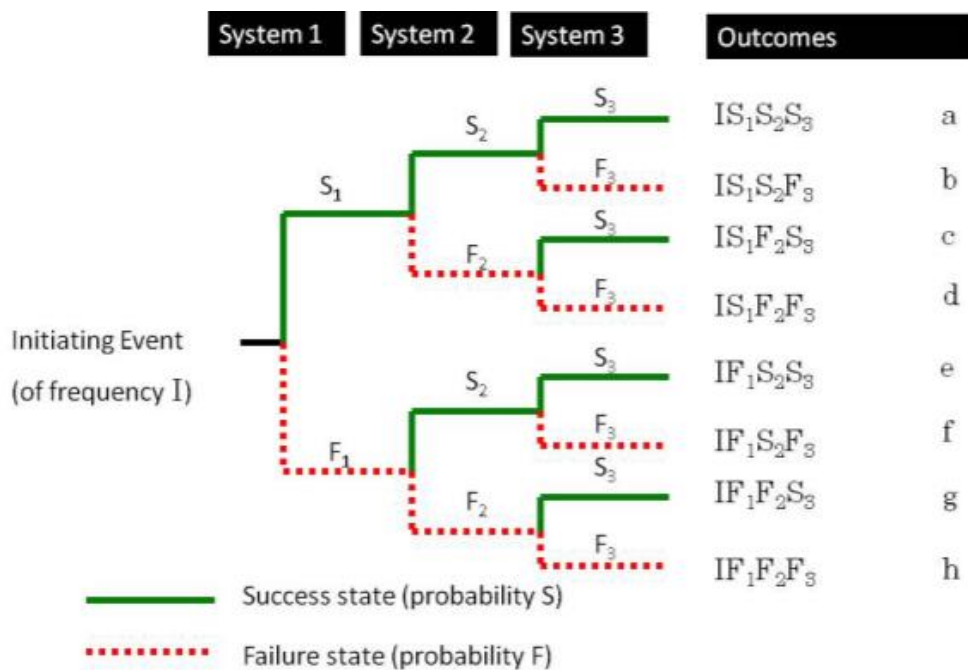
FTA meetod uurib tingimusi ja tegureid, mis võivad põhjustada soovimatuid sündmusi või õnnetusi. See on sobilik kasutamiseks nii õnnetusjuhtumite uurimiseks kui ohtude tuvastamiseks analüütilisel teel. FTA on loogikadiagramm, mis käsitleb kõiki sündmusi, mis võivad põhjustada õnnetusi. Õnnetuste sündmuste kirjeldamiseks kasutatakse erinevaid loogikasümboleid ja märgistusi (ingl k *AND, OR*). Diagramm joonistatakse ülevalt

alla ning lähtepunktiks on soovimatu sündmus. Seejärel tuleb alt üles liikudes tuvastada loogika abil võimalikud rikketingimused, mis soovimatut sündmust põhjustavad [28].



Joonis 2.1 Riskipuu analüüs, FTA [28]

ETA meetod sarnaneb FTA-ga, kuid vastupidiselt FTA-le määrab ETA kõigepealt võimaliku algsündmuse, mille tagajärjeks võib olla õnnetus. ETA meetodit kasutatakse õnnetust põhjustavate riskide tuvastamiseks eesmärgiga leida võimalusi õnnetuste ärahoidmiseks. ETA koostamiseks kasutatakse loogikavärvaid, millel on vaid kaks võimalikku teed- kas jah või ei ning sündmuse kirjeldamist alustatakse vasakult, kust ta edasi hargneb mööda võimalikke stsenaariumeid [28].



Joonis 2.2 Sündmuse puu analüüs, ETA [28]

PRA ehk tõenäosusliku riskihindamise meetodika abil kirjeldatakse võimalikke häiringuid ja ohtusid ning analüüsitakse ohtude tekke tõenäosusi ja tagajärgesid. Eesmärgiks on tuvastada riske, mis takistaks protsesside turvalist ja efektiivset toimimist [29]. PRA annab vastused küsimustele- mis on võimalikud riskid, kui sagedasti need esinevad ja millised on tagajärjed [25].

Käesoleva töö läbiviimiseks sobiv riskianalüüsi meetodika valiti koostöös juhendajate ja ekspertidega. Parimaks võimalikuks meetodiks antud töö raames osutus tõenäosuslik riskihindamise meetodika (ingl k- *Probabilistic Risk Assessment, PRA*).

Andmeid riskide hindamiseks on võimalik saada asjakohasest statistikast, näiteks kasutades tehaseadmete rikete andmeid ja seadmete kättesaadavuse andmeid. Käesolevas töös kasutatakse peamiselt eelnevate analüüside tulemusi ning nende põhjal koondatakse informatsioon vastavalt iga tehnoloogia kohta.

Antud analüüsi juures teostatakse kvalitatiivne riskianalüüs ehk riskide mõju määramiseks kasutatakse mitteruumbrilist iseloomustust. Uuringus lähtutakse riskimaatriksit, kus on kolm riski esinemise tõenäosuse kategooriat (madal, keskmine, kõrge) ja kolm raskusastme kategooriat (madal, keskmine, kõrge).

Tabelis 2.2 on toodud riskide mõju hindamise selgitused ning tabelis 2.3 on toodud riskide sageduse hindamine. Tabeli 2.1 järgi leitakse riski esinemise tõenäosuse ja tagajärje raskusastme kombinatsioonile vastav riskitase. Kõrge riskitase on omistatud sellistele

sündmustele, mille tagajärjeks on suuremahulised kahjustused seadmetele ja ümberkaudsetele objektidele ja mis võivad inimestele fataalset mõju avaldada ning mille esinemise tõenäosus on kõrge. Madal riskitase omistatakse sündmustele, mille mõju keskkonnale ja seadmetele on minimaalne, oht rasketeks inimvigastusteks väike ning mille esinemise tõenäosus on madal. Vähetähtsad riskid võib jätta arvestamata.

Tabel 2.1. Riskimaatriks

		Sagedus			
		Äärmiselt ebatõenäoline	Madal	Keskmine	Kõrge
Tagajärg	Kõrge	Vähetähtis	Keskmine	Kõrge	Kõrge
	Keskmine		Madal	Keskmine	Kõrge
	Madal		Madal	Madal	Keskmine
	Vähetähtis		Vähetähtis		

Tabel 2.2 Riskide mõju hindamine

Mõju suurus	Mõju elanikkonnale	Mõju hoonetele ja seadmetele
Kõrge	Fataalne mõju, eluohtlikud akuutsed vigastused, püsivad kahjustused	Varaline kahju üle 40 miljoni euro, tootmise seisak üle 1 nädala
Keskmine	Tõsised vigastused, vajalik hospitaliseerimine, mittepüsivad kahjustused	Varaline kahju 85 000 kuni 40 miljonit eurot, seadmete häving ja kahjustus, tootmise seisak kuni 1 nädal
Madal	Kergemad vigastused, hospitaliseerimine pole vajalik	Varaline kahju kuni 85 000 eurot, kahjustatud seadmeid on võimalik parandada, arvestatav tööseisak, minimaalne mõju ümbritsevale keskkonnale.
Vähetähtis	Tühised vigastused	Minimaalne seadmete parandamine, minimaalne tööseisak, puudub mõju ümbritsevale keskkonnale.

Tabel 2.3 Riskide esinemise sageduse hindamine

Sagedus	Kirjeldus
Kõrge	Tõenäoliselt juhtub mitu korda ühe jaama/seadme eluea jooksul. Esinemissagedus kord aasta jooksul või sagedamini.

Sagedus	Kirjeldus
Keskmine	Tõenäoliselt juhtub üks kord jaama/seadme eluea jooksul. Esinemissagedus kord mitme aastakümne jooksul.
Madal	Tõenäoliselt ei esine jaama/seadme eluea jooksul. Esinemissagedus umbes kord saja aasta jooksul.
Vähetahtis	Äärmiselt väike tõenäosus. Kord mitme tuhande aasta jooksul.

3. RISKID JA RISKIDE ANALÜÜS

Selles peatükis kirjeldatakse kõrgemas arengujärgus olevate vesinikutehnoloogiate kasutuselevõtuga seonduvaid tehnoloogilisi ja ohutuslaseid riske ning hinnatakse vesinikutehnoloogiate ühiskondlikku aktsepteeritavust. Kokkuvõtlikud riskide kirjeldused ja analüüsid tabeli kujul on toodud vastavates lisades. Tehnoloogiliste küpsuse hindamiseks kasutatakse tehnoloogilise valmiduse tasemeid (TVT), mida on kirjeldatud lisa 15.

Käsitletud on järgnevad vesiniku rakendusvaldkonnad:

1. Vesiniku kasutamine transpordivahendite kütusena, kus eraldi käsitletakse linnaliinibusse, sõiduautosid, veoautosid, ronge, parvlaevu, kahveltõstukeid ja autonoomseid sõidukeid.
2. Vesiniku lisamine maagaasitrassi
3. Ammoniaagi tootmine vesinikust
4. Vesiniku kasutamine tagavarageneraatorite kütusena

3.1 Ühiskondlik aktsepteeritavus

3.1.1 Ühiskondlik suhtumine vesinikutehnoloogiatesse

Sotsiaalsed takistused vesinikutehnoloogiate kasutamise osas on peamiselt põhjustatud vähestest või lausa puudulikest teadmistest vesinikuenergia kasutamise kohta. Teiseks sotsiaalseks barjääriks on harjumused- inimesed on harjunud kasutama traditsioonilisi tehnoloogiaid ning neil on ebakindlus ja hirm uute vähetuntud tehnoloogiate kasutamise ees. Kolmandaks barjääriks on majanduslik olukord. Vesinikutehnoloogiate kasutuselevõtt nõuab suuri alginvesteeringuid ja vähem jõukatel riikidel on raskem neid muutusi ellu viia. Vaja on tõsta inimeste teadlikkust ja haritust, et vesinikutehnoloogiad leiaks laiemat kasutust ning suudaks konkureerida teiste tehnoloogiatega [30].

Vesinikutehnoloogiate rakendajad ja kasutajad näevad vesinikusõidukeid (H₂FC) võimaliku valikuna, kui tehnoloogia töötab korrektselt ning see tagab transporditeenuse kvaliteedi, samas tehnoloogia tundmise kohapealt esinevad puudujäägid ja kohaliku oskusteabe puudumine võib kujuneda probleemiks. Inimesed hindavad H₂FC busside panust puhtasse keskkonda, peamiseks takistuseks on pigem majanduslik tasuvus ja teenuste kvaliteet. H₂FC tehnoloogia vajab täieliku küpsuse saavutamiseks ja konkurentsivõimeliseks muutmiseks rahalist tuge, skeptikute hinnangul sõltub laiem kasutuselevõtt eelkõige

valitsuse poliitikast, edaspidi tuleks otsida meetmeid vesiniku tootmise ja sõidukite soetamise kulude alandamiseks. Vähest sotsiaalset aktsepteeritavust peetakse oluliseks barjääriks näiteks vesinikutanklate rajamisel [31].

3.1.2 Ühiskondlik suhtumine rohelisest vesinikust toodetud ammoniaaki

Ammoniaagi igapäevase käitlemise suurenemise tõttu avalikes ruumides tuleks eriti hoolikalt hinnata ammoniaagiga kokkupuute riske ning leevendavaid meetmeid. Ühiskondliku aktsepteeritavuse kohapealt on põhiliseks probleemiks ammoniaagi tugev lõhn isegi madalatel kontsentratsioonidel (alla 5 ppm), mis põhjustab inimestes ohutusala muret. [32]. Samas on ammoniaagi töökeskkonna piirnormid kõrgemad-pikaajaliselt (8 tundi) on 20 ppm ehk 14 mg/m³ ja lühiajaliselt (15 minutit) 50 ppm ehk 36 mg/m³ [33]. Ammoniaak põhjustab tõsiseid nahapõletusi, silmakahjustusi ja on sissehingamisel mürgine. Tegemist on tuleohtliku gaasiga mis võib kuumutamisel plahvatada [34].

Sotsiaalne aktsepteeritavus on ammoniaagi laiemaulatusliku kasutamise juures energiakandjana väga oluline küsimus, mis nõuab uuringuid, standardite väljatöötamist ja poliitilisi jõupingutusi. Samas ei ole ühtegi põhimõttelist probleemi ammoniaagi tootmise või käitlemise juures, mis takistaks ammoniaagi laiemat kasutuselevõttu. Sellest võib järeldada, et sotsiaalne mõju on keskmine [31]. Inimestele põhjustavad hirmu plahvatusohtliku ammoniaagiga ning ammoniaagist toodetud ammooniumnitraadi ja lämmastikväetistega seotud õnnetusjuhtumid. Paljudel on meeles 2020. aasta augustis Liibanoni pealinnas Beirutis toimunud suur plahvatus, kus kaotas elu 6500 inimest ning ligi 300 000 inimest jäi kodutuks. Plahvatus toimus laos, kus hoiustati ammooniumnitraati ning kümneid kotte ilutulestikku. Ammooniumnitraati kasutatakse laialdaselt väetisena või lõhkeainete tootmiseks. Normaalingimustel on ammooniumnitraat stabiilne ühend, kuid süüteallika olemasolul võib see kinnises ruumis muutuda plahvatusohtlikuks. Beirutis laos hoiustati ammooniumnitraati hooletult, eirates kõiki ohutusnõudeid. Angaaris hoiustati 2750 tonni ammooniumnitraati 6 aastat, mille jooksul imas see niiskust ja saasteaineid, mis muutis selle materjali veelgi reaktsioonivõimelisemaks. Koos ammooniumnitraadiga ladustati samas laos ka 15 tonni ilutulestikku ning õnnetuse toimumise päeval toimusid angaaris keevitustööde, millest tekkinud sädemed võisid algatada edasise sündmuse ahela. Ammooniumnitraati tuleb hoiustada õhukindlates mahutites, et vältida selle niiskuse imamist ning saastumist. Ammooniumnitraati tuleks hoiustada vähemasustatud piirkondades, mida pidevalt kontrollitakse ning kus on kasutusele võetud kõik ohutusmeetmed, sealhulgas tuletõkke- ja evakuatsioonisüsteemid, mis aitaks vältida selliste traagiliste sündmuste kordumist [35].

Ammoniaaki on tööstuses kasutatud juba üle 100 aasta ning tänasel päeval on see tootmismahult suuruselt teine kemikaal maailmas. Selle aja jooksul on tootmisprotsess pidevalt täiustunud ning ammoniaagitööstuse ohutuslaste eesmärkide täitmiseks teevad keemiainsenerid tihedat koostööd, jagades teavet õnnetusjuhtumite, tehnoloogiliste uuenduste ja ohutustavade kohta [36]. Eestis on olemas pikaajaline kogemus ammoniaagi tootmisel. Kohtla- Järvel tootis Nitrofert AS Venemaalt imporditud maagaasist mineraalväetisi. Nitroferti tehases oli võimalik toota 180 000 tonni veeldatud ammoniaaki ning 220 000 tonni karbamiidi [37].

3.1.3 Meetmed riskide maandamiseks

Ühiskondliku aktsepteeritavuse ja barjääride leevendamiseks tuleb tõsta inimeste teadlikkust vesinikutehnoloogiast. Selleks tuleks korraldada sotsiaalseid ja hariduslikke kampaaniaid, mis propageeriks taastuenergiast toodetud vesinikku kui võimalust muuta energeetikasektor rohelisemaks. Reklaamides tuleks rõhutada kütuse ja energia kokkuhoidu pikemas perspektiivis. Hirmu ja ebakindluse leevendamiseks tuleks samuti teha kampaaniaid ja teavitustööd ning rõhuda vesinikutehnoloogiaste kasutuselevõttuga seonduvatele positiivsetele aspektidele. Majanduslike mõjude leevendamiseks ja suure algkapitalikulu korvamiseks tuleks luua kaasfinantseerimise programmid, pakkuda toetusi ja lisasoodustusi roheenergia kasutuselevõtuks [30].

Positiivse avaliku arvamuse kujundamine vesinikutehnoloogiaste kasutuselevõtul on äärmiselt oluline, kuna eriti tehnoloogiaste kasutuselevõtu algusfaasis võivad väiksemadki õnnetused põhjustada suurt avalikku vastuseisu, mis varjutaksid vesiniku kasutuselevõttuga seonduvad positiivsed küljed. Positiivse maine kujundamiseks tuleks kõigepealt koostöös sotsiaalteadlastega viia läbi sotsiaalteaduslikke uuringuid, et selgitada varakult välja võimalikud probleemid ning leida parimad viisid vesinikutehnoloogiaste tutvustamiseks. Sidususrühmadele korraldatud seminaride, küsitluste ja veebiküsitluste abi saaks läbi viia uuringuid, et teha kindlaks keskkonnamõju ja ohutuse küsimused ning samuti erinevad tootmise ja ekspordi võimalused. Teise sammuna tuleks uurida, mis tingimustel on need kohalikud kogukonnad, kuhu vesinikuprojektid on suunatud, nõus vesinikutehnoloogiaid heaks kiitma ja rakendama. Kolmanda sammuna tuleks koostöös varajaste kasutajate, tööstuse ja huvigruppidega identifitseerida sammud, mis aitavad vesinikutehnoloogiaste kasutuselevõttule kaasa [38].

3.1.4 Järeldused

Kokkuvõttes on suurimateks vesinikutehnoloogiaste kasutuselevõttuga seonduvateks barjäärideks inimeste puudulikud teadmised, hirm õnnetuste ees, harjumus kasutada fossiilseid kütuseid ja tuntud tehnoloogiaid ning vesinikutehnoloogiaste kõrge hind. Õnneks

on ühiskondlik suundumus üha enam panustada keskkonna säästlikesse lahendustesse ning tänu sellele on aina rohkem inimesi valmis oma seniseid harjumusi muutma. Barjääre aitaks leevendada vesinikutehnoloogiate laiem tutvustamine ja levik, seega ei tohiks avalikkuse suhtumine saada takistuseks vesinikutehnoloogiate suuremahulise kasutuselevõtu ees.

Ühiskondliku aktsepteeritavusega seotud riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 1 Ühiskondliku aktsepteeritavuse riskianalüüsi tabel.**

3.2 Vesiniku kasutamine transpordivahendite kütusena

Käsitletavad transpordivahendid on bussid, veoautod, rongid, praamid, kahveltõstukid, autonoomsed sõidukid. Kõigi nimetatud vesinikusõidukite tehnoloogilised ja ohutusalsed riskid on sarnased, hõlmates eelkõige kütusepaakide, kütuseelemendi, infrastruktuuri ja hooldusega seotud riske.

3.2.1 Transpordivahenditega seotud tehnoloogilised riskid

Kütusepaak

Vesiniku omadused (madal viskoossus, suur hajuvus, madal süttimisenergia) võivad teatud tingimustel põhjustada süttimist või isegi detonatsiooni, kui vesiniku mahuosa õhus on 13-65%, kuid kiire hajumise tõttu on see ebatõenäoline [39]. Vesiniku madala tiheduse tõttu peab kütusepaagi maht olema kordades suurem võrreldes bensiini või diiselpaakidega, et saada sama kogus energiat, mis võib võtta lisaruumi [40]. Kütusepaagi kahjustumiseks on mitmeid võimalikke variante. Kütusepaak võib puruneda avarii või õnnetuse tagajärjel, kuid paagi kahjustumine võib toimuda ka tootmisvigade, vale käitlemise või ülekoormuse tõttu. Lisaks muud välised mõjud nagu kokkupuude mõne terava objektiga või tulekahju teke, võivad põhjustada tõsiseid tagajärgesid, eriti juhul, kui tõrked esinevad ka ülerõhuklapi töös. Aeglane lekkimine võib toimuda ka pragude tekkimise tagajärjel, ülerõhuklapi või kütusepaagi ühenduse vea tõttu [41].

Avarii korral on tulekahju ja plahvatuse tekkimise tõenäosust hinnatud madalaks, kütusepaak on disainitud vastu pidama ka rängale avariile, suurima tõenäosusega on avarii väike ning vesinikku ei leki, mis viib ka tulekahju tekkimise võimaluse miinimumi. Vesinik on õhust väga palju kergem ning hajub äärmiselt kiiresti ümbritsevasse keskkonda, mistõttu süttimise oht on madal [42]. Euroopa vesinikusõidukite tüübikinnituse eeskirjad nõuavad, et vesinikpaakidele paigaldataks temperatuuri -ja rõhualandusseadmed (ingl k -TPRD, *Thermal and Pressure Relief Device*), et tulekahju korral ülerõhuklapp vabastaks paagi sisu, et vältida paagi katastroofilist purunemist. Kuna vesinikku hoiustatakse rõhu

all, siis on vesiniku põlemine kordades kiirem võrreldes bensiini või diisliga. Temperatuuri- ja rõhuanduri töös võib aga esineda tõrkeid, näiteks kui õnnetuse korral seade ummistub [43]. Vesinik põleb kõrge temperatuuri ja kiirgusega, kuid nähtamatu leegiga, mis muudab selle tuvastamise keeruliseks. Vesinikul on suur põlemiskiirus ja seetõttu on suletud keskkonnas raske tulekahju piirata [39].

Vesinikusõidukid on enamasti valmistatud III (alumiiniumist) või IV tüüpi mahutist (polümeerist). Need komposiitpaagid on sobilikud gaasilise vesiniku hoiustamiseks tänu oma kergele kaalule ja mehaanilisele tugevusele. IV tüüpi paagi sisemus on valmistatud suure tihedusega polüetüleenist ning on omakorda kaetud süsinikkiuga tugevdatud polümeeriga (epoksüvaiguga), et mahuti peaks vastu suurele rõhule. Sarnaselt teiste kütuseliikide paakidele lagunevad vesinikku hoiustavad kerged ja mehaaniliselt tugevad komposiitpaagid termilise koormuse korral üsna kiiresti. Termiliselt kaitsmata paakide tulepüsivusaste on 6-12 minutit, see näitab aega, mis kulub tulekahju tekkest kuni paagi täieliku purunemiseni. Ilma termilise kaitseta komposiitpaagil on tulekahju korral mõju inimelule 2,5 korda lubatud piirmäärast kõrgem, koos termilise kaitsega on mõju aga peaaegu olematu [43]. Termilise kaitse tagamiseks kaetakse komposiitpaakida vastavast materjalist kaitsekihiga, mis vähendab soojusülekannet ning märgatavalt pikendab komposiitpaagi vastupidavust termilisele koormusele. Termilise kaitsetena kasutatakse näiteks keraamilisi kihte või spetsiaalseid värvkatteid [44].



(a) 8min 31s



(b) 14min 53s



(c) 17min 22s



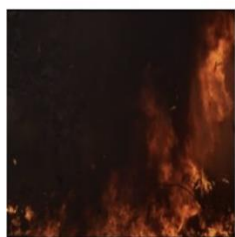
(d) 17min 35s



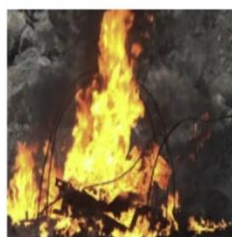
(e) 17min 36s



(f) 17min 37s



(g) 17min 38s



(h) 19min 55s



(i) 20min 20s

Joonis 3.1 Vesinikupaagi kõrgsurvemahuti termilise vastupidavuse katse [45].

Joonisel 3.1 on näidatud vesiniku kõrgsurvepaagi termilise vastupidavuse katse. Tegemist on sisemise alumiiniumkihi ja süsinikkiududega tugevdatud komposiitpaagiga (III tüüpi), mille kogumass on 89 kg ja nominaalne tööõhk 35 MPa. TPRD avaneb automaatselt, kui temperatuur saavutab kriitilise väärtuse, kuid antud katses TPRD ei aktiveerunud ning 17 min 36 s hiljem mahuti purunes ja plahvatas. Plahvatusohtlike õnnetuste põhjusteks võivad olla vale protsessijuhtimine, mikrodefektid komposiitpaakides, ebapiisav soojusülekanne TPRD-le või selle rike [45].

PEM kütuseelement

Käesolevas töös käsitletakse PEM kütuseelementi, kuna see on vesinikusõidukites senimaani kõige laialdaslikumalt kasutatud kütuseelement. PEM kütuseelement koosneb elektrodidest, bipolaarsetest plaatidest, prootonvahetusmembraanist, katalüsaatorkihist ja gaasi difusioonkihist. Lisaks PEM kütuseelemendile on alternatiivina võimalik kasutada näiteks SOFC, AEMFC ja DMFC kütuseelemente [46]. Nendega on täpsemalt võimalik tutvuda alapeatükis **3.7 Alternatiivsete vesinikutehnoloogiate riskid**.

Töörežiimis väheneb kütuseelemendi efektiivsus erinevate elementide lagunemise tõttu. Kütuseelemendi lagunemine on põhjustatud juhtivuse vähenemisest, membraani reostusest, membraani hõrenemisest ja liigest kuumusest. Probleemiks võib olla ka kütuseelemendi aeglane dünaamiline reaktsioon, mistõttu tuleks koos kütuseelemendiga kasutada ka akut, et kompenseerida puudujääke. PEM jõudlust piirab kütuseelemendi erinevate osade- elektrodide, membraani ja katalüsaatori kahjustumine. Kütuseelemendi jõudlust mõjutavad erinevad parameetrid on seotud juhtivuse vähenemisega, membraani hõrenemisega, aktiivse pinna vähenemisega. Juhtivuse vähenemist põhjustab membraani reostumine, korrosiivsed ühendid, kõrge temperatuur või voolukõikumine. Kütuseelemendi töö käigus võivad vesinikperoksiidi molekulid reageerida membraani metallioonidega ja moodustada radikaali, mis põhjustab membraani hõrenemist keemiliste sidemete lagunemise tõttu. Kütuseelemendi töö käigus tekkinud veeaur võib põhjustada anoodkatalüsaatorite mürgituse süsinikmonooksiidiga ja vähendada vesiniku ionisatsiooni kiirust [47]. Üheks võimalikuks kütuseelementidega seotud riskiks on molekulaarse vesiniku ja hapniku kokkupuude katalüsaatori pinnal, mille tagajärjel võib tekkida tulekahju. Selle mõju on aga piiratud, kuna vesinikukogused kütuseelemendis ja kütusevarustuse liinides on väikesed [41].

Peamised PEM kütuseelemendi probleemid on seotud elektrolüüdi lühikese elueaga, niisutusvajadusega, et säilitada elektrijuhtivust ja kütuseelemendi „mürgitamisega“ ebasobilike ühenditega. PEM membraani tuleb juhtivuse säilitamiseks pidevalt niisutada,

kuid samas ei tohi tekitada membraani üleujutamist. PEMFC-s on vaja kõrge puhtusega vesinikku, kuna seade on tundlik saasteainete, näiteks CO, väävli ja ammoniaagi suhtes. CO võib absorbeeruda platinast valmistatud katalüsaatori pinnale ning seeläbi vähendada katalüsaatori efektiivsust anoodis ja seega kogu kütuseelemendi võimsust. Kui CO piirväärtust 2 ppm süsteemis ületatakse, siis tagajärjeks on PEMFC efektiivsuse vähenemine. Kuna CO mõju on pöörduv, siis on võimalik kütuseelementi hooldusesse viies tekkinud probleem lahendada. CO adsorptsioonil 40-50% platinat pinnal maksimaalsest adsorptsioonivõimest, toimub 50 mV pingelangus, mis oluliselt vähendab kütuseelemendi efektiivsust. Väävli (S) piirnormi 4 ppm ületamine tekitab aga süsteemis olulist kahju ning nõuab kütuseelemendi välja vahetamist [48]. Kui vesiniku hoiustamiseks kasutatakse ammoniaaki, metanooli või sipelghapet, nõuab PEM kütuseelement eelnevalt vesiniku täielikku puhastamist [19].

Üldisel juhul on vesinikusõidukites kasutatavad kütuseelemendid väga töökindlad ja usaldusväärsed. Probleme võib ilmneda abikomponentide, näiteks alalisvoolu muundurite, jahutusumpade, andurite ja tarkvara osas [49].

Kütuseelemendid on külma suhtes tundlikud, mis võib omakorda mõjutada nende eluiga. Kuna kütuseelement toodab ka sooja, siis see lubab töötada veokitel temperatuurivahemikus -30°C kuni $+45^{\circ}\text{C}$, kuid käivitamisega võivad tekkida probleemid. Selle tarbeks on võetud kasutusele lisasoojendid, tänu millele käivituvad kütuseelemendid koheselt ka -20°C juures, kuid neid süsteeme on katsetatud vaid busside peal külmemates linnades, näiteks Oslos, kuid näiteks veokeid pole nii ekstreemsetes tingimustes (või veelgi külmemates) veel katsetatud [50].

Elektroodid

Kütuseelementidel põhinevate busside tootmisel on keskkonnamõistes suurem jalajälg võrreldes tavaliste sise põlemismootoriga sõidukitega. Suurimat mõju kütuseelementide üldisele jalajäljele avaldab elektroodide tootmine, kuna seal kasutatakse haruldasi metalle [51]. Sise põlemismootorite katalüsaatorites kasutatav plaatina kogus on vastavalt diiselmootoris 5-10 grammi ning bensiinimootorites 2-7 grammi. Kütuseelementides kasutatav plaatina kogus on aga 30-60 grammi, mis on märkimisväärselt suurem võrreldes sise põlemismootoritega. Kütuseelementide katalüsaatoritega seotud uuringud on suunatud plaatina koguse vähendamiseni vähemalt 10-15 grammini ning seejärel oleks need võrreldavad sise põlemismootorites kasutatava plaatina kogusega [52]. Seda keskkonnabarjääri saab aga osaliselt leevendada, kui neid metalle (eelkõige platinat) uuesti ringlusesse võtta ja taaskasutada [51]. Platinat on kütuseelemendi juures üks olulisemaid komponente, kuid tegemist on haruldase väärismetalliga, mida kaevandatakse

peamiselt Lõuna-Aafrika Vabariigis ja Venemaal. See võib põhjustada tarneraskuseid ning raskendada kütuseelementide masstootmist [51]. Tuleb ka arvestada, et kuigi kütuseelementide tootmise jalajälg on suurem võrreldes diiselmootorite tootmisega, siis üldist elutsüklit arvestades on vesinikusõidukite jalajälg võrreldes diisliga oluliselt väiksem, kuna enamik diiselibusside CO₂ heitmest paiskub atmosfääri selle opereerimisfaasis [53]. Tehnoloogilised arengud on suunatud sellele, et plaatina kasutust vähendada või seda hiljem taaskasutada, mis samuti vähendaks kütuseelementide hinda. Plaatina kasutust saab vähendada näiteks kasutades plaatina (Pt) ja kroomi (Cr) sulamit või Pt ja reenumi (Re) sulameid, Pt seotud süsinikmaterjaliga ning arendatakse ka täiesti plaatina vabasid katalüsaatormaterjale [54].

Bipolaarsed plaadid

Vesinik on väga reaktiivne gaas ja see põhjustab metallide korrosiooni. Vesinik on väga väikeste mõõtmetega element ja suudab tungida läbi metalli struktuuri. See põhjustab vesinikuga kokkupuutuvate materjalide omaduse halvenemist. Bipolaarsete plaatide korrosioon suurendab kohttakistust ja võib tekitada pingelangust süsteemis. Seetõttu tuleb bipolaarsed plaadid katta heade soojus- ja juhtivusomadustega korrosioonikaitse kattega ja see muudab korrosiooni riski madalaks [51].

Olemasolevate sõidukite ümberehitus

Uutesse süsteemidesse on lihtsam vesinikutehnoloogiaid integreerida, kuid suuremad sõidukid, nagu rongid ja praamid, mida ostetakse pikemaks ajaperioodiks, võivad vesinikukütusele üleminekuks vajada ümberehitust.

Praeguses merendussektoris on kütuseelement väga uudne tehnoloogia, kuna laevanduses on aastakümneid kasutatud sisepõlemismootoreid [19]. Elektrilise jõuülekande kasutamine nõuaks laevade põhimõttelisi muudatusi ja elektrifitseerimist, seetõttu oleks tõenäoliselt vesiniku põletamine sisepõlemismootorites lühemas perspektiivis ökonoomsem. Samas pikas perspektiivis on kütuseelemendid tõenäoliselt kõige tõhusamad ja ökonoomsemad lahendused. PEM kütuseelementi peetakse puhta vesiniku kasutamisel kõige optimaalsemaks variandiks [55].

Olemasolevad rongid on peamiselt diiselkütuse või elektrivõrgu toitel seega on kütuseelementide tehnoloogia integreerimine praegustesse rongidesse keeruline, kuna nõuab kere- ja struktuurimuutusi. Sellega võivad kaasneda erinevad kaalu-, ruumi- ja paigaldusnõuded ning see võib vähendada reisijate mahtu või piirata sõiduomadusi ning osutada majanduslikult kulukas. Lisaks kütuseelemendile endale, tuleb luua ka vesiniku hoiustussüsteem ning see kokku nõuab rongi täielikku ümberehitust. Maanteetranspordi kütuseelemendi süsteeme testitakse löökide ja vibratsiooni suhtes, et tagada

kütuseelemendi pikem eluiga. Rongide puhul võib aga jätkuvalt vibratsioon põhjustada ohtu kütuseelemendi tööle. Risk on seotud näiteks kiirrongide ja põhivedurite sagedase ühendamise ja lahti haakimisega [56].

Infrastruktuur

Rajatava sõidukipargiga tuleb paralleelselt rajada ka vesinikutankla. Optimaalne infrastruktuuri lahendus sõltub mitmetest teguritest, näiteks kütuse saadavus ja eeldatav nõudlus, mis mõjutab hangitava sõidukipargi suurust ja eeldatavat kütusevajadust sõiduki kohta [49]. Lisaks sõidukite enda kuludele vajavad nii elektrilised kui ka vesinikkütuseelemendiga sõidukid laadimis- või tankimistaristut, mis on tavaliselt kallim võrreldes näiteks diislikütuse mahuti ja jaoturiga. Laadimisseadmed, lisakaablid ja võimalikud täiendavad alajaamad võivad osutada suureks lisakuluks sõltuvalt sõidukite arvust ja laadimisstrateegiast [57].

Täpsemalt on tanklatega seotud riskidega võimalik tutvuda vesinikutanklaid kirjeldavas alapeatükis **3.3 Vesiniku tankimise ja tanklatega seotud riskid**.

Hooldus

Enne kütuseelementidega sõidukite kasutuselevõttu on vaja teha ettevalmistusi, et tagada piisav võimekus nende hooldamiseks. Hooldustöid tehakse enamasti hoonetesiselt ning vesiniku omadustest tulenevalt toob see endaga kaasa teistsuguseid riske kui bensiini- või diiselsõidukite korral. Süsteemi gaasielementide lekkimine võib põhjustada vesiniku kogunemist ruumi lae alla ning põhjustades tulekahju- ja plahvatusohtu. Selle riski vähendamiseks tuleks paigaldada vesinikuandurid ja hea ventilatsioonisüsteem [49].

Hooldustöökojas peab olema ka kütusepaagi tühjendamise süsteem, kuna ohutuse tagamiseks on vajalik sõiduki kütusepaaki tühjendada enne hooldustoimingute teostamist. Tühjendussüsteemi abil suunatakse gaas kas hoiupaaki või ventileeritakse õhusõltava abil keskkonda. Pärast hooldust on vajalik sõiduk uuesti tankida, kas hoiupaagist võetud vesinikuga või hoolduses toodetava/hoiustatava vesinikuga [58]. Hetkel puuduvad spetsiaalsed rajatised ja kvalifitseeritud personal hooldustööde teostamiseks. Töötajad peavad saama koolitust hooldustööde teostamiseks ning peavad omama teadmisi ohutuse, diagnostika ja süsteemide remondi alal [50].

3.2.2 Transpordivahendite ohutusalased riskid

Vesinik on väga lenduv gaas ja seetõttu suudab tungida läbi materjalide, mis võib põhjustada vesiniku lekkeid. Selle vältimiseks tuleb valida sobivad materjalid, näiteks IV tüüpi mahutid sisaldavad polüetüleenist kihti, et takistada vesiniku lekkimist. Vesinik võib

metalli pinnal dissotsieeruda aatomvesinikuks ning moodustada metallhüdriide, mis ajapikku võib põhjustada metallide lagunemist [57].

Vesinik võib õhuhapnikuga segunedes põlema süttida. Süüte aktivatsioonienergia on äärmiselt madal, ligi kümme korda väiksem kui maagaasil. Vesinik põleb värvitu leegiga ja väga kõrge temperatuuriga (2000°C) ning väga suurel kiirusel (260 cm·s⁻¹). Süttimine võib toimuda laias mahukontsentratsiooni vahemikus (4–75%) [57].

Üheks võimalikuks riskiks on ka kõrgsurveanumate kasutamisest tulenev oht. Kõrge rõhu all olevast mahutist võib vesinikku lekkida ning õhku sattudes võib sädeme olemasolul ootamatult süttida. Tulekaju ja kõrgete temperatuuride korral võib mahuti muutuda hapraks ning seetõttu tuleb lekkeohtu pidevalt kontrollida. Rahvusvaheliste standardite kohaselt peab vesinikumahuti olema varustatud spetsiaalse anduri ja ventiiliga, mis vabastab vesinikku niipea, kui temperatuur on tõusnud üle 110°C. Selle idee on tule- ja plahvatusohtliku vesinikugaasi eraldamine kontrollitud kiirusel, et vältida plahvatusi ja piirata tulekahjusid [57]. Erinevalt sisepõlemismootoritest esineb vesinikusõidukitel elektrilöögi oht sisseehitatud kõrgepingeallikate tõttu [50].



Joonis 3.2 Vesinikul (vasakul) ja bensiinil (paremal) sõitva auto kütuse põlemise simulatsioon [59].

Joonisel 3.2 on toodud katse, kus paremal pool on bensiiniauto, kus bensiin lekkis ning süüte tagajärjel süttis põlema. Vasakul olev vesinikusõiduk sisaldab vesinikuandureid, mis aktiveerivad solenoidid, mis ohu korral sulgevad kütusevoo kütuseelementi. Jooniselt on võimalik näha, et vesiniku põlemisel tekib tulejuga ning see on suunatud kõrgele õhku ja peaaegu ei kahjusta autot. Vesinikuauto sisaldab ülerõhuklappi, mis tulekahju korral avaneb ning vesinik põleb suunatud joana ära palju kiiremini võrreldes bensiini või diisliga. Bensiiniauto puhul aga toimub põlemine aeglasemalt ning 90 sekundi jooksul on auto

peaaegu hävinenud, seevastu vesinik on sama aja jooksul aga pea täielikult põlenud autot kahjustamata [59].

3.2.3 Meetmed riskide ennetamiseks

Tootjad

Sõidukite ja seadmete testid peaksid sisaldama süsteemi vastupidavust vibratsioonile ja lööklainetele, tuleks valida sobivaimad kohad ventilatsiooni süsteemi paigutamiseks, kõrgsurvetorud tuleks kaitsta ning paigaldada kaitseventiilid [41]. Tuleks kasutada täiendavat tulekaitset, kasutades patareides spetsiaalset separatsioonisüsteemi, vältimaks elektrisädemete teket avarii korral [41]. Kütusetorud tuleb projekteerida nii, et need oleks võimalikult eraldatud kõigist elektriseadmetest, patareidest, mootoritest ja juhtmetest. Ventilatsioonisüsteem tuleb kavandada selliselt, mis võimaldab vesinikul välja pääseda ning väldib vesiniku kogunemist mahuti vahetus lähedusse [41].

Vesiniku kõrgsurvepaakidega seotud riskide ennetamiseks kasutatakse tugevaid süsinikkiududest valmistatud mahuteid, mis on purunemise vältimiseks projekteeritud taluma lubatud rakendatavast maksimaalrõhust kaks korda suuremat rõhku ning on seega palju tugevamad võrreldes bensiini- või diiselsõidukis kasutatavate kütusepaakidega [50]. Kütusepaakide kahjustuste riskide maandamiseks tuleks ennetava meetmena paak välja vahetada iga 10 aasta tagant, ohutuse tarbeks tuleks paak paigaldada väljaspoole reisijate sektsiooni ning kaitsta mehaaniliste kahjustuste eest [60].

Elektrisüsteemi eraldamiseks suletakse kütuseelement ja aku eraldi kasti, mis suletakse ja isoleeritakse metallkerest ning nende asukoht tähistatakse vastava värvikoodiga. Sõidukitesse tuleb paigaldada vesinikusensorid, et tagada nii sõiduki kui seal viibivate inimeste ohutus. Kütusevool peatatakse, kui andur tuvastab lekke, mis ületab kütuseelemendi nõudlust. Vesinikusõiduk ja selle komponendid läbivad mitmeid testimisi, mis on sarnased CNG sõidukite testimisega ning sellega kontrollitakse vastupidavust äärmuslikele tingimustele ja õnnetustele. Seejuures on nõuded vesinikusõidukitele veelgi karmimad kui CNG sõidukitele [50].

Hooldustoiminguid läbi viies tuleb plahvatusohu vältimiseks paigaldada siseruumidesse vesinikuandurid, mis on ühendatud häiresüsteemiga, samuti ühendada sõidukid hoolduse ajaks maandusega, et vähendada elektrostaatilist riski. Lisaks tuleks paigaldada hea ventilatsioonisüsteem, tuletõkkeüksed ning paigaldada vastavad valgustid ja muud seadmed, mis on mõeldud kasutamiseks potentsiaalsetes plahvatusohtlikes piirkondades (ATEX) [49]. ATEX direktiiv sätestab minimaalsed ohutusnõuded, mis on kehtestatud töötamiseks plahvatusohtlikes piirkondades ning selle direktiivi abil on Euroopa Liidu

siseselt võimalik ATEX märgistusega tooteid müüa ilma täiendava testimisvajaduseta [61]. Vesinikusõidukite kasutamisel siseruumides, näiteks kahveltõstukite korral, tuleb paigaldada head ventilatsioonisüsteemid, et vesiniku lekke korral ei tekiks tulekahju [62].

Kasutajad

Sõidukite juhid peaksid läbima nii teoreetilise kui praktilise baastreeningu ning saada ülevaate sõidukite põhilistest tehnilistest omadustest, mis sisaldab potentsiaalseid ohtusid ning teavet tegutsemise kohta hädaolukorras. Lisaks praktilisele ja suulisele instruktoraazile tuleks juhtidele edastada ka kirjalikud juhised, mis hõlmavad ohutuskaarte ja teavet hädaolukorras tegutsemise kohta [49].

Hooldusmehaanikud peavad läbima nii baastreeningu kui saama ka erikoolituse kõrgepingekomponentide käsitlemise, kütuseelementide ning survestatud gaasisüsteemide kohta. Samuti tuleb läbida väljaõpe tegutsemiseks hädaolukorras [49].

Kohalikku tuletõrjeteenistust tuleb teavitada vesinikurajatiste planeerimisest ning anda vajalikku teavet hoiustatavate vesiniku koguste kohta, et oleks võimalik välja töötada hädaolukordadele reageerimise kava [49].

3.2.4 Järeldused

Selles peatükis analüüsiti vesinikusõidukite kasutamisega seonduvaid tehnoloogilisi ja ohutusalaalseid riske ning kirjeldati meetmeid riskide leevendamiseks. Suurimad tehnoloogilised riskid on seotud kütusepaagi mahutiga, mis võivad puruneda avarii, tulekahju või vale käitlemise tagajärjel. Teiseks peamiseks riskiks on kütuseelementides kasutatavate haruldaste väärismetallide, (eriti plaatina haruldus), mis võib põhjustada tarneraskusi ja olla negatiivse mõjuga keskkonnale. Samuti tuleb rajada taristu ja vesinikutanklad ning tagada võimekus pakkuda vesinikusõidukitele hooldusteenust. Vajalik on nõuetele vastavate ja hea ventilatsioonisüsteemiga hooldustöökojade olemasolu, kus kvalifitseeritud personal oleks võimeline teostama töid vesinikusõidukitega. Kirjeldatud riske on aga võimalik minimeerida ning laiemaks kasutuselevõtuks tuleks laiendada vesinikutanklate võrgustikku, rajada hooldustöökojad ning trennida personali. Sõidukite ohutuks opereerimiseks peavad sõidukid olema varustatud vesiniku anduritega ning kasutatud materjalid peavad olema tulekindlad ning kooskõlas ohutusnõuetega. Tehnoloogilised arengud on suunatud kütuseelementides kasutatava plaatina vähendamisele või taaskasutamisele, et vähendada keskkonnamõju.

Vesinikubussid- Vesinikubusside kasutuselevõtu potentsiaal on suur, kuna senimaani on see kõige arenenum kütuseelement-tehnoloogia rakendus, see on kommertsiaalses

kasutuses ja selle tehnoloogilise valmiduse aste on 9 [63]. Vesinikubusside riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 2 Vesinikubusside riskianalüüsi tabel.**

Vesinikuveokid- Euroopas on üha enam keskendunud kütuseelement raskeveokite ja veoautode tutvustusprojektidele. Esimese kommertsiaalse projektina on Hyundai juba tarninud esimesed kütuseelemendid sõitvad Xcient mudeli veoautod Šveitsi turule ning 2025. aastaks plaanitakse Šveitsi teedel sõitmas näha 1600 Hyundai kütuseelement veoautot [64]. Seega liiguvad vesinikuveokid kommertsiaalse kasutuselevõtu suunas. Teised veoautode tootjad nagu Daimler, Hyundai, Fuso, Toyota, Scania, Volkswagen, ja PSA arendavad hetkel oma kütuseelement-veokeid ning valminud on nii prototüüpe kui kommertsiaalseid mudeleid [63]. Vesinikul põhinevad veokid on heaks keskkonnasäästlikumaks alternatiiviks sise põlemismootoritele ning võrreldes akudega on kütuseelementidel pikem sõiduulatus ja lühem tankimisaeg. Siinkohal sõltub vesiniku keskkonnasäästlikkus eelkõige vesiniku tootmisviisidest. Vesiniku veokite riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 4 Vesiniku veokite riskianalüüsi tabel.**

Vesinikurongid- Rongide eluiga on pikk ja seetõttu võib vesinikurongide kasutuselevõtuks olla vajalik olemasolevate diislrongide ümberehitus, mis on tehnoloogiliselt keerukas protsess. Vesinikurongide ümberehituseks tuleb paigaldada uued vesinikupaagid, mis on mahult kordades suuremad võrreldes diislrongide kütusepaakidega. Lisaks pole kütuseelemente piisavalt katsetatud raudtee vibratsiooni ja löökide suhtes. Vesinikuronge on otstarbekas kasutada piirkondades, kus raudteeliinide elektrifitseerimine pole mõttekas ning selle abil vähendada nii müra kui süsinikuheitmeid kohalikul tasandil. Kütuseelementidel põhinevate rongide kasutuselevõtu potentsiaal on suur ja üldine tehnoloogilise valmiduse aste on 8. Euroopa on vesinikurongide arendamises juhtpositsioonil ning rajatud on suuremahulised taristud. Saksamaal sõidavad lühikesel marsruudil kaks kütuseelementidega Alstomi rongi [63]. Alstomi vesinikurong on kasutusele võetud ka Hollandis [65]. Vesiniku rongide riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 5 Vesiniku rongide riskianalüüsi tabel.**

Vesinikupraamid- Suurimateks riskideks vesiniku kasutamisel laevade või praamide kütusena on olemasolevate laevade ümberehitamise vajadus- kas laevad täielikult elektrifitseerida või vahetada/täiustada sise põlemismootorite süsteeme. Suureneda võib kütuse hoiuruumi vajadus ning tankimiseks kuluv aeg. Hetkel puuduvad ka sadamates vajalikud tanklad ning hoiumahutid. Kütuseelement tehnoloogiate tehnoloogilise valmiduse aste laevandussektoris on 7. Kütuseelemendid on hetkel eelkõige sobilikud väiksemate laevade ja praamide puhul kasutamiseks. Käimas on mitmeid projekte, näiteks Norra plaanib 2021. aasta jooksul esimese H₂ hübriidkütuseelementidega laeva kommertskasutusse võtta. ABB aga töötab välja megavatt mahus kütuseelemente, et toita

suurte konteinerlaevade abiseadmeid [63]. Vesiniku parvlaevade riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 6 Vesiniku parvlaevade riskianalüüsi tabel.**

Kahveltõstukid- Peamiseks ohuks on kahveltõstukite kasutamine sisetingimustes, kuna lekke korral võib tekkida plahvatusoht. Seda riski hinnatakse aga madalaks, sest kasutatavad vesinikukogused on väiksed ning ruumid, kus neid kasutatakse on suured ning hästi ventileeritud. Ühendriikides on kasutusel juba üle 30 000 kütuseelementidel töötavat kahveltõstukit. Kütuseelementidel põhinevad kahveltõstukid on heaks alternatiiviks diiselmootoriga tõstukitele, kuna ei erita lokaalseid heitmeid ja tänu sellele sobivad kasutamiseks ka sisetingimustes. Võrreldes akupõhiste tõstukitega on ka nende tankimisprotsess kiirem ja efektiivsem [16]. Vesinikupõhiste kahveltõstukite tehnoloogilise valmiduse aste on 9, seega on tegemist kommertsiaalkasutuses oleva tehnoloogiaga, mis on ennast tõestanud läbi kasutamise reaalses elukeskkonnas. Edasised arengud peaksid olema suunatud kapitali- ja kasutuskulude hinna optimeerimisele ning standardite väljatöötamisele [66]. Riskianalüüsi tabel vesiniku kasutamisel kahveltõstukite kütusena on leitav lisast **Lisa 8 Vesiniku kasutamine kahveltõstukite kütusena riskianalüüsi tabel.**

Autonoomsed sõidukid- Kuna autonoomsed sõidukite tehnoloogia on alles arengujärgus, siis on neisse lihtne vesinikutehnoloogiat integreerida, kuna need ei vaja olemasolevate sõidukite ümberehitust. Samas on autonoomsete sõidukite tehnoloogia üldiselt alles arengufaasis. Seega nõuab tähelepanu mitte üksnes vesinikutehnoloogiate areng, vaid süsteem tervikuna, et tagada ohutu liikumine. Vesinikutehnoloogiate suurima riskina tuleb kütust hoiustada kompaktses kõrgrsurvepaakides, mille maksimumrõhul on tehnoloogilised piirangud. Samuti kütuseelemendid, mille põhiliseks probleemiks on eluiga ja katalüsaatorites kasutatav haruldane väärismetall plaatina või selle sulamid. Autonoomsetel sõidukitel on kõrge energiavajadus, kuna automatiseeritud juhtimine ehk tehisintellekti nõutav arvutivõimsus ning pardal olevad kütte-, ventilatsiooni- ja konditsioneerisüsteemid tekitavad suurendatud energianõudlust [67]. Autonoomsete sõidukite puhul on ohuks küberturvalisus, kuna andurid ja muud automaatikakomponendid tuvastavad sõiduki täpset asukohta, liikumisi ja sõiduki tehnilist olekut. See muudab autonoomsed sõidukid sihtmärgiks häkkeritele ja kurjategijatele [20]. Autonoomsed vesinikusõidukid nõuavad veel aastaid testimist ja katsetamist ning regulatsioonide kohaldamist, et muutuda tehnoloogiliselt küpseks tehnoloogiaks ja saavutada ühiskondlik heakskiit. Üheks riskiks on võimalikud vead riistvara ja tarkvara toimimises, kuna ka väiksemal anduri veal võib olla tõsiseid tagajärjesid [68]. Vesiniku kasutamine autonoomsete sõidukite kütusena riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 10 Vesiniku kasutamine autonoomsete sõidukite kütusena riskianalüüsi tabel.**

3.3 Vesiniku tankimise ja tanklatega seotud riskid

Vesinikutanklate puudumine on üheks suuremaks barjääriks kütuseelementidel põhinevate sõidukite laiemal kasutuselevõtu ees. Surugaasitanklate peamised komponendid on kompressor, mahutid ja tankurid. LH₂ hoidlatega veeldatud vesiniku tanklate peamised komponendid on krüoogeenne mahuti, pump, aurusti ja tankur [69].

3.3.1 Vesiniku transportimisega seotud riskid

Surugaasi transport tanklasse

Vesiniku transportimisel surugaasimahutitega haagistega on põhilisteks probleemideks mahutite sisekihi vastupidavus, mis võib kannatada saada pideva dekomprimeerimise tagajärjel. Probleemiks on ka komposiitmahutite kõrge hind, mis moodustab 70% kogukulust [70]. Samuti võivad tekkida lekked, mis põhjustatud korrosioonist või välistest mõjutustest. Selle mõju suurus sõltub kahjustuse ulatusest ning tagajärjeks võib olla leegijoa tekkimine ja tulekahju. Lisaks on oht mahuti katastroofilisele purunemisele liiklusõnnetuse korral, mille tagajärjel moodustub õhus süttimisohtlik gaaside segu, mis võib plahvatada [69].

Veeldatud vesiniku transport tanklasse

Veeldatud vesiniku veokitranspordi peamiseks puudusteks on ebaefektiivne veeldamisprotsess ja võimalikud kaod seoses vesiniku aurustumisega, kui teatav kogus soojust pääseb mahutile ligi. Sellest olenevalt tuleb valida maksimaalne kaugus transpordiks. Lisaks suurendab veokitransport liiklustihedust ning korraga pole võimalik väga suurtes kogustes vesinikku vedada [13]. Võimalikeks õnnetusstsenaariumiteks on LH₂ transpordihaagise kahjustus, mis võib tekkida juhul, kui mahuti temperatuur tõuseb ja tekib ülerõhk või valest materjalivalikust põhjustatud mahuti haprumine, mille tagajärjel võib vesinik lekkida ning on oht tulekahju ja plahvatuse tekkeks. Vesiniku leke võib toimuda ka transpordihaagise mahuti tühjendamisel tanklas ning selle riski mõju hinnatakse keskmiseks [71].

3.3.2 Vesiniku hoiustamisega seotud riskid

Surugaasi hoiustamine tanklates

Vesinikutanklates hoiustatakse vesinikku väga kõrge rõhu all. Bussides ja rongides hoiustatakse vesinikku 350 bar juures, kuid sõiduautes kasutamiseks peab vesinik olema 700 bar rõhu all ning tanklates komprimeeritakse vesinik kuni 900 bar ning arendused on

suunatud veelgi kõrgemate rõhkude võimaldamiseks [72]. Seetõttu on ka paagi plahvatuse oht, kus suur ülerõhk tekitab plahvatuse korral lööklaine, mis kujutab ohtu inimeste tervisele ja varale. Vesiniku tanklas on aurupilvede plahvatuste tõenäosus siiski väga väike, kuna jaam asub avatud õhkkonnas ja on hea ventilatsiooniga. Teist tüüpi ohusündmuse seostatakse vesiniku kohese süttimisega. Kui vesiniku lekkele järgneb kohene süttimine, siis võib tekkida tulekera, mis toob endaga kaasa katastroofilisi purustusi [73]. Selle riski tõenäosus on aga väike, kuna vesinik on väga palju õhust kergem ning hajub äärmiselt kiiresti ümbritsevasse keskkonda, mistõttu süttimise oht on madal [42]. Suureks riskiks vesiniku hoiustamise puhul on mahutite purunemine, mis võib olla põhjustatud välisest tulekahjust või löögikoormusest ning see toob endaga kaasa plahvatuse ja tulekera tekke. Sellised õnnetused on sagedasemad III ja IV tüüpi komposiitpaakide korral ning vähem tõenäolised I ja II tüüpi metallpaakide puhul. Mahutite purunemise tõenäosus on aga oluliselt madalam võrreldes leketega seadmetest ja ventiilidest, kuna paagid on enamasti kaitstud löögi- ja tulekindlate materjalidega [74].

Veeldatud vesiniku hoiustamine tanklates

Veeldatud vesinikku hoiustatakse krüogeensetes mahutites $-253,15^{\circ}\text{C}$ juures, kus oluline roll on korralikul isolatsioonmaterjalil, kuna vesinik võib temperatuuri tõustes kergelt aurustuda. Rõhu tõustes veeldatud gaas aurustub ning rõhk mahutis tõuseb ning kui rõhku ei vähendata, siis tekib lekkeoht [75]. Vesiniku leke on enamasti veel põhjustatud mahuti, torustiku, ventiilide, pumba või aurusti purunemisest või veast. Väiksemate lekete korral veeldatud vesinik aurustub ja gaasiline vesinik tõenäoliselt lihtsalt hajub atmosfääri [76].

Plahvatusohu ja süttimise vältimiseks tuleb pidevalt jälgida rõhutaset ja paigaldada ülerõhu ventiilid. Kuna veeldatud vesinik on väga madala temperatuuriga, siis võib see tekitada ümberkaudsete inimeste alajahtumist ja külmumist. Kui aga välisõhk satub vesiniku hoiustuspaaki, siis võib õhus sisalduv niiskus kondenseeruda ja tekitada jääd, mis kahjustab torusid, ventiile ja seadmeid [75]. Veeldatud vesiniku hoiustuspaagid on topelt seintega ja vaakumkestaga, mis toimib täiendava turvatõkkena lekete ja purustuste korral ning samuti on vesinikul krüogeensetel temperatuuridel madal paisumisenergia. Seega paagi purunemise korral on lekkinud vesiniku süttimine äärmiselt ebatõenäoline. Krüogeenne temperatuur võib siiski kahjustada külgnevaid ventiile või rõhulangetusseadmeid, mis pole mõeldud krüogeensetes tingimustes töötamiseks [76].

Kõrge tõenäosuse/riskiga sündmused veeldatud vesiniku hoiustamise puhul on madalate temperatuuride tõttu häired rõhualandusventiilide töös või aurusti purunemine välise teguri toimetel. Aurusti puhul tuleb arvestada, et see peab taluma nii gaasilist vesinikku (võimalik rabeledus) kui ka madalaid temperatuure, kuna vesinik siseneb krüogeensetel

tingimustel. Mõlemad sündmused põhjustavad vesiniku lekkimist kas gaasilisel või vedelal kujul [76]. Keskmise tõenäosuse/ riskitasemega sündmused on hoiupaagi purunemine välise õnnetuse või kokkupõrke tagajärjel, mahuti välisseina purunemine välise tulekahju tõttu, krüogeense pumba rike tihendi vea või paigaldusvea tõttu, krüogeense pumba enneaegne töö kontrolleri rikke tõttu, aurusti liitmikke või ühendavate torustike leke [76].

3.3.3 Vesiniku tankimine

Kompressor

Enamikes vesinikutanklates hoiustatakse vesinikku 5-20 MPa mahutites ning isotermliseks komprimeerimiseks kasutatakse mitme-etapilist komprimeerimissüsteemi, kus vesinikku vahepeal jahutatakse. Kuna vesinikku hoiustatakse madalamal rõhul, kulub komprimeerimiseks palju energiat, sest rõhkude vahe sisendis ja väljundis on väga suur. Kompressor on vesiniku tankla põhielement, mis peab kõrgema efektiivsuse saavutamiseks vastama nii tehnilistele nõuetele kui ka olema mõistliku kuluga [77]. Kui kompressorseadmed ja elektrolüüserid on paigutatud suletud ruumidesse, siis võib süttimise korral tekkida märkimisväärne plahvatusoht. Plahvatuse suurus sõltub eraldunud vesiniku kogusest, kuid kui eraldub väga suures koguses vesinikku, siis ei pruugi piisavalt kasu olla ka riski vähendavatest meetmetest nagu sundventilatsiooni paigaldamine ning lekke avastamisel töö seiskamine ja rõhu alandamine. Suletud ruumi korral võib selliste õnnetuste tõenäosus olla üsna suur [74]. Kompressorite lekketõenäosus on suur ja seetõttu nõuab nende hooldamine ja haldamine põhjalikku hoolt [78].

Tankur

Vesinikuautode, -busside ja veokitanklate tankuritega seotud lekked on tavaliselt lühiajalised ja piiratud, seetõttu on mõju lokaalne ja oht inimeste elule on väiksem [74]. Laeva tankimise juures on tankuritel oluline roll, kuna harilike sõidukite tankimisel on sõiduk paigal, kuid laevade puhul sõiduk liigub pidevalt. Seetõttu tuleb valida sobivaim moodus tankimiseks. On kahte sorti tankureid, esimene on manuaalne, mida kasutatakse nii busside kui rongide puhul. Teine on automaatne süsteem, kus düüsi asendit suunab robotkäsi. Automaatne lahendus on sobilik suurematele LH₂ laevadele, kus kaustatakse pikki ja raskeid voolikuid. Ohud, mis kaasnevad tankimisega, on liiga kiire täitumine, kuna kiirel kokkusurumisel võib kuumus põhjustada vesinikumahuti tõsist riket. Seetõttu varustatakse düüsid infrapunasaatjatega, mis peatavad voolu, kui mahutis tõuseb temperatuur üle lubatud piiri [79]. Peale selle on probleemiks madala tihedusega gaasi pikk tankimis- ja punkerdusaeg. Suur laev vajaks oma tööks üle 100 tonni vesinikku, kuid sellise koguse tankimiseks kuluks mitu nädalat või läheks tarvis väga palju düüse. Sellise suure hulga düüside kinnitamine ja lahti ühendamine oleks aga väga keeruline ja

aeganõudev tegevus. Teiseks alternatiiviks on kassett-tüüpi kütusesüsteem, kus vesinikku oleks võimalik hoiustada merekonteineritesse paigaldatud vesinikupaakide abil, mida on võimalik laevale laadida. See oleks sobiv väiksemat tüüpi laevade, näiteks praamide jaoks, kuid suurte laevade jaoks pikendaks see märkimisväärselt sadamas viibitud aega, mis kulub nende konteinerite peale- ja mahalaadimiseks [19].

3.3.4 Vesinikutanklatega seotud ohutuselased riskid

Levinuimad vesinikutankla õnnetuste stsenaariumid on põhjustatud esiteks lekkest seadmete põhisosade kahjustumise ja purunemise tõttu (sh keevitusvead), mille tekkepõhjuseks on projekteerimisvead ja õnnetused on põhjustatud materjalide vibratsiooniväsimisest, nõuetele mittevastava materjali kasutamisest või ka puudulikest hooldustöödest. Teiseks võimaluseks on leke ventiilide ja tihendite juurest, mille põhjusteks on peamiselt ebapiisav tihendus või tootmisviga. Peamisteks lekete tekkepõhjuseks on aga inimlik eksitus [80]. Samuti on õnnetuste põhjustajateks torustike korrosioon, ohutusventiili rike või täitevooliku purunemine. Selle tagajärjeks võib olla kas tulekahju või aurupilve plahvatus. Kui vesinik lekib, kuid ei sütti, siis hajub lekkinud vesinik atmosfääri ning sellega ei kaasne ohtlikke tagajärgi. Juhul, kui ükski ohutusmeede ei toimi, võivad lekke korral tekkida ohtlikud tulejoad [81]. Lekke korral seguneb vesinik õhus oleva hapnikuga ja moodustab tuleohtliku segu, mis süütamise korral võib tekitada tulekera või tulejoa teatud suunas, mis põhjustab surmavaid tagajärgi inimestele, kes asuvad täpselt tulejoa sihis. Inimestele mõjub surmavalt kokkupuude vesinikuleegiga või viibimine kõrge temperatuuri ja soojuskiirgusega hapnikuvaeses keskkonnas [81]. Hoiumahuti ühenduse leke võib samuti põhjustada tulekahju või plahvatust. Tulenevalt tootmismeetoditest on osad hoiupaagi ühendused väga suurte läbimõõtudega ning seetõttu võib rikke korral kogu paak tühjeneda vähem kui sekundiga. Suur lekkeulatus põhjustab aga plahvatusohtu. Risk on seda suurem, mida suurem on hoiupaak ning ühendusülili diameeter [74].

3.3.5 Meetmed riskide ennetamiseks

Kõikide vesinikuseadmete, välja arvatud tankurite, ümber tuleks paigaldada vastavad vertikaalseinad, mis kaitsevad lähedalasuvaid inimesi ohu korral tulejuga ja leekide eest ning vähendavad plahvatuse mõju. Peale selle tuleks kõik mahutid kaitsta tule ja löögikindlate materjalidega ning kõik ühenduslülid ja torud tuleb valida vastavate mõõtudega, et lekke korral eralduks korraga limiteeritud koguses vesinikku [74]. Riski vähendamiseks paigaldatakse gaasi detektorid, näiteks hädaolukorra avastamise süsteem, mis ohu korral lülitab süsteemi välja ning sellega vähendab lekete sagedust ja lekkinud vesiniku hulka [82]. Vesinikupraamide tankimisel peaks tankimisvoolikule olema ühendatud seade, mis kontrollitult eraldab vooliku kaks poolt tihendades mõlemad otsad

ja vältides vesiniku leket, juhul kui tankimisel peaks laev soovimatus suunas liikuma hakkama [79].

3.3.6 Järeldused

Kõige suuremad riskid vesinikutanklate puhul on seotud vesiniku lekkehuga seoses mahutite, ventiilide, pumba või aurusti veaga, kuid kuna vesinikutanklad paiknevad vabas õhus, siis lekke korral vesinik suurima tõenäosusega hajub atmosfääri. Samuti arvestatakse vesinikutanklate rajamisel vajalike ohutusmeetmetega, seadmetele paigaldatakse ülerõhuventiilid, mahutid kaitstakse tulekindlate materjalidega ning seadmete ümbrusesse rajatakse tõkkeseinad. Tanklate tõkkeseinad on ehitatud nii, et plahvatuse korral oleks löögijõud ning võimalikud purustused suunatud ülespoole ehk inimestest ja teistest hoonetest eemale. Vesinikutanklate olemasolu on võtmekomponent kütuseelementidel põhinevate sõidukite kasutuselevõtuks ning koos eelnevalt mainitud sõidukiprojektidega tuleb rajada vastavad toimivad taristud. Kütuseelementidega sõidukid vajavad kõrget puhtusetaset, seetõttu on saastumise vähendamiseks tihtipeale kasutuselioonkompressorid. Komprimeerimise käigus gaas soojeneb ning sõidukite nõuetele vastamiseks tuleb vesinikku eelnevalt jahutada. See muudab protsessi keerukamaks ja suurendab energiatarvet [63]. Vesinikutanklate tehnoloogilise valmiduse aste on 9 ning 2019. aasta lõpu seisuga oli maailmas 460 vesinikutanklat, seega on tegemist küpse tehnoloogiaga, mille edasised arengud on suunatud maksumuse vähendamisele [63]. Vesinikutanklate riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 3 Vesinikutanklate riskianalüüsi tabel.**

3.4 Vesiniku lisamine maagaasitrassi

Erinevalt maagaasist pole vesinikul olemasolevat infrastruktuuri ning uue taristu ehitamist peetakse riskantseks ja kalliks. Seetõttu on hakatud uurima võimalusi vesiniku lisamiseks olemasolevasse maagaasi võrku. Järgnevalt käsitletakse võimalikke tehnoloogilisi ja ohutuse alaseid riske, mis on seotud vesiniku lisamisega maagaasivõrku [83].

3.4.1 Kasutatavate tehnoloogiatega seotud riskid

Gaasituvastusseadmed

Gaasituvastusseadmed, mis mõeldud maagaasi jaoks ei pruugi efektiivselt toimida vesiniku ja maagaasi segu puhul. Vesinik põleb kahvatu sinise leegiga ning see ei tekita päevavalguse käes nähtavat suitsu ega leeki ning eraladuva soojuskiirguse hulk on väiksem. Seetõttu võivad paljud vesinikulekked jääda avastamata ning levida suuremas

ulatuses. Vesiniku lekete tuvastamiseks on vaja spetsiaalseid turvasüsteeme. Kuna maagaasi puhul kasutatavad odorandid nagu merkaptaan ei sobi vesiniku puhul kasutamiseks, siis on lekete tuvastamine keerulisem [84]. Praegu kasutusel olevad lõhnaained võivad saastada ka kütuseelemente, mis on vesiniku kasutamise kohapealt üks tähtsamatest komponentidest [85]. Probleemiks võib osutuda ka see, et Eestis kasutusel olevad gaasikromatograafid on mõeldud eelkõige maagaasi mõõtmiseks ning nende projekteerimisel pole arvestatud vesiniku lisamisega. Selle tagajärjena ei ole kromatograafid suutelised vesinikkomponenti tuvastama ning seepärast pole maagaasi ja vesiniku segu kütteväärtust võimalik arvutada. Tuleks uurida olemasolevate kromatograafide spetsifikatsioone ning hinnata nende sobivust vesiniku lisamisel maagaasile. Vajadusel tuleb ka olemasolevad kromatograafid välja vahetada [85]. Turbiinmõõturite puhul tuleb vesiniku ja maagaasi (CH_4/H_2) segu mõõtemääramatusi kontrollida just madala tiheduse tõttu. Muud tehnoloogiad, eriti ultraheli mõõturid säilitavad oma mõõtetäpsuse, kui lisatud vesiniku hulk on kuni 15% [86].

Võrguseadmed

Vesinik võib mõjutada ka võrguseadmeid ja põhjustada talitlushäireid ning seetõttu tuleb eelnevalt kindlaks teha, milline süsteemi osa on vesiniku suhtes kõige tundlikum. Samuti peaksid seadmete tootjad välja töötama uued ühilduvad seadmed, mis sobivad kasutamiseks nii puhta aine kui ka maagaasi-vesiniku segu korral. Kompressorid ja gaasiturbiinid tuleb reguleerida, kohandada või asendada, et need toimiks efektiivselt antud vesiniku hulga korral [86]. Kompressorid taluvad ilma eriliste piirangutega kuni 5%vol vesinikukogust, kuid üle selle on juba vajalik süsteemi modifitseerimine. Mehaanilised kompressorid võivad probleemideta taluda ka kuni 10%vol vesinikku [85]. Kuna vesiniku kontsentratsioon võib ajas muutuda, siis tuleb paigaldada kas uued reguleerimissüsteemid või vesinikueraldusmembraanid [86].

Mõju torustikele

Vesiniku lisamisel maagaasivõrku on peamiseks riskiks vesiniku haprumine ehk vesiniku lahustumine metallis. See nähtus esineb peamiselt rauast ja terasest valmistatud torustikes ning haprumise tagajärjel võivad tekkida torustikesse praod. Seda tüüpi kahjustusega ei kaasne keemiline reaktsioon ning ei moodustu teisi ühendeid ja see muudab võimaliku haprumise tuvastamise keeruliseks [85]. Mõjud ilmnevad vesiniku pikaajalisel kasutamisel ning selle tulemuseks on isolatsioonimaterjalide kahjustumine ja torustike mehaaniliste omaduste halvenemine, mis võib mõjutada kogu süsteemi toimivust ning sellel võivad olla katastroofilised tagajärjed [84].

Vesiniku mõju terastorudele sõltub erinevatest teguritest nagu torustiku diameeter, tootmisaasta ja päritolu, terase puhtus- kas sisaldab väävli- ja fosforiühendeid, keevitusprotseduur ja töötingimused [86]. Vesinik võib põhjustada terasest maagaasitorustike murenemist ja rabadust, kuid sellise stsenaariumi korral hajub suurima tõenäosusega lekke korral vesinik atmosfääri ning süttimist ei järgne. Kui aga süttimine peaks aset leidma, siis lähedalasuvatele inimestele on mõju suur, kuid torustikud rajatakse eeldatavasti kohta, kus asustustihedus on väiksem [83].

Hetkel puuduvad pikaajalised teadmised ja kogemused vesiniku mõjudest maagaasitorustikele selle lisamisel erinevates kontsentratsioonivahemikes maagaasile. Neid teadmisi on vaja, et tuvastada ja asendada potentsiaalselt ohtlikud torustikulõigud. See on küll kulukas protsess, kuid kokkuvõttes odavam võrreldes täiesti uue gaasivõrgu ehitamisega [85]. Uuringutest on selgunud, et vesinikku võib segada maagaasi hulka 5-15% ulatuses, ilma et sellega kaasneks märkimisväärseid riske. Siiski tuleb toonitada, et seda 5-15% ei saa võtta rusikareeglina ning reaalsuses tuleks läheneda juhtumipõhiselt, kuna sobiva kontsentratsiooni hulk võib sõltuda torustiku omadustest ja maagaasi koostisest [83].

Mõju CNG veokitele

CNG veokite elementide projekteerimisel Euroopa standardite kohaselt arvestatakse maksimaalse vesiniku sisaldusega 2%. Seega võivad kõik CNG autode elemendid olla potentsiaalselt ohtlikud töötamisel kõrgema vesiniku sisaldusega kütusega [85]. Rootsi firma Scania on Leedus edukalt testinud ka reaalelu tingimustes CNG veokeid, kuhu on lisatud kuni 20% ulatuses vesinikku [87]. Lisaks võib probleeme tekkida kütusepaagiga, kuna gaasi kandvad komponendid pole projekteeritud ega testitud vesiniku sisaldusega üle 2% ja see võib põhjustada nii metallist kui ka polümeerist valmistatud tihendite leket. Seetõttu tuleb enne kasutuselevõttu eelnevalt läbi viia mahukaid katseid nende võime hindamiseks kõrgemate vesiniku kontsentratsioonidega toime tulemiseks. Peamiseks ohuteguriks on terasest kütusepaakide haprumise risk vesiniku toimel. Riske on võimalik leevendada, asendades terasest paagid komposiitmaterjalidest paakidega, kuid see nõuab lisaressursse ja täiendavaid kulusi [85].

Kütteväärtus

Metaani ja vesiniku kokkusurutavuse teguritest tingitud erinevus ning vesiniku madalam kütteväärtus toovad kaasa vesiniku ja metaani segu energiatiheduse vähendamise (kWh/m^3) võrreldes puhta metaaniga. Normaalingimustel on vesiniku mahuline erisoojus 3,1 korda madalam võrreldes metaaniga. Rõhul suurenemisel erinevus kasvab. Vesiniku

lisamisel maagaasi võrku tuleb arvestada mahulise erisoojuse vähenemisest tulenevate mõjudega [85].

3.4.2 Ohutus

Vesinik on õhust ja maagaasist kergem ja seetõttu on vesiniku leke torustikest 1,3 kuni 2,8 korda suurem kui metaani lekke korral samadel tingimustel. Vesiniku lisamine maagaasile muudab segu kergemaks ja suurendab nii voolukiirus kui ka difusioonikordajat [84]. Vesiniku minimaalne süttimisenergia on madalam kui metaanil. Vesiniku lisamisel maagaasile tuleb arvestada, et segu leekpunkt väheneb vastavalt lisatud vesiniku kogusele. Mida rohkem vesinikku lisada, seda madalamaks muutub ka süttimistemperatuur [84].

3.4.3 Meetmed riskide leevendamiseks

Kaitseklapid

Kõige ebasoodsam stsenaarium on vesiniku ja maagaasi segu leke atmosfääri, kuna vesinikul ja vesiniku-maagaasi segul on erinevad keemilis-füüsikalised omadused, siis sattumisel keskkonda on nende mõju erinev ning riskitase on samuti erinev. Riskitaset saab aga vähendada ohutusventiilide abil, mis ohu korral sulguvad automaatselt ja eraldavad kahjustada saanud torustiku osa ülejäänud süsteemist. See kiire meetod aitab vältida doominoefekti tekkimist ning hoida olukorda kontrolli all kuni spetsialistid jõuavad tulla probleemi lahendama [84].

Tõkkeseinad

Teiseks leevendavaks meetmeks, mis aitab kaasa ebasoovitud gaasilekke ohu- ja riskitaseme vähendamisele on tõkkeseinte ehitamine. Need tõkkeseinad vähendavad horisontaalse joaleegi levimiskaugust ja süttimisohu piirkonda [84]. Tõkkeseinad on projekteeritud selliselt, et need peaks vastu ülerõhule, vähendaks leegijoast tuleva kuuma kiirgusvoo mõju ning takistaks tulejoo horisontaalset levikut, mida on näidatud ka joonisel 3.3 [88].



Joonis 3.3 Tökkeseina testimine [88]

Korrosioonikaitse meetmed

Kõige levinumad korrosiooni vähendamise meetmed on väline katmine, katoodkaitse, sisemine kaitsevooder (näiteks nailon). Väliseks katmiseks on kolm meetodit: esimene põlvkond, kus kasutatakse asfalti, bituumenit, polüetüleeni, polüuretaani, teine põlvkond, kus kasutatakse mitmekomponendilist vedelikku ja sulatatud epoksüvaiku ja kolmas põlvkond, kus kasutatakse kahekihilist sulatatud epoksüvaiku, kolmekihilist polüetüleeni ja kolmekihilist polüpropüleeni. Lisaks on korrosiooni vähendamiseks oluline õige materjalide valik, võimalusel kasutada komposiitmaterjali, mitte metalli ning soovituslik on keemiline töötlus näiteks korrosiooni inhibiitoritega [89].

3.4.4 Järeldused

Peamisteks tehnoloogilisteks riskideks vesiniku lisamisel maagaasile on olemasoleva võrgu kohaldamine, kuna maagaasi tuvastusseadmed pole sobilikud vesiniku tuvastamiseks. Samuti tuleks muud seadmed, sh näiteks kompressorid seadistada vastavalt vesiniku sisaldusele. Lisaks ei pruugi maagaasitorustikud olla vesiniku suhtes piisavalt vastupidavad ja see võib põhjustada metalltorustike ja muude materjalide kahjustumist ning selle mõjude leevendamiseks tuleks infrastruktuuri täiustada. Pole ka täpselt määratletud, kui palju vesinikku võib maagaasile lisada, ilma et sellel oleks märkimisväärset mõju. Sobiva vesiniksegu kontsentratsioon sõltub torujuhtmestiku tüübist ning hinnanguliselt oleks maagaasivõrku võimalik lisada 5-15% vesinikku. Eestis on hetkel Gaasituru toimimise võrgueeskirja lisas kehtestatud gaasisüsteemi sisestatav maksimaalne vesiniku kogus

0,1% [90]. Vesiniku lisamisel maagaasile on tehnoloogilise valmiduse aste 7 ning tehtud on üle 40 pilootprojekti, millest märkimisväärsemad on Wind2Gas projekt Saksamaal, Jupiter 1000 projekt Prantsusmaal ning HyDeploy projekt Ühendkuningriigis [63]. Vesinikumaagaasitrassi lisamise riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 7 Vesiniku lisamine maagasitrassi riskianalüüsi tabel.**

3.5 Vesinikust ammoniaagi tootmine

Vesinikku on võimalik toota päikseenergiast vee elektrolüüsi teel, millest omakorda toodetakse ekspordiks ammoniaaki. Järgnevalt analüüsitakse projekti erinevates etappidest esineda võivaid ohte ja riske seoses vesiniku tootmisega elektrolüüsi teel, lämmastiku eraldamisega õhust ning ammoniaagi sünteesi ja hoiustamisega seonduvaid ohte ja mõju inimestele ja ümbritsevale keskkonnale. Selles töös käsitletakse taastuvenergiaallikatel põhinevat ammoniaagi tootmist, kus vesinikku toodetakse vee elektrolüüsi teel ning lämmastiku puhastamiseks ja eraldamiseks õhust kasutatakse Haber-Bosch (H-B) meetodit. Elektri tootmiseks kasutatakse päikseenergiat ning ammoniaaki hoiustatakse vedelal kujul [86].

3.5.1 Kasutatavate tehnoloogiatega seotud riskid

Vesiniku tootmine elektrolüüsi teel

Päiksepaneelide kasutamine vesiniku tootmiseks sai alguse juba 1970. aastatel, mil hakati päiksest saadud elektrienergiat kasutama vee elektrolüüsiks. Hetkeseisuga on protsessi miinuspooleks madal kasutegur- päiksepaneelide kasutegur on ligi 20% ning elektrolüüserite kasutegur 80%. Seega päiksepaneelide kasutamise suurimateks väljakutseteks on paneelide kõrge hind ning suuremahulisemaks tootmiseks tuleks vähendada tarbitavat energiahulka ja süsteemi hoolduskulusid. Täiustamist vajab ka tehnoloogia energiatõhusus, ohutus ja vastupidavus [11]. Hetkel ei suuda taastuvenergiaallikatel põhinevad vesiniku tootmisviisid konkureerida veel fossiilsetest kütustest toodetud vesinikuga just elektrolüüsiprotsessi madala tõhususe tõttu. Sagedaseks efektiivsuse languse põhjuseks on põhjustatud ülepinge elektrodide vahel, mille tekitavad gaasimullid, mis suurendavad takistust. Samuti tekib süsteemis soojuskadusid ning juhtimissüsteemid tarbivad üleliigses koguses energiat. Turule on jõudnud AE ja PEM elektrolüüserid, mille kasutegur on juba ligi 60% ning mis peavad vastu 10-15 aastat, sealhulgas väheneb efektiivsus aastas vaid 1,5%-2,5%. Sellegipoolest tuleks tehnoloogiaid täiustada, et vee elektrolüüsi efektiivsust kasvatada [91].

Vee puhastamine

Lisaks elektrienergiale vajab elektrolüüsi protsess ka deioniseeritud vett. Nõutav puhtuse tase sõltub tehnoloogiast. Leeliseliste elektrolüüserite puhul on lubatud vees lahustunud tahkete ainete hulk ≤ 10 ppm, PEM elektrolüüserite puhul aga lausa ≤ 2 ppm. Veest leiduvatel lisanditel on suur mõju elektrolüüseri elueale ning see suurendab vesiniku hinda [92]. Kui vee juhtivus on suurem kui $1,5 \mu\text{S}/\text{cm}$, võib see kahjustada elektrolüüserit ning vähendada selle eluiga, sellest võib järeldada, et mõju on suur [92]. Veetöötlus ja deioniseerimine nõuab lisakulu ja energiat. Vett saab puhastada pöördosmoosi, elektrodialüüsi ja aurude mehaanilise komprimeerimise abil. Elektrolüüseritel on tavaliselt pöördosmoosi moodulitel põhinevad puhastusseadmed, kuna need on usaldusväärsed ja modulaarsed [92]. Stõhhiomeetrilisest seisukohast on 1 kg vesiniku tootmiseks vaja 9 kg vett. Protsessi ebaefektiivsuse ja demineraliseerimise protsessi arvestades võib suhe olla ka 18-24 kg vett 1 kg vesiniku tootmiseks. Üldiselt on kulu vee puhastamisele siiski üsna vähetähtis vesiniku tootmise kogukulu arvestades [93].

AE elektrolüüser

AE elektrolüüser on kommertsiaalne tehnoloogia, mille eluiga on üle 30 aasta. Eluiga mõjutab näiteks gaaside segunemine diafragma kahjustumise tõttu, mille tagajärjel väike kogus vesinikku satub hapniku poolele. Kuna elektrolüüser koosneb sadadest üksikutest elementidest, siis vesiniku kontsentratsiooni pidevalt jälgitakse ning kahjustunud sektsioon vahetatakse välja. Tänu tehnoloogia arengule on see probleem aga lahendatud ja seega vähetähtis. Kõrge söövitavusega KOH kasutamine nõuab nikli- ja tsinkmaterjale, mis ei tohi sisaldada rauda ega kroomi, sest vastasel korral võivad leostuda ja saastada elektroode. Lisaks võib halva kvaliteediga vesi mis sisaldab rauda, alumiiniumi ja kroomi ühendeid negatiivselt mõjutada diafragmat, katalüsaatorit ja teisi komponente [93].

Leeliselise elektrolüüseri kasutamisel esinevad mõningad riskid, mida enne tehnoloogia kasutuselevõtmist kaaluda. AE elektrolüüseri vesilahuse elektrolüüdil on seoses vedela olekuga suur lekkimisoht. Lisaks on elektrolüüseril ka suur soojuslik kadu, mille tagajärjeks on väiksem voolutihedus [6]. Madal voolutihedus ($0,2-0,4 \text{ A}/\text{cm}^2$) ja rõhk avaldavad aga olulist mõju süsteemi suurusele ja tootmiskuludele. Samuti ei ole AE elektrolüüser sobilik kasutamaks dünaamilistel töötingimustel. Sage käivitamine ja erinevate sisendvõimsuste andmine pärsib süsteemi efektiivsust ja mõjutab toodetud gaasi puhtust ja kvaliteeti [94]. Samuti väheneb ebaregulaarse elektrivoo korral tootmiskiirus anoodi ja katoodi vahel ning selle tulemuseks on madalam vesiniku tootmishulk. Leeliselisi elektrolüüsereid kasutatakse tavaliselt püsiva sisendallikaga, kuna elektrolüüseril on pikk käivitumisaeg ning aeglane laadimisreaktsioon. Seetõttu on neid raske integreerida taastuvenergiaallikatega

süsteemidesse ning nende asemel tuleks kasutada PEM elektrolüüsereid [95]. AE elektrolüüseriiga seotud uuringud on keskendunud voolutiheduse ja tööõhu suurendamisele ning süsteemi täiustamisele, et kohaldada seda töötama ka katkendliku töörežiimiga taastuvenergiaallikatega [94].

PEM elektrolüüser

PEM elektrolüüseri eluiga on üle 50000 töötundi, kuid elektrolüüseri toimimist võivad pärssida ebasoodsad töötingimused nagu liiga kõrge temperatuur või rõhk. Lahendusena on võimalik katta bipolaarsed plaadid ja poorsed kihid kaitsvate materjalidega. Teiseks, anoodis kasutatav iriidiumoksiid võib lahustuda pinge või temperatuuri tõttu, mille vältimiseks tuleks kasutada suuremas koguses katalüsaatorit ($>5 \text{ mg/cm}^2$). PEM elektrolüüseri tööd mõjutab suuresti ka sisestatava vee puhtus, kuna väiksemgi ebapuhtus võib kahjustada membraani ja katalüsaatoreid [91]. PEM-elektrolüüseriites kasutatakse kalleid katalüsaatoreid, nagu plaatina (katoodi poolel) ja iriidium (anoodi poolel), mis tõstab elektrolüüseri hinda [96]. Samuti on probleemiks fluoritud membraanmaterjalide kõrge hind ja kättesaadavus. Lisaks üldine süsteemi keerukus, mis tuleneb kõrge rõhu all töötamisest ja vee suurest puhtusenõudest. Seetõttu on PEM elektrolüüseri eluiga lühem kui AE-I [94].

PEM elektrolüüseri lühikese eluea põhjusteks on prootonite asendumine katioonidega ja sellest põhjustatud elektrijuhtivuse vähenemine. Temperatuuri ja rõhu toime kaotab PEM oma esialgsed omadused, samuti võib vesinikfluoriidi (HF) teke põhjustada elektrolüüseri kahjustumist ning probleemiks on ka oomiliste kadude teke voolukollektorite ja bipolaarsete plaatide oksüdeerumise toime [97]. PEM elektrolüüseri kõrge tööõhuga seonduvad riskid on vesiniku ja hapniku segunemine, mille tõenäosus kasvab rõhu tõusuga. Teiseks ohuks on materjalide korrosioon, mis tuleneb happeliste materjalide kasutamisest. Materjalid peavad vastu pidama korruga nii söövitavatele tingimusele madala pH juures ($\text{pH}=2$) kui ka kõrgele pingele (2V). Nii katalüsaatorid, voolukollektorid kui eraldusplaadid peavad olema väga vastupidavatest materjalidest [96]. Kõrge rõhu toime võivad elektroodi läbinud vesinik (H_2) ja hapnik (O_2) minna läbi PEM-i ning seguneda vastavas sektsioonis. Nende komponentide segunemine suurendab gaasiplahvatuse ohtu ja vähendab protsessi efektiivsust, kuna sama energiahulgaga toodetakse vähem puhast H_2 gaasi [98].

Praegused arendustegevused on eelkõige suunatud süsteemi keerukuse vähendamisele ja odavamate materjalide kasutamise uurimisele, et võimaldada süsteemi laiemat kasutuselevõttu ning maksumuse vähendamist [94]. Peamised väljakutsed on tahke polümeerelektrolüüt-membraani keemiliselt ja termomehaaniliselt vastupidavamaks

muutmise, muude sobivate katalüsaatorite leidmine peale plaatina (Pt) ja iriidiumi (Ir). Anoodse kollektori bipolaarseid plaate lagundavate passiivsete kihtide korrosiooni ja madala juhtivuse vähendamine, suurema puhtuse tagamiseks vähendatakse difusiivsust membraanide tahkes faasis [97].

Lämmastiku tootmine

Puhta lämmastiku tootmiseks on võimalik kasutada erinevaid tehnoloogiaid. Lämmastikku saab õhust eraldada kasutades eraldusseadmeid, näiteks krüogeenset destilleerimist, aga ka läbilaskva membraani abil või muutuva rõhuga adsorptsiooni teel. Kuna lämmastiku tootmiseks kasutatakse õhku, siis võib puhastatud lämmastik siiski mingil määral sisaldada hapnikku. Kui hapnikku ei eraldata, siis võib see sattuda ammoniaagi sünteesi protsessi ning põhjustada katalüsaatorite kahjustumist. Seetõttu paigaldatakse ohutuse tagamiseks lämmastiku tootmise etapis hapniku eemaldamise seade hapniku täielikuks eemaldamiseks [92]. Lämmastiku tootmise energiatarve on 0,32 kWh 1 kg lämmastiku tootmiseks või 0,25 kWh 1 kg ammoniaagi tootmiseks. Energiatarve sõltub lämmastiku nõutavast puhtusetasemest. Suurima energiakuluga on aga õhu komprimeerimise protsess (0,18 kWh 1 kg ammoniaagi kohta) [92].

Ammoniaagi süntees

Ammoniaagi sünteesimiseks on erinevaid meetodeid: termokeemiline süntees (Haber-Boschi protsess), elektrokeemiline süntees, mitte-termilise plasmana, metallmembraanidega [92]. Haber-Boschi protsessi viiakse läbi väga kõrgetel temperatuuridel (400°C–500°C) ja rõhkudel (100–200 bar) ning tavaliselt kasutatakse rauapõhiseid katalüsaatoreid. Haber-Boschi meetod on energiakulukas ja kineetiliselt keeruline protsess [99]. $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$ on eksotermiline reaktsioon ja selle läbiviimiseks on vajalikud äärmuslikud tingimused. Reaktsiooni tasakaalu jaoks on vajalik temperatuur kuni 200°C, üle selle muutub protsess ebatõhusaks. Samal ajal on katalüsaatori töö jaoks vajalik temperatuuride vahemik 400°C–500°C. Töö optimeerimiseks kasutatakse väga kõrgeid rõhkusid (100-200 bar) ning läbitakse mitu vaheetappi, seetõttu kulub ligi 50% energiast komprimeerimise peale [99]. Viimase etapina eraldatakse vedel ammoniaak jahutamise teel faaside separeerimisega gaasilisest vesiniku ja lämmastiku segust [92].

Vesiniku dehüdrogeenimine ammoniaagist

Ammoniaagist on võimalik elektrit toota nii otseselt kui kaudsel meetodil. Kaudse meetodi korral lagundatakse ammoniaak kõigepealt uuesti vesinikuks ja lämmastikuks, kuid selle protsessi tulemusena läheb 14% ammoniaagist kaduma. Seetõttu eelistatakse ammoniaagi otsest põletamist [92]. Ammoniaagi dehüdrogeenimine on keerukas protsess.

Levinuim viis selleks on ammoniaagi termolüüs, mis on ammoniaagi sünteesile täpselt vastupidine reaktsioon, kus täieliku konversiooniastme saavutamiseks on vajalik temperatuur üle 650°C. Kõige aktiivsemad ammoniaagi lagundamise katalüsaatorid põhinevad ruteeniumil (Ru), kuid ruteenium on väga kallis ja seetõttu ebasobiv suuremahuliseks kasutamiseks. Alternatiivina uuritakse koobalti, nikli või raua katalüsaatoreid [100].

Ammoniaagi transpordi ja hoiustamisega seotud riskid

Ammoniaagi salvestamiseks on kaks võimalust- kas survestatud anumates kõrge rõhu all või vedelal kujul, jahutades seda atmosfäärirõhul temperatuurini -33°C [32]. Suruõhumahuteid kasutatakse eelkõige ammoniaagi väiksemahuliseks kasutamiseks (kuni 3000 tonni). Komprimeerimine nõuab suuremaid eelkulusid, kuid käitamiskulud on madalamad kui külmutusmahutite puhul. Tavaliselt kasutatakse ammoniaagi meretranspordiks LPG mahuteid ning suuremate mahtude transportimiseks on optimaalsem hoiustada ammoniaaki veeldatud kujul [32]. Ammoniaak sobib kasutamiseks nii süsinikku kui roostevabast terast sisaldavate materjalidega. See tähendab, et ammoniaaki võib kasutada enamikes standardsetes torudes, liitmikes ja ventiilides. Kuid ammoniaak söövitab vaske, messingit ja tsinki sisaldavaid sulameid ning looduslikku kummi ja mõningaid plastikuid [32]. Tuleb arvestada, et taastuenergiaallikatel põhineva ammoniaagi tootmisprotsessi puhul on vajalik puhvermahutite ja akude olemasolu, kuna üldiselt ei suuda kõrgsurvekompessorid ja tundlikud katalüsaatorid töötada väljaspool statsionaarset režiimi ning nõuavad vesiniku ja elektri salvestamist [101].

3.5.2 Ohutus

Nagu kõigi veeldatuna hoiustatavate gaaside puhul on ka ammoniaagil gaasi paisumise ja lekkimise oht ning eriti suurt ohtu avaldab see kinnistes ruumides. Kokkupuude vedela ammoniaagiga põhjustab külmakahjustusi. Merekeskkonnas hõljub vabanenud ammoniaak veepinnal ning lahustub kiirelt vees muutudes ammooniumhüdrosiidiks eraldades samal ajal gaasilist ammoniaaki. Ammoniaagi mõju vee-elustikule sõltub vee temperatuurist, pH-st ja soolsusest [32]. Uuringud on näidanud, et mida kõrgem on temperatuur ja pH, seda suurem on ka ammoniaagi kontsentratsioon vees. Samas mida soolasem on vesi ja mida suurem on selle iooniline tugevus, seda väiksem on ammoniaagi kontsentratsioon merevees, kuna soolsus vähendab gaasilise ammoniaagi osakaalu [102]. Ammoniaagi lekked toovad endaga kaasa vee-elustiku hävimise ning mõju ulatus sõltub vabanenud ammoniaagi kogusest. Kuivas õhus hajub ammoniaak laiali vastavalt valitsevatele tuuleoludele ning toksiliste omaduste tõttu avaldab mõju nii inimestele, taimedele kui loomadele [32]. Ammoniaak ei sütti õhus kergelt, plahvatuspiir on 15,7-

27,4%. Ammoniaagi plahvatus toimub sisetingimustes, mitte vabas õhus, seega on õnnetusjuhtumi teke väga vähetõenäoline [103]. Ammoniaak põhjustab tõsiseid nahapõletusi ja silmakahjustusi ja on sissehingamisel mürgine. Tegemist on tuleohtliku gaasiga mis võib kuumutamisel plahvatada [34]. Samas on ammoniaagi töökeskkonna piirnormid kõrgemad- pikaajaliselt (8 tundi) on 20 ppm ehk 14 mg/m³ ja lühiajaliselt (15 minutit) 50 ppm ehk 36 mg/m³ [33]. Inimesed tunnevad ammoniaagi lõhna juba kontsentratsioonidel 1,5 ppm, mis ei tekita inimeste silmadele, ninale ega kurgule ärritust. Ammoniaagitööstuses on välja arendatud põhjalikud ohutusmeetmed, et vältida ammoniaagiga seonduvate õnnetuste riske, millega saab täpsemalt tutvuda viitest [32].

3.5.3 Ammoniaagi tootmise ja käitlemisega seonduvate riskide maandamine

Kuna ammoniaak on toksiline ja avaldab kahjulikku mõju inimeste tervisele, siis on kõikide ammoniaagi käitlemiseseadmete lähedusse vaja paigaldada gaasituvastussüsteeme, et vähendada lekkimise tõenäosust. Andurid tuleb paigaldada inimese hingamiskõrgusele või võimalike lekkallikate kohale, kuna ammoniaak on õhust kergem. Ammoniaagi käitlejatel on kohustuslik kanda keemiliselt vastupidavat kaitseriietust. Hoiuruumide läheduses peaksid olema silmade puhastusjaamad ja ohutusdušid [32].

3.5.4 Järeldused

Ammoniaagi tootmise ja salvestamise peamine oht on ammoniaagi lekkimine, kuna ammoniaak on mürgine ning lekke korral võib ohustada nii inimeste tervist kui ka ümbritsevat keskkonda. Kuid selle ohu minimeerimiseks on võimalik paigaldada gaasituvastussüsteeme ning projekteerida süsteemid nii, et õnnetuste tõenäosus oleks minimaalne. Ammoniaagi tootmine, ladustamine ja transport on küps tehnoloogia, kuna selle infrastruktuur on arenenud tänu ammoniaagi laialdasele kasutamisele anorgaaniliste väetiste lähteainena. Samuti on ammoniaaki palju kasutatud merekaubanduses ja seega on sadamates vastav infrastruktuur, mis soodustab ammoniaagi kasutuselevõttu vesinikukandajana ning kütusena [104].

Seega on määrava tähtsusega riskid mis seotud vesiniku tootmisega elektrolüüsi teel. Peamised väljakutsed seoses vesiniku tootmisega elektrolüüserite abil on tootmisprotsessi suur energiatarve ning ebaefektiivsus, mis suurendab ka saadava vesiniku hinda. Samuti ei suuda taastuvenergeetikal põhinev elektrolüüsiprotsess rahaliselt konkureerida levinuima aurureformimise meetodiga [66]. AE elektrolüüsereid on kasutatud pikema ajaperioodi vältel ning selle tehnoloogilise valmiduse aste on 9, mis tähendab, et tehnoloogia on valmis ning kasutatav. Kuid kuna AE elektrolüüseri puhul väheneb osalise

koormuse korral tootlikku ning sagedase käivitamise ja erinevate sisendvõimsuste andmine on piiratud, siis pole see sobilik ainult taastuenergiaallikatega süsteemi jaoks ning eelistatum on kasutada PEM elektrolüüserit [101]. PEM elektrolüüser on samuti juba kommertsiaalses kasutuses olev tehnoloogia, mis jääb küll küpsuselt natuke alla AE elektrolüüserile ning selle tehnoloogilise valmiduse aste on 9. PEM elektrolüüseri eelisteks on suurem tööõhk, mis vähendab vajadust komprimeerimise järele, kiirem reageerimisaeg ja suurem vastupidavus koormuse muutusele, mis muudab selle sobivaks taastuenergiaallikate süsteemi integreerimiseks. PEM elektrolüüseri riskiks on katalüsaatorites kasutatavad kallid materjalid nagu iriidium ja plaatina [63]. Vesinikust toodetud ammoniaagi ekspordi riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 9 Vesiniku tootmine ammoniaagist riskianalüüsi tabel.**

3.6 Vesiniku kasutamine tagavarageneraatorite kütusena

Kütuselemendil põhinevad elektrisüsteemid on näidanud suurt potentsiaali alternatiivse heitmevaba energiavarustuse tehnoloogia pakkujana. Need on atraktiivsed ka telekommunikatsiooniettevõtetele, kes soovivad vältida pikaajalist elektrikatkestust ja klientide teenuse katkemist. Kütuseelemendid pakuvad võrreldes diislikütustega paremat võrgu töökindlust, keskkonnasäästlikkust ja ökonoomsust varuvõimsuse tagamiseks. [105]. Järgnevalt analüüsitakse tehnoloogilisi ja ohutusega seonduvaid riske, mis seotud vesiniku kasutamisega sidevõrgustiku tagavaratoite kütusena.

3.6.1 Kasutatavate tehnoloogiatega seotud riskid

Kütuseelementidega seotud riskid on leitavad alapeatükist **3.2 Vesiniku kasutamine transpordivahendite kütusena** ning vesiniku hoiustamisega seotud riskid on leitavad alapeatükist **3.3 Vesiniku tankimise ja tanklatega seotud riskid.**

3.6.2 Järeldused

Kõige suuremad riskid seoses vesiniku kasutamisega sidevõrgutagavaratite kütusena on seotud PEM kütuseelementide vastupidavusega ning vesiniku hoiustamisega seotud riskidega. PEM kütuseelement vajab tööks väga kõrge puhtuseastmega vesinikku, vastasel korral võib seade saada kahjustada ning muutuda ebaefektiivseks. Kui kasutusele võtta kõik riske maandavad meetmed, siis pakub kütuseelement-aku hübriidsüsteem usaldusväärset ja keskkonnasäästlikku lahendust telekommunikatsiooniteenuste toiteks.

Tagavaratoite süsteemi tehnoloogilise valmiduse aste on 8 ning tegemist on küpse tehnoloogiaga, mida on Euroopas läbi erinevate projektide piisavalt katsetatud. Peamised

edasised arengusuunad on seotud tagavaratoite süsteemi komponentide standardiseerimisega, et vähendada hinda. Samuti tuleb Euroopa Liidu siseselt luua standardid vesiniku transportimiseks ja hoiustamiseks. Vesinikupõhise tagavaratoite laiemaks kasutuselevõtuks tuleb jätkuvalt alandada kogu süsteemi hinda, kuid see on võimalik ainult suuremahulisemate tootmisvõimsuste juures [66]. Vesiniku kasutamine tagavarageneraatorite kütusena riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 10 Vesiniku kasutamine tagavarageneraatorite kütusena riskianalüüsi tabel.**

3.7 Alternatiivsete vesinikutehnoloogiate riskid

Selles alapeatükis antakse lühiülevaade alternatiivsetest vesiniku tootmise, salvestamise, transpordi ja kasutamise võimalustest, mida antud töös põhjalikumalt käsitletud polnud ning mille tehnoloogiline valmidus pole veel kommertsiaalset staatust saavutanud. Peale vee elektrolüüsi meetodi on rohelist vesinikku võimalik toota biomassi termokeemilise muundamise teel. Arendatakse võimalusi vesiniku salvestamiseks metallhüdriididesse või vedeleta organiliste vesinikukandjatega (LOHC). Alternatiiviks vesiniku lisamisele maagaasivõrku on võimalus rajada ka uued vesinikutorustikud. Kütuseelemente on samuti mitmeid, kuigi kõige levinumad on AE ja PEM kütuseelemendid, siis neile lisaks on olemas veel näiteks tahkeoksiid kütuseelemendid (SOFC) ja metanool-kütuseelemendid (DMFC).

3.7.1 Tootmine

Biomassi termokeemiline muundamine

Keskkonnasõbralikuks vesiniku tootmise viisiks on lisaks elektrolüüsile ka biomassi termokeemiline muundamine, mille peamised meetodid on pürolüüs, gaasistamine, aurureformimine ja keemilise sidumise tehnoloogiad [106]. Biomassi hulka kuuluvad erinevad põllukultuurid, orgaanilised põllumajandusjätmed ja toiduainetööstuse jätmed, loomasõnnik ja reoveesetted. Need sisaldavad aga palju CO₂ ning väiksemal määral vesiniksulfiidi, lämmastikku, ammoniaaki või lenduvaid orgaanilisi ühendeid, mis tuleb protsessi käigus eemaldada ning see on energiakulukas ja kallis protsess [107].

Vesiniku tootmine biomassi pürolüüsi teel pole väga levinud, kuna nõuab kõrgeid temperatuure ja saadav vesiniku kontsentratsioon on liiga madal. Biomassi hapnikurikas gaasistamine on üks meetoditest keskmise kütteväärtusega gaasi tootmiseks, kuid see vajab suurt investeeringut hapniku tootmiseks. Aurureformimise meetodiga on võimalik saavutada kõrgemad vesiniku kontsentratsioonid ning see ei nõua hapniku lisamist, kuid protsess tarbib palju vett ja energiat ning tekitab CO₂ emissioone. Aurureformimise protsessis kasutatakse enamasti niklipõhiseid katalüsaatoreid, mille probleemideks on

aktiivsuse vähenemine ja katalüsaatori mürgitamine erinevate ühenditega. Aurureformimise protsess nõuab palju soojust ning selle tarbeks tuleks põletada 20% toorainest protsessi soojendamiseks. Alternatiivina on võimalik biomassi ressursi säästmiseks kasutada näiteks päikseenergiat või muid lisaenergiaallikaid. Termokeemilise konversiooni protsessid hõlmavad endotermilisi keemilisi reaktsioone ja on väga suure energiakuluga. Samuti on termokeemiliste reaktorite ehitamine kulukas ning nõuab vastupidavaid materjale [106].

3.7.2 Salvestamine

LOHC

LOHC on vesinikukandjad, näiteks N-etüülkarbasool, metüülsükloheksaan (MCH), toluen, dibensüültolueen, toluen, benseen, metanool ja sipelghape, mis suudavad adsorbeerida suures koguses vesinikku [108]. LOHC puudusteks on kõrge reaktsioonientalpia, mis tähendab, et vesiniku eraldamiseks on vaja suurt kogust soojust. Kuna nõutav temperatuur on üsna kõrge, siis ei ole võimalik ka ainult jääksoojust ära kasutada. Hüdrogeenimisel eraldub omakorda soojust, mis osaliselt kompenseerib dehüdrogeenimisel eralduvat soojuskadu. Üks puudus on ka see, et dehüdrogeenimine atmosfäärirõhule lähedasel rõhul, kuid hüdrogeenimine nõuab täiendavat komprimeerimist. See tekitab suuremat energianõudlust täiendava komprimeerimise vajaduse tõttu. Lisaks tuleb tühjentatud LOHC viia tagasi hüdrogeenimisjaama. See muudab tarneahelad keerulisemaks, eriti juhul, kui sama veok peab vesinikku viima erinevatesse sihtkohtadesse. LOHC nõuab ka hüdrogeenimise ja dehüdrogeenimise reaktoreid, mis suurendab kulusid [109].

Üheks vesinikukandjaks on metanool. Metanool on alkohol, mille tootmiseks saab lähteainetena kasutada metaani ja vee või CO₂ ja vee segu ning reaktsioon viiakse läbi vasepõhise katalüsaatori juuresolekul. Metanool on tuleohtlik ja toksiline ühend, millega kokku puutumine võib kujutada ohtu inimeste tervisele ning see muudab metanooli käitlemise ja kõrge aururõhu tõttu ka hoiustamise keerulisemaks [108].

Metallhüdriidid

Vesiniku salvestatakse metallhüdriididesse tahkel kujul, kus vesiniku aatomid on seotud teiste metalli või poolmetallide aatomitega ioonsete, kovalentsete või metalliliste sidemete abil. Kõik mikropoorsed aktiivsüsinikud või metall-orgaanilised raamistikud (MOFid) on seotud nõrkade van der Waalsi jõudude abil. Soovitav võimsuse saavutamiseks on vajalikud külmemad säilitustemperatuurid, seega tuleb süsteemi jahutada. Hüdriidide üheks miinuseks on vesiniku madal massiprotsent (kuni 15%). Hüdriidid on enamasti elektri- ja soojusisolaatorid, seega tuleb süsteemi lisada soojusvahetussüsteemid, et

süsteemi oleks võimalik mahutada võimalikult palju vesinikku ja selle tulemusena suureneb süsteemi mass ja maht ning seeläbi ka maksumus. Hüdrogeenide maht võib hüdrogeenimise ja dehüdrogeenimise käigus märkimisväärselt muutuda. „Tühjendatud“ hüdrogeenid on tihedalt pakitud, kuid uue vesiniku laadimise käigus avaldab metallhüdrogeen mahuti seintele lisajõudu tahkete osakeste võimaliku hõõrdumise tõttu. Süsteemi täitmisel toimuvad keemilised reaktsioonid või faasisiirded hüdrogeeni moodustamisel, siis metallhüdrogeeni täitmise kiirus on võrreldes surugaasipaakidega aeglasem [110].

Kui vesiniku dehüdrogeenimise entalpia on kõrge, siis tuleb vesiniku vabastamiseks kulutada suures koguses energiat. Järelikult eraldavad suure vesiniku absorptsiooni entalpiaga materjalid tankimise käigus suures koguses energiat ning selle vabanenud lisaenergia eemaldamiseks tuleb süsteem ühendada suure võimusega välise soojusvahetiga, et kiirendada tankimist. Täiendava soojusvaheti vajaduse ning suure massi tõttu ei ole metallhüdrogeenid sobilik meetod kütusepaakide jaoks. Mõned metallhüdrogeenid (näiteks amiidid ja borohüdrogeenid) nõuavad võimalike ebapuhtuste (ammoniaagi ja borohüdrogeenide) eemaldamiseks täiendavaid puhastuselemente [110].

3.7.3 Vesiniku transport

Uued vesinikutorustikud

Uute vesinikutorustike rajamisega kaasnevad suured kapitalikulud ning vesinikutehnoloogiate kasutuselevõtu algusfaasis ei pruugi olla piisavalt nõudlust uute pikamaa torustike jaoks. Suurte mahtude juures on need aga kõige efektiivsemaks viisiks suure koguse vesiniku transportimiseks. Vesinikutorustike rajamine võib ka ohustada keskkonda ja olla riskiks inimeste ohutusele [111].

Vesiniku transportimine gaasivõrgu kaudu on energiakulukam võrreldes maagaasiga. Uut gaasitorustikku projekteerides tuleb arvestada, et rõhulang torustikes ja temperatuuri muutused vähendavad vesiniku tihedust ja suurendava kiirust, mis omakorda suurendab rõhulangust ja see võib põhjustada häireid, kui torustike mõõtmed on valesti valitud. Seega peab gaasitorustiku kaudu toimuva vesiniku transpordi optimeerimisel arvestama torustike siseläbimõõdu ja ümbritseva temperatuuri mõjuga. Sarnaselt maagaasi torustikele tuleks vesiniku torustikud isoleerida, et kaitsta neid korrosiooni ja välise niiskuse eest [112].

Kui vesiniku gaasitorustik saab mõne välise mõju toel kahjustada, siis on riskiks kontrollimatu gaasileke, mis põhjustab ka rõhulangu torustikus. See aktiveerib aga kaitsesüsteemi, mis sulgeb automaatselt ohutusventiilid, eraldades sellega kahjustunud torustiku lõigu ülejäänud süsteemist. Juhul kui rikke korral ohutusventiilid ei sulgu, siis

paiskub kogu torustikus olnud gaas keskkonda ja see võib põhjustada tulejoo. Vesinik võib ka hiljem süttida ning plahvatada [112].

3.7.4 Kütuseelemendid

AEMFC

AEMFC kütuseelemendi kõige suuremaks probleemiks on selle eluiga ja vastupidavus. AEM kütuseelemendi lühikese eluea põhjuseks pole mitte materjalide kahjustumine, vaid kütuseelemendi ebasobiv veekäitlussüsteem. Samuti põhjustab probleeme CO₂, mis võib kütuseelementi sattuda õhu kaudu, mida suunatakse katoodile. CO₂ reageerib hüdroksiidanioonidega ning tekivad karbonaadid, mis suurendavad kogu süsteemi sisetakistust [113].

SOFC

Tahkeoksiid kütuseelement on kõrgetemperatuuriline, töötemperatuurid on vahemikus 800°C kuni 1000°C. SOFC peamiseks probleemiks on lagunemine süsiniku sadestumise ja väävliga mürgistumise tõttu. Kõrge temperatuuri tõttu on kütuseelemendil aeglane käivitumine ning soojuse säilitamise jaoks ning lähedalasuvate inimeste kaitsmiseks on vajalik hea termokaitse. SOFC ei ole seetõttu sobilik kasutamiseks transpordisektoris ja väikeste kaasaskantavate seadmete jaoks. Kõrgete töötemperatuuride tõttu tuleb kasutada vastupidavaid materjale (keraamikat) ning see on peamiseks tehniliseks väljakutseks, mis suurendab ka hinda [114]. SOFC kasutegur on 0,6, kuid termilise soojuse ära kasutamisel võib kasutegur olla ka 0,85 [115].

DMFC

DMFC ehk otsene metanool kütuseelemendi on sarnane PEM kütuseelemendile, kuid erinevusena kasutab see puhta vesiniku asemel metanooli ning protsessi käigus eraldub CO₂. DM kütuseelemendi kasutegur on võrreldes teiste kütuseelementidega üsna madal (0,4). DM kütuseelement opereerib madalatel temperatuuridel (kuni 120°C), seetõttu kasutatakse plaatina või plaatina- ruteenium katalüsaatoreid [115]. DMFC peamiseks väljakutseks on anoodkatalüsaatorkihil asuva reageerimata metanooli sattumine katoodkihile. Seega kütus läbib membraani, mis põhjustab pingelangust ja vähendab efektiivsust. Selle tagajärjel võivad katoodi katalüsaator ja membraan saada kahjustada. Kui metanool oksüdeerub katoodil, siis tekib keemilise reaktsiooni tulemusel vesi, mis põhjustab kütuseelemendi üleujutust [114].

3.7.5 Kasutamine transpordisektoris

Lennundus

Lennukite kütusepaakides on otstarbekas kasutada veeldatud vesinikku, kuna see vähendab vesinikupaakide mahtu ning samuti on veeldatud vesiniku paagid kergemad võrreldes surugaasipaakidega. See on oluline, kuna eriti pikamaalendude jaoks hoiustatakse lennuki pardal mitu tonni vesinikku korraga. Võrreldes praeguste prototüüpidega tuleks kütusepaakide mahtu vähendada ning ohutuse tagamiseks kasutada kergekaalulisi topelt seintega paake, mis on hästi isoleeritud [116].

Võrreldes lennukikütusena kasutatava petrooleumiga on vesiniku energiatihedus väiksem ja seetõttu on vaja projekteerida uued lennukid, mis kohalduksid LH₂ kütusega. Kütusepaagid peaksid lennuulatuse nõuetele vastamiseks asuma pigem kere kui tiibade osas ning see võib vähendada reisijatele mõeldud ruumi. Vesinikulennukid on varajases arengufaasis [63]. Hetkel on lennunduses kasutamiseks kõige sobivam PEM kütuseelement ning lennukites kasutamiseks peaks uute kütuseelementide tehnoloogia saavutama veelgi suurema võimsustiheduse [116]. Oluliseks küsimuseks on ka vastava vesiniku infrastruktuuri rajamine lennujaamadesse. Üheks võimaluseks vesinikulennukite tankimiseks lennujaamades oleks vesinikuveokid, kuid veeldatud vesinik nõuaks kaks korda rohkem tankimisveokeid võrreldes petrooleumi tankimisega ja see võib suurendada liiklustihedust. LH₂ tankimisautod erinevad olemasolevatest tankimisautodest ning selle kasutamine nõuaks vastavaid koolitusi. Veeldatud vesiniku hoiustamine lennujaama territooriumil võib samuti võtta lisaruumi ning nõuda suuremaid ohutuskauguseid, kuid neid pole hetkel veel välja töötatud [116]. LH₂ tankimine võtab kauem aega võrreldes petrooleumiga. 75% paagi täituvuse saavutamiseks kulub petrooleumi puhul 65 minutit ja LH₂ puhul 140 minutit, mis võib mõjutada lennugraafikuid [116] Alternatiivsete vesinikutehnoloogiate riskianalüüsi tabel on leitav lisast **Lisa 12 Alternatiivsete vesinikutehnoloogiate riskianalüüsi tabel.**

KOKKUVÕTE

Käesolevas bakalaureusetöös läbi viidud riskianalüüsi käigus hinnati valitud tehnoloogiate kasutuselevõtuga seotud potentsiaalseid tehnoloogilisi ja ohutuslaseid barjääre, mis võiksid osutada takistuseks vesinikutehnoloogiate implementeerimisel. Riskid jaotati vastavalt raskusastmele kas madala, keskmise või kõrge tõenäosuse ja raskusastmega riskideks. Lisaks tehnoloogilistele aspektidele tuleb vesinikutehnoloogiate kasutuselevõtul arvestada ka ühiskondliku aktsptepteritavusega seotud riskidega, kus peamisteks probleemideks on inimeste vähene teadlikkus vesiniku kasutamise kohta ja varasematest õnnetusjuhtumistest tulenev hirm ja teadmatus. Oma rolli mängib ka vesinikutehnoloogiate kõrgem hind ja vähene kättesaadavus ning seetõttu eelistatakse olemasolevaid harjumuspäraseid tehnoloogiaid.

Vesiniku tootmine- taastuvenergiaga põhineva vesiniku tootmiseks on hetkel peamiselt kasutusel kas AE või PEM elektrolüüserid. Peamised väljakutsed seoses vesiniku tootmisega elektrolüüserite abil on tootmisprotsessi suur energiatarve, mis suurendab ka saadava vesiniku hinda. Küpse tehnoloogiaga AE elektrolüüseri suurimaks riskiteguriks on selle kasutamine osalise koormuse korral, mis välistab selle kasutamise taastuvenergiaallikatega süsteemis. Alternatiiviks on kasutada PEM elektrolüüsereid, kuid seal kasutatakse haruldasi materjale nagu plaatina ja iriidium, seega konkureerib elektrolüüsi tehnoloogia ressursside kasutamise eest teiste tehnoloogiatega ning see võib põhjustada tarneraskuseid ja suurendada keskkonnamõju.

Hoiustamine ja transport- vesinikku hoiustatakse peamiselt surugaasina või veeldatud vesinikuna ning transporditakse torustike kaudu või surugaasi ja krüogeensete veokitega. Surugaasitransport on sobilik pigem lühemateks vedudeks, kuna vesiniku tihedus on madal, mis limiteerib korraka transporditavat vesiniku kogust. Riskiks on ka mahuti kahjustumine sagedase dekomprimeerimise tõttu või täielik purunemine liiklusõnnetuse korral, mille tagajärjeks on vesiniku lekkimine ja võimalik plahvatus või tulekahju, kuid sellise sündmuse tõenäosus on madal. Krüogeense vesiniku transpordil tuleb arvestada sellega, et temperatuuri tõustes vesinik aurustub ja tekivad kaod. Üheks transpordi võimaluseks on ka vesiniku lisamine olemasolevasse maagaasivõrku, kuid selle peamisteks riskideks on olemasoleva võrgu kohaldamine maagaasi-vesiniku seguga, mistõttu tuleks seadmed, sh näiteks kompressorid seadistada vastavalt vesiniku sisaldusele. Lisaks ei pruugi maagaasitorustikud olla vesiniku suhtes piisavalt vastupidavad ja see võib põhjustada metalltorustike ja muude materjalide kahjustumist.

Transpordisektor- vesinikusõidukite peamised tehnoloogilised riskid on seotud kütusepaagi ja kütuseelemendiga, kuid mõjutab ka infrastruktuur ning seadmete hooldus.

Vesiniku kütusepaagid on ruumalaliselt kordades suuremad võrreldes bensiini- või diiselpaakidega, mis nõuab lisaruumi. Kütusepaagid võivad saada kahjustada ka ülekoormuse, vale käitlemise või avarii tõttu ja tagajärjeks on vesiniku leke ja potentsiaalne tulekahju ja plahvatuse oht, mille tõenäosus on siiski madal tänu vesiniku molekulide kiirele hajuvusele atmosfääris. PEM kütuselementide puhul on suurim riskitase katalüsaatorina kasutatava plaatina haruldus ja vähene kättesaadavus, mis suurendab sõidukite hinda. Selle maandamiseks uuritakse üle maailma alternatiivseid mitteväärismetallkatalüsaatoreid. Vesinikusõidukite hooldust tuleb läbi viia hea ventilatsiooniga ruumis, et vältida vesiniku akumulierumist ruumis ja plahvatusohu segu tekkimist, kuid selle leevendamiseks kasutatakse ülitundlikke andureid, mistõttu riskitaset saab hinnata madalaks. Suurema raskusastmega riskiks peab käesoleval hetkel hindama kvalifitseeritud personali ning rajatiste puudumise meie regioonis. Kuid selle saab lahendada spetsiaalsete koolituste ja ümberõppimistega välismaal, kus on vesinikutehnoloogiaid pikemalt kasutatud. Vesinikusõidukite kasutuselevõtu suurimaks riskiks on puudulik infrastruktuur ning selle ehitamise kulukuse võrreldes traditsiooniliste tanklate ning akude laadimise jaamade rajamisega.

Ammoniaagi tootmine- ammoniaagi süntees on energiakulukas ning nõuab kõrget temperatuuri ja rõhku. Tootmiseks on vajalik eelnevalt elektrolüüsi teel saada vesinikku ning õhust eraldada lämmastikku. Riskiks ammoniaagi leke, kuna ammoniaak on toksiline ühend, mis võib sissehingamisel põhjustada ohtu inimeste elule ja tervisele. Ammoniaagi tootmisel taastuenergiaallikatest on oluline roll puhvermahutite olemasolul, kuna ammoniaagi sünteesi keerukad kõrgsurvekompressoreid ja tundlikke katalüsaatoreid sisaldavad süsteemid vajavad statsionaarset protsessi ning mittestatsionaarne režiim põhjustab häireid ammoniaagi sünteesis. Selle riski maandamiseks tuleks kasutada täiendavaid energiaallikaid, mis aga pole kliima kontekstis jätkusuutlikud. Üldiselt on ammoniaagi tootmine küps tehnoloogia, kuna seda on pikaajaliselt (ka Eestis) kasutatud väetiste tootmiseks.

Vajalike ohutusnõuete rakendamisel on võimalik rakendada erinevaid vesinikutehnoloogiaid, mida maailma kontekstis ka järjest rohkem tehakse. Töös hinnatud vesinikutehnoloogiatega rakendamine aitaks täita Pariisi kliimakokkuleppes seatud tingimusi kasvuhoonegaaside vähendamiseks.

SUMMARY

The risk analysis carried out in this bachelor's thesis assessed the potential technological and safety barriers related to the introduction of the selected technologies, which could be an obstacle to the implementation of hydrogen technologies. Risks were divided according to severity into low, medium or high probability and severity risks. In addition to the technological aspects, the introduction of hydrogen technologies must also take into account the risks associated with social acceptability, where the main problems are people's low awareness of hydrogen use and the fear and of previous accidents. Higher prices and low availability of hydrogen technologies also play a role, and therefore preference is given to existing conventional technologies.

Hydrogen production- Either AE or PEM electrolyzers are currently mainly used to produce hydrogen from renewable energy. The main challenges to produce hydrogen by electrolyzers are the high energy consumption of the production process, which also increases the price of the hydrogen obtained. AE electrolyser is a mature technology, but its main risk is its use in a part load system with renewable energy sources. The alternative is to use PEM electrolyzers, but they use rare materials such as platinum and iridium. The electrolysis technology competes for the use of resources with other technologies, and it can cause supply difficulties and increase environmental impact.

Storage and transportation- Hydrogen is mainly stored as gaseous or liquid hydrogen and is transported by pipeline or by compressed gas and cryogenic trucks. Compressed gaseous hydrogen transport is more suitable for shorter distances, as the density of hydrogen is low, which limits the amount of hydrogen transported per drive. There is also a risk of damage to the container due to frequent decompression or complete rupture in the event of an accident resulting in hydrogen leakage and possible explosion or fire, but the probability of such an event is low. When transporting cryogenic hydrogen, as the temperature rises the boil-off occurs, which causes hydrogen losses. One of the options is the addition of hydrogen-natural gas mixture to the existing natural gas network, but the main concern is that existing equipment (compressors etc) should be adjusted to the hydrogen content. In addition, existing natural gas pipelines may not be suitable for hydrogen and this may cause damage to metal pipelines and other materials.

Mobility applications- The main technological risks of hydrogen vehicles are related to the fuel tank and the fuel cell, but also to the maintenance, infrastructure and equipment. Hydrogen fuel tanks are larger in volume compared to petrol or diesel tanks, which require extra space. Fuel tanks can also be damaged by overloading, mishandling or accidents,

resulting in hydrogen leakage and the potential risk of fire and explosion, which, however, is unlikely due to the rapid dispersion of hydrogen molecules in the atmosphere. The highest level of risk for PEM fuel cells is the low availability of platinum as a catalyst, which increases the cost of vehicles. To mitigate this risk, alternative base metal catalysts are being explored. The maintenance works for hydrogen vehicles must be done in a well-ventilated room to prevent the accumulation of hydrogen in the room and the formation of an explosion hazard mixture. To mitigate this risk, hydrogen sensors are used, so the level of risk can be assessed as low. The lack of qualified personnel and facilities in our region must currently be assessed as a higher level of risk. However, this can be solved by special training and retraining abroad, where hydrogen technologies have been used for a long time. The highest risk of the introduction of hydrogen vehicles is the lack of infrastructure and the cost of its construction compared to the construction of traditional filling stations and battery charging stations.

Ammonia production- The synthesis of ammonia is an energy intensive process and requires high temperature and pressure. For production, it is necessary to obtain hydrogen from electrolysis and to separate nitrogen from the air. Leakage of ammonia is dangerous because ammonia is a toxic compound that can pose a risk to human life and health if inhaled. The presence of buffer tanks plays an important role in the production of ammonia from renewable energy sources, as complex systems of ammonia synthesis with high-pressure compressors and sensitive catalysts require a stationary process and the non-stationary mode causes disturbances in ammonia synthesis. To maintain a stationary process, additional energy sources should be used, but this may not be a sustainable solution in the climate context. In general, ammonia production is a mature technology as it has long been used to produce fertilizers (also in Estonia).

By implementing the necessary safety requirements, it is possible to apply various hydrogen technologies, which is increasingly being done in a global context. The implementation of the hydrogen technologies assessed in the work would help to meet the conditions set out in the Paris Climate Agreement for reducing greenhouse gases.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] A. Demirbas, „Future hydrogen economy and policy“, *Energy Sources Part B Econ. Plan. Policy*, kd 12, nr 2, lk 172–181, veebr 2017, doi: 10.1080/15567249.2014.950394.
- [2] F. Dawood, M. Anda, ja G. M. Shafiullah, „Hydrogen production for energy: An overview“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 7, lk 3847–3869, veebr 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.
- [3] M. Noussan, P. P. Raimondi, R. Scita, ja M. Hafner, „The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition—A Technological and Geopolitical Perspective“, *Sustainability*, kd 13, nr 1, lk 298, dets 2020, doi: 10.3390/su13010298.
- [4] A. A. AlZahrani ja I. Dincer, „Thermodynamic and electrochemical analyses of a solid oxide electrolyzer for hydrogen production“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 42, nr 33, lk 21404–21413, aug 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.186.
- [5] M. Rashid, M. K. A. Mesfer, H. Naseem, ja M. Danish, „Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis“, kd 4, nr 3, lk 14.
- [6] A. Mohammadi ja M. Mehrpooya, „A comprehensive review on coupling different types of electrolyzer to renewable energy sources“, *Energy*, kd 158, lk 632–655, sept 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.073.
- [7] E. Rozzi, F. D. Minuto, A. Lanzini, ja P. Leone, „Green Synthetic Fuels: Renewable Routes for the Conversion of Non-Fossil Feedstocks into Gaseous Fuels and Their End Uses“, *Energies*, kd 13, nr 2, lk 420, jaan 2020, doi: 10.3390/en13020420.
- [8] Y. Naimi ja A. Antar, „Hydrogen Generation by Water Electrolysis“, *Advances In Hydrogen Generation Technologies*, M. Eyvaz, Toim InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.76814.
- [9] B. Yodwong, D. Guilbert, M. Phattanasak, W. Kaewmanee, M. Hinaje, ja G. Vitale, „Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control: A Short Review“, *C – J. Carbon Res.*, kd 6, nr 2, lk 29, mai 2020, doi: 10.3390/c6020029.
- [10] „Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part II: H2 storage, transportation, and distribution | Elsevier Enhanced Reader“, *Elsevier*, juuni 21, 2021. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319920320966?token=0BBC8F62CE2B9B32700A729759E239CE9E98857134E7F24140EAF7EA13D109BD0C4F78B3139BF4A2C3DC4F2FC21C84D8&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210601152148> (vaadatud juuni 01, 2021).
- [11] A. M. Abdalla, S. Hossain, O. B. Nisfindy, A. T. Azad, M. Dawood, ja A. K. Azad, „Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review“, *Energy Convers. Manag.*, kd 165, lk 602–627, juuni 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.03.088.
- [12] T. Sinigaglia, F. Lewiski, M. E. Santos Martins, ja J. C. Mairesse Siluk, „Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications—a review“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 42, nr 39, lk 24597–24611, sept 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.063.
- [13] S. Singh *et al.*, „Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 51, lk 623–633, nov 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.040.
- [14] F. Birol, „The Future of Hydrogen Seizing today’s opportunities“, IEA, Japan, juuni 2019. Vaadatud: mai 31, 2021. [Online]. Available at: <https://www.iea.org/topics/hydrogen/>.
- [15] I.-S. Sorlei *et al.*, „Fuel Cell Electric Vehicles—A Brief Review of Current Topologies and Energy Management Strategies“, *Energies*, kd 14, nr 1, lk 252, jaan 2021, doi: 10.3390/en14010252.
- [16] A. MacCharles *et al.*, „Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation“, Deloitte and Ballard, China, 2020.
- [17] I. Staffell *et al.*, „The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system“, *Energy Environ. Sci.*, kd 12, nr 2, lk 463–491, 2019, doi: 10.1039/C8EE01157E.
- [18] E. Haghi, H. Shamsi, S. Dimitrov, M. Fowler, ja K. Raahemifar, „Assessing the potential of fuel cell-powered and battery-powered forklifts for reducing GHG emissions using clean

- surplus power; a game theory approach", *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 59, lk 34532–34544, dets 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.063.
- [19] L. Van Hoecke, L. Laffineur, R. Campe, P. Perreault, S. W. Verbruggen, ja S. Lenaerts, „Challenges in the use of hydrogen for maritime applications", *Energy Environ. Sci.*, kd 14, nr 2, lk 815–843, 2021, doi: 10.1039/D0EE01545H.
- [20] B. Canis, „Issues in Autonomous Vehicle Testing and Deployment", Congressional Research Service, R45985, apr 2021.
- [21] Y. Bicer, I. Dincer, G. Vezina, ja F. Raso, „Impact Assessment and Environmental Evaluation of Various Ammonia Production Processes", *Environ. Manage.*, kd 59, nr 5, lk 842–855, mai 2017, doi: 10.1007/s00267-017-0831-6.
- [22] S. Giddey, S. P. S. Badwal, C. Munnings, ja M. Dolan, „Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media", *ACS Sustain. Chem. Eng.*, kd 5, nr 11, lk 10231–10239, nov 2017, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b02219.
- [23] H. Hadeif, B. Negrou, T. G. Ayuso, M. Djebabra, ja M. Ramadan, „Preliminary hazard identification for risk assessment on a complex system for hydrogen production", *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 20, lk 11855–11865, apr 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.162.
- [24] A. Mascia *et al.*, „A failure mode and effect analysis (FMEA)-based approach for risk assessment of scientific processes in non-regulated research laboratories", *Accreditation Qual. Assur.*, kd 25, nr 5–6, lk 311–321, dets 2020, doi: 10.1007/s00769-020-01441-9.
- [25] H2tools, „Example Safety Plan for Hydrogen and Fuel Cell Projects". 2020.
- [26] M. Hirayama, H. Shinozaki, N. Kasai, ja T. Otaki, „Comparative risk study of hydrogen and gasoline dispensers for vehicles", *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 43, nr 27, lk 12584–12594, juuli 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.003.
- [27] J. Fuentes-Bargues, M. González-Cruz, C. González-Gaya, ja M. Baixauli-Pérez, „Risk Analysis of a Fuel Storage Terminal Using HAZOP and FTA", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, kd 14, nr 7, lk 705, juuni 2017, doi: 10.3390/ijerph14070705.
- [28] A. Siddiqui, „FTA- Fault Tree Analysis Explained in Quality Management", lk 9, okt 2016.
- [29] „Tutorial on Probabilistic Risk Assessment (PRA) United States Regulatory commission". <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/risk-informed/rpp/pratutorial.pdf> (vaadatud mai 31, 2021).
- [30] M. Ingaldi ja D. Klimecka-Tatar, „People's Attitude to Energy from Hydrogen—From the Point of View of Modern Energy Technologies and Social Responsibility", *Energies*, kd 13, nr 24, lk 6495, dets 2020, doi: 10.3390/en13246495.
- [31] A. Lozanovski, N. Whitehouse, N. Ko, ja S. Whitehouse, „Sustainability Assessment of Fuel Cell Buses in Public Transport", *Sustainability*, kd 10, nr 5, lk 1480, mai 2018, doi: 10.3390/su10051480.
- [32] D. R. MacFarlane *et al.*, „A Roadmap to the Ammonia Economy", *Joule*, kd 4, nr 6, lk 1186–1205, juuni 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.04.004.
- [33] „Safety Data Sheet Air Liquide", juuli 15, 2020. http://alsafetydatasheets.com/download/se/Ammonia_NOAL_0002_SE_EN.pdf (vaadatud mai 31, 2021).
- [34] „Ammonia, anhydrous - Substance Information - ECHA", dets 21, 2020. <https://echa.europa.eu/et/substance-information/-/substanceinfo/100.028.760> (vaadatud mai 31, 2021).
- [35] S. Sivaraman ja S. Varadharajan, „Investigative consequence analysis: A case study research of beirut explosion accident", *J. Loss Prev. Process Ind.*, kd 69, lk 104387, märts 2021, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104387.
- [36] J. Brightling, „Ammonia and the Fertiliser Industry: The Development of Ammonia at Billingham", *Johns. Matthey Technol. Rev.*, kd 62, nr 1, lk 32–47, jaan 2018, doi: 10.1595/205651318X696341.
- [37] R. Mälk, „Estonian Investment Relations With Eastern Partnership Countries ECEAP", dets 11, 2020. <https://eceap.eu/wp-content/uploads/2020/12/Estonian-Investment-Relations-with-the-Eastern-Partnership-Countries.pdf> (vaadatud mai 31, 2021).

- [38] S. Carr-Cornish, K. Lamb, M. Rodriguez, ja J. Gardner, „Social science for a hydrogen energy future“, lk 33, 2019.
- [39] X. Tang, L. Pu, X. Shao, G. Lei, Y. Li, ja X. Wang, „Dispersion behavior and safety study of liquid hydrogen leakage under different application situations“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 55, lk 31278–31288, nov 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.031.
- [40] B. L. Salvi ja K. A. Subramanian, „Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 51, lk 1132–1155, nov 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.030.
- [41] M. T. Chaichan, „Safety using of hydrogen as vehicle fuel: A review“, *ResearchGate*, nr 2, lk 9, apr 2018.
- [42] B. D. Ehrhart, D. M. Brooks, A. B. Muna, ja C. B. LaFleur, „Risk Assessment of Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles in Tunnels“, *Fire Technol.*, kd 56, nr 3, lk 891–912, mai 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00910-z.
- [43] M. Dadashzadeh, S. Kashkarov, D. Makarov, ja V. Molkov, „Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 43, nr 12, lk 6462–6475, märts 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.195.
- [44] P. Golewski ja T. Sadowski, „Description of thermal protection against heat transfer of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) coated by stiffened ceramic mat (TBC)“, *Compos. Struct.*, kd 229, lk 111489, dets 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111489.
- [45] C. Shen *et al.*, „Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test“, *J. Loss Prev. Process Ind.*, kd 55, lk 223–231, sept 2018, doi: 10.1016/j.jlp.2018.06.016.
- [46] A. Alaswad *et al.*, „Technical and Commercial Challenges of Proton-Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells“, *Energies*, kd 14, nr 1, lk 144, dets 2020, doi: 10.3390/en14010144.
- [47] K. Brik ja F. Ben Ammar, „Improved performance and energy management strategy for proton exchange membrane fuel cell/backup battery in power electronic systems“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 42, nr 13, lk 8845–8856, märts 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.191.
- [48] F. Zhang, P. Zhao, M. Niu, ja J. Maddy, „The survey of key technologies in hydrogen energy storage“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 41, nr 33, lk 14535–14552, sept 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.293.
- [49] M. Dolman ja M. Gallmetzer, „Operators' guide to fuel cell bus deployment“, aug 2018. <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bd0cefd8&appId=PPGMS> (vaadatud apr 13, 2021).
- [50] J. Lof, C. MacKinnon, G. Martin, ja D. B. Layzell, „Survey of Heavy-Duty Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles“, *Transit. Accel. Rep.*, kd 2, nr 1, lk 87, 2020.
- [51] O. Bethoux, „Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles and Their Infrastructure: An Option towards an Environmentally Friendly Energy Transition“, *Energies*, kd 13, nr 22, lk 6132, nov 2020, doi: 10.3390/en13226132.
- [52] „Is automotive demand for platinum increasing or decreasing? - CME Group“. <https://www.cmegroup.com/content/cmegroup/en/education/articles-and-reports/is-automotive-demand-for-platinum-increasing-or-decreasing.html> (vaadatud mai 31, 2021).
- [53] X. Liu, K. Reddi, A. Elgowainy, H. Lohse-Busch, M. Wang, ja N. Rustagi, „Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 1, lk 972–983, jaan 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.192.
- [54] T. Wilberforce *et al.*, „Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 42, nr 40, lk 25695–25734, okt 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.054.
- [55] C. J. McKinlay, S. R. Turnock, ja D. A. Hudson, „A Comparison of Hydrogen and Ammonia for Future Long Distance Shipping Fuels“, lk 14, 2020.
- [56] Y. Ruf, T. Zorn, P. Akcayoz De Neve, P. Andrae, S. Erofeeva, ja F. Garrison, „Study Of The Use Of Fuel Cells & Hydrogen In The Railway Environment“, Shift2Raul JU and FCH JU, 3,

- apr 2019. [Online]. Available at: <https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2019/04/Report-3.pdf>
- [57] S. Bakker ja R. Konings, „The transition to zero-emission buses in public transport – The need for institutional innovation“, *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, kd 64, lk 204–215, okt 2018, doi: 10.1016/j.trd.2017.08.023.
- [58] S. Sokolsky, J. Tomic, ja J.-B. Gallo, „Best Practices in Hydrogen Fueling and Maintenance Facilities for Transit Agencies“, *World Electr. Veh. J.*, kd 8, nr 2, lk 553–556, juuni 2016, doi: 10.3390/wevj8020553.
- [59] D. M. R. Swain, „Fuel Leak Simulation“, lk 11, 2001.
- [60] J. Sinay ja B. Konečný, „Risk Management in Hydrogen Technologies - Application for Mobile Technology“, esitatud 2nd EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems, Starý Smokovec, Slovakia, 2018. doi: 10.4108/eai.22-11-2017.2275045.
- [61] European Commission, „Equipment for potentially explosive atmospheres (ATEX)“, 2021. https://ec.europa.eu/growth/sectors/mechanical-engineering/atex_en (vaadatud mai 04, 2021).
- [62] W. G. Houf, G. H. Evans, I. W. Ekoto, E. G. Merilo, ja M. A. Groethe, „Hydrogen fuel-cell forklift vehicle releases in enclosed spaces“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 38, nr 19, lk 8179–8189, juuni 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.05.115.
- [63] „ETP Clean Energy Technology Guide“, IEA, juuli 02, 2020. <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide> (vaadatud mai 05, 2021).
- [64] Y. Ruf, M. Baum, T. Zorn, A. Menzel, ja J. Rehberger, „Fuel Cell Hydrogen Trucks Heavy-duty's High Performance Green Solution“. dets 2020.
- [65] „Trial runs of Alstom's hydrogen train in the Netherlands deemed officially successful“, *Alstom*, sept 30, 2020. <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/9/trial-runs-alstoms-hydrogen-train-netherlands-deemed-officially> (vaadatud mai 31, 2021).
- [66] Y. Ruf, M. Kaufmann, F. Heieck, ja J. Pfister, „Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities“, Roland Berger, Brussels and Frankfurt, sept 2017. Vaadatud: apr 13, 2021. [Online]. Available at: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171127_FCH2JU_BCs%20Regions%20Cities_Consolidated%20Tech%20Intro_Rev.%20Final%20FCH_v11%20%28ID%202910585%29.pdf
- [67] K. Alanne ja S. Cao, „Zero-energy hydrogen economy (ZEH 2 E) for buildings and communities including personal mobility“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 71, lk 697–711, mai 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.098.
- [68] T. Litman, „Implications for Transport Planning“, *Vic. Transp. Policy Inst.*, lk 46, märts 2021.
- [69] R. Gerboni ja E. Salvador, „Hydrogen transportation systems: Elements of risk analysis“, *Energy*, kd 34, nr 12, lk 2223–2229, dets 2009, doi: 10.1016/j.energy.2008.12.018.
- [70] R. Moradi ja K. M. Groth, „Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 44, nr 23, lk 12254–12269, mai 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.041.
- [71] M. Moonis, A. J. Wilday, ja M. J. Wardman, „Semi-quantitative risk assessment of commercial scale supply chain of hydrogen fuel and implications for industry and society“, *Process Saf. Environ. Prot.*, kd 88, nr 2, lk 97–108, märts 2010, doi: 10.1016/j.psep.2009.11.006.
- [72] „Linde Hydrogen FuelTech Tomorrow's fuel today“, 2020. https://www.linde-engineering.com/en/images/RLD_01_K19004_15_Hydrogen_Fuel_Tech_Broschuere_RZ_VIEW_tcm19-595381.pdf (vaadatud mai 31, 2021).
- [73] X. Pan, Z. Li, C. Zhang, H. Lv, S. Liu, ja J. Ma, „Safety study of a wind-solar hybrid renewable hydrogen refuelling station in China“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 41, nr 30, lk 13315–13321, aug 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.180.

- [74] O. R. Hansen, „Hydrogen infrastructure—Efficient risk assessment and design optimization approach to ensure safe and practical solutions“, *Process Saf. Environ. Prot.*, kd 143, lk 164–176, nov 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.06.028.
- [75] M. Genovese, D. Blekhman, M. Dray, ja P. Fragiacom, „Hydrogen losses in fueling station operation“, *J. Clean. Prod.*, kd 248, lk 119266, märts 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119266.
- [76] C. Correa-Jullian ja K. M. Groth, „Liquid Hydrogen Storage System FMEA and Data Requirements for Risk Analysis“, *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*, 2020, lk 973–980. doi: 10.3850/978-981-14-8593-0_5714-cd.
- [77] A. Bauer, T. Mayer, M. Semmel, M. A. Guerrero Morales, ja J. Wind, „Energetic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 44, nr 13, lk 6795–6812, märts 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.087.
- [78] K. Ono, T. Kihara, K. Tsunemi, K. Yoshida, T. Saburi, ja R. Makino, „Risk Assessment of Hydrogen Fueling Stations and Their Surroundings“, *AIST-RISS*, jaan 28, 2019. https://www.aist-riss.jp/wp-content/uploads/2019/08/RiskAssessment_of_HydrogenFuelingStations_Jan2019.pdf (vaadatud mai 31, 2021).
- [79] K. Hyde ja A. Ellis, „Feasibility of Hydrogen Bunkering“, *Interreg North Sea Region Dual Ports*, jaan 30, 2019. <https://northsearegion.eu/media/9385/feasibility-of-hydrogen-bunkering-final-080419.pdf> (vaadatud mai 31, 2021).
- [80] J. Sakamoto, R. Sato, J. Nakayama, N. Kasai, T. Shibusaki, ja A. Miyake, „Leakage-type-based analysis of accidents involving hydrogen fueling stations in Japan and USA“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 41, nr 46, lk 21564–21570, dets 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.060.
- [81] T. Suzuki *et al.*, „Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 46, nr 11, lk 8329–8343, veebr 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.035.
- [82] H.-R. Gye, S.-K. Seo, Q.-V. Bach, D. Ha, ja C.-J. Lee, „Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 44, nr 2, lk 1288–1298, jaan 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.035.
- [83] J. Ogden, A. M. Jaffe, D. Scheitrum, Z. McDonald, ja M. Miller, „Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: Insights from the literature“, *Energy Policy*, kd 115, lk 317–329, apr 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2017.12.049.
- [84] Z. Iabidine Messaoudani, F. Rigas, M. D. Binti Hamid, ja C. R. Che Hassan, „Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: A critical review“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 41, nr 39, lk 17511–17525, okt 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.171.
- [85] H. Agabus, J. Šuvalova, H. Koduvere, A. Siirde, ja E. Latõšov, „Vesiniku ja sünteetilise gaasi kasutamise potentsiaal ja ühenditest tulenev mõju ülekandeturustikele ja lõpptarbijate seadmetele“, TalTech, Tallinn, Estonia, dets 2020. [Online]. Available at: https://elering.ee/sites/default/files/2021-01/ER%20P2G%20aruanne%20v3_detsember2020.pdf
- [86] C. Fúnez Guerra, L. Reyes-Bozo, E. Vyhmeister, M. Jaén Caparrós, J. L. Salazar, ja C. Clemente-Jul, „Technical-economic analysis for a green ammonia production plant in Chile and its subsequent transport to Japan“, *Renew. Energy*, kd 157, lk 404–414, sept 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.05.041.
- [87] „Major Swedish manufacturer of commercial vehicles – Scania has selected Lithuania for testing Hydrogen technologies designated for transport“, *SGdujos*, sept 19, 2018. <https://sgdujos.lt/en/news/articles/the-swedish-concern-scania-has-selected-lithuania-for-testing-hydrogen-technologies-designated-for-transport> (vaadatud mai 31, 2021).
- [88] W. G. Houf, G. H. Evans, R. W. Schefer, E. Merilo, ja M. Groethe, „A study of barrier walls for mitigation of unintended releases of hydrogen“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 36, nr 3, lk 2520–2529, veebr 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.04.003.

- [89] E. Ohaeri, U. Eduok, ja J. Szpunar, „Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review”, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 43, nr 31, lk 14584–14617, aug 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.064.
- [90] „Gaasituru toimimise võrgueeskiri- Gaasisüsteemi sisestava gaasi kvaliteeditingimused”, Riigi Teataja, majandus-ja taristuministri 28.07.2017 määrus nr 41, mai 2021. Vaadatud: mai 05, 2021. [Online]. Available at: https://www.riigiteataja.ee/akti/1291/2202/0033/MKM_m41_Lisa.pdf#
- [91] N. A. Burton, R. V. Padilla, A. Rose, ja H. Habibullah, „Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 135, lk 110255, jaan 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110255.
- [92] K. H. R. Rouwenhorst, A. G. J. Van der Ham, G. Mul, ja S. R. A. Kersten, „Islanded ammonia power systems: Technology review & conceptual process design”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 114, lk 109339, okt 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109339.
- [93] E. Taibi, H. Blanco, R. Miranda, ja M. Carmo, „Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5C climate goal”, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020. Vaadatud: märts 11, 2021. [Online]. Available at: www.irena.org/publications
- [94] O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson, ja S. Few, „Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study”, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 42, nr 52, lk 30470–30492, dets 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.045.
- [95] J. Chi ja H. Yu, „Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production”, *Chin. J. Catal.*, kd 39, nr 3, lk 390–394, märts 2018, doi: 10.1016/S1872-2067(17)62949-8.
- [96] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez, ja D. Guilbert, „Investigation of PEM electrolyzer modeling: Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption”, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 29, lk 14625–14639, mai 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.195.
- [97] M. David, C. Ocampo-Martínez, ja R. Sánchez-Peña, „Advances in alkaline water electrolyzers: A review”, *J. Energy Storage*, kd 23, lk 392–403, juuni 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.03.001.
- [98] H. Ito, N. Miyazaki, M. Ishida, ja A. Nakano, „Cross-permeation and consumption of hydrogen during proton exchange membrane electrolysis”, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 41, nr 45, lk 20439–20446, dets 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.119.
- [99] L. Wang *et al.*, „Greening Ammonia toward the Solar Ammonia Refinery”, *Joule*, kd 2, nr 6, lk 1055–1074, juuni 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.04.017.
- [100] J. Andersson ja S. Grönkvist, „Large-scale storage of hydrogen | Elsevier Enhanced Reader”, *Elsevier*, märts 29, 2019. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319919310195?token=A7B7009270D975D868D6CFBC1DC9FBE797EE1857DC2C9A807EA0F8DCA8990DA1740750B014381CF8C2778B5C516AFFC4&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210531155053> (vaadatud mai 31, 2021).
- [101] C. Smith, A. K. Hill, ja L. Torrente-Murciano, „Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape”, *Energy Environ. Sci.*, kd 13, nr 2, lk 331–344, 2020, doi: 10.1039/C9EE02873K.
- [102] A. Franklin ja L. L. Edward, „Ammonia toxicity and adaptive response in marine fishes – A review”, *INDIAN J MAR SCI*, kd 48, nr 03, lk 8, 2019.
- [103] W. Tan, D. Lv, X. Guo, H. Du, L. Liu, ja Y. Wang, „Accident consequence calculation of ammonia dispersion in factory area”, *J. Loss Prev. Process Ind.*, kd 67, lk 104271, sept 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104271.
- [104] B. David, „Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store.”, The Royal Society, London, veebr 2020. Vaadatud: apr 12, 2021. [Online]. Available at: <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>
- [105] Z. Ma, J. Eichman, ja J. Kurtz, „Fuel Cell Backup Power System for Grid Service and Microgrid in Telecommunication Applications”, *J. Energy Resour. Technol.*, kd 141, nr 6, lk 062002, juuni 2019, doi: 10.1115/1.4042402.

- [106] B. Dou *et al.*, „Hydrogen production from the thermochemical conversion of biomass: issues and challenges“, *Sustain. Energy Fuels*, kd 3, nr 2, lk 314–342, 2019, doi: 10.1039/C8SE00535D.
- [107] M. Miltner, A. Makaruk, ja M. Harasek, „Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions“, *J. Clean. Prod.*, kd 161, lk 1329–1337, sept 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.045.
- [108] M. Niermann, A. Beckendorff, M. Kaltschmitt, ja K. Bonhoff, „Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) – Assessment based on chemical and economic properties“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 44, nr 13, lk 6631–6654, märts 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.199.
- [109] M. Hurskainen ja J. Itonen, „Techno-economic feasibility of road transport of hydrogen using liquid organic hydrogen carriers“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 56, lk 32098–32112, nov 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.186.
- [110] „Hydrogen Storage Tech Team Roadmap“, US drive, juuli 2017. Vaadatud: mai 11, 2021. [Online]. Available at: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f36/hstt_roadmap_July2017.pdf
- [111] P. W. Parfomak, „Pipeline Transportation of Hydrogen: Regulation, Research, and Policy“, Congressional Research Service, R46700, märts 2021. Vaadatud: mai 11, 2021. [Online]. Available at: https://www.everycrsreport.com/files/2021-03-02_R46700_294547743ff4516b1d562f7c4dae166186f1833e.pdf
- [112] A. Witkowski, A. Rusin, M. Majkut, ja K. Stolecka, „Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects“, *Energy*, kd 141, lk 2508–2518, dets 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.141.
- [113] W. E. Mustain, M. Chatenet, M. Page, ja Y. S. Kim, „Durability challenges of anion exchange membrane fuel cells“, *Energy Environ. Sci.*, kd 13, nr 9, lk 2805–2838, 2020, doi: 10.1039/D0EE01133A.
- [114] F. M. Guangul ja G. T. Chala, „A Comparative Study between the Seven Types of Fuel Cells“, *Appl. Sci. Eng. Prog.*, kd 13, nr 3, apr 2020, doi: 10.14416/j.asep.2020.04.007.
- [115] D. Akinyele, E. Olabode, ja A. Amole, „Review of Fuel Cell Technologies and Applications for Sustainable Microgrid Systems“, *Inventions*, kd 5, nr 3, lk 42, aug 2020, doi: 10.3390/inventions5030042.
- [116] „Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050“, Clean Sky 2 JU, FCH 2 JU, mai 2020. Vaadatud: mai 11, 2021. [Online]. Available at: https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/20200507_Hydrogen-Powered-Aviation-report_FINAL-web-ID-8706035.pdf
- [117] C. Xu, Y. Wu, ja S. Dai, „What are the critical barriers to the development of hydrogen refueling stations in China? A modified fuzzy DEMATEL approach“, *Energy Policy*, kd 142, lk 111495, juuli 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111495.
- [118] K. G. dos Santos *et al.*, „Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review“, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, kd 68, lk 563–571, veebr 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.128.
- [119] M. Miotti, J. Hofer, ja C. Bauer, „Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles“, *Int. J. Life Cycle Assess.*, kd 22, nr 1, lk 94–110, jaan 2017, doi: 10.1007/s11367-015-0986-4.
- [120] M. Y. Mustafa, A. Al-Mahadin, B. E. Kanstad, ja R. K. Calay, „Fuel cell technology application for Dubai rail systems“, *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, Abu Dhabi, veebr 2018, lk 1–7. doi: 10.1109/ICASET.2018.8376798.
- [121] B. D. Ehrhart, S. R. Harris, M. L. Blaylock, A. B. Muna, ja S. Quong, „Risk assessment and ventilation modeling for hydrogen releases in vehicle repair garages | Elsevier Enhanced Reader“, *Elsevier*, sept 19, 2020. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319920335953?token=DAA0A29A1960B0EFA6155CFD4C328062E2404B3B22E752EC5FC918185F8BEE543200F8731A355D6EC4F9041CA4E8A635&originRegion=eu-west-1&originCreation=20210531160218> (vaadatud mai 31, 2021).

- [122] A. Smaragdakis, S. Kamenopoulos, ja T. Tsoutsos, „How risky is the introduction of fuel cell electric vehicles in a Mediterranean town?“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 35, lk 18075–18088, juuli 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.224.
- [123] F. G. Aarskog, O. R. Hansen, T. Strømgren, ja Ø. Ulleberg, „Concept risk assessment of a hydrogen driven high speed passenger ferry“, *Int. J. Hydrog. Energy*, kd 45, nr 2, lk 1359–1372, jaan 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.128.
- [124] A. S. Danasa, T. E. B. Soesilo, D. N. Martono, A. Sodri, A. S. Hadi, ja G. T. Chandrasa, „The ammonia release hazard and risk assessment: A case study of urea fertilizer industry in Indonesia“, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, kd 399, lk 012087, dets 2019, doi: 10.1088/1755-1315/399/1/012087.
- [125] N. F. Barilo, „Safety of Hydrogen Systems Installed in Outdoor Enclosures“, PNNL--22960, 1115836, nov 2013. doi: 10.2172/1115836.
- [126] European Cooperation For Space Standardization, „Space engineering- Technology readiness level (TRL) guidelines“. märts 01, 2017.
- [127] G. Notander, „EIT Health is supported by the EIT, a body of the European Union“, lk 30.
- [128] European Commission, „HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2018-2020“, 2020, [Online]. Available at: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/2018-2020/annexes/h2020-wp1820-annex-g-trl_en.pdf

LISAD

Lisa 1 Ühiskondliku aktsepteeritavuse riskianalüüsi tabel

Tabel 1.1 Tabelis on toodud ühiskondliku aktsepteeritavusega seotud barjäärid, nende riskide esinemise tõenäosus ja mõju suurus

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Riskitase	Viide
Vesinik	Teadlikkus	Inimestel puuduvad vesiniku tehnoloogia kasutamise alased teadmised, puudujäägid haridussüsteemis	Hirm ja vastuseis	Keskmine	Keskmine	Keskmine	[31], [30]
	Harjumused	Harjumustest kasutatakse vanu fossiil-kütustel põhinevaid tehnoloogiaid	Uute tehnoloogiate laiem kasutuselevõtt piiratud	Madal	Madal	Madal	[31], [30]
	Hind ja kättesaadavus	Ei olla valmis tegema suuremat alginvesteeringut vesinikusõiduki soetamiseks	Uute tehnoloogiate laiem kasutuselevõtt piiratud	Kõrge	Keskmine	Kõrge	[31], [30]
	Varasemad õnnetusjuhtumid	Varasemad vesinikuga toimunud õnnetusjuhtumid (näiteks Hindenburg) tekitavad ühiskonnast kartust	Hirm ja vastuseis	Vähetähtis	Kõrge	Vähetähtis	[41]
Rohelisest vesinikust toodetud ammoniaak	Lõhn	Ammoniaagi lõhna on tunda juba väikestes kogustes (5 ppm)	Hirm ja vastuseis	Vähetähtis	Keskmine	Vähetähtis	[32]
	Toksilisus	Ammoniaagi kasutamisel kütusena avalikes kohtades tuleks käitlemist eriti hoolikalt jälgida, et vältida toksilise ammoniaagi lekkeid.	Hirm ja vastuseis	Vähetähtis	Keskmine	Vähetähtis	[32]

Lisa 2 Vesinikubusside riskianalüüsi tabel

Tabel 2.1 Vesinikubusside kasutuselevõttuga seotud tehnoloogilised ja ohutusalsed riskid, nende esinemise tõenäosus ja mõju suurused

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Riskitase	Vii-de
Tehnoloogilised riskid	Kütusepaak	Avarii korral vesinikupaagi purunemine ja vesiniku lekkimine suures ulatuses	Tulekahju ja plahvatus, mõju inimeste elule ja tervisele	Madal	Madal	Madal	[42] [41]
		Kütusepaagi materjali kahjustus (Tootmisvead, ülekoormus, vale käitlemine, vesiniku omandustest tingitud mõju metallile)	Vesiniku aeglane leke ja tulekahju teke	Madal	Kõrge	Keskmine	[60] [41]
		Kerged, kuid mehaaniliselt tugevad komposiitpaagid lagunevad termilise koormuse (tulekahju) korral	Lööklaine ja tulekera. Tõsised tagajärjed inimeste elule ja tervisele	Madal	Koos termilise kaitsega: Madal	Madal	[43]
					Ilma termilise kaitseta: Kõrge	Keskmine	
	Suur kütusepaagi maht (4x suurem kui bensiinipaak, et saada sama kogus energiat)		Kõrge	Madal	Keskmine	[40]	
	PEM kütuseelement	Vesinik on kõrge reaktsioonivõimega ja põhjustab bipolaarsete plaatide korrosiooni	Pingelangus, efektiivsuse vähenemine	Madal	Madal	Madal	[51]
		Vajab väga puhast vesinikku, kuna CO ja S adsorbeeruvad Pt-katalüsaatori pinnale ning vähendab selle aktiivsust	Kütuseelemendi efektiivsuse vähenemine	Vähetähtis	CO mõju katalüsaatorile: madal	Vähetähtis	[48]
					Väävli (S) mõju katalüsaatorile: Kõrge	Vähetähtis	
	Molekulaarse vesiniku ja hapniku kokkupuude katalüsaatori pinnal	Süttimine või plahvatus	Madal	Madal	Madal	[41]	

		PEM kütuseelementides kasutatav Pt on haruldane väärismetall	Tarneraskused, keskkonnamõju	Madal	Kesk-mine	Madal	[118], [51]
	Infrastruktuur	Vesinikusõidukite kasutuselevõtuks on vajalik tanklate olemasolu, mille mahutite ja jaotamistehnoloogia on kallim võrreldes diisliga	Aeglustab vesiniku-energeetika implementeerimist	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[57]
	Hooldus	Kuna hooldust viiakse läbi sisetingimustes, siis lekke korral vesinik akumuleerub ruumis	Tulekahju või plahvatus	Madal	Kesk-mine	Madal	[49]
		Kvalifitseeritud personali ja rajatiste puudumine hooldustööde teostamiseks	Eba-professionaalne hooldus	Kõrge	Madal	Kesk-mine	[50]
Ohutus	Elektrisüsteem	Sisseehitatud kõrgepingeallikad	Elektrilöök	Madal	Kõrge	Kesk-mine	[50]
	Vesiniku mõju metallidele	Vesinikumolekulid võivad dissotsieeruda aatomvesinikuks, mis pikema aja jooksul võib põhjustada metalli haprumist ja purunemist	Mahutite purunemine, lekkimine	Madal	Kesk-mine	Madal	[57]
	Vesinik on kergelt süttiv	Madal aktivatsioonienergia, põleb värvitult	Põlengute raske tuvastamine	Madal	Madal	Madal	[57]
	Vesiniku säilitamine kõrge rõhu all	Vesinik võib lekkida	Tulekahju teke	Madal	Kesk-mine	Madal	[60], [57]

Lisa 3 Vesinikutanklate riskianalüüsi tabel

Tabel 3.1 Vesinikutanklate kasutuselevõtuiga seonduvad tehnoloogilised ja ohutusalsed barjäärid

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Riskitase	Viide	
Tehnoloogilised riskid	Surugaasi transport	Mahuti võib sagedase dekomprimeerimise tõttu saada kahjustada ja lekkida	Tulekahju	Madal	Kõrge	Keskmine	[70], [69]	
		Sobilik pigem lühemateks vedudeks, kuna vesiniku tihedus paagis on madal	Korruga veetav vesiniku kogus on limiteeritud	Keskmine	Madal	Madal	[70]	
		Vesiniku leke korrosiooni või välise mõjutuse tulemusel	Tulekahju	Madal	Kõrge	Keskmine	[69]	
		Liiklusõnnetuse korral mahuti purunemine	Plahvatus	Madal	Kõrge	Keskmine	[69]	
	Krüogeense vesiniku transport	Temperatuuri tõustes vesinik aurustub	Tekivad kaod	Madal	Keskmine	Madal	[13]	
		Veokitransport suurendab liiklustihedust	Liiklusummikud	Madal	Madal	Madal	[13]	
		LH2 transpordihagise mahuti kahjustus	Tulekera, plahvatus, tulejuga	Madal	Kõrge	Keskmine	[71]	
		LH2 leke transpordihagise mahuti tühjendamisel	Plahvatus, tulekahju	Madal	Kõrge	Keskmine	[71]	
	Veeldatud vesiniku hoiustamine tanklates	Veeldatud LH2 puhul on temperatuur väga madal ja lekkimine võib põhjustada alajahtumist ja külmumist	Inimeste tervisekahjustused	Vähetahtis	Madal	Vähetahtis	[75]	
		Kui paaki lekib õhk ja niiskus pääseb ligi, siis see võib tekitada jääd, kahjustades torusid ja ventiile	Seadmete kahjustused	Madal	Keskmine	Madal	[75]	
		Vesinikutankla LH2 mahuti katastroofiline purunemine	Plahvatus, tulekahju	Vähetahtis	Kõrge	Vähetahtis	[71]	
	Gaasilise vesiniku hoiustamine tanklates	Vesinikku hoiustatakse kõrge rõhu all, tulekahju korral võib mahuti puruneda	Treilermahuti plahvatus, tulekera teke, inimeste tervisekahjustused	Ilma leevendavate meetmeteta: Kõrge	Ilma leevendavate meetmeteta: Kõrge	Kõrge	[73], [82]	
				Koos leevendavate meetmetega: Madal	Koos leevendavate meetmetega: Keskmine	Madal		
	Ohutus	Lekkimine	Leke täitevooliku purunemisel	Tulekahju, mõju inimeste elule ja tervisele	Ilma ohutusmeetmeteta: Keskmine	Ilma ohutusmeetmeteta: Kõrge	Kõrge	[81], [75], [82], [26]

					Koos ohutusme etmetega: Madal	Koos ohutus meetme tega: Madal	Madal

Lisa 4 Vesiniku veokite riskianalüüsi tabel

Tabel 4.1 Tehnoloogilised ja ohutuse alased riskid, mis seotud vesiniku kasutamisega veoauto kütusena ning nende riskide hindamine

Vald kond	Te gur	Riskid	Tagajärjed	Tõe- näosus	Raskusaste	Riski- tase	Viide
Tehnoloogilised riskid	Kütusepaak	Avarii korral vesinikupaagi purunemine ja vesiniku lekkimine suures ulatuses	Tulekahju ja plahvatus, mõju inimeste elule ja tervisele	Madal	Madal	Madal	[42], [41]
		Kütusepaagi materjali kahjustus (Tootmisvead, ülekoormus, vale käitlemine, vesiniku omandustest tingitud mõju metallile)	Vesiniku aeglane leke ja tulekahju teke	Madal	Kõrge	Keskmine	[60], [41]
		Kerged, kuid mehaaniliselt tugevad komposiitpaagid lagunevad termilise koormuse (tulekahju) korral	Lööklaine ja tulekera, Tõsised tagajärjed inimeste elule ja tervisele	Madal	Koos termilise kaitsega: Madal	Madal	[43], [43]
					Ilma termilise kaitseta: Kõrge	Keskmine	
	Suur kütusepaagi maht (4x suurem kui bensiinipaak, et saada sama kogus energiat)		Kõrge	Madal	Keskmine	[40]	
	PEM kütuseelement	Vesinik on kõrge reaktsioonivõimega ja põhjustab metalli korrosiooni (bipolaarsete plaatide korrosioon)	Pingelangus, efektiivsuse vähenemine	Madal	Madal	Madal	[51]
		Vajab väga puhast vesinikku, kuna CO adsorbeerub Pt- katalüsaatori	Kütuseelemendi efektiivsuse vähenemine	Vähetähtis	CO mõju katalüsaatorile: Madal	Vähetähtis	[48]

		pinnale ning vähendab selle aktiivsust			Väavli (S) mõju katalüsaatorile: Kõrge	Vähetähtis	
		Molekulaarse vesiniku ja hapniku kokkupuude katalüsaatori pinnal	Süttimine või plahvatus	Madal	Madal	Madal	[41]
		PEM kütuseelementid es kasutatav Pt on haruldane väärismetall	Tarneraskused, keskkonnamõju	Madal	Keskmine	Madal	[118], [51]
		Temperatuuri mõju kütuseelementidele	Vähene kogemus kütuselementide käivitumise katsetamisel - 20°C madalamatel temperatuuridel	Kõrge	Madal	Keskmine	[50]
	Infrastruktuur	Vesinikusõidukite kasutuselevõtuks on vajalik tanklate olemasolu, mille mahutite ja jaotamistehnoloogia on kallim võrreldes diisliga	Aeglustab vesinikuenergeetika implementeerimist	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[57]
	Hooldus	Kuna hooldust viiakse läbi sisetingimustes, siis lekke korral vesinik akumuleerub ruumis	Tulekahju või plahvatus	Madal	Keskmine	Madal	[49]
		Kvalifitseeritud personali ja rajatiste puudumine hooldustööde teostamiseks	Ebaprofessionaalne hooldus	Kõrge	Madal	Keskmine	[50]
Ohutus	Elektrisüsteem	Sisseehitatud kõrgepingeallikad	Elektrilöök	Madal	Kõrge	Keskmine	[50]

	Vesiniku mõju metallidele	Vesinikumolekulid võivad dissotsieeruda aatomvesinikuks, mis pikema aja jooksul võib põhjustada metalli haprumist ja purunemist	Mahutite purunemine, lekkimine	Madal	Keskmine	Madal	[57]
	Vesiniku säilitamine kõrge rõhu all	Vesiniku leke	Tulekahju teke	Madal	Keskmine	Madal	[60], [57]

Lisa 5 Vesinikurongide riskianalüüsi tabel

Tabel 5.1 Vesinikurongide kasutuselevõtuga seonduvalt tehnoloogilised ja ohutusalsed riskid, nende esinemise tõenäosus ja mõju suurus

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Selgitus	Viide
Tehnoloogilised riskid	Olemasolevate rongide ümberehitus	Vesiniku hoiustamise mahutid nõuavad 20-30% rohkem ruumi võrreldes diislirongide paakidega	Vajadus kohalda rongid uute mahutitega.	Keskmine	Madal	Madal	[56]
		Olemasolevad rongid vajavad ümberehitust	Vesinikupaagi suure kaalu ja kütuseelemendi jaoks vajaliku lisaruumi tõttu tuleb rong täielikult ümber ehitada ning see on kulukas	Madal	Keskmine	Madal	[56]
		Elektrivõrgu ja kütuseelementide koos kasutamine vajab uurimist	Kontaktvõrgu ja katusele paigaldatud vesinikupaagi koostalitluse probleemid	Vähetähtis	Keskmine	Vähetähtis	[56]
		Muutused rongi kaalus võivad mõjutada jõudlust	Rong ei täida jõudlusnõudeid, kuna mass on väiksem.	Vähetähtis	Madal	Vähetähtis	[56], [120]
	Mootorisüsteem	Puudub kogemus kütuseelementide-akude hübriidsüsteemide väljatöötamiseks rongide jaoks	Standardiseeritud süsteemide puudumise tõttu ole teada, kuidas erinevaid jõuülekanne süsteeme omavahel integreerida, tuleb läheneda juhtumipõhiselt	Vähetähtis	Keskmine	Vähetähtis	[56]
		Vibratsiooni kahjustav mõju kütuseelementidele	Häired kütuseelemendi töös	Vähetähtis	Madal	Vähetähtis	[56]
	Kütuseelement	Kütuseelemendi süsteemi vastupidavus raudteedel	Elektroonilised komponendid (näiteks sensorid) võivad olla raudteekeskonnas ebausaldusväärsed, kuna pole	Vähetähtis	Madal	Vähetähtis	[56]

			testitud nii suure vibratsiooniga keskkondades töötamiseks.				
		Vesinik on kõrge reaktsioonivõimega ja põhjustab metalli korrosiooni (bipolaarsete plaatide korrosioon)	Pingelangus, efektiivsuse vähenemine	Madal	Madal	Madal	[51].
		Vajab väga puhast vesinikku, kuna CO adsorbeerub Pt- katalüsaatori pinnale ning vähendab selle aktiivsust	Kütuseelemendi efektiivsuse vähenemine	Vähetähtis	CO mõju katalüsaatorile: madal	Vähetähtis	[48]
					Väävli (S) mõju katalüsaatorile: kõrge	Vähetähtis	
		Molekulaarse vesiniku ja hapniku kokkupuude katalüsaatori pinnal	Süttimine või plahvatus	Madal	Madal	Madal	[41]
		PEM kütuseelementides kasutatav Pt on haruldane väärismetall	Tarneraskused, keskkonnamõju	Madal	Keskmine	Madal	[118], [51]
	Aku	Aku eluiga	Akude väljavahetamine suurendab kulusid	Vähetähtis	Keskmine	Vähetähtis	[56]
	Kütusepaak	Paagid vajavad suuremat hoiuruumi	Vajadus välja töötada uued hoiustussüsteemid. Veeldatud vesiniku hoiustamise korral tuleb paigaldada ka surugaasi lisamahutid, kuna kütuseelement tarbib vaid gaasilist vesinikku	Madal	Kõrge	Keskmine	[56]
		Mahuti purunemisel eraldub suures koguses vesinikku	Tagajärjeks tulekahju- ja plahvatus	Vähetähtis	Madal	Vähetähtis	[56]

		Avarii korral vesinikupaagi purunemine ja vesiniku lekkimine suures ulatuses	Tulekahju ja plahvatus, mõju inimeste elule ja tervisele	Madal	Madal	Madal	[42], [41].
		Kütusepaagi materjali kahjustus (Tootmisvead, ülekoormus, vale käitlemine, vesiniku omandustest tingitud mõju metallile)	Vesiniku aeglane leke ja tulekahju teke	Madal	Kõrge	Keskmine	[60], [41].
		Kerged, kuid mehaaniliselt tugevad komposiitpaagid lagunevad termilise koormuse (tulekahju) korral	Lööklaine ja tulekera, Tõsised tagajärjed inimeste elule ja tervisele	Madal	Koos termilise kaitsega: Madal	Madal	[43], [43].
					Ilma termilise kaitseta: Kõrge	Keskmine	
	Hooldus	Hoolduse tarbeks on vaja rajada rongide kütuse tühjendussüsteemid	Puuduvad standardid, hooldusjuhendid ja teenusepakkujad	Madal	Madal	Madal	[56]
		Hooldust viiakse läbi sisetingimustes, siis lekke korral vesinik akumuleerub ruumis	Tulekahju/plahvatus	Madal	Keskmine	Madal	[49]
		Kvalifitseeritud personali ja rajatiste puudumine hooldustööde teostamiseks	Ebaprofessionaalne hooldus	Kõrge	Madal	Keskmine	[50]
	Tankimine	Pikk tankimisaeg	Kuna tankimisaeg peaks olema ligikaudu sama, mis diiselrongidel, tuleks suure vesinikukoguse kiiremaks tankimiseks paigaldada mitu düüsi või suurendada	Vähetähtis	Vähetähtis	Vähetähtis	[56]

			nende läbilaskevõimet				
Ohutus	Vesiniku mõju metallidele	Vesinikumolekulid võivad dissotsieeruda aatomvesinikuks, mis pikema aja jooksul võib põhjustada metalli haprumist ja purunemist	Mahutite purunemine, lekkimine	Madal	Keskmine	Madal	[57]
	Vesiniku leke	Vesiniku leke	Tulekahju teke	Madal	Keskmine	Madal	[60], [57]
	Kütuseel emendid	Sõidukid võivad teiste liiklejate poolt jääda märkamata	Liiklusõnnetused	Kõrge	Keskmine	Kõrge	[60]

Lisa 6 Vesiniku parvlaevade riskianalüüsi tabel

Tab 6.1 Tehnoloogilised ja ohutusalsed riskid vesiniku kasutamisel parvlaevade kütusena ning nende mõju hindamine

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Riskitase	Viide
Tehnoloogilised riskid	Gaasilise vesiniku hoiustamine	Kütusemahutid nõuavad rohkem ruumi		Kõrge	Madal	Keskmine	[19], [55]
		Pikk tankimis- või punkerdusaeg		Vähetähtis	Vähetähtis	Vähetähtis	[19], [55]
		Vesiniku hoiustatakse kõrge rõhu all, tulekahju korral võib mahuti puruneda	Plahvatus, tulekera teke, inimeste tervisekahjustused	Ilma leevendavate meetmeteta: Kõrge	Ilma leevendavate meetmeteta: Kõrge	Kõrge	[73], [82]
				Koos leevendavate meetmetega: Madal	Koos leevendavate meetmetega: Keskmine	Madal	
		Mahuti purunemine	Mahuti purunemine põhjustab lühiajalist lööklainet, pärast mida jääb laev küll pinnale, kuid ilmselt kaotab laev juhtivuse, laev saab kahjustada, aknad purunevad, inimesed saavad vigastada	Madal	Kõrge	Keskmine	[123]
	Veeldatud vesiniku hoiustamine	Veeldamine ja jahutamine on suure energiakuluga		Madal	Madal	Madal	[19], [55]
		Vältimatu soojusvoog mahutitesse põhjustab vesiniku aurustumist ja kadu	Lekkimine ja plahvatus	Vähetähtis	Madal	Vähetähtis	[19], [55]
		Veeldatud LH2 puhul on temperatuur väga madal ja lekkimine võib põhjustada alajahtumist ja külmumist	Inimeste tervisekahjustused	Madal	Keskmine	Madal	[75]
		Kui paaki lekib õhk ja niiskus pääseb ligi, siis see võib tekitada jääd,	Seadmete kahjustused	Madal	Keskmine	Madal	[75]

		kahjustades torusid ja ventiile					
		LH2 mahuti katastroofiline purunemine	Plahvatus, tulekahju	Vähetähtis	Kõrge	Vähetähtis	[71]
	Kütuseelemendid	Kütuseelementide kasutamine nõuaks laevade täielikku elektrifitseerimist	Laevade täielik ümberehitus, kulude suurenemine	Kõrge	Keskmine	Kõrge	[19], [55]
		Vesinik on kõrge reaktsioonivõimega ja põhjustab metalli korrosiooni (bipolaarsete plaatide korrosioon)	Pingelangus, efektiivsuse vähenemine	Madal	Madal	Madal	[51]
		Vajab väga puhast vesinikku, kuna CO adsorbeerub Pt-katalüsaatori pinnale ning vähendab selle aktiivsust	Kütuseelemendi efektiivsuse vähenemine	Vähetähtis	CO mõju katalüsaatorile: madal	Vähetähtis	[48]
					Väavli (S) mõju katalüsaatorile: Kõrge	Vähetähtis	
		PEM kütuseelemendi lühike eluiga	Hoolduskulude suurenemine	Madal	Madal	Madal	[48]
		Molekulaarse vesiniku ja hapniku kokkupuude katalüsaatori pinnal	Süttimine/plahvatus	Madal	Madal	Madal	[41]
PEM kütuseelementides kasutatav Pt on haruldane väärismetall	Tarneraskused, keskkonnamõju	Madal	Keskmine	Madal	[118], [51]		
Ohutus	Ventilatsioon	Tulekahju ja plahvatus ventileerimise käigus	Plahvatus	Vähetähtis	Madal	Vähetähtis	[123]
	Kõrgrõhutorustik	Ventiilide, filtrite, torude leke (rõhk 250 baari)	Tulejoad	Madal	Madal	Madal	[123]
	Lekkimine	Veeldatud vesiniku leke	Krüogeenne vesinik võib kahjustada laeva teraskonstruktsioone ja põhjustada	Madal	Keskmine	Madal	[19], [55]

			kahjustusi laeva kerele.				
		Veeldatud vesiniku lekkimisel tekkivad niisked aurupilved	Plahvatus, mõju inimeste elule ja tervisele	Madal	Keskmine	Madal	[19], [55]
	Vesiniku mõju metallidele	Vesinikumolekulid võivad dissotsieeruda aatomvesinikuks, mis pikema aja jooksul võib põhjustada metalli haprumist ja purunemist	Mahutite purunemine, lekkimine	Madal	Keskmine	Madal	[57]

Lisa 7 Vesiniku lisamine maagaasitrassi riskianalüüsi tabel

Tabel 7.1 Kasutatavate tehnoloogiatega seotud tehnoloogiliste ja ohutuse alaste riskide kirjeldus, tõenäosus ja mõju ulatus vesiniku lisamisel maagaasivõrku

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Riskitase	Viide
Tehnoloogilised riskid	Vesiniku lisamine maagaasile	Gaasituvastusseadmed ei ole piisavalt tundlikud maagaasi ja vesiniku segu suhtes	Lekete tuvastamise keerulisem, kuna odorandid (merkaptaan), mida kasutatakse maagaasi tuvastamiseks, ei sobi vesiniku puhul kasutamiseks	Madal	Madal	Madal	[84]
		Vesinik võib põhjustada terasest maagaasijuhtme murenemist ja rabadust	Lekkimine, tulekahju	Madal	Kõrge	Keskmine	[83], [69]
		Vesinik vajab võimsamaid kompressoreid		Kõrge	Madal	Keskmine	[83]
		Hetkel on veel ebaselge, kui palju vesinikku võib maksimaalselt maagaasivõrku lisada	Ühise reeglistiku puudumine	Juhtumi-põhine	Juhtumi-põhine	Juhtumi-põhine	[83], [69]
		CNG veokid pole projekteeritud töötamiseks üle 2%vol vesinikusisaldusega	Tihendite lekked ja kütusepaakide haprumine	Keskmine	Madal	Madal	[85],
Ohutus	Vesiniku lisamine maagaasile	Vesinikusegu madalam kütteväärtus võrreldes puhta metaaniga	Sama koguse energia jaoks on vaja rohkem kütust	Madal	Madal	Madal	[85]
		Vesinik on kergem kui maagaas ja see suurendab difusiooni ja lekkeohtu	Lekkimine, Tulekahju, plahvatus	Madal	Kõrge	Keskmine	[84], [69]

		Vesiniku lisamine alandab segu süttimistemperatuuri	Tulekahju	Madal	Kõrge	Kesk- mine	[84], [69]
--	--	---	-----------	-------	-------	---------------	---------------

Lisa 8 Vesiniku kasutamine kahveltõstukite kütusena riskianalüüsi tabel

Tabel 8.1 Tehnoloogilised ja ohutusalsed riskid ja nende hindamine vesiniku kasutamisel kahveltõstukite kütusena

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Riskitaseme	Viide
Tehnoloogilised riskid	Elektrolüüs AE elektrolüüsiga	Elektrolüüdi lekkeprobleemid	Efektiivsus väheneb	Madal	Madal	Madal	[6]
		Suur takistuse soojuskadu	Efektiivsus väheneb	Madal	Madal	Madal	[6], [94], [95]
		Osalise koormuse korral väheneb tootlikkus, sagedase käivitamise ja erinevate sisendvõimsuste andmine on piiratud	Mõjutab gaasi puhtust ja süsteemi efektiivsust. Raske kohandada taastuenergiaallikatega süsteemi	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[6], [94], [95]
		Ülepinge, mis põhjustatud mullide tekkest elektrodide vahel	Efektiivsus väheneb	Madal	Madal	Madal	[6], [94], [95]
	Elektrolüüs PEM elektrolüüsiga	Haruldastest materjalidest valmistatud katalüsaator ning elektrolüüdi materjalid	Tarnemisküsimused, keskkonnamõju	Platina: Kõrge	Platina: Kõrge	Kõrge	[96]
				Iriidium: Kõrge	Iriidium: Kõrge	Kõrge	[94], [97]
				Titaan: Madal	Titaan: Madal	Madal	
		Voolukollektorite korrosioon ja juhtivuse vähenemine	Efektiivsus väheneb				[96], [94], [97]
	Ebapiisava puhtusega vesi	Seadme kahjustumine	Vähetähtis	Keskmine	Vähetähtis	[92]	
	PEM kütuselement	Vesinik on kõrge reaktsioonivõimega ja põhjustab metalli korrosiooni	Pingelangus, efektiivsuse vähenemine	Madal	Madal	Madal	[51]

		(bipolaarsete plaatide korrosioon)					
		Vajab väga puhast vesinikku, kuna CO adsorbeerub Pt-katalüsaatori pinnale ning vähendab selle aktiivsust	Kütuseelemendi efektiivsuse vähenemine	Vähetähtis	CO mõju katalüsaatorile: madal	Vähetähtis	[48]
					Väevli (S) mõju katalüsaatorile: Kõrge	Vähetähtis	
		Molekulaarse vesiniku ja hapniku kokkupuude katalüsaatori pinnal	Süttimine või plahvatus	Madal	Madal	Madal	[41]
		PEM kütuseelemendi des kasutatav Pt on haruldane väärismetall	Tarneraskused, keskkonnamõju	Vähetähtis	Keskmine	Vähetähtis	[118], [51]
	Gaasilise vesiniku hoiustamine	Vesinikku hoiustatakse kõrge rõhu all, tulekahju korral võib mahuti puruneda	Treilermahuti plahvatus, tulekera teke, inimeste tervisekahjustused	Ilma leeven-davate meetme-teta: Kõrge	Ilma leeven-davate meetme-teta: Kõrge	Kõrge	[73], [82]
				Koos leeven-davate meetme-teta: Madal	Koos leeven-davate meetme-tega: Keskmine	Madal	
	Infrastruktuur	Vesinikusõidukite kasutuselevõtuks on vajalik tanklate olemasolu, mille mahutite ja jaotamistehnoloogia on kallim võrreldes diisliga		Kõrge	Keskmine	Kõrge	[57]
	Hooldus	Kuna hooldust viiakse läbi sisetingimustes, siis lekke korral vesinik akumuleerub ruumis	Tulekahju või plahvatus	Madal	Keskmine	Madal	[49]

Ohutus	Töötamine sisetingimustes	Vesiniku leke sisetingimustes töötades	Tulekahju, plahvatus, mõju inimeste tervisele	Madal	Keskmine	Madal	[49]
	Vesiniku mõju metallidele	Vesinikumolekulid võivad dissotsieeruda aatomvesinikuks, mis pikema aja jooksul võib põhjustada metalli haprumist ja purunemist	Mahutite purunemine, lekkimine	Madal	Keskmine	Madal	[57]
	Vesiniku säilitamine kõrge rõhu all	Vesiniku leke	Tulekahju teke	Madal	Keskmine	Madal	[60] / [57]

Lisa 9 Vesinikust ammoniaagi tootmise riskianalüüsi tabel

Tabel 9.1 Tabelis on välja toodud ammoniaagi tootmisega seonduvad riskid

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Riskitase	Viide
Tehnoloogilised riskid	Elektrolüüs AE elektrolüüsiga	Elektrolüüdi lekkeprobleemid	Efektiivsus väheneb	Madal	Madal	Madal	[6]
		Suur takistuse soojuskadu	Efektiivsus väheneb	Madal	Madal	Madal	[6], [94], [95]
		Osalise koormuse korral väheneb tootlikkus, sagedase käivitamise ja erinevate sisendvõimsuste andmine on piiratud	Mõjutab gaasi puhtust ja süsteemi efektiivsust Raske kohandada taastuenergiaallikatega süsteemi	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[6], [94], [95]
		Ülepinge, mis põhjustatud mullide tekkest elektrootodide vahel	Efektiivsus väheneb	Madal	Madal	Madal	[6], [94], [95]
	Elektrolüüs PEM elektrolüüsiga	Haruldastest materjalidest valmistatud katalüsaator ning elektrolüüdi materjalid	Tarnemisküsimused ja keskkonnamõju	Platina : Kõrge	Platina: Kõrge	Kõrge	[96], [94], [97]
				Iriidium : Kõrge	Iriidium: Kõrge	Kõrge	
				Titaan: Madal	Titaan: Madal	Madal	
		Voolukollektorite korrosioon ja juhtivuse vähenemine	Efektiivsus väheneb	Madal	Madal	Madal	[96], [94], [97]
		Ebapiisava puhtusega vesi	Seadme kahjustumine	Vähetähtis	Kõrge	Vähetähtis	[92]
	Lämmastiku tootmine	Kuna lämmastikku seotakse õhust, siis võivad hapnikku sisaldavad ühendid sattuda ammoniaagi sünteesi kontuuri	Ammoniaagi sünteesi katalüsaatorite mürgitamine, efektiivsus väheneb	Madal	Keskmine	Madal	[92]
	Ammoniaagi süntees	Nõuab kõrget temperatuuri ja rõhku	Suur energiakulu	Keskmine	Madal	Madal	[99]

	Ammoniaagi dehüdrogeenimine	Täieliku konversiooni saavutamiseks on vajalik kõrge temperatuur (üle 650° C). Katalüsaatorina oleks efektiivsem kasutada ruteeniumi, kuid kalli hinna tõttu kasutatakse koobalti-, nikli- ja rauapõhiseid katalüsaatoreid, mis nõuavad veelgi kõrgemaid temperatuure (900° C)	Suur energiakulu	Keskmine	Keskmine	Keskmine	[92], [100]
	Ammoniaagi hoiustamine ja transport	Ammoniaagi ülepaisumise ja lekkimise oht	Tulekahju, mõju inimeste elule ja tervisele	Madal	Kõrge	Keskmine	[124], [32]
		Taastuenergiaallikate kasutamisel on oluline roll puhvermahutite olemasolul, kuna ammoniaagi sünteesi keerukad kõrge survekompressoreid ja tundlikke katalüsaatoreid sisaldavad süsteemid vajavad statsionaarset protsessi	Häired ammoniaagi sünteesis	Kõrge	Keskmine	Kõrge	[32]
Ohutus	Gaasi paisumine	Lekkimine	Ammoniaak levib tuulega ning (olenevalt kogusest) avaldab mõju nii inimestele, taimedele kui loomadele	Vähetähtis	Kõrge	Vähetähtis	[124], [32]
	Toksilisus	Ammoniaagi piirnormid pikaajaliselt (8 tundi) on 20 ppm ehk 14 mg/m ³ ja lühiajaliselt (15 minutit) 50 ppm ehk 36 mg/m ³	Söövitav toime võib põhjustada tõsiseid nahapõletusi ja silmakahjustusi ning ägedaid hingamisteede ärritusi	Madal	Kõrge	Keskmine	[124], [32], [34], [33]
	Plahvatusoht	Alumine plahvatuspiir on 150 000 ppm	Mõju inimeste elule ja tervisele	Vähetähtis	Kõrge	Vähetähtis	[103], [32]

Lisa 10 Autonoomsete vesinikusõidukite riskianalüüsi tabel

Tabel 10.1 Autonoomsete autode kasutuselevõtuga seonduvad tehnoloogilised ja ohutusalsed barjäärid

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Töenäosus	Raskusaste	Riskitase	Viide
Tehnoloogilised riskid	Kütusepaak	Avarii korral vesinikupaagi purunemine ja vesiniku lekkimine suures ulatuses	Tulekahju ja plahvatus, mõju inimeste elule ja tervisele	Madal	Madal	Madal	[42], [41]
		Kütusepaagi materjali kahjustus (Tootmisvead, ülekoormus, vale käitlemine, vesiniku omandustest tingitud mõju metallile)	Vesiniku aeglane leke ja tulekahju teke	Madal	Kõrge	Keskmine	[60] [41]
		Kerged, kuid mehaaniliselt tugevad komposiitpaagid lagunevad termilise koormuse (tulekahju) korral	Lööklaine ja tulekera. Tõsised tagajärjed inimeste elule ja tervisele	Madal	Koos termilise kaitsega: Madal	Madal	[43]
					Ilma termilise kaitseta: Kõrge	Keskmine	
		Suur kütusepaagi maht (4x suurem kui bensiinipaak, et saada sama kogus energiat)		Kõrge	Madal	Keskmine	[40]
	PEM kütuseelement	Vesinik on kõrge reaktsioonivõimega ja põhjustab bipolaarsete plaatide korrosiooni	Pingelangus, efektiivsuse vähenemine	Madal	Madal	Madal	[51]
		Vajab väga puhast vesinikku, kuna CO adsorbeerub Pt- katalüsaatori pinnale ning vähendab selle aktiivsust	Kütuseelemendi efektiivsuse vähenemine	Vähetähtis	CO mõju katalüsaatorile: Madal	Vähetähtis	[48]
					Väavli (S) mõju katalüsaatorile: Kõrge	Vähetähtis	
	Molekulaarse vesiniku ja hapniku	Süttimine või plahvatus	Madal	Madal	Madal	[41]	

		kokkupuude katalüsaatori pinnal					
		PEM kütuseelementid es kasutatav Pt on haruldane väärismetall	Tarneraskused, keskkonnamõju	Madal	Keskmine	Madal	[118], [51]
	Infrastruktuur	Vesinikusõidukite kasutuselevõttuks on vajalik tanklate olemasolu, mille mahutite ja jaotamistehnoloogia on kallim võrreldes diisliga	Aeglustab vesinikuenergeetika implementeerimist	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[57]
	Hooldus	Kuna hooldust viiakse läbi sisetingimustes, siis lekke korral vesinik akumuleerub ruumis	Tulekahju/plahvatus	Madal	Keskmine	Madal	[49]
		Kvalifitseeritud personali ja rajatiste puudumine hooldustööde teostamiseks	Ebaprofessionaalne hooldus	Kõrge	Madal	Keskmine	[50]
Ohutus	Elektrisüsteem	Sisseehitatud kõrgepinge allikad	Elektrilöök	Madal	Kõrge	Keskmine	[50]
	Vesiniku mõju metallidele	Vesinikumolekulid võivad dissotsieeruda aatomvesinikuks, mis pikema aja jooksul võib põhjustada metalli haprumist ja purunemist	Mahutite purunemine, lekkimine	Madal	Keskmine	Madal	[57]
	Vesinik on kergelt süttiv	Madal aktivatsioonienenergia, põleb värvitult	Põlengute raskestuvastamine	Madal	Madal	Madal	[57]

	Vesiniku säilitamine kõrge rõhu all	Vesinik võib lekkida	Tulekahju teke	Madal	Keskmine	Madal	[60], [57]
--	-------------------------------------	----------------------	----------------	-------	----------	-------	---------------

Lisa 11 Riskianalüüsi tabel vesiniku kasutamisel tagavarageneraatori kütusena

Tabel 11.1 Vesiniku tehnnoloogilised ja ohutuse alased riskid, nende esinemise tõenäosus ja mõju suurus vesiniku kasutamisel sidevõrgu tagavaratoite generaatorite kütusena

Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Tõenäosus	Raskusaste	Riskitase	Viide
Tehnoloogilised riskid	PEM kütuseelement	Vesinik on kõrge reaktsioonivõimega ja põhjustab metalli korrosiooni (bipolaarsete plaatide korrosioon)	Pingelangus, efektiivsuse vähenemine	Madal	Madal	Madal	[51]
		Vajab väga puhast vesinikku, kuna CO adsorbeerub Pt-katalüsaatori pinnale ning vähendab selle aktiivsust	Kütuseelemendi efektiivsuse vähenemine	Vähetähtis	CO mõju katalüsaatorile: Madal	Vähetähtis	[48]
				Vähetähtis	Väevli (S) mõju katalüsaatorile: Kõrge	Vähetähtis	
		Molekulaarse vesiniku ja hapniku kokkupuude katalüsaatori pinnal	Süttimine/plahvatus	Madal	Madal	Madal	[41]
		PEM kütuseelemendi des kasutatav Pt on haruldane väärismetall	Tarneraskused, keskkonnamõju	Vähetähtis	Keskmine	Vähetähtis	[118], [51]
		Elektrolüüdi elektrilise kontakti kadumine. Ülelaadimine: vale laadija tsükli valik. Ülekuumenemine: kiire laadimine ja tühjenemine, kõrge välistemperatuur.	Elektroodide korrosioon	Vähetähtis	Vähetähtis	Vähetähtis	[47]
		Elektrilise isoleerkihi ja ioonidele vähem poorse kihi loomine aeglustab	Elektroodide sulfaatumine	Vähetähtis	Vähetähtis	Vähetähtis	[47]

		happe difusiooni					
Veeldatud vesiniku hoiustamine		Veeldatud LH2 puhul on temperatuur väga madal ja lekkimine võib põhjustada alajahtumist ja külmumist	Inimeste tervisekahjustused	Vähetähtis	Madal	Vähetähtis	[75]
		Kui paaki lekib õhk ja niiskus pääseb ligi, siis see võib tekitada jääd, kahjustades torusid ja ventiile	Seadmete kahjustused	Madal	Keskmine	Madal	[75]
		LH2 mahuti katastroofiline purunemine	Plahvatus, tulekahju	Vähetähtis	Kõrge	Vähetähtis	[71]
Gaasilise vesiniku hoiustamine		Vesinikku hoiustatakse kõrge rõhu all, tulekahju korral võib mahuti puruneda	Treilermahuti plahvatus, tulekera teke, inimeste tervisekahjustused	Ilma leevendavate meetmeteta: Kõrge	Ilma leevendavate meetmeteta: Kõrge	Kõrge	[73]
				Koos leevendavate meetmetega: Madal	Koos leevendavate meetmetega: Keskmine	Madal	[82]
Ohutus		Vesiniku leke	Tulekahju, plahvatus	Madal	Madal	Madal	[125]
	Vesinik on kergelt süttiv	Madal aktivatsioonienergia, põleb värvitult	Põlengute raskestuvastamine	Madal	Madal	Madal	[57]
	Vesiniku säilitamine kõrge rõhu all	Vesinik võib lekkida	Tulekahju teke	Madal	Keskmine	Madal	[60] [57]




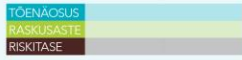
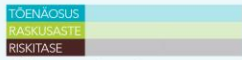
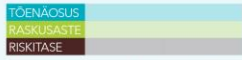
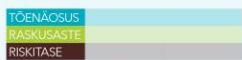


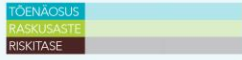
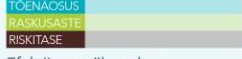

Lisa 12 Alternatiivsete vesinikutehnoloogiate riskianalüüsi tabel

Tabel 12.1 Alternatiivsete vesinikutehnoloogiatega seotud riskid



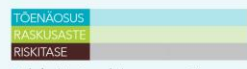







Valdkond	Tegur	Riskid	Tagajärjed	Töenäosus	Raskusaste	Riski-tase	Viide
Tootmine	Biomassi termokeemiline muundamine	Kõrge energiakulu	Madal efektiivsus	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[106]
		Gaasi puhastamine	Lisanduv energia ja kapitalikulu	Keskmine	Keskmine	Keskmine	[107]
		Saadava vesiniku madal kontsentratsioon	Madal efektiivsus	Keskmine	Keskmine	Keskmine	[106]
Salvestamine	LOHC	Dehüdrogeenimise energiakulu	Soojuskadu	Madal	Madal	Madal	[109]
		Täiendav komprimeerimise vajadus	Kõrgem hind	Madal	Madal	Madal	[109]
		Tarneahela keerukus	Ajakulu	Keskmine	Keskmine	Keskmine	[109]
	Adsorbeerituna tahke aine pinnale	Tankimise periood pikem	Vähene konkurentsivõime	Kõrge	Keskmine	Kõrge	[110]
		Dehüdrogeenimise energiakulu	Kõrgem hind	Madal	Madal	Madal	[110]
		Vesiniku massiprotsent on väike	Suur mahuti mass, väike efektiivsus	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[110]
		Ei sobi sõidukite kütusepaakideks	Kasutamine sõidukites piiratud	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[110]
	Transport	Uued vesinikutorustikud	Gaasijuhtme purunemine	Tulejuga, plahvatus	Madal	Kõrge	Keskmine
Vähene nõudlus vesinikutehnoloogiate rakendamise alusfaasis			Keeruline rakendada	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[111]
Kõrge hind				Kõrge	Kõrge	Kõrge	[111]
Kütuseelemendid	AEMFC	Ebasobiv veekäitlussüsteem	Lühike eluiga	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[113]
		CO ₂ mürgistus	Kütuseelemendi lagunemine	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[113]
	SOF C	Kõrge temperatuur	Aeglane käivitumine	Madal	Madal	Madal	[114]

		Nõudlus vastupidavate materjalide järele	Kõrgem hind	Keskmine	Keskmine	Keskmine	[114]
		Väävliga mürgistumine	Kütuseelemendi eluea vähenemine	Madal	Madal	Madal	[114]
	DMFC	Metanooli sattumine katoodkihile (läbi membraani)	Pingelangus ja efektiivsuse vähenemine, madal kasutegur (0.4)	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[115] [114]
		Protsessi käigus eraldub CO ₂	Keskonnamõjud	Keskmine	Keskmine	Keskmine	[115] [114]
Kasutamine transpordisektoris	Lennundus	Uute lennukite projekteerimine	Nõuab uute tehnoloogiliste lahenduste välja töötamist	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[116]
		LH2 mahutite suurem ruuminõue		Kõrge	Kõrge	Kõrge	[116]
		Infrastruktuuri rajamine lennujaamadesse	LH2 hoiustamise ruuminõudlus, võimalikud suuremad ohutuskaugused, LH2 veokitranspordi puhul suurenev liiklustihedus	Kõrge	Kõrge	Kõrge	[116]




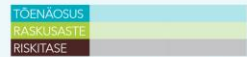


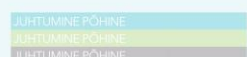

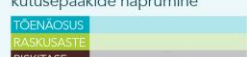

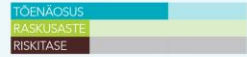



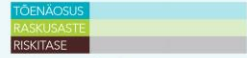
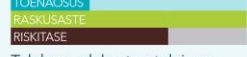

Lisa 13 Tehnoloogiliste riskide joonised

Valdkond	Pilootprojektid	Tehnoloogia	Riskid	Riskitase ja tagajärjed	
 <p>Vesiniku tootmine</p>	 <p>Ekspord ammoniaagina</p>  <p>Vesiniku kasutamine kahveltõstukite kütusena</p>	<p>Vee elektrolüüs AE elektrolüüseriga</p>	Elektrolüüdi lekkeprobleemid	 <p>Efektiivsus väheneb</p>	
			Suur takistuse soojuskadu	 <p>Efektiivsus väheneb</p>	
			Osalise koormuse korral väheneb tootlikkus, sagedase käivitamise ja erinevate sisendvõimsuste andmine on piiratud	 <p>Mõjutab gaasi puhtust ja süsteemi efektiivsust. Raske kohandada taastuvenergiaallikatega süsteemi</p>	
			Ülepinge, mis põhjustatud mullide tekkest elektroodide vahel	 <p>Efektiivsus väheneb</p>	
			<p>Vee elektrolüüs PEM elektrolüüseriga</p>	Haruldastest materjalidest valmistatud katalüsaator ning elektrolüüdi materjalid	<p>Plaatina</p>  <p>Iridium</p>  <p>Titaan</p>  <p>Tarneraskused, keskkonnamõju</p>
				Voolukollektorite korrosioon ja juhtivuse vähenemine	 <p>Efektiivsus väheneb</p>
	Ebapiisava puhtusega vesi	 <p>Seadme kahjustumine</p>			





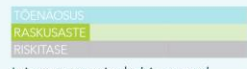


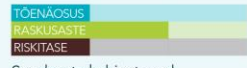




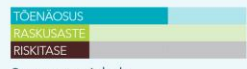

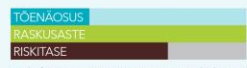

Joonis 13.1 Vesiniku tootmisega seonduvad tehnoloogilised riskid

Valdkond	Pilootprojektid	Tehnoloogia	Riskid	Riskitase ja tagajärjed	
 <p>Vesiniku sõidukid</p>	 <p>Vesiniku kasutamine linnaliinibusside kütusena</p>	<p>Kütusepaak</p> <p>Avari korral vesinikupaagi purunemine ja vesiniku lekkimine suures ulatuses</p> <p>Kütusepaagi materjali kahjustus (Tootmisvead, ülekoormus, vale käitlemine, vesiniku omandustest tingitud mõju metallile)</p> <p>Kerged, kuid mehaaniliselt tugevad komposiitpaagid lagunevad termilise koormuse (tulekahju) korral</p> <p>Suur kütusepaagi maht (4x suurem kui bensiinipaak, et saada sama kogus energiat)</p>	<p>Tulekahju ja plahvatus, mõju inimeste elule ja tervisele</p> <p>Vesiniku aeglane leke ja tulekahju teke</p>	 <p>Tulekahju ja plahvatus, mõju inimeste elule ja tervisele</p>	
	 <p>Vesiniku kasutamine väikesõidukite kütusena,</p>			 <p>Vesiniku kasutamine kahveltõstuki kütusena,</p>	 <p>Vesiniku aeglane leke ja tulekahju teke</p>
	 <p>Vesiniku kasutamine veoauto kütusena</p>			 <p>Vesiniku kasutamine rongide kütusena</p>	 <p>Lööklaine ja tulekera, tõsised tagajärjed inimeste elule ja tervisele</p>
	 <p>Vesiniku kasutamine laevade ja praamide kütusena</p>	<p>PEM kütuseelement</p> <p>Vesinik on kõrge reaktsioonivõimega ja põhjustab metalli korrosiooni (bipolaarsete plaatide korrosioon)</p> <p>Vajab väga puhat vesinikku, kuna CO adsorbeerub Pt-katalüsaatori pinnale ning vähendab selle aktiivsust</p> <p>Molekulaarse vesiniku ja hapniku kokkupuude katalüsaatori pinnal</p> <p>PEM kütuseelementides kasutatav Pt on haruldane väärismetall</p>	<p>Pingelangus, efektiivsuse vähenemine</p> <p>Kütuseelemendi efektiivsuse vähenemine</p> <p>Süttimine/plahvatus</p> <p>Tarneraskused, keskkonnamõju</p>		
		<p>Infrastruktuur</p> <p>Vesinikusõidukite kasutuselevõtuks on vajalik tanklate olemasolu, mille mahutite ja jaotamistehnoloogia on kallim võrreldes diisliga</p>	<p>Hooldus</p> <p>Kuna hooldust viiakse läbi sisetingimustes, siis lekke korral vesinik akumuleerub ruumis</p> <p>Kvalifitseeritud personali ja rajatiste puudumine hooldustööde teostamiseks</p>	<p>Tulekahju/plahvatus</p> <p>Ebaprofessionaalne hooldus</p>	

Joonis 13.2 Vesiniku sõidukitega seonduvad tehnoloogilised riskid












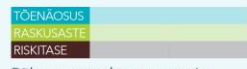

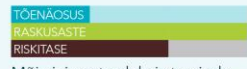



Valdkond	Pilootprojektid	Tehnoloogia	Riskid	Riskitase ja tagajärjed
 Vesiniku transport	 Vesiniku lisamine maagaasile  Vesiniku kasutamine sõiduautode kütusena (tanklad)	Vesiniku lisamine maagaasivõrku	Gaasituvatusseadmed ei ole piisavalt tundlikud maagaasi ja vesiniku segu suhtes	 Lekete tuvastamise keerulisem, kuna odorandid (merkaptaan), mida kasutatakse maagaasi tuvastamiseks, ei sobi vesiniku puhul kasutamiseks
			Vesinik võib põhjustada terasest maagaasijuhtme murenemist ja rabedust	 Lekkimine, Tulekahju
			Vesinik vajab võimsamaid kompressoreid	
			Hetkel on veel ebaselge, kui palju vesinikku võib maksimaalselt maagaasivõrku lisada ning tuleb läheneda juhtumipõhiselt	 Ühise reeglustiku puudumine
			CNG veokid pole projekteeritud töötamiseks üle 2% vol vesinikusisaldusega	 Tihendite lekked ja kütusepaakide haprumine
			Vesinikusegu madalam kütteväärtus võrreldes puhta metaaniga	 Sama koguse energia jaoks on vaja rohkem kütust
		Surugaasi transport	Mahuti võib sagedase dekomprimeerimise tõttu saada kahjustada	 Lekkimine
			Sobilik pigem lühemateks vedudeks, kuna vesiniku tihedus paagis on madal	 Korraga veetav vesiniku kogus on limiteeritud
			Vesiniku leke korrosiooni või välise mõjutuse tulemusel	 Tulekahju
			Liiklusõnnetuse korral mahuti purunemine	 Plahvatus
		Veeldatud vesiniku transport	Temperatuuri tõustes vesinik aurustub	 Tekivad kaod
			Veokitransport suurendab liiklustihedust	 Liiklusummikud
LH2 transpordihagise mahuti kahjustus	 Tulekera, plahvatus, tulejuga			
LH2 leke transpordihagise mahuti tühendamisel	 Plahvatus, Tulekahju			

Joonis 13.3 Vesiniku transpordiga seonduvad tehnoloogilised riskid
















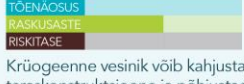

Valdkond	Pilootprojektid	Tehnoloogia	Riskid	Riskitase ja tagajärjed
 <p>Vesiniku salvestamine</p>	 <p>Vesiniku kasutamine sõiduautode kütusena</p>	<p>Surugaasi (CGH) hoiustamine</p>	<p>Vesiniku hoiustatakse kõrge rõhu all, tulekahju korral võib mahuti puruneda</p>	 <p>Treilermahuti plahvatus, tulekera teke, inimeste tervisekahjustused</p>
	 <p>Vesiniku eksport ammoniaagina</p>	<p>Veeldatud vesiniku (LH2) hoiustamine</p>	<p>Veeldatud LH2 puhul on temperatuur väga madal ja lekkimine võib põhjustada alajahtumist ja külmumist</p>	 <p>Inimeste tervisekahjustused</p>
	 <p>Vesiniku kasutamine kahveltõstukite kütusena</p>  <p>Vesiniku kasutamine sidevõrgu tagavaratoite kütusena</p>	<p>Veeldatud vesiniku (LH2) hoiustamine</p>	<p>Kui paaki lekib õhk ja niiskus pääseb ligi, siis see võib tekitada jääd, kahjustades torusid ja ventile</p> <p>LH2 mahuti katastroofiline purunemine</p>	 <p>Seadmete kahjustused</p>  <p>Plahvatus, Tulekahju</p>
 <p>Vesiniku kasutamine keemiatööstuses</p>	 <p>Vesiniku eksport ammoniaagina</p>	<p>Lämmastiku tootmine</p>	<p>Kuna lämmastikku seotakse õhust, siis võivad hapniku sisaldavad ühendid sattuda ammoniaagi sünteesi kontuuri</p>	 <p>Ammoniaagi sünteesi katalüsaatorite mürgitamine, efektiivsus väheneb</p>
	<p>Vesiniku eksport ammoniaagina</p>	<p>Ammoniaagi süntees</p>	<p>Nõuab kõrget temperatuuri ja rõhku</p>	 <p>Suur energiakulu</p>
	<p>Vesiniku eksport ammoniaagina</p>	<p>Ammoniaagi dehüdrogeenimine</p>	<p>Täieliku konversiooni saavutamiseks vajalik kõrge temperatuur (üle 650° C). Katalüsaatorina oleks efektiivseim kasutada ruteniumi, kuid kalli hinna tõttu kasutatakse koobalti-, nikli- ja rauapõhiseid katalüsaatoreid, mis nõuavad veelgi kõrgemaid temperatuure (900° C)</p>	 <p>Suur energiakulu</p>
	<p>Vesiniku eksport ammoniaagina</p>	<p>Ammoniaagi hoiustamine ja transport</p>	<p>Ammoniaagi ülepaisumise ja lekkimise oht</p> <p>Taastuenergiaallikate kasutamisel on oluline roll puhvermahutite olemasolul, kuna ammoniaagi sünteesi keerukad kõrgsurvekompressoreid ja tundlikke katalüsaatoreid sisaldavad süsteemid vajavad stantsionaarset protsessi</p>	 <p>Tulekahju, mõju inimeste elule ja tervisele</p>  <p>Häired ammoniaagi sünteesis</p>

Joonis 13.4 Vesiniku salvestamise ja keemiatööstuses kasutamise seonduvad tehnoloogilised riskid

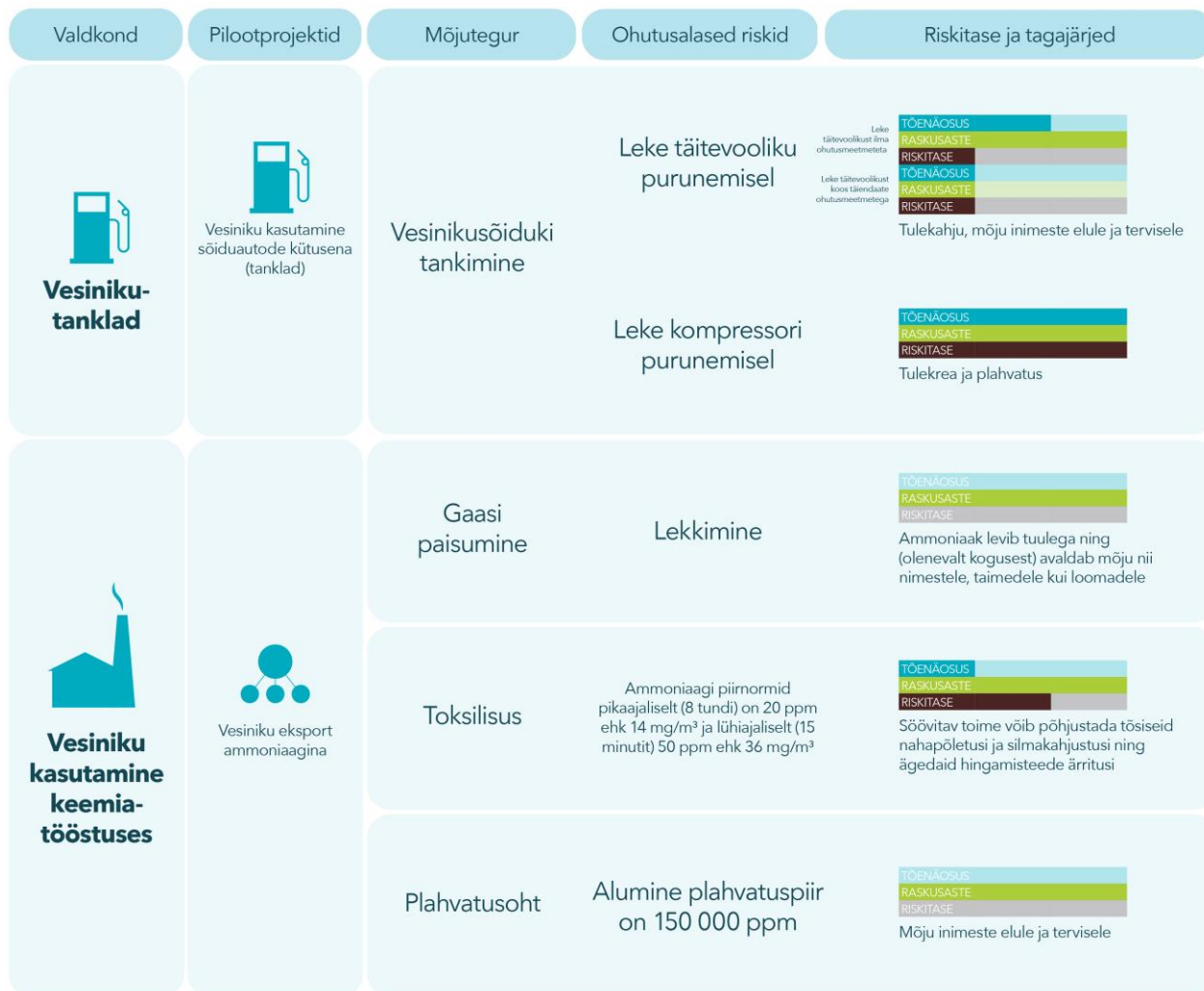
Lisa 14 Ohutusalaste riskide koondjoonised

Valdkond	Pilootprojektid	Mõjutegur	Ohutusalased riskid	Riskitase ja tagajärjed
 <p>Vesiniku tootmine</p>	 <p>Ekspord ammoniaagina</p>	<p>Vesiniku väikse-mõõtmeline molekul</p>	<p>Vesiniku lekkimine</p>	 <p>Tulekahju teke</p>
	 <p>Vesiniku kasutamine kahveltõstukite kütusena</p>			
 <p>Vesiniku sõidukid</p>	 <p>Vesiniku kasutamine linnaliinibusside kütusena</p>	<p>Elektrisüsteem</p>	<p>Sisseehitatud kõrgepingeallikad</p>	 <p>Elektrilöök</p>
	 <p>Vesiniku kasutamine väikesõidukite kütusena,</p>	<p>Vesiniku mõju metallidele</p>	<p>Vesinikumolekulid võivad dissotsieeruda aatomvesinikuks, mis pikema aja jooksul võib põhjustada metalli haprumist ja purunemist</p>	 <p>Mahutite purunemine, lekkimine</p>
	 <p>Vesiniku kasutamine kahveltõstuki kütusena,</p>	<p>Vesiniku kergelt süttivus</p>	<p>Madal aktivatsioonienergia, põleb värvitult</p>	 <p>Põlengute raske tuvastamine</p>
	 <p>Vesiniku kasutamine veoauto kütusena</p>	<p>Vesiniku kogunemine kinnisesse ruumi</p>	<p>Tulekahju- ja plahvatusoht</p>	 <p>Mõju inimeste elule ja tervisele</p>
	 <p>Vesiniku kasutamine rongide kütusena</p>	<p>Sisseehitatud kõrgepingeallikad</p>	<p>Elektrilöök</p>	
	 <p>Vesiniku kasutamine laevade ja praamide kütusena</p>			

Joonis 14.1 Vesiniku tootmise ja vesinikusõidukitega seonduvad ohutusalased riskid

Valdkond	Pilootprojektid	Mõjutegur	Ohutusalsed riskid	Riskitase ja tagajärjed
 <p>Vesniku transport</p>	 <p>Vesniku kasutamine sõiduautode kütusena (tanklad)</p>	Vesniku transport surugaasina	Vesniku leke korrosiooni või välise mõjutuse tulemusel	 <p>Tulekahju</p>
		Vesniku transport surugaasina	Liiklusõnnetuse korral mahuti purunemine	 <p>Plahvatus</p>
		Krüogeense vesniku transport	LH2 transpordih Haagise leke	 <p>Plahvatus, Tulekahju</p>
 <p>Vesniku sisestamine maagaasi võrku</p>	 <p>Vesniku lisamine maagaasile</p>	Vesinik on kergem kui maagaas ja see suurendab difusiooni ja lekkeohtu	Lekkimine	 <p>Tulekahju, plahvatus</p>
		Vesniku lisamine alandab segu süttimistemperatuuri	Süttimine	 <p>Tulekahju</p>
 <p>Vesniku salvestamine</p>	 <p>Vesniku kasutamine sõiduautode kütusena</p>  <p>Vesniku eksport ammoniaagina</p>  <p>Vesniku kasutamine kahveltõstukite kütusena</p>  <p>Vesniku kasutamine sidevõrgu tagavaratoite kütusena</p>	Vesniku säilitamine kõrge rõhu all	Lekkimine	 <p>Tulekahju</p>
		Veeldatud vesniku hoiustamine	Veeldatud vesniku leke	 <p>Krüogeenne vesinik võib kahjustada laeva teraskonstruktsioone ja põhjustada kahjustusi laeva kerele.</p>
		Veeldatud vesniku hoiustamine	Veeldatud vesniku lekkimisel tekkivad niisked aurupilved	 <p>Plahvatus, mõju inimeste elule ja tervisele</p>

Joonis 14.2 Vesniku transpordi, salvestamise ja maagaasivõrku sisestamisega seotud ohutusalsed riskid



Joonis 14.3 Vesiniku tanklate ja keemiatööstuses kasutamisega seonduvad ohtusalased riskid

Lisa 15 Tehnoloogilise valmiduse tasemed

TVT metoodika võeti esmakordselt kasutusele 1970. aastatel NASA poolt, et keerukate kosmoseprogrammide jaoks valida sobivaim tehnoloogia. Hiljem võeti see 9 astmeline tehnoloogilise valmiduse skaala kasutusele ka teiste ettevõtete ja organisatsioonide poolt [126].

Tabel 15.1 Tehnoloogilise valmiduse tasemed [127], [128]

Tehnoloogilise valmiduse tase	Selgitus
1	Põhiprintsiipide uurimine, teaduslike uuringute rakendamine arendustegevustes
2	Tehnoloogilise kontspetsiooni sõnastamine
3	Kontseptsiooni katseline tõestus, analüütiliste tulemuste kontrollimine laboratoorsete katsetustega
4	Tehnoloogia katsetamine laboris, tehnoloogilised komponendid toimivad, kuid neid tuleb edasi arendada
5	Tehnoloogia katsetamine asjakohases keskkonnas
6	Tehnoloogia edasine katsetamine reaalses keskkonnas, prototüüp on võrreldes TVT 5-iga teinud suure arengu edasi
7	Prototüübi kasutamine reaalses töökeskkonnas
8	Tehnoloogia on valmis kasutamiseks
9	Tehnoloogia toimivus on tõestatud töökeskkonnas ning valmis kommertsiaalseks kasutamiseks

