



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Miko Rantala

Vedyn infrastruktuuri

Tuotannon, siirron ja varastoinnin suunnittelu

Opinnäytetyö

Kevät 2024

Insinööri (AMK), Rakennustekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Rakennustekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Talonrakennustekniikka

Tekijä: Miko Rantala

Työn nimi alaotsikoineen: Vedyn infrastruktuuri: Tuotannon, siirron ja varastoinnin suunnittelu

Ohjaaja: Marita Viljanmaa

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 29

Liitteiden lukumäärä: 1

Työn tavoitteena oli kerätä tietoa vedyn tuotannon, siirron ja varastoinnin suunnitteluun. Työssä selvitettiin turvallisen suunnittelun vaatimia laskentakaavoja ja koottiin niistä Excel-laskentapohja, jolla voidaan määrittää tarvittavia suojaetäisyyksiä. Vihreä vety on tällä hetkellä paljon mediassa esillä ja tästä syystä opinnäytetyössä lähdettiin tutkimaan vihreän vedyn tuotannon, kuljetuksen ja jakelun suunnittelulähteitä.

Työn lähestymistapana oli etsiä ja tutkia vedyn tuotanto-, siirto- ja varastointitapoja sekä tarkastella laskentamallia, jolla on mahdollista selvittää katastrofaalinen vedyn varastosäiliön räjähtäminen ja siitä aiheutuvan lämpösäteilyn voimakkuus tutkittavalla etäisyydellä.

Työn tuloksena laadittiin Excel-pohja, jolla on mahdollista laskea lämpösäteilyn voima valitulla etäisyydellä. Tätä laskentaa pystytään hyödyntämään vedyn varastojen sijoittelun suunnittelussa.

¹ Asiasanat: vety, vihreä vety, vedyn varastointi.

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Bachelor of Engineering, Construction Engineering

Specialisation: Building Construction

Author/s: Miko Rantala

Title of thesis: Hydrogen Infrastructure: Designing Production, Transmission, and Storage

Supervisor(s): Marita Viljanmaa

Year: 2024

Number of pages: 29

Number of appendices: 1

The aim of the work is to gather information on the design of hydrogen production, transportation, and storage. The work investigates the calculation formulas required for safe design and compiles them into an Excel calculation template, which can be used to determine the necessary safety distances. Green hydrogen has a lot of media attention and for this reason, the thesis started to investigate the design criteria of green hydrogen production, transportation, and distribution.

The approach of the work is to search and study hydrogen production, transportation, and storage methods, and to examine a calculation model that makes it possible to investigate a catastrophic explosion of a hydrogen storage tank and the intensity of the resulting thermal radiation at the investigated distance.

As a result of the work, an Excel template has been created, which makes it possible to calculate the power of thermal radiation at a selected distance. This calculation can be utilized in the design of hydrogen storage locations.

¹ Keywords: Hydrogen, green hydrogen, Hydrogen storage.

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Käytetyt termit ja lyhenteet.....	6
1 JOHDANTO	8
1.1 Työn tausta ja tavoite	8
1.2 Työn tavoite.....	8
1.3 Työn rakenne	8
1.4 Yritysesittely	8
2 VETYTALOUS JA VIHREÄ VETY	9
2.1 Vedyn ominaisuuksia	9
2.2 Vetytalous	9
2.3 Vihreä vety	10
3 VEDYN TUOTANTOTAPOJA.....	12
3.1 Metaanin höyryreformointiprosessi.....	12
3.2 Hiilen kaasuttaminen	12
3.3 Elektrolyysi	12
3.3.1 Alkalinen elektrolyysi.....	13
3.3.2 PEM-elektrolyysi	13
3.3.3 Kiinteäoksidi-elektrolyysi	14
3.4 Tuotantolaitosten sijoittelu	14
3.5 Tuotantolaitoksen onnettomuusseurausanalyysi.....	14
4 VEDYN VARASTOINTI JA KULJETUS	17
4.1 Vedyn varastointi.....	17
4.1.1 Kaasumainen vety	17
4.1.2 Nestemäinen vety	18
4.1.3 Paineistettu nestemäinen vety	18
4.1.4 Hydridit.....	19

4.1.5	Muita vedyn kantajia	19
4.2	Vedyn siirto	19
4.2.1	Vedyn kuljetus konteissa, trailerissa tai pulloissa.....	19
4.2.2	Vedyn siirtoputkisto	20
4.3	Jakeluasema	20
4.3.1	Turvallisuus.....	21
4.3.2	Jakeluaseman sijoittelu	21
5	HÖYRYPILVIRÄJÄHDYS	23
5.1	Höyrypilviräjähdyksen mallinnus	23
5.2	Lämpövirran laskennan lähtöarvot	24
5.3	Lämpövirran laskennan kaavat.....	25
6	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	30
6.1	Pohdinta	30
6.2	Johtopäätökset.....	30
6.3	Merkittävimmät riskit ja kehitysehdotukset	31
	LÄHTEET	32
	LIITTEET	33

Käytetyt termit ja lyhenteet

Adsorptio	Jähmeiden kappaleiden kyky tiivistää tai kiinnittää pinnalleen nesteissä tai kaasuissa olevia aineita.
Alkuaine	Aine, jota ei kemiallisin keinoin voida hajottaa yksinkertaisempiin osiin.
Bentseeni	Yksinkertainen aromaatti, jota on eri raakaöljyissä vaihtelevia pitoisuuksia.
CFD-malli	Computational fluid dynamics (laskennallinen virtausdynamiikka).
Diffuusio	(1) Molekyyliden tai partikkelien siirtyminen nesteestä tai kaasusta laimeampaan suuntaan. (2) Atomien ja molekyyliden lämpöliikkeestä johtuva aineiden passiivinen sekoittuminen nesteessä, kaasussa tai jossakin muussa väliaineessa.
Ekvivalenssi	Samanarvoisuus.
Elektrolyysi	Aineen hajottaminen sähkövirran avulla kemiallisiksi komponenteiksi.
Fenomenologinen malli	Havaintokokemukseen perustuva malli.
Hiilijalanjälki	Tuotteen, toiminnan tai palvelun aiheuttamien kasvihuonekaasujen määrä tietyn ajanjakson aikana.
Kryotekniikka	Yhdistävä termi kaikille tekniikan sovelluksille, joissa toimitaan alle -150 °C lämpötilassa. Kryo-sanaa voidaan käyttää etuliitteenä, kun halutaan tuoda esiin, että kyseisessä sovelluksessa käytetään alhaisia lämpötiloja.
Lämpökapasiteetti	Lämpömäärä, jonka kappale pystyy sitomaan.
Lämpösäteily	Lämmön siirtyminen sähkömagneettisena säteilynä.

PEM-elektrolyysi	Polymeeri-elektrolyytti-membraani elektrolyysi.
Pistol liekki	L liekki, joka purkautuu suurella nopeudella määräsuuntaan.
Sykloalkaani	Hiilivety, jossa hiiliatomeista on muodostunut yksi tai useampi rengasrakenne.
Sykloheksaani	Kuuden hiiliatomin muodostama rengasrakenteinen sykloalkaani.
sykloheptatrieni	Rengasrakenteisiin sykloalkeeneihin kuuluva hiilivety.
VCE-malli	Vapor cloud explosion (höyrypilviräjähdys).
Vihreä vety	Uusiutuvalla energialla tuotettu vety.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoite

Vihreä vety on tällä hetkellä paljon mediassa esillä ja tästä syystä opinnäytetyön tekijä lähti selvittämään vihreän vedyn tuotannon, kuljetuksen ja jakelun suunnittelulähteitä. Työn tavoitteena on kerätä tietoa vedyn tuotannon, siirron ja jakeluasemien suunnitteluun. Työssä selvitetään turvallisen suunnittelun vaatimia laskentakaavoja ja kootaan niistä Excel-laskentapohja, jolla voidaan määrittää tarvittavia suojaetäisyyksiä.

1.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena on kerätä tietoa vedyn tuotannon, siirron ja jakeluasemien suunnitteluun. Työssä selvitetään turvallisen suunnittelun vaatimia laskentakaavoja ja kootaan niistä Excel-laskentapohja, jolla voidaan määrittää tarvittavia suojaetäisyyksiä.

1.3 Työn rakenne

Työn alussa käsitellään vetyä elementtinä ja vetytalouden sekä vihreän vedyn määritelmiä. Seuraavaksi on koottuna vedyn eri tuotanto-, siirto- ja jakelutapoja, sekä niihin liittyviä turvallisuusmääräyksiä. Lopuksi työssä esitellään laskentakaavat sekä -tavat. Näiden avulla on laadittu Excel-taulukko, jolla voidaan laskea lämpövirta valitulle etäisyydelle.

1.4 Yritysesittely

Tämä työ on tehty yhteistyössä Sitowise Oy:n kanssa (Sitowise Oy, i.a.). Sitowise Oy on infra- ja rakennussuunnittelun asiantuntijayritys, joka toimii ympäri Suomea. Sitowise Oy:llä on myös toimintaa ulkomailla Ruotsissa, Virossa ja Latviassa. Sitowise Oy panostaa kestävään kehitykseen.

2 VETYTALOUS JA VIHREÄ VETY

2.1 Vedyn ominaisuuksia

Vety on maailmankaikkeuden yleisin ja atomipainoltaan kevyin alkuaine (Greenwood & Earnshaw, 1997, s. 32) Vety on jaksollisen järjestelmän ensimmäinen alkuaine. Se on maapallon kuoren ja meren atomeista kolmanneksi yleisin hapen ja piin jälkeen kattaen 15,4 prosenttia kaikista atomeista. Vety on painon puolesta kymmenenneksi yleisin alkuaine maapallolla. Se on väritön ja hajuton kaasu, joka on lähes liukenematon veteen (Brun & Allison, 2022, s. 11).

Vedyn sulamispiste on -259,19 celsiusastetta ja kiehumispiste on -252,76 celsiusastetta (Brun & Allison, 2022, s. 11). Sillä on erittäin matala tiheys, mutta suuri lämpökapasiteetti massaa kohti. Vedyllä on korkea lämmönjohtavuus ja diffuusio. Se reagoi voimakkaasti ilman kanssa, minkä takia se on erittäin helposti palavaa. Vetykaasu on palavaa 4–75 prosentin seossuhteessa ilmassa ja 25 celsiusasteen lämpötilassa ja se on erittäin helposti syttyvää tietyissä seossuhteissa. Vedyn itsesytyminen tapahtuu 500–570 celsiusasteessa tästä syystä suuripaineinen vetyvuoto voi syttyä itsestään ja sitten aiheuttaa räjähdysten (mts. 12).

2.2 Vetytalous

Vetytaloudella viitataan tulevaisuuteen, jossa fossiilisten polttoaineiden sijasta käytetään vetyä päätoimisena energian kantajana (Brun & Allison 2022, s. 1). Vaikka vetyä voidaan valmistaa useilla eri tavoilla ja näiden tapojen hiilijalanjälki vaihtelee, vain uusiutuvan energian, kuten tuulisähkön tai aurinkosähkön avulla valmistettu vety on täysin hiilineutraalia vihreää vetyä. Muut vedyn valmistustavat tarvitsevat hiilenkeräyslaitteiston päästökseen lähelle hiilineutraaliutta.

Tällä hetkellä vetytalouden toimeenpanon suurimpana esteenä nähdään fossiilisten polttoaineiden edullisuus verrattuna vedyn valmistukseen elektrolyysillä (Brun & Allison, 2022, s. 2). Kustannusero vedyn ja hiilivety pohjaisten polttoaineiden välillä syntyy näiden energialähteiden valmistustavoista. Valmistettaessa vetyä elektrolyysillä ei koskaan voida saada

tuotetusta vedystä enemmän energiaa kuin mitä sen valmistukseen on käytetty. Hiilivety-pohjaiset polttoaineet taas perustuvat muinaisiin biologisiin prosesseihin, jotka ovat sitoneet energian näihin hiilivetyketjuihin. Tästä syystä näiden varastoima energia on käytännössä ilmaista, lukuun ottamatta löytämisen, kaivuun, jalostuksen ja jakelun kustannuksia. Näistä syistä vetytalous vaatisi toteutuakseen merkittävää poliittista ja lainsäädännöllistä tahtoa.

Kokeilu laajamittaisesta kokonaisjärjestelmästä on käynnissä Englannin luoteisosassa Merseysiden alueella HyNet-brändin alla (Folkson & Sapsford, 2022, s. 161). Tämä hanke tähtää vedyn tuottamiseen laajassa mittakaavassa teollisuuden, liikenteen ja lämmityksen tarpeisiin.

2.3 Vihreä vety

Kun vetyä valmistetaan fossiilisista polttoaineista tai elektrolyysillä käyttäen sähköä, joka on tuotettu fossiilisia polttoaineita käyttäen, niistä puhutaan ruskeana tai mustana vetynä (Folkson & Sapsford, 2022, s. 160). Musta vety on valmistettu kivihiiilestä kaasuttamalla. Ruskea vety taas viittaa kaikkiin muihin fossiilisia energianlähteitä hyödyntäviin valmistustapoihin. Vetyä valmistettaessa fossiilisista polttoaineista tai elektrolyysillä sähkön avulla, jota ei ole tuotettu uusiutuvilla energialähteillä, mutta ne yhdistetään hiilidioksidin ilmakehään pääsyn estäviin tai talteen ottamis- ja eristämisteknologioihin, viitataan niihin sinisenä vetynä. Vihreää vetyä valmistetaan elektrolyysillä, jonka sähkö on kokonaan tuotettu uusiutuvilla energiamuodoilla. Vihreällä vedyllä on merkittävästi pienempi ympäristöjalanjälki kuin sinisellä tai ruskealla vedyllä. Teknisinä haasteina vihreän vedyn tuotannossa on elektrolyysiprosessin tehokkuus ja elektrodien elinikäinen suorituskyky.

Vihreän vedyn käyttö liikenteen polttoaineena jakaa asiantuntijoiden mielipiteitä. Jotkut uskovat sen olevan pitkällä aikavälillä paras ratkaisu, kun taas toisten mielestä sen mahdollisuudet kilpailla akkusähköautoja vastaan ovat hyvin pienet (Folkson & Sapsford, 2022, s. 161). Vedyn varastointi ja jakelu vaativat kalliita investointeja infrastruktuuriin. Tämä on suurin haaste vedyn omaksumiselle liikenteen polttoaineena, kun vetykäyttöisiä kulkuneuvoja verrataan akkusähkö kulkuneuvoihin. Vihreä vety nähdään kuitenkin vaihtoehtona

luonnonkaasulle lämmityksessä ja teollisuuden prosesseissa, jotka ovat suuria hiilidioksidin lähteitä.

3 VEDYN TUOTANTOTAPOJA

3.1 Metaanin höyryreformointiprosessi

Metaanin höyryreformointi viittaa valmistustapaan, jossa maakaasu reagoi katalyytin kanssa korkeassa lämpötilassa tuottaen synteettistä kaasua (Brun & Allison, 2022, s. 31). Kaasureformoinnin toisessa vaiheessa, jota kutsutaan vesikaasusiirtymäksi, lisätään vedyn tuotantoa entisestään (mts. 32). Koko tämä prosessi vaatii useiden kaasuvirtojen siirtelyä ja paineistamista esimerkiksi kompressoreilla, kuten vedynkierrätyskompressori.

3.2 Hiilen kaasuttaminen

Maailmanlaajuisia hiilivarantoja on noin 200 vuodeksi (Folkson & Sapsford, 2022, s. 154). Hiili on edullinen polttoaine, mutta sen suuri hiilen suhde vetyyn tarkoittaa, että se vapauttaa suuria määriä hiilidioksidia ilmakehään. Toimenpiteitä hiilen hiilidioksidipäästöjen ehkäisemiseksi on tehty, mutta hiilidioksidipäästöjen merkittävä vähentäminen tarkoittaisi päästöjen talteenottoa ja eristämistä (mts. 155).

Vedyn tuotanto hiilestä vaatii useita kaasutusreaktioita, kuten vesikaasun konvertointireaktion ja kaasun erottamisen (Brun & Allison, 2022, s. 32).

3.3 Elektrolyysi

Elektrolyysissä vesi erottuu vedyksi ja hapeksi, kun sähkövirtaa johdetaan veteen (Folkson & Sapsford, 2022, s. 156). Elektrolysaattorit voidaan jakaa unipolaarisiksi ja bipolaarisiksi. Unipolaarisessa elektrolyysissä vesi on yhdessä säiliössä, jossa oleva elektrodit on erotettu kalvolla. Unipolaarisessa elektrolyysissä elektrodit on kytketty rinnakkain. Tämän takia unipolaariset elektrolyysilaitteet toimivat korkealla virralla ja matalalla jännitteellä. Bipolaarisissa elektrolyysilaitteissa elektrodit on erotettu eristeellä. Tämä mahdollistaa toisen elektrodin toimimisen katodina ja vastakkaisen elektrodin toimimisen anodina. Bipolaariset elektrolyysilaitteet on kytketty sarjaan, jolloin ne toimivat matalalla virralla ja korkealla jännitteellä.

Elektrolyysilaitteet luokitellaan myös tuotantoteknologioiden perusteella (Folkson & Sapsford, 2022, s. 156). Tällä hetkellä kehitys on keskittynyt kolmeen päätyyppiin: alkalinen, PEM (proton exchange membrane) ja kiinteäoksidielektrolyysi (SOEC, solid oxide electrolyser cells).

3.3.1 Alkalinen elektrolyysi

Alkalisessa elektrolyysissä tyypillisesti käytetään elektrolyytinä 30-painoprosenttista kaliumhydroksidi vesiliuosta (Folkson & Sapsford, 2022, s. 156–157). Kaliumhydroksidiliuoksella on korkea sähkönjohtavuus ja sillä minimoidaan happikehitysreaktion energiahukkaa. Elektrolyysilaitteeseen syötetään kaliumhydroksidiliuos yhdessä raaka-aineveden kanssa. Käyttölämpötila on tyypillisesti rajoitettu 100 celsiusasteeseen elektrodien korroosion välttämiseksi. Merkittävästi korkeammilla, jopa 400 celsiusasteen käyttölämpötilaa on myös tutkittu. Alkalisissa elektrolyysilaitteissa yleensä käytettävät elektrodimateriaalit ovat rauta, nikkeli ja nikkelimetalliseos, ja ne voivat olla konfiguroituna joko unipolaarisesti tai bipolaarisesti. Bipolaarisessa emäksisessä elektrolyysissä voi olla yli 100 kennoa pakattuna suodatinpuhdistusjärjestelyyn, jossa ne muodostavat pinon, jonka jokainen kenno saa vettä rinnakkain.

3.3.2 PEM-elektrolyysi

PEM-elektrolyysissä toisin kuin alkalisessa elektrolyysissä käytetään kiinteää ionijohtavaa kalvoa, joka erottaa elektrodit toisistaan ja kuljettaa protoneja anodilta katodille (Folkson & Sapsford, 2022, s. 157). PEM-elektrolyysiin syötetään vain puhdasta vettä. Sen kalvo on polymeerirakenne, johon on kiinnitetty sulfonihapporyhmiä, jotka mahdollistavat protonisiirron. Elektrodit valmistetaan tyypillisesti platinasta ja ruteniumista. Tätä elektrolyysimenetelmää on mahdollista tehostaa nostamalla käyttölämpötilaa, joka nopeuttaa kemiallisia reaktioita elektrodeilla. Tämä vähentää ylijännitettä ja tarvittavan sähköenergian määrää.

Kalvon on kuitenkin pysyttävä hydratoituneena, mikä rajoittaa käyttölämpötilan alle 100 celsiusasteeseen. Tutkimuksissa on päästy korkeampiin, noin 130 celsiusasteen lämpötiloihin. PEM-elektrolyysillä on monia etuja alkaliseen elektrolyysiin nähden, kuten tuotetun kaasun korkeampi puhtaus, alhaisempi energiankulutus, pienempi ekologinen jälki ja

järjestelmä on kokonaismitoiltaan pienempi. PEM-elektrolyysin veden puhtausvaatimukset ovat paljon korkeammat kuin alkalisen elektrolyysin menetelmällä.

3.3.3 Kiinteäoksidi-elektrolyysi

Kiinteäoksidi-elektrolyysilaitteet (SOEC) ovat herättäneet huomiota vedyn tuotantotekniikana sähköstä, koska ne toimivat noin 500–950 celsiusasteen käyttölämpötiloissa, mikä lisää reaktioita ja vähentää sähkönkulutusta (Folkson & Sapsford, 2022, s. 157). SOEC käyttää keraamista materiaalia elektrolyytinä. Tämä elektrolyytti siirtää selektiivisesti negatiivisesti varautuneita happi-ioneja anodille. SOEC-menetelmässä vesi hajoaa vedyksi ja happi-ioneiksi katodilla toisin kuin PEM-elektrolyysissä tai alkalisisessa elektrolyysissä. SOEC:n toiminnassa uusiutuvan energian lähteitä, kuten ydinvoimaa ja teollisuuden hukkalämpöä voidaan käyttää sähkön ja lämmön lähteinä. SOEC:t voivat toimia myös itselämittävässä tilassa.

3.4 Tuotantolaitosten sijoittelu

Tuotantolaitosten ja alueen toimintojen sijoittelussa on otettava huomioon ympärillä olevat muut toiminnot ja sijoittelulla on minimoitava mahdollisen onnettomuuden vaikutukset muulle toiminnalle tuotantolaitoksen läheisyydessä (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Tuotantolaitosten sijoittamisessa on otettava huomioon vedyn varastoinnissa ja siirrossa käytettävä paine. Paine vaikuttaa merkittävästi mahdollisen vuodon aiheuttamaan vahinkoon ja sen vaikutuksien laajuuteen. Varastointimäärä vaikuttaa myös merkittävästi onnettomuustilanteiden vakavuuteen. Turvallisen sijoittelun varmistamiseksi toiminnanharjoittajan on arvioitava tunnistamiensa onnettomuusskenaarioiden seurausvaikutuksia. Seurausvaikutuksia voidaan mallintaa tietokoneohjelmilla. Mallinnuksen tuloksilla esitetään vetyvuodon seurauksen vaikutuksen laajuus.

3.5 Tuotantolaitoksen onnettomuusseurausanalyysi

Pistoliekin pituus ja lämpösäteilyvaikutus kuvaa vetyvuodon syttyessä muodostuvaa liekinpituutta ja sen aiheuttamaa lämpösäteilyä. Ihmiselle turvallinen raja-arvo on 1,5 kW/m² ja pelastushenkilöstö pystyy toimimaan 3,0 kW/m² vaikutusalueella (Turvallisuus- ja

kemikaalivirasto, 2015). Suunnittelun lähtökohtana pidetään Valtioneuvoston asetusta vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista (856/2012). Asetuksen pykälässä 6 sanotaan lämpösäteilyn vaikutuksista seuraavasti:

Tuotantolaitos on sijoitettava sitä ympäröiviin rakennus- ja muihin kohteisiin nähden siten, ettei tuotantolaitoksessa tapahtuvasta, pykälässä 5 tarkoitetusta onnettomuudesta aiheudu sellaista lämpösäteilyä tuotantolaitoksen ulkopuolella oleviin kohteisiin, että:

- 1) sen vaikutuksesta rakennukset, laitteistot, rakenteet tai muut paloa levittävät kohteet voivat syttyä.
- 2) se voi estää ihmisten suojautumisen tai poistumisen lämpösäteilyn vaikutusalueelta rakennus- tai muissa kohteissa, joissa ihmisiä voi oleskella.
- 3) se voi aiheuttaa palovammoja ulkona oleville ihmisille kohteissa, joista poistuminen tai joiden tyhjentyminen voi onnettomuustilanteissa olla hidasta, kuten hoitolaitokset, majoitustilat, kokoontumis- ja liiketilat ja -alueet tai tiheästi asutut alueet.

Syttymättömän, mutta konsentraatioiltaan syttymiskelpoisen vetypilven koko liittyy vetyvuodon leviämiseen ennen kuin se syttyy.

Räjähdyksen lämpösäteily- ja painevaikutukset on otettava huomioon (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2015). Räjähdysonnettomuuksissa syntyy myös painevaikutuksia ja mahdollisesti heitteitä. Paineaaltoon vaikuttavat vetysäiliön paine, halkaisija ja tilavuus. Suunnittelussa tulee noudattaa valtioneuvoston asetuksen pykälää 7 vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista (856/2021) seuraavasti:

Tuotantolaitos on sijoitettava sitä ympäröiviin rakennus- ja muihin kohteisiin nähden siten, ettei tuotantolaitoksessa tapahtuvasta, pykälässä 5 tarkoitetusta onnettomuudesta aiheudu sellaisia painevaikutuksia, että seurauksena voi olla:

1. rakennusten tai rakenteiden sortuminen tai vaurioita muiden tuotantolaitosten laitteistoihin, varastoihin tai muihin rakenteisiin siinä määrin, että onnettomuus voisi laajeta;
2. pysyviä vammoja ihmisille alueella, jolla sijaitsee rakennuksia tai muita kohteita, joissa normaalisti voi olla ihmisiä.

Vaaroja arvioitaessa on otettava huomioon myös heitteistä sekä rakenteiden sortumisesta tai rikkoontumisesta aiheutuvat vaarat.

Paineaallon ylipaine on räjähdysten vahingoittava voima ja sitä mitataan kilopascaleissa (kPa) (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2015). 5 kPa on suuruusluokaltaan riittävä aiheuttamaan vammoja ja pieniä vaurioita rakennusten rakenteille. 15 kPa aiheuttaa pysyviä vammoja ja rakennusten osittaista sortumista. 30 kPa aiheuttaa rakennuksissa kantavien rakenteiden romahduksia ja riskinä on onnettomuuden laajeneminen.

Heitteet ovat ympäristöön sinkoutuvia kappaleita, jotka räjähdysten tuottama ylipaine on aiheuttanut (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2015). Heitteiden osuma-alueen ulkorajat riippuvat heitteiden lähtönopeuksista, -kulmista ja ilmanvastuksesta. Heitteiden osumakohdat ovat sattumanvaraisia.

4 VEDYN VARASTOINTI JA KULJETUS

4.1 Vedyn varastointi

Vety sisältää energiaa melkein kolme kertaa enemmän kuin bensiini tai kevyt polttoöljy (Säätö, 2023). Vedyn pieni tiheys heikentää sen energiasisältöä. Tämän takia vety varastoidaan korkeassa 200–700 baarin paineessa. Vetyä voidaan varastoida myös nestemäisenä jäädyttämällä se -253 celsiusasteeseen. Tämän jatkuvan jäähdystarpeen takia vedyn säilönnässä suositetaan korkeassa paineessa varastointia. 1 kilogramma vetyä tarvitsee normaalissa ilmanpaineessa ja lämpötilassa 11 kuutiometriä varastointitilaa (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Vetyä voidaan varastoida myös vetysohjona ja kiinteänä vetyynä. Vety esiintyy kiinteässä olomuodossa kolmoispisteessä, jossa lämpötila on -259,39 celsiusastetta ja paine 0,0704 baaria.

Vetyä voidaan varastoida eri kemiallisissa muodoissa riippuen siitä, mihin tarkoitukseen vetyä käytetään ja millaisia vaatimuksia varastoinnille on (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Näitä kemiallisia varastointitapoja ovat erilaiset hydridit, adsorbtiio, nestemäiset orgaaniset kantajat ja reformoidut orgaaniset polttoaineet.

4.1.1 Kaasumainen vety

Vedyn varastointipaineena käytetään 200–700 baaria (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Painesäiliöt ovat painelaitteita ja niitä koskee painelaitelainsäädäntö. Näissä säiliöissä käytetään kolmikerroksista rakennetta, jonka sisin rakenne on vetytiivis metallista, kestonmuovista tai pinnoitetusta komposiittimateriaalista valmistettu kerros. Toinen kerros on paineenkestävä ja lämpöä eristävä. Kolmas ja uloin kerros valmistetaan metallista tai hiilikuidusta. Säiliöt voidaan varastoida maanpäällisinä, jolloin niiden suojauksessa on otettava huomioon sääilmiöt ja fyysiset vauriot. Säiliöiden sääsuojat on suunniteltava siten, ettei vetyä pääse vuototilanteessa kertymään katoksen alle. Säiliöitä voidaan varastoida myös maapeitteen alla säästäten tilaa, mutta maapeite hankaloittaa säiliön tarkistamista ja mahdollisten vuotojen havaitsemista.

Vetysäiliöt jaetaan neljään eri tyyppiin (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto 2024):

- Tyypin I säiliöt ovat yksinkertaisesti valmistettuja ja edullisia täysin metallisia painesäiliöitä. Näiden maksimipaine on 200 baaria.
- Tyypin II säiliöt ovat kevyempiä ja samalla suurempia paineita kestäviä. Näitä ovat alumiini-lasikuiturakenne, joka kestää 260 baaria, sekä teräs-hiilikuiturakenne, joka kestää 300 baaria. Lasi- ja hiilikuitusäikeiden tehtävänä on vahvistaa säiliön seinämiä, että metallikerroksesta saadaan ohuempi täten keventäen säiliötä tyypin I säiliöihin verrattuna.
- Tyypin III säiliöiden sisällä on hyvin ohut metallinen tai alumiininen pinnoite. Näiden säiliöiden paineen kesto tulee täysin ulkokuoren komposiittimateriaalista. Käytettyjä komposiittimateriaaleja näissä säiliöissä ovat lasikuitu, aromaattinen polymeeri tai hiilikuitu. Maksimipaineet ovat alumiini-lasikuiturakenteella 300 baaria, alumiini-aromaattisella polymeerirakenteella 430 baaria ja teräs-hiilikuiturakenteella 700 baaria.
- Tyypin IV säiliöiden sisäkerros on pinnoitettua komposiittimateriaalia. Ulkokerros valmistetaan hiilikuidun ja kestumuovin seoksesta. Nämä säiliöt ovat noin 70 prosenttia kevyempiä kuin tyypin I säiliöt.

4.1.2 Nestemäinen vety

Nestemäinen vety on hyvä varastointivaihtoehto, kun täytyy pystyä varastoimaan suuria määriä vetyä. Sitä käytetään myös avaruustekniikassa ja liikkuvissa ja lentoteknisissä sovelluksissa (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Nestemäisen vedyn etuja ovat tilansäästö ja vedyn korkea puhtausaste. Nestemäinen vety varastoidaan matalassa alle 5 baarin paineessa. Nestemäisen vedyn varastosäiliön ja muiden siihen liittyvien laitteistojen täytyy kestää erittäin suuria lämpötilaeroja nestemäisen vedyn lämpötilan -253 celsiusastetta ja ympäristön lämpötilan välillä. Näin alhaisissa lämpötiloissa vety voi haurastuttaa ja läpäistä monia materiaaleja.

4.1.3 Paineistettu nestemäinen vety

Vetyä voidaan varastoida ilman faasimuutosta, kun se varastoidaan vedyn kriittistä pistettä korkeammassa paineessa (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Paineistetulla

nestemäisellä vedyllä on korkea varastointitiheys ja sillä on vähemmän höyrystymishäviötä. Paineistettu nestemäinen vety vaatii paljon energiaa vedyn puristukseen ja jäädytykseen.

4.1.4 Hydridit

Hydrideillä viitataan vetyyn, joka on varastoitu metalli-, kompleksi-, siirtymämetalli- tai kemiallisina hydrideinä (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Hydrideinä varastoitu vety on turvallista ja stabiilia. vapautettaessa vety hydridistä se vaatii lämpöä ja voi muodostaa syttyviä sivutuotteita. varastointikapasiteetti hydrideillä on heikompi kuin muilla varastointimenetelmillä. Hydrideillä on termodynaamisia ja kineettisiä rajoitteita.

4.1.5 Muita vedyn kantajia

Muita vedyn kantajia ovat erilaiset nestemäiset orgaaniset vedynkantajat, adsorboitu vety ja reformoidut polttoaineet (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Orgaanisia vedynkantajia ovat muun muassa bentseeni tai sykloheksaani ja sykloheptatrieni tai sykloheptaani. Adsorboitu vety on suuren pinta-alan omaava materiaali, johon vety on fysikaalisesti sidottu. Reformoidut polttoaineet vaativat usein hiilen lähteen. Reformoituja polttoaineita ovat muun muassa ammoniakki ja metanoli.

4.2 Vedyn siirto

4.2.1 Vedyn kuljetus konteissa, trailerissa tai pulloissa

Vetyä voidaan kuljettaa rekoilla, junilla ja laivoilla joko nestemäisenä tai kaasuna (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Kaasuna vetyä kuljetetaan kaasupullokonteissa tai putki-perävaunuissa. Näiden säiliöiden paine on tyypillisesti 180–640 baaria. Nestemäisenä vetyä voidaan kuljettaa kerrallaan 300–4000 kilogrammaa. Nestemäisen vedyn kuljetus vaatii kryogeenisen säiliön.

4.2.2 Vedyn siirtoputkisto

Vedyn siirtoputkistoille on haettava rakentamislupaa Tukesilta (Turvallisuus ja kemikaalivirasto, 2024). Laitosalueiden ulkopuoliset siirtoputkistot eivät kuulu painelaitedirektiivin soveltamisalaan. Siirtoputkistolle tulee nimetä putkiston vastuuhenkilö. Vastuuhenkilö huolehtii siitä, että putkistoa käytettäessä toimitaan säädösten, rakentamislupaehtojen ja toiminnanharjoittajan laatimien toimintaperiaatteiden mukaisesti. Siirtoputkistoja voidaan rakentaa maalle, merenpohjalle ja ilmaan putkisilloilla. Siirtoputkien paine voi vaihdella muutamasta baarista kymmeneen baareihin. Vedylle ei ole lainsäädännössä määriteltyä termiä jakeluputkistoille, joten kaikki laitosalueiden ulkopuoliset putkistot ovat siirtoputkistoja.

Vedyn tiheys on $0,09 \text{ g/dm}^3$, mistä johtuen se vuotaa herkästi huonosti tehdyistä liitoksista ja joissain tapauksissa myös putken läpi (Säätö, 2023). Vety haurastuttaa seostettuja teräksiä diffuntoituneen vedyn seurauksesta. Diffuntoituminen tapahtuu, kun vetymolekyylit kerääntyvät teräksen huokosiin aiheuttaen paineen nousua huokosissa ja lopulta teräksen murtumisen.

4.3 Jakeluasema

Jakeluaseman sijoittelussa on otettava huomioon onnettomuuksien mahdollisuus (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Jakeluasemilla vety säilötään korkeassa paineessa ja tankkaus kaasumaisella vedyllä perustuu paine-eroon jakeluaseman varaston ja vastaanottavan ajoneuvon vetytankin välillä. Pääkomponentit jakeluasemassa ovat vedyn varastosäiliöt, kompressori, korkeapainevarasto, esijäähdytysjärjestelmä ja tankkauspiste. Tankkausasemalla vety siirretään kompressorilla varastosäiliöstä korkeapainevarastoon, josta se esijäähdytyksen jälkeen siirretään paine-eroa hyväksikäyttäen tankkauspisteen kautta ajoneuvon vetytankkiin.

4.3.1 Turvallisuus

Tankkausaseman ja ajoneuvon välillä on oltava automaatioyhteys, joka rajoittaa tankkausnopeutta, mikäli ajoneuvon vetytankin lämpötila nousee liian korkeaksi (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Turvallisuuden ja tankkauksen onnistumisen varmistamiseksi aseman toimintaa on välttämätöntä valvoa erilaisin mittauksin. Tärkeitä mittauksia ovat vedyn puhtaus, lämpötila, paine ja virtaus. Turvalaitteita ja -toimintoja ovat eri laitteiden väliset eristysventtiilit ja turva-automatiikka, joka sulkee venttiilit vuotojen sattuessa rajoittaen onnettomuuksien seurauksia.

Jakeluasemilla turvallisuuden kannalta kriittisiä tapahtumia ovat tankkaustapahtuma ja varastokontin vaihto (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Nämä tapahtumat ovat todennäköisimpiä vuodon aiheuttajia. Kuluttajien toiminnasta aiheutuvia riskejä ovat muun muassa se, jos auton kuljettaja unohtaa tankkausletkun kiinni autoon liikkeelle lähtiessään. Tätä ehkäistään auton ja tankkausaseman välisellä kommunikaatiolla ja automatiikalla, joka estää auton käynnistämisen, mikäli tankkausletku on yhä kiinni autossa. Automatiikan on myös varmistettava tankkausletkun tiiveys ennen varsinaista tankkauksen aloitusta. Automatiikasta huolimatta on tankkausletkut tarkistettava säännöllisesti.

Muita huomioitavia turvallisuustekijöitä ovat kiinteästi asennetut paineistetun kaasun varastot, jotka valmistetaan ja tarkastetaan painelaitesäädösten mukaisesti CE-merkittynä (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Vedyn määrän mittauslaitteiston tulee olla tyyppi- hyväksytty ja varmennettu ennen käyttöönottoa. Varmennuksen tekee hyväksytty tarkastuslaitos. Suljetuissa tiloissa, kuten kompressorikontti on oltava kaasunilmaisimet, jotka laukaisevat automaattiset turvatoimet, kuten hätätuuletuksen ja venttiilien sulkemisen. Katoksissa on vältettävä vedyn kerääntymisen mahdollistavia syvennyksiä.

4.3.2 Jakeluaseman sijoittelu

Sijoittelun suunnittelussa on ehkäistävä ja minimoitava mahdollisten onnettomuuksien vaikutukset jakeluaseman läheisyydessä oleville muille toiminnoille (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2024). Sijoittelussa on otettava huomioon niin sanotut herkätkohteet, kuten hoitolaitokset, koulut, päiväkodit, liikekeskukset ja jakeluaseman alueella olevat mahdolliset

myymälät, autopesulat ja autohuoltamot. Sijoittelun suunnittelussa huomioidaan samoja asioita kuin vedyn tuotantolaitoksien sijoittelussa.

5 HÖYRYPILVIRÄJÄHDYS

5.1 Höyrypilviräjähdyksen mallinnus

Räjähdyksiä mallinnetaan käyttäen VCE-malleja (Jiang, Liu & Kim, 2010). Nämä mallit voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

1. Numeeriset mallit
2. Fenomenologiset mallit
3. Korrelaatiomallit

Useimmat numeeriset mallit käyttävät laskennallista virtausdynamiikkaa CFD. Tällaiset mallit on suunniteltu tuottamaan numeerisia vastauksia ratkomalla osittaisdifferentiaaliyhtälöitä (Jiang, Liu & Kim, 2010). Yhtälöiden numeerinen ratkaiseminen iteratiivisella menetelmällä kaikille muuttujille ja näiden toistaminen jokaiselle aika-askelelle on laskennallisesti raskasta ja voi vaatia paljon laskenta-aikaa.

Fenomenologisia malleja kutsutaan myös fyysisiksi malleiksi (Jiang, Liu & Kim, 2010). Nämä mallit ovat yksinkertaistettuja malleja, joilla pyritään mallintamaan höyrypilviräjähdyksen fysikaalisen prosessin idealisoidun geometrian ja empiirisen korrelaation perusteella. Tämän tapaiset mallit ovat yksinkertaistaneet räjähdysprosessia ja tämä voi vaikuttaa ennustetarkkuuteen.

Korrelaatiomalleja kutsutaan myös empiirisiksi malleiksi tai skaalauslakimalleiksi. Ne on kehitetty kokeellisten tulosten perusteella (Jiang, Liu & Kim, 2010). Tämän tyyppisiin malleihin kuuluu muun muassa TNT-ekvivalenssimalli, joka on vanhin höyrypilviräjähdyksiin käytetty malli. Tässä mallissa oletetaan, että räjähdyksestä vapautuva energia vastaa TNT-massaa.

Tässä työssä selvitetään suuronnettomuustilanteessa tarvittavia kaavoja. Nämä kaavat perustuvat Standardissa SFS 3350:2016 mainittuun Methods for the calculation of physical effects - Yellow book:in kaavoihin ja laskentatapaan.

5.2 Lämpövirran laskennan lähtöarvot

Kirjassa (van der Bosch & Weterings, 2005) annetuissa laskentaesimerkeissä on kaavoja sovellettu nestemäiseen propaaniin. Tässä työssä nämä propaanin arvot on muutettu vastaaviin vedyn arvoihin. Näissä laskelmissa oletetaan, että säiliö on täynnä ja kaikki sen sisältämä vety syttyy palamaan räjähdysmäisesti.

Exceliin tehdyssä esimerkkilaskennassa on säiliön kooksi määritetty 100 kuutiometriä ja täyttöasteeksi 100 prosenttia. Säiliössä vety on 300 baarin paineessa ja ympäristön lämpötila on 20 celsiusastetta.

Laskentaan tarvittavat arvot:

– Vedyn moolimassa (M_{vety})	1,008 g/mol
– Säiliön tilavuus (V)	100 m ³
– Säiliön paine ($P_{\text{säiliö}}$)	300 bar
– Etäisyys tulipallosta (x_{bleve})	200 m
– Ympäristön lämpötila (T_{ambient})	20 °C (293,15 K)
– Kaasuvakio (R_c)	8,3145 J/(mol*K)
– Säiliön täyttöaste desimaalilukuna (f)	1,00
– Vedyn höyrypainne (P_{sw})	3*10 ⁵ N/m ²
– Vedyn palamislämpö kiehumispisteessä (ΔH_c)	1,419*10 ⁸ J/kg
– Vedyn höyrystymislämpö sen kiehumispisteessä (ΔH_v)	4,47*10 ⁵ J/kg
– Ominaislämpö (C_p)	14310 J/kg*K
– Tulen ja ympäristön lämpömuutos (ΔT)	1306,85 K

Yksikkömuunnokset: Muutetaan moolimassa g/mol muotoon kg/mol seuraavasti:

1,008/1000 = 0,001008 kg/mol. Muutetaan paine baarista Pascaleiksi seuraavasti:

300*100 000 = 30 000 000 Pa

5.3 Lämpövirran laskennan kaavat

Säiliön sisältämän kaasun massa määritetään kaavalla 1 (van der Bosch & Weterings, 2005).

$$m = \frac{m_{\text{vety}} * P_{\text{säiliö}}}{R_c * T_{\text{ambien}} * V} * f \quad (1)$$

Missä

m on säiliön sisältämän vedyn kokonaismassa

m_{vety} on vedyn moolimassa

$P_{\text{säiliö}}$ on säiliön paine

R_c on kaasuvakio

T_{ambien} on ympäristön lämpötila

V on säiliön tilavuus

Kaasun massan aiheuttaman tulipallon säde määritetään kaavalla

$$r_{fb} = 3,24 * m^{0,325} \quad (2)$$

Missä

r_{fb} on tulipallon säde

m on säiliön sisältämän kaasun massa

Tulipallon palamisaika määritetään kaavalla

$$t = 0,852 * m^{0,26} \quad (3)$$

Missä

t on tulipallon palamisaika

m on säiliön sisältämän kaasun massa

Tulipallon nousukorkeus maasta määritetään kaavalla

$$H_{bleve} = 2 * r_{fb} \quad (4)$$

Missä

H_{bleve} on tulipallon nousukorkeus

r_{fb} on tulipallon säde

Määritetään etäisyys tulipallon keskeltä laskettavalle etäisyydelle kaavalla

$$X = (x_{bleve}^2 + H_{bleve}^2)^{1/2} \quad (5)$$

Missä

X on etäisyys tulipallon keskeltä valittuun etäisyyteen

x_{bleve} on mittausetäisyys

H_{bleve} on tulipallon korkeus maasta

Määritetään maksimi view-kerroin matkalle X kaavalla

$$F_{view} = (r_{fb}/X)^2 \quad (6)$$

Missä

F_{view} on view-kerroin

r_{fb} on tulipallon säde

X on etäisyys tulipallon keskeltä valittuun etäisyyteen

Määritetään tulipallon tuottaman lämmön fraktio kaavalla

$$F_s = 0,00325 * (P_{sw})^{0,32} \quad (7)$$

Missä

F_s on tulipallon tuottaman lämmön fraktio

P_{sw} on vedyn höyrypaine

Lasketaan palamiselle käytössä oleva lämpö (ΔH)

$$\Delta H = \Delta H_c - \Delta H_v - C_p * \Delta T \quad (8)$$

Missä

ΔH on lämpö, joka on käytettävissä lämpösäteilyyn

ΔH_c on vedyn palamislämpö kiehumispisteessä

ΔH_v on vedyn höyrystymislämpö kiehumispisteessä

C_p on vedyn ominaislämpö

ΔT on tulen ja ilman lämpötilaero

Määritetään tulipallon pinnan säteilyvoima. Tässä kaavassa oletetaan, ettei palossa muodostu nokea, jolloin $SEP_{act} = SEP_{max}$

$$SEP_{act} = \frac{\Delta H * m * F_s}{4 * \pi * r_{fb}^2 * t} \quad (9)$$

Missä

SEP_{act} on tulipallon pinnan säteilyvoima

m on säiliön sisältämän kaasun massa

F_s on tulipallon tuottaman lämmön fraktio

r_{fb} on tulipallon säde

t on tulipallon palamisaika

Määritetään etäisyys tulipallon pinnasta kaavalla

$$x = X - r_{fb} \quad (10)$$

Missä

x on etäisyys tulipallon pinnasta

X on etäisyys tulipallon keskeltä valittuun etäisyyteen

r_{fb} on tulipallon säde

Määritetään veden osittainen höyrynpaine ympäristön lämpötilassa ja ilmankosteudessa kaavoilla

$$p_w = RH * p_w^0 \quad (11)$$

$$p_w * x \quad (12)$$

Missä

p_w on veden osittainen höyrynpaine

RH on ilman kosteusprosentti

x on etäisyys tulipallon pinnasta

Määritetään ilmakehän läpäisevyys käyttämällä yksinkertaistettua kaavaa, koska kaavan 12 tulos oli väliltä $10 \cdot 10^4 - 10 \cdot 10^5$ (van der Bosch & Weterings, 2005).

$$\tau_a = c_7 * (p_w * x)^{-0,09} \quad (13)$$

Missä

τ_a on Ilmakehän läpäisevyys

p_w on veden osittainen höyrynpaine

x on etäisyys tulipallon pinnasta

c_7 saadaan kaavasta:

$$c_7 = 2,02 \left(\frac{N}{m^2} \right)^{0,09} * m^{0,09} \quad (14)$$

Missä

m on säiliön sisältämän kaasun massa

Määritetään lämpövirta valitulle etäisyydelle kaavalla.

$$q'' = SEP_{act} * F_{view} * \tau_a \quad (15)$$

Missä

q'' on lämpövirta valitulla etäisyydellä

SEP_{act} on tulipallon pinnan säteilyvoima

F_{view} on view-kerroin

T_a on ilmakehän läpäisevyys

Tämän esimerkin tulokseksi saadaan $3,71 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{s}$. Tämä tarkoittaisi, että pelastushenkilöstö ei välttämättä pystyisi toimimaan 200 metriä lähempänä kohdetta, mikäli tällainen onnettomuus tapahtuisi. Excel-laskelma löytyy liitteestä 1.

6 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Pohdinta

Vety on energian kantajana erinomainen vaihtoehto nykyisten fossiilisten polttoaineiden korvaajaksi. Akkusähkökulkuneuvojen lisäksi vetykäyttöiset kulkuneuvot edistävät siirtymistä pois fossiilisista polttoaineista. Akkusähkökäyttöiset raskaat ajoneuvot ovat tällä hetkellä harvinaisia ja varsinkin pitkien matkojen liikennöinnissä epäkäytännöllisiä. Raskaslääkenteen ajoneuvo olisi mahdollista tankata hyvin lyhyessä ajassa vedyllä ja nykyiset ajoneuvoihin tarkoitetut vetysäiliöt ovat hyvin kestäviä onnettomuustilanteissa. Vetytaloudella olisi mahdollista ratkaista tämän hetken ongelmia ilmastonmuutoksen suhteen.

Vetyhankkeita aloittaessa voidaan hyvällä sijainnin valinnalla ja suunnittelulla ehkäistä kalliita turvarakenteita, kuten sumuverhot tai suojaseinät. Näillä kustannuksilla voi olla merkittäviä vaikutuksia mahdollisten vetyhankkeiden toteutumiseen. On tärkeää huomioida mahdolliset onnettomuudet, vaikka ne olisivatkin hyvin epätodennäköisiä, koska vedyn sisältämän energian määrä on merkittävä onnettomuuden tapahtuessa. Vedyn varastoinnin haasteena on tarvittava suuri varastointipaine tai erittäin alhainen lämpötila. Nämä aiheuttavat onnettomuustilanteessa merkittäviä riskejä.

6.2 Johtopäätökset

Nykyteknologialla olisi mahdollista irtautua fossiilisista polttoaineista lähes täysin. Irtautuminen fossiilisista polttoaineista vaatisi suurta poliittista tahtotilaa ja erittäin merkittäviä investointeja vety- ja akkusähköteknologioihin. Irtautuminen fossiilisista polttoaineista tarkoittaisi myös valtion omavaraisuuden kasvamista, kun kotimaassa tuotettu vety korvaisi ulkomailta tulevat fossiiliset polttoaineet.

Turvallisuus on yksi tärkeimmistä vedyn varastoinnin suunnittelun lähtökohdista. Onnettomuus voi aiheutua kaluston kulumisen, väärinkäytön tai tahallisen vahingonteon seurauksena. Näistä syistä on tärkeää, että turvaetäisyydet otetaan suunnittelussa huomioon ja tahallisen vahingonteon riskiä pyritään pienentämään. Onnettomuudesta aiheutuvat vahingot voivat olla mittavia paitsi tuotantolaitokselle myös sen läheisyydessä oleville muille

toimijoille. Mikäli vety liikenteen polttoaineena yleistyisi, olisi tarpeen kiinnittää erityistä huomiota vedyn jakeluasemien turvallisuuteen.

6.3 Merkittävimmät riskit ja kehitysehdotukset

Merkittäväksi riskiksi tunnistettiin tässä työssä laaditun laskentatavan käyttäminen ilman tarvittavaa taustatietoa kaavoista ja niiden laskentaperiaatteista. Tämän työn esimerkkilaskelmaa ei tule käyttää sellaisenaan ainoana turvaetäisyyden määritelmänä. Olemassa olevien maksullisten CFD-ohjelmien käyttöä suositellaan.

Kehitysehdotuksena tämän työn laskentakaavojen tueksi olisi hyvä tarkastella höyrypilviräjähdyksestä aiheutuvan paineaallon vaikutuksia. Tämän työn laskentakaavoissa ilmankäntä läpäisevyys on laskettu yksinkertaistetulla menetelmällä, ja se ei sovellu kaikkiin tapauksiin.

LÄHTEET

- Brun, K., & Allison, T. C. (2022). *Machinery and Energy Systems for the Hydrogen Economy*. Elsevier.
- Folkson, R., & Sapsford, S. (2022). *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance - Towards Zero Carbon Transportation* (2. p.)
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2. p.). Butterworth-Heinemann.
- Jiang, J., & Liu, Z. & Kim, A.. (2010). *Comparison of blast prediction models for vapor cloud explosion*. [Nanjing University of Chemical Technology]. Researchgate. https://www.researchgate.net/publication/44059870_Comparison_of_blast_prediction_models_for_vapor_cloud_explosion
- Motiva. (2023). Vety. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/va-litse auto viisaasti/energialahteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/va-litse_auto_viisaasti/energialahteet/vety)
- Sitowise Oy(i.a.). *The Smart City Company*. <https://www.sitowise.com/fi/smart-city-company>
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2019). *Palavien kemikaalien tuotantolaitos; Combustible Chemicals Production Plant* (SFS 3353:2019).
- Säätö. (2023). Vety. <https://saato.fi/vety/>
- Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. (2015). *Tuotantolaitosten sijoittaminen*. <https://tukes.fi/documents/5470659/6406815/Tuotantolaitosten+sijoittaminen/ab664564-66f7-49b7-96bb-316dfefe4517/Tuotantolaitosten+sijoittaminen.pdf>
- Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. (2024). *Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus*. <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#vedyn-varastointi>
- Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista 856/2012. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120856#Pidm46651396423904>
- Van der Bosch, C. J. H. & Weterings, R. A. P. M. (2005). *Yellow book: Methods for the calculation of physical effects: Due to release of hazardous materials (liquids and gases)*. (3. p.). (alkuperäinen toes julkaistu 1997)

LIITTEET

Liite 1. Laskentataulukko

Liite 1. Laskentataulukko

Suojaetäisyyden laskentataulukko

Varaston tilavuus (V)	100	Varaston sisällön paino (m)	1240,668485
Täyttöaste (f)	1	Tulipallon halkaisija (r_{fb})	32,8082548
Varaston paine (Psäiliö)	300	Tulipallon paloaika (t)	5,436251323
Lämpötila (Tambient)	20	Tulipallon korkeus (H_{bleve})	65,6165096
Etäisyys räjähdyksestä (x_{bleve})	200	Etäisyys tulipallon keskeltä (X)	210,4887796
Vedyn höyrynpaine (Psw)	30000	Maksimaalinen näkyvyysfraktio (F_{view})	0,024294522
Vedyn moolimassa (Mvety)	1,008	Lämpösäteilyn fraktio (F_s)	0,088016108
Yleinen kaasuvakio (Rc)	8,314462618	Saatavilla oleva lämpö palamiseen ja säteilyyn (ΔH)	122741783,07
Vedyn palamislämpö (ΔH_c)	141900000,00	Pintaemissioteho ($SEP_{act}=SEP_{max}$)	210729,17
Vedyn höyrystymislämpö (ΔH_v)	447000	Todellinen etäisyys tulipallon pinnasta (x)	177,6805248
Vedyn lämpökapasiteetti (Cp)	14317,80	Veden osittainen höyrynpaine (p_w)	511,77
Vedyn palon lämpötila (K)	1600	$p_w \cdot x$	90932,04
pii	3,141592654	c_7	2,022602971
Ilmankosteus	0,3	Ilmakehän läpäisykyky (τ_a)	0,72
Veden höyrynpaine	1705,91	Lämpövirta valitulla etäisyydellä (q'') (kW/m ²)	3,705605088
hiilidioksidin höyrynpaine	30,3975		
Lämpötilaero (ΔT)	1306,85		