



Vetyhaurauden vaikutukset painesäiliöihin

Kuvaileva kirjallisuuskatsaus

Janne Viitanen

Opinnäytetyö, AMK

Maaliskuu 2026

Konetekniikan tutkinto-ohjelma



jamk

Viitanen Janne

Vetyhaurauden vaikutukset painesäiliöihin. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Maaliskuu 2026**, 55 sivua

Konetekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Vetyteknologioiden yleistymisen ja vetytalouden kehittyminen olivat lisänneet tarvetta tarkastella vetyrasitukselle altistuvien painelaitteiden rakenteellista kestävyyttä. Yhtenä keskeisenä ilmiönä oli vetyhaurastuminen, joka vaikuttaa merkittävästi painelaitteiden turvallisuuteen ja elinkaareen.

Opinnäytetyön kirjoittamishetkellä ei ollut kattavaa selvitystä lämmittämättömien painesäiliöiden standardeissa, kuinka huomioida vetyhaurauden tuomat vaatimukset. Työn tavoitteena oli tuoda esiin, mitä uutta tutkimustietoa oli vetyhaurauden suhteen lämmittämättömissä painesäiliöissä hyödyntäen tietoperustasta saatua tietoa ja suuntaa.

Työ toteutettiin kuvailevana kirjallisuuskatsauksena, jossa tutkittiin ulkomaalaisia tutkimuksia, julkaisuja ja tietoja painelaitteissa vetyhaurauden näkökulmasta. Tulosten avulla pyrittiin vastaamaan tutkimuskysymyksiin ja antamaan johtopäätökset sekä jatkotutkimusehdotuksia.

Lopputuloksena saatiin katsaus, jossa käsiteltiin tuoreita tutkimuksia vetyhaurauden vaikutuksista, testaamisesta ja ehkäisystä. Katsauksen tuoreen tiedon avulla voitiin saavuttaa perusymmärrystä aihepiirien luoman kokonaisuuden tilanteesta. Johtopäätöksissä todettiin kehityksen nopea tahti, tutkimusten merkittävyys ja standardisoinnin hankaluus.

Avainsanat (asiasanat)

Vety, vetytalous, hauraus, painelaitteet, säiliöt, standardit, standardointi, kehitys

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Viitanen Janne

**Effects of hydrogen embrittlement on pressure vessels
A narrative literature review**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, March 2026, 55 pages

Bachelor'Degree Programme in mechanical engineering. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The thesis was commissioned by Jyväskylä University of Applied Sciences. The increased widespread use of hydrogen technologies and the development of the hydrogen economy raised the need to examine the structural durability of pressure equipment exposed to hydrogen stress. One of the key phenomena was hydrogen embrittlement, which significantly affects the safety and life cycle of pressure equipment.

At the time of writing the thesis, there was no comprehensive explanation in the standards for unheated pressure vessels of how to consider the requirements of hydrogen embrittlement. The aim of the work was to highlight what new research information there was regarding hydrogen embrittlement in unheated pressure vessels, utilizing the information and direction obtained from the knowledge base.

The work was carried out as a narrative literature review, which examined foreign studies, publications and information in pressure equipment from the perspective of hydrogen embrittlement. The results were used to answer the research questions and provide conclusions and suggestions for further research.

The final result was a review that discussed recent studies on the effects, testing and prevention of hydrogen embrittlement. The review's fresh information provided a basic understanding of the state of the subject area. The conclusions noted the rapid pace of development, the significance of the studies and the difficulty of standardization.

Keywords/tags (subjects)

Hydrogen, hydrogen economy, brittleness, pressure equipment, containers, standards, standardization, development

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Johdanto | 3 |
| 2 | Vety ja vetyhauraus | 4 |
| 2.1 | Vety | 4 |
| 2.2 | Vetyhauraus | 4 |
| 2.2.1 | Muut vedyn vaikutukset | 6 |
| 3 | Painelaite | 6 |
| 3.1 | Suunnittelu ja valmistus | 7 |
| 3.1.1 | Painelaitteiden luokittelu | 9 |
| 4 | Standardisointi | 12 |
| 4.1.1 | Standardisointi kansainvälisesti (ISO) | 13 |
| 4.1.2 | Standardisointi Euroopassa (CEN/EN) | 13 |
| 4.1.3 | Standardisointi Suomessa (SFS) | 14 |
| 5 | SFS-EN 13445:2021 Lämmittämättömät painesäiliöt | 15 |
| 5.1 | Vedyn huomiointi EN 13445 | 15 |
| 5.2 | Vedyn huomiointi ja testaus painelaiteteräkset EN 10028 | 17 |
| 5.2.1 | EN 10229:1998 terästuotteiden vetyhalkeilualttiuden tutkiminen | 17 |
| 6 | Vetyteknologioiden ja standardisoinnin kartoitus | 18 |
| 6.1 | Hydrogen Pipelines-Design and Material Challenges and Mitigations | 18 |
| 6.2 | Steel components in the hydrogen economy | 18 |
| 6.3 | ECH2A | 19 |
| 6.4 | Standardization roadmap Hydrogen technologies 2024 & 2025 | 19 |
| 6.4.1 | Tiekartta 2024 | 20 |
| 6.4.2 | Tiekartta 2025 | 20 |
| 7 | Tietoperustan yhteenveto | 21 |
| 8 | Toteutus | 21 |
| 8.1 | Kuvaileva kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä | 21 |
| 8.2 | Aineiston hankinta | 22 |
| 8.3 | Haun valinnat ja tulokset | 23 |
| 8.4 | Aineiston laadun arviointi | 25 |
| 8.5 | Aineiston analyysi | 25 |
| 9 | Tulokset | 26 |
| 9.1 | Vetyhaurauden testaaminen | 26 |
| 9.2 | Materiaalin valinta | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 9.3 Optimoitu suunnittelu ja vetyhaurauden ehkäisy | 32 |
| 10 Pohdinta..... | 35 |
| 10.1 Tutkimuksen luotettavuus | 35 |
| 10.2 Tutkimuksen eettisyys..... | 36 |
| 10.3 Johtopäätökset..... | 36 |
| 10.4 Jatkotutkimusehdotukset..... | 38 |
| Lähteet | 39 |
| Liitteet | 44 |
| Liite 1. Kirjallisuuskatsauksessa käytetyt lähteet | 44 |
| Liite 2. Kirjallisuuskatsauksen valittujen aineistojen laadunarviointi | 47 |
| | |
| Kuviot | |
| | |
| Kuvio 1. Esimerkki painesäiliöstä | 7 |
| Kuvio 2. Esimerkki putkistosta | 7 |
| Kuvio 3. Painelaitteiden luokittelu | 9 |
| Kuvio 4. CLP-aineluettelo | 10 |
| Kuvio 5. Esimerkki luokittelu taulukko säiliöille, joissa on sisältönä ryhmän 1 kaasu | 11 |
| Kuvio 6. Painelaiteluokat ja niiden moduulit | 12 |
| Kuvio 7. Standardin tunnus | 14 |
| Kuvio 8. SALS-kehys | 22 |
| Kuvio 9. SUS316L-teräksen testaus tulos..... | 27 |
| Kuvio 10. SUS316L-teräksen testauksen ilmiöt | 28 |
| Kuvio 11. SUS304L-teräkselle tehdyn testin ilmiöt | 29 |
| Kuvio 12. SUS316L-teräksen onton kappaleen murtumispinta | 29 |
| Kuvio 13. Vedyn vaikutusten muuntuminen eri rasituksessa ja vetypitoisuudessa | 30 |
| Kuvio 14. Vedyn vaikutus Alloy 25 SSRT-testituloksiin | 32 |
| Kuvio 15. Vesihöyryn lisäämisen vaikutus halkeaman kasvuun paineistetussa vedyssä | 33 |
| Kuvio 16. Kuormituskohtia vedyn vaikutuksesta painesäiliössä..... | 34 |

1 Johdanto

Vetyteknologioiden yleistyminen ja vetytalouden kehittyminen ovat lisänneet tarvetta tarkastella entistä kriittisemmin vetyrasitukselle altistuvien laitteiden, erityisesti painelaitteiden rakenteellista kestävyyttä. Yhtenä keskeisenä ilmiönä on vetyhaurastuminen, joka voi heikentää yleisesti painelaitteissa käytettyjen terästen mekaanisia ominaisuuksia kuten sitkeyttä ja voi siten vaikuttaa merkittävästi painelaitteiden turvallisuuteen ja elinkaareen. Vedyn käyttöön liittyvä standardointi ja materiaalivalinta ovat keskeisiä tekijöitä vetyteknologioiden kehityksessä kansainvälisesti. (Hiiliteräsputki soveltuu vedyn siirtoon reunaehdot huomioiden 2024.)

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä ei ole kattavaa selvitystä lämmittämättömien painesäiliöiden standardeissa, kuinka vetyhaurauden vaikutukset otetaan huomioon. Tästä syystä toimeksiantajalla on tarve syventää tietopohjaansa ja arvioida, miten vetyyn liittyvät ilmiöt painelaitteissa voitaisiin huomioida tulevaisuuden hankkeissa. Työn aiheen liittyessä vetyyn ja tekniikkaan, se koskettaa kestävän kehityksen suhteen Agenda 2030-ohjelman 17 tavoitteesta tavoitetta 7.2, jossa pyritään lisätä vuoteen 2030 mennessä merkittävästi uusiutuvan energian osuutta maailmanlaajuisesti (Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all n.d). Aihe koskettaa myös tavoitetta 9.4, jossa infrastruktuuria pitää päivittää ja ottaa käyttöön enemmän puhtaita ja ympäristöystävällisiä teknologioita ja teollisia prosesseja (Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation n.d).

Opinnäytetyö on kuvaileva kirjallisuuskatsaus, joka tarkastelee pääosin ulkomaalaisia tutkimuksia, julkaisuja, tietoja ja standardeja painelaitteissa vetyhaurauden näkökulmasta. Työn tavoitteena on vastata valitun tutkimusmetodin avulla tutkimuskysymyksiin ja luoda kokonaisvaltaista ymmärrystä aihepiirien kokonaisuudesta.

Opinnäytetyössä keskitytään seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

-Mitä uutta tutkimustietoa on vetyhaurauden suhteen painesäiliöissä?

-Miten kerättyä tietoa voidaan soveltaa lämmittämättömien painesäiliöiden suunnittelun, materiaalivalinnan ja standardien kehittämisen tueksi?

Työn rakenne aloitetaan tietoperustasta ja sen yhteenvedosta. Tietoperustan luomisen pohjana hyödynnettiin painelaitesuunnittelu ja -lainsäädäntö kurssilta saatua tietoa. Alustavaa tietoa vetyyn ja vetyhaurastumiseen painelaitteissa kerättiin Neil Gallonin kirjallisuuskatsauksesta, joka sisällytettiin myös varsinaiseen tietoperustaan. Tietoperustan rakenteen hahmottuessa tiedonhakua kohdennettiin tietylle rakennekohdalle soveltuvaksi. Lähteiden etsintä oli luonteeltaan vapaamuotoista tietoperustalle, jossa aikaisempi tieto ja tutut lähteet tukivat uusien lähteiden valikointia. Tietoperustan jälkeen käydään läpi katsauksen toteutus, aineiston hankinta ja aineiston analyysi. Aineiston analyysia seuraa katsauksen tulokset ja työn lopuksi pohdinta.

2 Vety ja vetyhauraus

2.1 Vety

Vety on alkuaine, joka esiintyy kaasuna ja muiden aineiden yhdisteisiin sitoutuneena. Se on omassa molekyyli muodossaan (H_2) hajuton ja väritön, vuotaa materiaaleista herkästi ja on syttyvää. Vetyä voidaan käyttää energian lähteenä, energian kuljettajana tai petrokemian tuotteissa. Yleisimmissä vedyn tuotantomenetelmissä vety valmistetaan maakaasusta tai vedestä eri erotusmenetelmiä hyödyntäen. Vetyä voidaan kuljettaa eri ratkaisuin maalla ja merellä, joista putkistot ja säiliöt ovat yleisimpiä. Vetyä voidaan varastoida fysikaalisesti (kaasu ja neste) ja kemiallisesti (vetyä sisältäviä aineita, kuten hydridit ja orgaaniset kantajat). Paineistetun kaasumaisen vedyn varastointi vaatii korkeita 200–700 bar paineita, minkä vuoksi varastointiin tehtyjä säiliöitä koskee painelainsäädäntö. Vetyä voidaan säilöä neljän eri tyyppin säiliössä, jotka voivat erota toisistaan rakenteeltaan, materiaaliltaan ja maksimipaineiltaan. (Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus 2024.)

2.2 Vetyhauraus

Vedyn heikentävät vaikutukset rautaan ja teräkseen on tunnettu pitkään, sillä vedyn vaikutukset havaittiin vuonna 1874 ja seuraavana vuonna tieto julkistettiin. Vetyhauraus voidaan määritellä vedyn aiheuttamaksi useimpien metallisten materiaalien ja seosten mekaanisten ominaisuuksien

heikkenemiseksi ja ne voivat ilmetä reilusti materiaalin myötölujuuden alapuolella. Yleisimpiä ilmiötä on materiaalin sitkeyden ja vetolujuuden heikentyminen, mikä yleensä johtaa myös murtumiskestävyyden heikkenemiseen. (Gavriliuk, Shyvaniuk, & Teus 2022; Djukic, Bakic, Zeravcic, Sedmak, & Rajicic 2016,944; Lee & Woods 2016.)

Vetyaltistukseen ei välttämättä tarvita puhdasta vetykaasua, vaan vetyä sisältävä aine tai ympäristö riittää vetyhaurastumisen muodostumiseen. Vetyhauraus voidaan tästä syystä jakaa kahteen tyyppiin sen lähteen mukaan: sisäinen vetyhaurastuminen, joka johtuu metallin sisältämästä vedystä ja vety-ympäristöhaurastuminen, jossa vety on peräisin ympäristöstä. Sisäistä vetyä voi syntyä materiaalin valmistusprosesseissa, kuten sulatuksessa ja hitsauksessa ja ulkoista vetyä korroosiosta, vetykaasusta tai happamista ympäristöistä. (Djukic ym. 2016, 944; Li, Ma, Zhang, Akiyama, Wang & Song 2020; Lee & Woods 2016.)

Metallien vetyvauriot vetyhaurastumisesta jaetaan palautuviin ja palautumattomiin vaurioihin, jossa palautumiskykyisessä vetyhaurastumisessa vetyatomit siirtyvät ja kerääntyvät mahdollisiin halkeilukohtiin, mikä johtaa seosten viivästyneeseen murtumiseen. Korkeapaineisen vetykaasun tapauksessa vedyn liukeneminen teräkseen käsittää kolme vaihetta. Ensimmäinen vaihe on fysikaalinen imeytyminen kiinteälle pinnalle. Toinen vaihe on vedyn kemiallinen imeytyminen, joka on palautumatonta, ja kolmannessa vaiheessa kemiallisen imeytymisen jälkeen vetyatomit diffundoituvat materiaalin rakenteeseen. (Li ym. 2020.)

Monia mekanismeja vetyhaurauden suhteen on ehdotettu ja niiden ymmärrys on kehittyneiden laitteiden avulla siirtynyt mikrokaavasta nanokaavaan ja parantuneen mikrorakenteellisen ymmärryksen sekä murtumapinnan havainnoinnin perusteella on ehdotettu eri mekanismien synergististä vaikutusta. (Li ym. 2020.) Teräksissä murtuman siirtyminen sitkeästä hauras murtumaan vedyn vaikutuksesta on edelleen ilmiö, jota ei ole vielä riittävästi tutkittu ja selvitetty. Erimielisyyksiä ja mielipiteitä vedyn aiheuttaman haurastumisen luonteesta, laukaisijasta ja mekanismeista esiintyy kirjallisuudessa ja olemassa olevat vetyhauraus mekanismit pätevät vain tietyille materiaaleille tietyissä sovelluksissa, eikä yhtenäistä mekanismia kaikille materiaaleille ole vielä kehitetty. (Djukic ym. 2016, 949; Li ym. 2020.)

Vetyhaurastumisen estämistä voidaan lähestyä kahdella lähestymistavalla. Ulkoisessa estämisessä pintakäsittelyjen käyttö, mihin kuuluu pinnoitus ja pinnanmuokkauskäsittelyt. Sisäisessä estämisessä hyödynnetään materiaalin mikrorakenteen muokkaamista, jossa lisätään tai poistetaan seosaineita ja -tai parannetaan materiaalin mikrorakennetta. Martensiittisellä mikrorakenteella on suurin herkkyys vetyhauraudelle ja austeniittisellä vastaavasti matalin. Austeniittisessä mikrorakenteessa on tärkeää sen muoto ja stabilointi. (Li ym. 2020.)

2.2.1 Muut vedyn vaikutukset

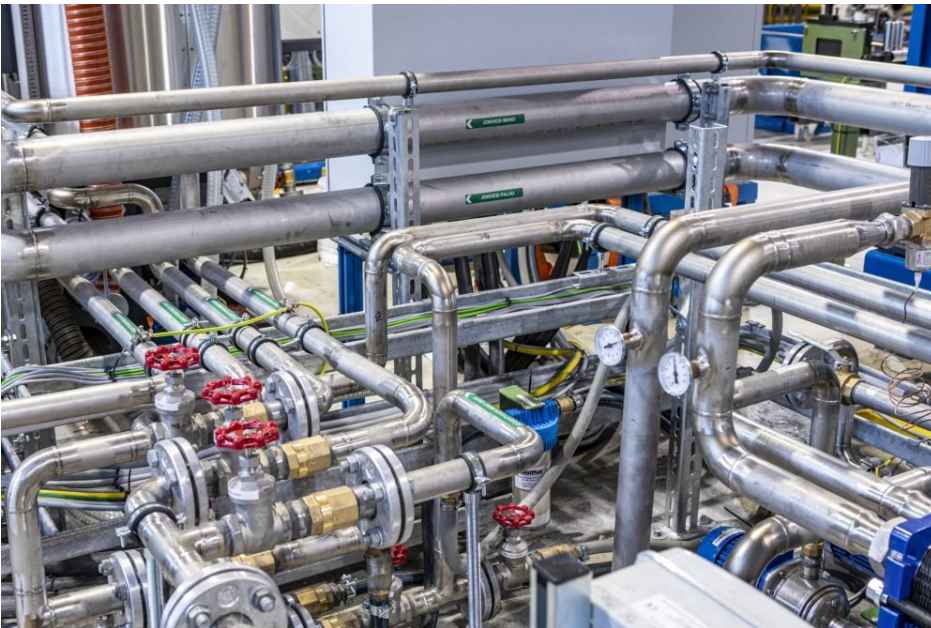
Vetyvaurio on yleisnimitys metallien hajoamisprosesseille ja erilaisille mekanismeille, jotka syntyvät vedyn vaikutuksesta. Vaurioihin kuuluu hajoamisprosesseja, materiaalien mikrorakenteellisia muutoksia ja muita materiaalin reaktioita vetyyn. Vetyhaurauden lisäksi vetyvaurioita ovat vedyn aiheuttama halkeilu (HIC), vetyjännityshalkeilu (HSC), ja korkean lämpötilan vetyhyökkäys (HTHA). (Djukic ym. 2016.)

3 Painelaite

Painelaitteita ovat esimerkiksi erikokoiset ja muotoiset painesäiliöt, höyry- ja kuumavesikattilat sekä moniin eri tarkoituksiin kuuluvat putkistot, joita hyödynnetään laajasti yhteiskunnan eri osaluilla kuten teollisuudessa ja kotitalouksissa (Painelaitteet n.d). Painelaitteissa säiliöllä tarkoitetaan paineenalaista sisältöä varten suunniteltua ja valmistettua kuorta, jossa voi olla yksi tai useampi kammio, lisäksi säiliön rakenteeseen lasketaan mukaan muiden laitteiden liitoskohtaan asti yltävät kiinteät liitoskappaleet. (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d 5.2.) Koska painelaitteiden käyttöön liittyy riski henkilö-, ympäristö- tai omaisuusvahinkoihin, on painelaitteita säädetty painelaitelaila, jonka tavoitteena on varmistaa painelaitteiden turvallisuus niiden elinkaarelle. Painelaitteiden yhdenmukainen suunnittelu ja valmistus on varmistettu ”painelaitedirektiivillä, yksinkertaiset painesäiliöt -direktiivillä ja aerosolidirektiivillä”. Käytössä olevien painelaitteiden käytöstä säädetään myös kansallisesti esimerkiksi tarkastusvelvoitteilla. (Painelaitteet n.d.) Kuviossa 1 on esitettyä painesäiliö, josta hahmottuu sen mahdollinen muoto, asettelu ja muut mahdolliset rakenteelliset ominaisuudet kuten yhteet. Kuviossa 2 on esitettyä paineellisten putkistojen kokonaisuus, josta hahmottuu niiden mahdollinen sijoittelu ja muut komponentit kuten venttiilit ja painemittarit.



Kuvio 1. Esimerkki painesäiliöstä (img__pressure-vessels--11.jpg. n.d).



Kuvio 2. Esimerkki putkistosta (Image 12 of 13. n.d).

3.1 Suunnittelu ja valmistus

Painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien valmistajalla on vaatimustenmukaisuuden varmistamisen suurin vastuu. Painelaitteiden lainsäädäntö velvoittaa vaatimustenmukaisuuden varmistamiseen myös maahantuojien ja jakelijoiden osallistumista. Painelaitelain (1144/2016) sisältöön kuuluu pai-

nelaitteiden suunnitteluun, valmistukseen ja käyttöön kuuluvat säännökset ja valtioneuvoston asetukseen painelaitteista (1548/2016) sisältöön kuuluu 2014/68/EU (PED) painelaitedirektiivin ”tekniset vaatimukset painelaitteiden ja laitekokonaisuuksien suunnittelusta, valmistuksesta ja vaatimustenmukaisuuden arvioinnista”. Kyseistä asetusta sovelletaan painelaitteisiin ja laitekokonaisuuksiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 bar. (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d. 5.1.)

Painelaitteen suunnittelun vaatimuksissa otetaan huomioon konkreettisia asioita, joiden kautta pyritään takaamaan painelaitteen turvallisuus sen elinkaaren ajaksi. Huomioitaviin kohtiin kuuluu laajasti eri tekijöitä materiaalien ominaisuuksista, painelaitteen erityisvaatimuksista, käytöstä ja sen olosuhteista. Materiaalien ollessa keskeisenä tekijänä painelaitteen rakenteessa, painelaittemateriaalin täytyy omata painelaitteen turvallisuuden takaamiseen soveltuvat sitkeys, lujuus ja iskusitkeys arvot. Lisäksi painelaittemateriaali ei saa normaaleissa käyttöolosuhteissa murtua hauraalla tavalla. Harmonisoitujen EN-standardien materiaalien ja osien hyödyntäminen on suositeltavaa, mutta myös materiaalin erikoisarvioinnin (PMA) kautta voidaan tarvittaessa materiaali hyväksyä käytettäväksi painelaitteeseen. (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d 5.5.2, 5.5.3.)

Painelaitteen suunnittelu ja valmistus voidaan tiivistetysti muotoilla vaiheisiin 1–6, jossa:

1. Painelaitteeseen liittyvien kaikki sovellettavien säädösten, direktiivien ja asetusten tunnistaminen.
2. ”Luokittele painelaite ja määrittele luokan I – IV perusteella vaatimustenmukaisuuden arviointimenettely (moduuli tai moduuliyhdistelmä)”.
3. Olennaisten turvallisuusvaatimusten määrittely ja riskien arviointi. Laitteen suunnitteluun ja valmistukseen käytettävien yhdenmukaistettujen EN standardien selvitys.
4. Teknisten asiakirjojen laatiminen, pätevöintiä ja testauksien teettäminen ennen valmistusta sekä asiakirjojen toimittaminen ilmoitettuun laitokseen tarvittaessa.

5. Painelaitteen valmistaminen teknisten asiakirjojen mukaisesti sen moduulin kuvaamien menetelyiden ja vaatimusten mukaan.

6. Painelaitteen merkintä vaatimusten mukaan ja vaatimustenmukaisuusvakuutuksen laatiminen. Käyttöohjeiden ja tarvittaessa muiden sovittujen asiakirjojen toimittaminen. (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d 5.1.)

3.1.1 Painelaitteiden luokittelu

Painelaitteen luokka (I – IV) määräytyy painelaitedirektiivin liitteen II taulukoiden mukaan. Jokaisen luokan painelaitteen on täytettävä direktiivin liitteen I olennaiset turvallisuusvaatimukset. Painelaitteen luokituksen perusteella määräytyy kyseiselle painelaitteelle vaatimustenmukaisuuden moduuli tai moduulipari, jolla arvioidaan vaatimustenmukaisuus painelaitteelle. Hyvän konepajakäytännön painelaitteiden alue (4 artiklan 3 kohdan alue eli SEP alue) sijaitsee luokkien alapuolella taulukoissa. (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d. 5.3.) Kuviossa 3 painelaitteiden luokittelu taulukointi.

| PAINELAITTEIDEN LUOKITTELU | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|-------|---|---|------------------------|---|-------|---|
| Painelaitedirektiivi (2014/68/EU), liitteen II taulukot 1– 9 | | | | | | | | | |
| 1. Painelaitteen tyyppi | Säiliöt | | | | Höyryn tai ylikuumennetun veden tuotannon painelaitteet | Putkistot | | | |
| 2. Sisältö | Kaasu | | Neste | | – | Kaasu | | Neste | |
| 3. Sisällön ryhmä | 1 | 2 | 1 | 2 | – | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 4. Taulukko (PED liite II) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 5. Luokitussuureet | PS, V | | | | PS, V | PS, DN | | | |
| 6. Luokka | SEP tai luokka I - IV | | | | SEP tai luokka I - IV | SEP tai luokka I - III | | | |

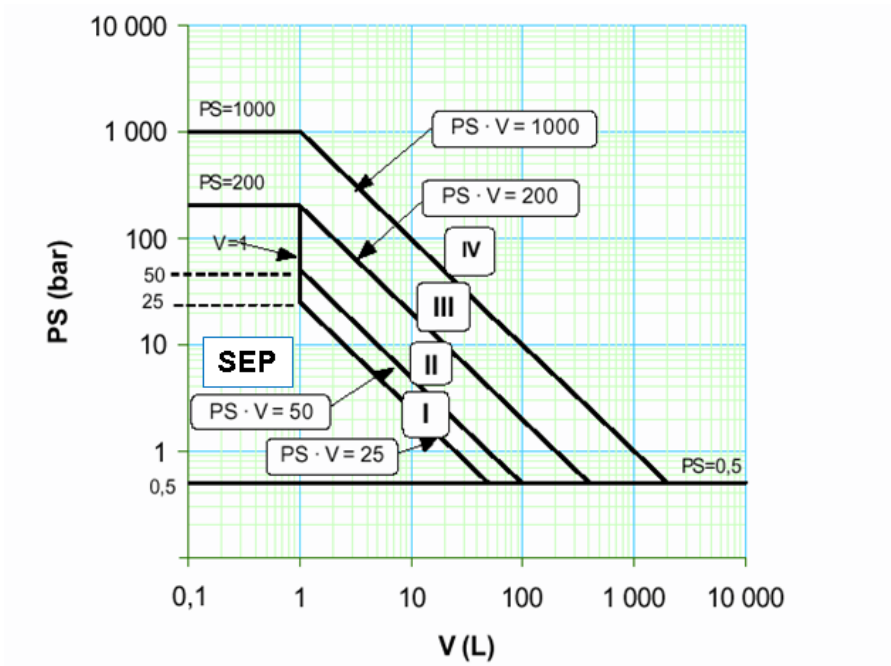
Kuvio 3. Painelaitteiden luokittelu (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d. 5.3).

Painelaitteen sisällön ryhmä selvitetään joko kyseisen aineen tai seoksen käyttöturvallisuustiedotteesta sijaitseva sisällön vaaraominaisuutta kuvaava H-lauseke tai CLP asetuksen aineluettelosta. (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d. 5.3.) Kuviossa 4 esitettyä CLP-vaaraluokat ja vaaralausekkeet.

| CLP-vaaraluokat ja kategoriat (PED, artikla 13) | CLP-asetuksen vaaralausekkeet (H-lausekkeet) |
|---|---|
| 1) Epästabiilit räjähteet tai vaarallisuusluokkiin 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 ja 1.5 kuuluvat räjähteet | H200, H201, H202, H203, H204, H205 |
| 2) Syttyvät kaasut, kategoria 1 ja 2 (huom. tämä sisältää myös kemiallisesti epästabiilit kaasut) | H220, H221, H230, H231 |
| 3) Hapettavat kaasut, kategoria 1 | H270 |
| 4) Syttyvät nesteet, kategoria 1 ja 2 | H224, H225 |
| 5) Syttyvät nesteet, kategoria 3, jos suurin sallittu lämpötila on korkeampi kuin leimahduspiste | H226 |
| 6) Syttyvät kiinteät aineet, kategoria 1 ja 2 | H228 |
| 7) Itsereaktiivinen aine tai seos, tyypit A–F | H240, H241, H242 |
| 8) Pyroforiset nesteet, kategoria 1 | H250 |
| 9) Pyroforiset kiinteät aineet, kategoria 1 | H250 |
| 10) Aineet ja seokset, jotka veden kanssa kosketuksiin joutuessaan kehittävät syttyviä kaasuja, kategoria 1, 2 ja 3 | H260, H261 |
| 11) Hapettavat nesteet, kategoria 1, 2 ja 3 | H271, H272 |
| 12) Hapettavat kiinteät aineet, kategoria 1, 2 ja 3 | H271, H272 |
| 13) Orgaaniset peroksidit, tyypit A–F | H240, H241, H242 |
| 14) Välitön myrkyllisyys suun kautta: kategoria 1 ja 2 | H300 |
| 15) Välitön myrkyllisyys ihon kautta: kategoria 1 ja 2 | H310 |
| 16) Välitön myrkyllisyys hengitysteiden kautta: kategoria 1, 2 ja 3 | H330, H331 |
| 17) Elinkohtainen myrkyllisyys – kerta-altistuminen, kategoria 1 | H370 |

Kuvio 4. CLP-aineluettelo (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d. 5.3).

Painelaitedirektiivin liitteestä II valitaan painelaitetyypin ja sisällön perusteella oikea taulukko painelaitteen luokittelua varten, josta määritetään luokitussuureiden Paine (PS), Tilavuus (V), Nimellishalkaisija (DN) avulla painelaitteen luokka I-IV tai (SEP) alue. (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d. 5.3.) Kuviossa 5 taulukko painelaitteen luokittelua varten esimerkki taulukko.



Kuvio 5. Esimerkki luokittelu taulukko säiliöille, joissa on sisältönä ryhmän 1 kaasu (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d. 5.3)

Luokan perusteella määräytynyt moduuli tai moduuliyhdistelmään voi vaikuttaa myös tuotantomuoto kuten yksittäis- tai sarjatuotanto sekä mahdolliset painelaitteen tilaajan esittämät vaatimukset, lisäksi valmistaja voi halutessaan käyttää vaativamman luokan arviointimenettelyä. Mitä korkeampi painelaitteen luokka, sitä tiukempia moduulit ovat ja sitä suurempi ilmoitetun laitoksen osuus arvioinneissa. (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d. 5.4.) Kuviossa 6 esitettyinä painelaiteluokkien moduulit ja moduuliparit.

| | | |
|--------------------|-----------------|---|
| Luokka I: | Moduuli A | Sisäinen tuotannonvalvonta |
| Luokka II: | Moduuli A2 | Sisäinen tuotannonvalvonta ja valvotut painelaitetarkastukset satunnaisin väliajoin |
| | Moduuli D1 | Tuotantoprosessin laadunvarmistus |
| | Moduuli E1 | Painelaitteiden lopputarkastuksen ja testauksen laadunvarmistus |
| Luokka III: | Moduulit B + D | EU-tyyppitarkastus – suunnittelutyyppi + Tuotantoprosessin laadunvarmistukseen perustuva tyyppimukaisuus |
| | Moduulit B + F | EU-tyyppitarkastus – suunnittelutyyppi + Painelaitteen tarkastukseen perustuva tyyppimukaisuus |
| | Moduulit B + E | EU-tyyppitarkastus – tuotantotyyppi + Painelaitteen laadunvarmistukseen perustuva tyyppimukaisuus |
| | Moduulit B + C2 | EU-tyyppitarkastus – tuotantotyyppi + Sisäiseen tuotannonvalvontaan perustuva tyyppimukaisuus ja satunnaisin väliajoin suoritettavat valvotut painelaitetarkastukset |
| | Moduuli H | Täydelliseen laadunvarmistukseen perustuva vaatimustenmukaisuus |
| Luokka IV: | Moduulit B + D | EU-tyyppitarkastus – tuotantotyyppi + Tuotantoprosessin laadunvarmistukseen perustuva tyyppimukaisuus |
| | Moduulit B + F | EU-tyyppitarkastus – tuotantotyyppi + Painelaitteen tarkastukseen perustuva tyyppimukaisuus |
| | Moduuli G | Yksikkökohtaiseen tarkastukseen perustuva vaatimustenmukaisuus |
| | Moduuli H1 | Täydelliseen laadunvarmistukseen ja suunnittelun tarkastukseen perustuva vaatimustenmukaisuus |

Kuvio 6. Painelaiteluokat ja niiden moduulit (Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi n.d).

4 Standardisointi

Standardit ovat asiakirjoja, jossa määritellään esimerkiksi tietylle asialle, esineelle taikka työlle vaatimuksia. Standardien vaatimuksia voivat olla laatu, turvallisuus, suorituskyky, valmistaminen ja testaus. Standardisointi on toiminnan, ominaisuuden, laadun tai muun tekijän luomista tietynlaiseksi vakioksi, mitä noudatetaan esimerkiksi neuvojen, ohjeistuksien tai lakien velvoittamana. (Mikä on standardi n.d.) Arjessa standardit ja standardisointi voivat esiintyä tiettyjen esineiden koossa (Mikä on standardi n.d). Esimerkiksi sähkötuotteissa pistokkeet on standardisoitu olemaan tietyn kokoiset ja muotoiset, jotta ne sopisivat pistorasiaan. Erilaisen standardisoinnin takia pistokkeissa ja pistorasioissa voi esiintyä eroavaisuuksia eri maiden välillä. Teollisuudessa korostuu ominaisuuksien ja mitta-arvojen standardisoinnin hyödyntäminen (mt. n.d). Usein tuotteiden valmistuksessa tarvitaan standardisointia monissa vaiheissa kuten materiaalin hankinnassa, työstämisessä ja kokoonpanossa.

Eri organisaatioiden ja maiden standardit voivat vaikuttaa hyödyllisesti yhteiskuntaan, yrityksiin ja markkinatalouteen parantamalla työn tuottavuutta, innovointia ja asioiden yleistä sujuvuutta. Standardien vaikutuksista tehdään aktiivisesti tutkimuksia ja raportteja kansallisella ja kansainvälisellä tasolla. (Tutkittua tietoa standardeista n.d.)

4.1.1 Standardisointi kansainvälisesti (ISO)

International Organisation for Standardization eli ISO on maailman laajin standardointijärjestö sen 160 kansallisen standardointijärjestö jäsenen kautta. Noin 250 teknisessä komiteassa (TC) laaditaan ISO standardeja, jotka hyödynnetään teknologiassa, hallinnoinnissa ja valmistuksessa. ISO-standardeja itsessään ei ole pakko vahvistaa Suomessa käytettäväksi standardiksi, mutta osa ISO standardeista CEN-standardointijärjestö vahvistaa EN-standardeiksi, jolloin niistä muodostuu EN ISO-standardeja ja tästä seuraten Suomessa näistä standardeista tulee SFS-EN ISO-standardeja. (Standardisointi Suomessa ja maailmalla n.d; About ISO n.d.)

Kansainvälisessä standardisoinnissa näkyy myös suurvaltakilpailu, jossa keskeisinä tekijöinä ovat Yhdysvallat, Kiina ja EU. Suurvaltojen kilpailu standardisoinnista kohdistuu tulevaisuuden ja kriittisten teknologioiden käyttöön, jossa motiiveina toimii samaan aikaan markkina-alueiden valtaaminen ja laajentaminen, että standardointityön riippumattomuuden, avoimuuden ja rehellisyyden turvaaminen. Tulevaisuuden kilpailuluontoista standardointi työtä tuetaan investointien ja osaamisen lisäämisellä tutkimuksiin, oppilaitoksiin ja yrityksiin. Vuonna 2024 tehdyn listauksen mukaan eniten valtaa ISO-standardien suhteen pitää Saksa, perustuen maiden vastuulla olevien ISO:n standardointiryhmien komiteoiden sihteeristöjen määrään. Toisella sijalla on Yhdysvallat, jota seuraa kolmantena Kiina ja neljänneksi sijoittuva Japani. Listauksessa Suomi on sijalla 26. (Strateginen standardisointi edistää Suomen kilpailukykyä. n.d.)

4.1.2 Standardisointi Euroopassa (CEN/EN)

EU- ja EFTA-maiden standardointijärjestöjen yhteistyö perustuu CEN (European Committee for Standardization) toimintaan. CEN tukee standardisointiin liittyvää toimintaa laajasti eri aloilla ja sektoreilla, kuten teollisuudessa, kuluttajatuotteissa, elintarvikkeissa, palveluissa ja liikenteessä. CEN: in toimintaan kuuluu yli 300 teknistä komiteaa, joiden työhön osallistumisoikeus kuuluu kaikille jäsenjärjestöille ja jossa komiteoiden sihteeristötehtävät hajautetaan jäsenjärjestöjen kesken.

(CEN, the European Committee for Standardization, is an association that brings together the National Standardization Bodies of 34 European countries n.d; Standardointi Suomessa ja maailmalla n.d.)

CEN toimittaa EU:lle sen pyynnöstä standardeja, jotka toimivat EU direktiivien ja asetusten jatkeina helpottamaan säädösten ja vaatimusten noudattamista. Jos pyynnöstä toimitettu säädöksiin perustuva standardi julkaistaan EU:n virallisessa lehdessä ja se on vahvistettu EU:n pyynnöstä EU:n yhdenmukaistamislainsäädännön soveltamiseksi, niin standardia kutsutaan harmonisoiduksi standardiksi. Harmonisoidut standardit julkaistaan EN-standardeina ja niiden kanssa ristiriitaan joutuvat kansalliset standardit täytyy kumota, koska jäsenjärjestöjen pitää noudattaa EN-standardien voimaan tuomista kansallisesti. (EU ja standardointi n.d.)

4.1.3 Standardisointi Suomessa (SFS)

SFS vastaa Suomessa standardoinnista poissulkien sähkö- ja teleala, joista vastaavat SESKO ja Traficom. SFS:n ja eri toimialayhteisöjen standardointi- ja työryhmissä toteutetaan tarvittava standardisointityö, jossa suomalaisia standardeja laaditaan tarpeen mukaan Suomen omiin tarpeisiin ja osallistutaan maailmanlaajuisesti standardien kommentointiin ja niiden laadintaan. (Mikä on standardi? n.d; Standardointi Suomessa ja maailmalla n.d; Suomen standardointityö on jaettu eri toimialoja edustaville organisaatiolle n.d.) Kuviossa 7 on esimerkki standardin esittämistavasta, jossa standardi on vahvistettu ISO, CEN ja SFS tasolla.



Kuvio 7. Standardin tunnus (Mikä on standardi? n.d).

Standardointiin osallistuvista toimialayhteisöistä METSTA ry:n toimialana toimii ”kone- ja metalliteollisuus, metallien jalostus, talotekniikka sekä energianhallinta”. (Standardointi Suomessa

ja maailmalla. n.d; Suomessa standardointityö on jaettu eri toimialoja edustaville organisaatiolle n.d.) METSTA ry:n Painelaitteet (SR 267) ja painelaitteissa käytettävien materiaalien (SR 107) standardisointiryhmät osallistuvat aktiivisesti monien osa-alueiden standardisointiin liittyvään toimintaan CEN/ISO tasolla. Erityismainintana SR 267 toimialueeseen kuuluu standardisarja EN 12445 (CEN/TC 54) ja SR 107 toimialueeseen kuuluu standardisarjan EN 13445 ”valmistuksessa sovellettavat materiaalistandardit (mm. painelaiteteräslevyt, -putket, -takeet, -tangot ja -valut)”. Painelaitteet (SR 267) n.d; Painelaitemateriaalit (SR 107) n.d.)

5 SFS-EN 13445:2021 Lämmittämättömät painesäiliöt

SFS-EN 13445 on lämmittämättömien painesäiliöiden standardi. Se kuuluu EU:n painelaitedirektiivin harmonisoitujen painelaitestandardien joukkoon ja on osa painelaitelakia valtioneuvoston asetuksen kautta.

Standardissa määritellään vaatimukset lämmittämättömien painesäiliöiden suunnitteluun, rakenteeseen, tarkistukseen ja testaukseen, jossa käsite painesäiliö sisältää hitsattuja lisäosia, yhteitä ja kierreliitoksia. Käsite lämmittämätön ei sulje pois säiliöitä, joita lämmitetään sähköllä tai kuumentuilla prosessiaineilla. Ne säiliöt, jotka ovat polttoprosessin välittömän lämmön alaisia tai liekin koskettamia luetaan pois. Standardissa esitetään rajauksia sen käytölle ja mainitsee muiden standardien käyttöalueita. (SFS-EN 13445-1:2021, 4–6.)

5.1 Vedyn huomiointi EN 13445

METSTAN ry:n tekemässä painelaitteiden standardien tilannekatsauksessa 25.11.2025 CEN/TC54 Unfired pressure vessel's teknisen komitean toiminnassa EN 13445-standardiin liittyviä kohtia oli useampi, joista ilmenee laajasti tulevia muutoksia eri osiin EN 13445-standardia (Painelaitestandardien tilannekatsaus 25.11.2025. 2025). Standardin osaan 3: suunnittelu muutoksen A1:2025 laajuus yli 200 sivua on julkaistu 11/2025 ja se on tällä hetkellä käynnistyksen alaisena (mts. 2). Kyseisen osion muutos A2, jonka on laajuus yli 240 sivua, on sen sijaan vielä alustavana työkohteena. Erityisenä huomiona EN 13445 - 15 spesifit vaatimukset vety sovelluksille, on vielä myös alustavan työkohteen vaiheessa. (Mts. 4.)

Vetyhaurastumista ei käsitellä EN 13445-standardin ensimmäisessä osassa. Kokonaisvaltaisia ohjeita esiintyy turvallisuuden ja materiaalien suhteen kohdassa 6. Riskien arviointi ja käsittely ja liite A (Opastava) A.4.1–3. (SFS-EN 13445-1:2021, 11–12, 14–15.)

Standardin EN 13445 osa 2: Materiaalit kohdassa 4. Vaatimukset paineenalaisissa osissa käytettäville materiaaleille, 4.2.1 Erikoisominaisuudet osiossa mainitaan valmistusmenetelmien ja käyttöolosuhteiden huomiointi painesäiliön turvallisuuteen ja sen käyttöikään. Materiaalia määrittäessä täytyy tarvittaessa huomioida valmistusmenetelmistä esimerkiksi lämpökäsittely sekä käyttöolosuhteista esimerkiksi vetyhauraus ja korroosio. Kohdassa 4.2.5 mainitaan kiinnittimissä käytettäviä teräksiä koskevat erityisvaatimukset, joissa pitää ottaa huomioon tarvittaessa materiaalin ”vetyhauraus, väsyminen ja relaksaatio-ominaisuudet”. (SFS-EN 13445-2:2021, 10–12.)

EN 13445 osa 3: Suunnittelu mainitaan enemmän vedystä verrattuna edeltäviin osiin. Liitteessä B (velvoittava), Jännitysanalyysi – Suora menetelmä, taulukko B.4–1. Vaurioitumistapojen ja rajatilojen jaottelussa tarkoitettussa taulukosta mainitaan ympäristön aiheuttama säröily, jolla tarkoitetaan seuraavia: Jännityskorroosio (SCC), vetyhauraus (HIC), jännitystilän suuntainen vetyhauraus (SOHIC). (SFS-EN 13445-3:2021, 592–593.)

EN 13445 osa 4: Valmistus kohdassa 11 Hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely (PWHT) taulukon 11.1-1 lopussa mainitaan yläindeksi 3: ”Paksuuksilla ≤ 35 mm myöstö on valinnainen ja yleensä tarpeen vain erikoistapauksissa (esim. jännityskorroosio- tai vetyhaurausriskin (hapan kaasu) vuoksi).” Kyseinen yläindeksi pätee tässä taulukossa materiaalityypin paksuuden ollessa ≤ 35 mm:

- 1.1 Seostamaton teräs ($ReH \leq 275$ MPa)

- 1.2 Seostamaton teräs ($ReH > 275 \leq 360$ MPa)

-9.1 Ni-seostettu teräs ($Ni \leq 3,0$ %)

-9.2 Ni-seostettu teräs, jossa $3,0$ % $< Ni \leq 8,0$ %.

(SFS-EN 13445-4:2021 + A1:2023, 40–41.)

5.2 Vedyn huomiointi ja testaus painelaiteteräkset EN 10028

Painelaiteterästen levytuotteissa (Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräkset, Normalisoidut hitsattavat hienoraeteräkset) tarvittaessa hyödynnetään testausta vetyhalkeilun kestävyden mittaamiseksi. EN 10028 Levytuotteet. Osa 1: Yleiset vaatimukset kohdassa 9.2 Suoritettavat koheet taulukossa 2. viitataan vetyhalkeilun kestävyden testaamisessa standardeihin EN 10028-2:2017 tai EN 10028-3:2017. Kyseisissä standardeissa mainitaan velvoittava liite D. (EN 10028-2:2017 kohta 8.7) ja A(EN 10028-3:2017), jossa:

Terästuotteiden vetyhalkeilun kestävyys on arvioitava standardin EN 10229 mukaisesti. Koeliuoksen A (pH ≈ 3) hyväksymisrajoja sovelletaan taulukossa D.1 esitetyille luokille. Esitetyt arvot ovat kolmen yksittäisen koetuloksen keskiarvoja. Koeliuoksesta B (pH ≈ 5) ja sitä vastaavasta hyväksymisrajasta voidaan sopia kyselyn ja tilauksen yhteydessä.

(SFS-EN 10028-1:2017, 12; SFS-EN 10028-2:2017, 9, 22; SFS-EN 10028-3:2017, 9, 13.)

5.2.1 EN 10229:1998 terästuotteiden vetyhalkeilualttiuden tutkiminen

EN 10229 standardin testi on alun perin kehitetty öljy ja kaasu teollisuudesta tulleen ilmiön takia, jossa raakaöljy tai maakaasu kuljettaa mukanaan putkistoissa huomattavan määrän vetysulfidia (H₂S) ja vettä luoden happamat olosuhteet painelaitteille. Vetysulfidin ja veden aiheuttaman happaman olosuhteen seurauksena syntyy materiaalissa vetyhalkeilua (Hydrogen induced cracking, HIC) ilman rasiusta. Testin tarkoitus ei ole luoda vastaavia kenttäolosuhteita materiaalille, vaan auttaa arvioimaan sen kykyä vastustamaan vetyhalkeilua. Testin materiaali on tarkoitettu nimellis-paksuuksille ≥6 millimetriä. Testin syövyttävänä väliaineena toimii vetysulfidi, jota pumpataan liuokseen saturoiden sen. Liuos voidaan toteuttaa kahdella eri happamalla liuoksella, joihin testikappaleet on upotettu. Testin kesto on 96 tuntia, jonka jälkeen tehdään saturaatio ja happamuus mittaukset liuokselle, sekä testikappaleiden arviointi. (SFS-EN 10229:1998, 4–11.)

6 Vetyteknologioiden ja standardisoinnin kartoitus

Vedyn käytön teknologisen kehityksen ja standardisoinnin kehitystä on viime vuosina kartoitettu eri tekijöiden ja menetelmien muodossa. Laajimmat kartoitukset ovat olleet Tiekartta (Roadmap)-teoksia, joihin monet teollisuuteen ja standardisointiin liittyvät tahot ovat osallistuneet.

6.1 Hydrogen Pipelines-Design and Material Challenges and Mitigations

Gallon, N (2020) tutkii kirjallisuuskatsauksessaan vetyputkistoon vaikuttavien tekijöiden mekaanisia tekijöitä, olemassa olevia suunnitteluohjeita ja standardien kriteereitä sekä relevantteja tutkimuksia. Vaikka kirjallisuuskatsauksen löydöt ja havainnot tukivat jo tehtyjä suunnitteluohjeita ja ratkaisuja, nousi esiin silti kysymysmerkkejä materiaaleihin liittyvien testien tarkkuuksissa, menetelmissä ja soveltuvuuksissa vedylle. (Gallon 2020.) Testaamisen suhteen täyden mittakaavan testien julkaisujen uupuminen ja niiden vertailu pienten mittakaavojen tuloksiin, voi vaikuttaa johtopäätösten tulkintaan muista kuin täyden mittakaavan testeistä (mts. 44).

Testaamisen lisäksi katsauksessa mainitaan vetyyn käytettävien lisäaineiden käytöstä, materiaalien ominaisuuksista ja rakenteiden vaurioitumisesta. Lisäaineiden suhteen on tehty paljon tutkimusta, mutta standardeissa ja ohjeistuksissa ei ole huomioitu vedyn seassa käytettävien lisäaineiden, kuten hapen (O₂) ja hiilidioksidin (CO₂) vaikutuksista vetyhaurauteen (Gallon 2020, 66–73). Eri lähteissä käytettävien materiaalien murtumislujuuDET eri laaduissa ja vahvuuksissa ovat ristiriitaisia, sillä joissakin lähteissä on havaittu vedyn vaikutuksesta suuremmat seuraukset lujemmassa ja toisissa heikommassa materiaalissa (mts. 40). Vetyputkistojen rakenteiden alttiudesta vaurioille ja niiden korjaamiselle on vähän julkista tutkimustietoa. Rakenteiden ohjeistuksissa ja standardeissa on kuitenkin mainintaa uurteista ja lommoista. (Mts. 88–89.)

6.2 Steel components in the hydrogen economy

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH julkaisemassa dokumentissa käsiteltiin paineistetun vedyn vaikutuksia metalleihin, vaikutusten testaamista ja paineistetun vedyn käyttökohteita. Steel components in the hydrogen environment (2025) dokumentin sivuilla 4–5 esiteltiin tutkimuksen tuloksia, jossa eri putkimateriaaleista valmistettuja, eri pintaolosuhteiden omaavia näytteitä oli

kuormitettu vedyllä. Tutkimuksessa havaittiin matalat vetytitoisuudet kaikissa testatuissa kappaleissa. Tutkimuksessa vetykuormitus kaasuna osoitti matalampia vetytitoisuus arvoja materiaaleissa, verrattuna happamiin käyttöolosuhteisiin tai elektrolyyttisesti kuormitettuihin tapauksiin. Vaikka vetytitoisuudet olivat pieniä kaikissa kappaleissa, mekaanisten vaurioiden tai plastisten muodonmuutosten vaikutus vetytitoisuuteen oli havaittavissa. (Steel components in the hydrogen environment 2025, 4–5.)

6.3 ECH2A

Vuonna 2020 perustettiin The European Clean Hydrogen Alliance (ECH2A) – järjestö, jonka jäseniin kuuluu teollisuuden toimijoita, viranomaisia, kansalaisyhteiskuntaa ja muita ryhmiä. Järjestön tavoitteena on vuoteen 2030 mennessä tukea vetyteknologioiden käyttöönottoa. ECH2A:n vuonna 2023 julkaisemassa tiekartassa käydään läpi vedyn standardoinnin tarpeita ja puutteita laajasti vedyn kuljettamisen, siirtämisen, varastoinnin, tuotannon ja käytön suhteen. (Vedyn standardointi tuotannosta käyttöön n.d.)

Roadmap on hydrogen standardization (2023) mukaan teknisestä näkökulmasta 80 % olemassa olevien ja toimivien systeemien standardisoinnista kaasuinfrastruktuurissa pätevät myös vedylle. Tämä riippuu komponentista, kuten esimerkiksi siirtoputkisto, jossa paine >16 bar tai kompressoriasemat. Muilla alueilla mainitaan tutkimusten olevan käynnissä. Lisäksi tiekartassa mainitaan kohteita, joissa pitäisi kiinnittää huomioita vetykaasun ollessa 100 % vetyä tai seostettua. Kohteita ovat esimerkiksi turvallisuus ja materiaalit ja niihin liittyvät ilmiöt kuten hauraus ja murtumismekanismit. (Roadmap on hydrogen standardisation 2023, 22–23.)

6.4 Standardization roadmap Hydrogen technologies 2024 & 2025

DIN (Deutsches Institut für Normung e.V., German Institute for Standardization) ja yhteistyökumppaneiden julkaisemissa standardoinnin tiekartoissa vetyteknologioille käydään läpi laajasti ja tarkasti standardisoinnin nykytilaa, puutteita ja tarpeita sisältäen myös suosituksia ja aloitettuja toimenpiteitä. Kyseiset tiekartat käyvät läpi vedyn koko arvoketjun viidellä pääalueella.

6.4.1 Tiekartta 2024

Paikallaan olevien ja liikuteltavien painesäiliöiden osiossa mainitaan EN 13445-standardisarjan tarpeesta uudelle osalle, jossa konkreettisesti määriteltäisiin spesifit vaatimukset vetysovelluksiin. Kyseistä standardia kehitetään tällä hetkellä CEN/TC 54:ssä ja kansallisella tasolla Saksassa DIN-standardikomitean kemiallisten laitteiden suunnittelussa. Petrokemian osiossa mainitaan lisää, että spesifit määritellyt tarpeet EN 13445-standardille julkaistaan tiekartan toisessa versiossa vuoden 2025 lopussa. (Standardization Roadmap for Hydrogen Technologies 2024, 63,77.)

14 eri tarvetta listattiin tiekartan metallisten materiaalien osiossa. Monissa kohdissa viitattiin puutteellisiin tai puuttuviin eurooppalaisiin tai saksalaisiin standardeihin. Testausmenetelmien puutoksissa toistuva elementti oli puutos vetykaasun käytöstä. Myös testaus vedyn pitkäaikaisista vaikutuksista oli puutteellista. (Standardization Roadmap for Hydrogen Technologies 2024, 4.3.3.) ISO 7039-standardi onttojen testikappaleiden vetolujuustestauksesta on kehitettävänä. Onton testikappaleen sisäpinnan vaikutuksesta testikappaleen väsymislujuuteen on edelleen avoimia kysymyksiä ja standardiin pitäisi lisätä suhteellisen vetyvaurion määrittely. (Mts. 114.) Uusia teknisiä sääntöjä tulisi laatia tai olemassa olevia sääntöjä täydentää vedyn luomilla olosuhteilla sekä vetyvaurion mittaamisen parametrin materiaalien paremman vertailun varmistamiseksi (mts. 115–117).

6.4.2 Tiekartta 2025

Paikallaan olevien ja liikuteltavien painesäiliöiden osiossa kuvataan paineastioiden standardisoinnin tilaa, tulevaisuutta ja sen mahdollisia vaikutuksia vetytalouteen. Liian tiukasta standardoinnista voi tulla pullonkaula, mikä voisi vähentää vedyn käytön kiinnostavuutta. Liian tiukan standardisoinnin sijaan pitäisi pyrkiä tietynlaiseen avoimuuteen teknologisen kehityksen suhteen, jossa olisi enemmän mahdollisuuksia hyödyntää erilaisia ratkaisuja vedyn varastoinnin turvaamiseksi. (Standardization Roadmap for Hydrogen Technologies 2025, 63–65.)

Metallisten materiaalien osiossa CSA ANSI/CSA CHMC1-standardista pyritään siirtämään sisältöä syklistesti kuormitettujen teknisten rakenteiden ISO-standardeihin ja ISO 7039-standardiin lisätään kolmen vuoden sisällä vaatimuksia paineellisen vedyn testaamista varten. Vaatimukseen on tarkoitus sisällyttää onttoon testikappaleeseen liittyviä erityispiirteitä, kuten reiän suunnittelu, ontelon

pinta-ala ja testausmenettely. Vedyn läpäisevyyden analysoinnin toteutusprojekti on myös työn alla Saksassa. Projektin tavoitteena on edistää kansallisen standardin kehittämistä, jonka avulla voidaan arvioida vedyn diffuusiota ja sitä estävien ratkaisujen arviointia. (Standardization Roadmap for Hydrogen Technologies 2025, 107–110.)

7 Tietoperustan yhteenveto

Opinnäytetyön kirjoitushetkellä lämmittämättömien painesäiliöiden EN 13445:2021 standardista puuttuu vedyn ja sen aiheuttaman vetyhaurauden spesifit vaikutukset ja vaatimukset painesäiliöiden suunnitteluun ja valmistukseen. Puutos on suuri siihen nähtynä, kuinka merkittävä vetyhauraus voi olla metallisille materiaaleille, kuinka paljon vedyn käyttöä aiotaan lisätä tulevaisuudessa ja kuinka tärkeää sekä tarkkaa on painesäiliöiden turvallinen suunnittelu. Vetyhauraus ja sen vaikutukset materiaaleihin on tiedetty pitkään, mutta vasta viime vuosina poliittiset linjaukset vetytalouskasvattamisesta ovat lisänneet tutkimuksia vetyhauraudesta ja tarvetta standardisoida vetyyn liittyviä teknologioita ja käyttökohteita. Itse standardoinnin ja ohjeistuksen määrää, että laatua on myös kartoitettu.

Vedyn käytön soveltaminen odottaa uutta tutkimustietoa ja teknologista kehitystä. Valitettavasti teknologioiden kehittäminen ja niiden hyödyntäminen lämmittämättömien painesäiliöiden tapauksessa on sidottu myös lakeihin, säädöksiin ja standardeihin. Teknologista kehitystä on hankala tehdä ilman tutkimustietoa ja tietoa standardien mahdollisista tulevaisuuden suuntauksista ja rajoitteista. Samaan aikaan standardit kuitenkin myös kaipaavat varmaa tutkimustietoa, jonka pohjalta luodaan vaatimuksia ja standardeja. Teknologinen kehitys ja standardisointi ovat siis tiukasti riippuvaisia tutkimuksista ja niiden tuloksista. Tämä tilanne luo painetta tutkimusten tekemiselle ja tuloksille. Lisäksi eri maiden eriävät vaikutusvallat kansainvälisiin standardeihin voivat ohjata tutkimusten tarvetta, suuntaa, kohteita ja laajuutta.

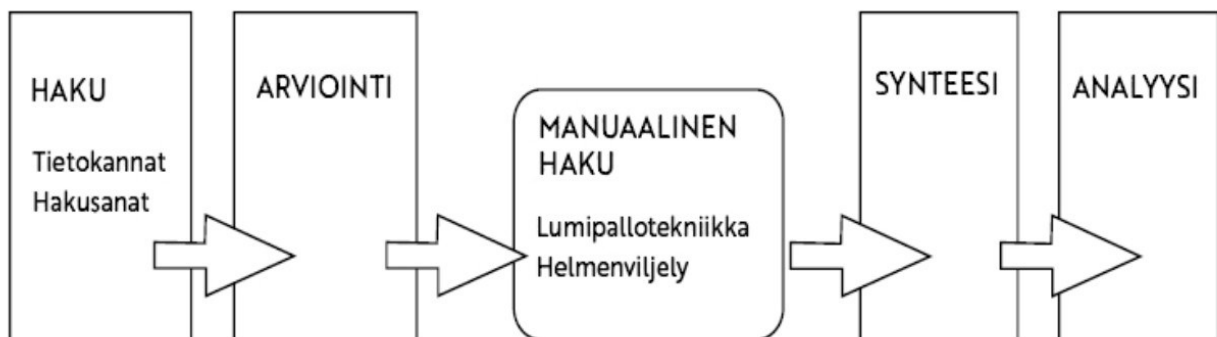
8 Toteutus

8.1 Kuvaileva kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä

Opinnäytetyö toteutettiin kuvailevan kirjallisuuskatsauksen menetelmällä, jonka muihin katsaus tyyppisiin verrattuna vapaamman luonteen avulla pyrittiin käsittelemään laajalta otannalta tietoa

tehokkaasti. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on tuoda esiin selkeästi ja suoraviivaisesti, mitä uutta tutkimustietoa on vetyhaurauden suhteen lämmittämättömissä painesäiliöissä hyödyntäen tietoperustasta saatua tietoa ja suuntaa. Kirjallisuuskatsauksen tulosten avulla pyritään vastaamaan tutkimuskysymyksiin ja antamaan jatkotutkimusehdotuksia.

Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen lähtökohtina on löytää tutkimusten kautta mitä tietystä ilmiöstä tiedetään, sen keskeisiä käsitteitä sekä käsitteiden välisiä suhteita. Kuvailevalla kirjallisuuskatsauksella voidaan käsitellä myös valittujen tutkimusten tutkimusasetelmia ja niiden teorioita, sekä katsauksen aiheen kehitystä ja historiaa. Tiedon tiivistämisen ja epäyhtenäisen tiedon järjestämisen kautta voidaan kuvailevalla kirjallisuuskatsauksella auttaa löytämään mahdollinen lisätutkimusten tarve ja antaa katsauksen aiheesta laaja yleiskuva sekä tilannearvio tieteenalalla. Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen vahvuuksiin kuuluu aineiston käsittely erityiskysymysten valossa vapaammin ja heikkouksiin epämääräinen sekä liian yksilöllinen tiedonetsintä. (Vilkkä 2023, 21–23.) Katsauksen ajankäytön ja selkeyden tehostamiseksi hyödynnettiin SALSA-kehystä, joka on esitettyä kuviossa 8.



Kuvio 8. SALSA-kehys (Vilkkä 2023, 18).

8.2 Aineiston hankinta

Tietoperustasta kerätyn tiedon perusteella tunnistettiin aiheita, joiden kautta rajattiin ja tuettiin tutkimuskysymyksiä kirjallisuuskatsauksen aineistohaussa. Tavoitteena oli kohdentaa kirjallisuuskatsaus ajankohtaisiin, mahdollisesti lämmittämättömien painesäiliöiden suunnitteluun vaikuttaviin aiheisiin ja parantaa kerätyn aineiston laatua. Kohteet kattoivat vedyn vaikutusten standardoimista testaamista ja materiaalitekniistä kehitystä. Aiheiksi valikoituivat:

- CSA ANSI/CSA CHMC 1-standardi
- ISO 7039-standardi
- Austeniittisen teräksen seostus ja mikrorakenne vetykäyttöön.

Tietoperustasta valittujen aiheiden ja tutkimuskysymysten pohjalta valittiin eri tietokantoja, joissa haluttiin keskittyä niihin tutkimuksiin, jotka sisältävät laajasti aineistoa erityisesti vetyyn liittyen.

Tietokantojen valintaehtona lisäksi olivat:

- Kansainvälisyys
- Helppokäyttöisyys ja selkeys
- Riittävät suodatinvaihtoehdot
- Alustavan kokeilun tarjoamien tuloksien määrä ja laatu
- Pääsy aineistoihin

Tietokannoiksi valikoitui kolme tietokantaa: ProQuest, ScienceDirect ja MDPI. Tutkimusten julkaisuuden rajaukseksi tietokannoissa asetettiin vuodet 2024–2026. Haku suoritettiin 6.12.2025. Rajauksessa otettiin huomioon tietoperustasta saatua tietoa sekä painotus kerätä uutta tutkimustietoa. Julkaisukielenä käytettiin englantia. Jokaisen valitun aiheen tietokanta haku tehtiin erikseen toisistaan hakuprosessin selkeyttämiseksi. Jokaiselle aiheelle tehtiin pilotointi haku jokaiseen valittuun tietokantaan, minkä avulla nähtiin mahdollinen tarve tarkemmille hakusanoille tai lauseille.

8.3 Haun valinnat ja tulokset

ProQuest tietokannassa käytettiin vakio tarkennuksena ”Full text” ja ”Peer reviewed”. ScienceDirect tietokannassa vastaavasti tarkennuksena ”Research articles”. CSA ANSI/CSA CHMC 1 – aihe hakusanalla ” CSA ANSI/CSA CHMC 1” saatiin yhteensä 19 hakutulosta. ”ISO-7039” tuotti yhteensä

21 hakutulosta ja Austeniittisen teräksen hakulauseke "Austenite" AND "alloy" yhteensä 11228 hakutulosta.

" CSA ANSI/CSA CHMC 1" ja "ISO-7039" hakusanat tarjosivat tarpeeksi hakutuloksia, mutta austeniittisen teräksen hakutulos oli turhan suuri. Hakulauseketta parannettiin lisäämällä "Hydrogen embrittlement" ja "austenite" OR "hydrogen embrittlement" NOT review otsikko vaatimukseen, jotta saataisiin hakutulokset painotettua tutkimuksiin, jotka eivät ole katsauksia muista tutkimuksista tai tiedoista sekä painottamaan austeniittista mikrorakennetta ja vetyhaurautta tulosten sisältöön. Tämä muutos toi yhteensä 275 hakutulosta.

Tietoperustasta valittujen aiheiden lisäksi luotiin geneerinen hakulauseke tukemaan hakutulosten määrää ja luonnetta. Hakulauseke oli: "hydrogen embrittlement" "pressure vessel" otsikko rajoituksilla Title: "Pressure vessel" NOT review NOT composite NOT pipeline. MDPI tietokannassa ei käytetty rajausta, sillä se tarjosi ilman sitä vain neljä tulosta. Yhteensä hakutuloksia geneerisellä hakulausekkeella tuli 29. Kokonaisuudessaan katsausta varten saatiin yhteensä 344 hakutulosta kaikilla neljällä hakulauseella.

Seuraavaksi siirryttiin suodattamaan hakutuloksia. Suodatus alkoi otsikoiden perusteella valikoidulla. Otsikoiden perusteella hakutuloksia saatiin yhteensä 140. Seuraavaksi luettiin tutkimusten tiivistelmät, jonka jälkeen poistettiin eri tietokannoista tulleet mahdolliset kaksoiskappaleet. Viimeiseen vaiheeseen jäljellä oli 42 tulosta. Viimeiseen vaiheeseen kuului varmistaa koko tekstin saatavuus, tekstin lukeminen ja tekstin arviointi sen soveltuvuudesta vastaamaan tutkimuskysymyksiin. Katsaukseen lopulta selvisi 15 tutkimusta.

Varsinaisen tietokantahaun jälkeen suoritettiin manuaalinen haku samoissa tietokannoissa. Vaikka kuivaileva kirjallisuuskatsaus antaa enemmän vapautta tiedonhaun suhteen, manuaalinen haku päätettiin pitää kohdistettuna tutkimuksiin ja yhteen aiheeseen. Manuaalinen haku suoritettiin 4.1.2026. Manuaalisessa haussa hyödynnettiin varsinaisessa aineistohaussa esiintynyttä tutkimusta, jota ei pidetty katsaukseen pätevänä. Tutkimuksessa oli silti aihe, jota pidettiin lupaavana ja haun tekemisen arvoisena. Manuaalinen haku suoritettiin tutkimuksesta avulla luoduista hakusanoilla: Electric pulse treatment "hydrogen embrittlement". Haulla oli samat rajoitukset kuin varsinaisella haulla (julkaisuvuodet, full text, peer reviewed ja research article). Science Direct tuotti

tuloksia 122 kappaletta, ProQuest 6 ja MDPI 0. Varsinaisen haun tavalla tutkimuksia suodatettiin ja Science Direct tietokannasta valikoitui kolme kappaletta, nostaan tutkimusten kokonaismäärän 18 tutkimukseen katsausta varten. Valituille tutkimuksille toteutettiin laadunarviointi ja niiden lähteet sijoitettiin liitteeseen 1.

8.4 Aineiston laadun arviointi

Valikoidulle aineistolle suoritettiin laadunarviointi, joka on sijoitettuna liitteeseen 2. Laadunarvioinnissa keskityttiin arvioimaan asteikolla 1–3 tutkimuksen sisäisiä ja ulkoisia tekijöitä laadullisesti. Asteikko 1–3 valittiin, jotta mahdolliset eroavaisuudet esiintyisivät tehokkaasti. Arvioitavia tekijöitä olivat: Viitekehys, tutkimusmenetelmien kuvaus, tulosten ja johtopäätösten ilmaisu, puolueettomuus ja lähteiden luotettavuus. Jokaisesta tutkimuksesta muodostettiin lopuksi loppuarvona arvioitujen tekijöiden perusteella.

8.5 Aineiston analyysi

Katsausta varten aineiston analyysimenetelmäksi hyödynnettiin temaattista analyysiä, jossa aineistoa käsitellään koodaamalla se eri alateemoihin. Alateemojen avulla oli tarkoitus kohdentaa ja tiivistää kirjallisuuskatsauksesta saatuja havaintoja vastaamaan asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Alateemat on muodostettu tutkimuskysymyksiin liittyvistä asioista. Alateemoihin lisättiin muistiinpanoja aineistosta tehtyjen havaintojen pohjalta. Alateemat olivat kehitys, testaaminen ja turvallisuus. Alateemojen muistiinpanoja hyödyntäen pyrittiin luomaan synteesejä eri lähteiden väliltä sekä yksittäisiä havaintoja, joista muodostettiin tulokset katsaukselle. Saatuja tuloksia analysoitiin aineistolähtöisesti.

Kehityksellä pyritään löytämään edistystä vetyhaurastumisen ymmärryksestä ilmiönä ja siihen vaikuttavista mekanismeista.

Testaus kohdassa keskitytään keräämään tietoa vetyhaurastumisen testausmenetelmien kehityksestä ja testausmenetelmien eroista.

Turvallisuus on merkittävä tekijä uusien teknologioiden ja teknisten ratkaisujen kehityksessä. Katsauksessa pyrittiin löytämään miten materiaalien valinta ja niihin vaikuttavat tekijät sekä käyttöolosuhteiden vaikutukset ja huolto voivat vaikuttavat turvallisuuteen.

9 Tulokset

Katsauksen aineistosta muodostettiin vastaukset asetettuihin tutkimuskysymyksiin ja molempiin tutkimuskysymyksiin pyrittiin vastaamaan samanaikaisesti. Tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

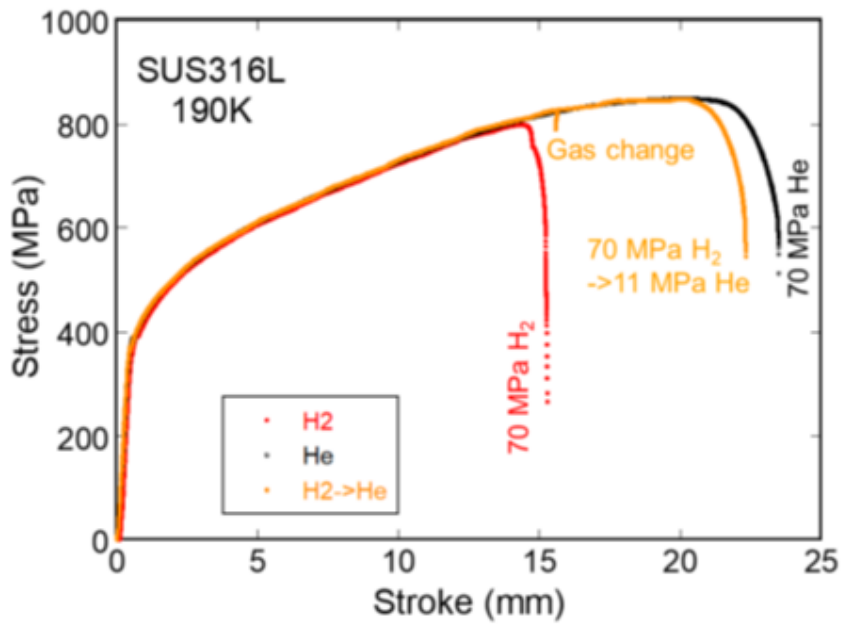
- Mitä uutta tutkimustietoa on vetyhaurauden suhteen painelaitteissa?
- Miten kerättyä tietoa voidaan soveltaa lämmittämättömien painesäiliöiden suunnittelun, materiaalivalinnan ja standardien kehittämisen tueksi?

9.1 Vetyhaurauden testaaminen

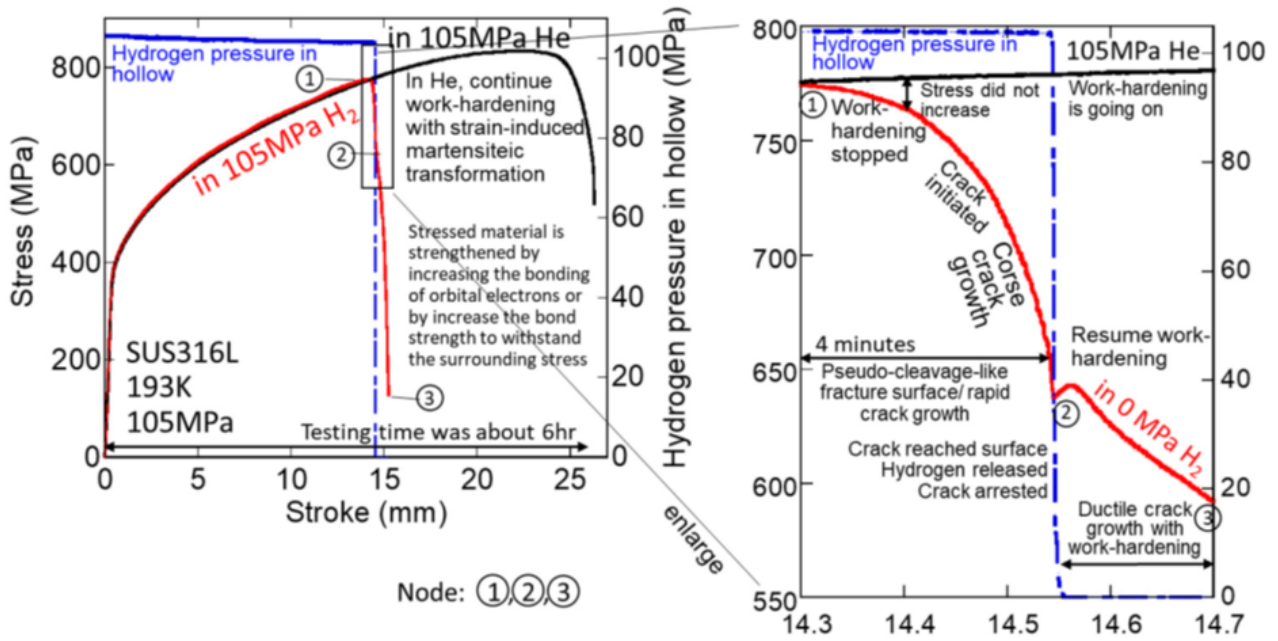
Onttojen testikappaleiden hyödyntäminen materiaalien vetyhaurauden testaamisessa on toimiva ratkaisu, vaikkakin sen täyden potentiaalin hahmottaminen vaatii enemmän tutkimusta. Ontot testikappaleet tuovat myös uusia mahdollisuuksia materiaalien vetyhaurauden testaamisen soveltamiseen. (Ogata 2025; Michler, Schönborn & Oesterlin 2025.) Onttoihin testikappaleisiin valmistettujen reikien pinnankarheus ja halkeaman aloituskohtien lukumäärä vaikuttavat vedyn jakautumiseen ja murtumismekanismiin. (Konert, Campari, Nietzke, Sobol, Paltrinieri & Alvaro 2024; Campari, Konert, Sobol & Alvaro 2024.)

Vetykaasun vapautuminen ontossa testikappaleessa voi katkaista vedyn vaikutuksen materiaaliin, kun halkeama saavuttaa testikappaleen ulkopinnan ja vedyn vuotaessa pois (Ogata 2025). Kuviossa 9–12 on esitettyä Ogatan (2025) tutkimuksessa tehtyjen testien tuloksia eri teräksillä. Kuviossa 9 nähdään jännitys-siirtymä käyrissä teräksen käyttäytyminen, jossa testikappaleen sisältämä vetykaasu korvattiin heliumkaasulla juuri ennen kappaleen murtumisjännitystä. Kuviossa 10 ja 11 on jännitys-siirtymä käyrä, kun vetykaasu pääsee vapautumaan testikappaleeseen muodostuneesta halkeamasta. Kuviossa 12 nähdään SUS316L-teräksen ontton testikappaleen murtumispinta vetykaasun 105 MPa paineessa ja 193 K lämpötilassa. Testikappaleen sisäpinnalta alkoi halkeama, joka ulottui testikappaleen ulkopinnalle, minkä jälkeen kappaleen vetykaasu pääsi vapautumaan ja

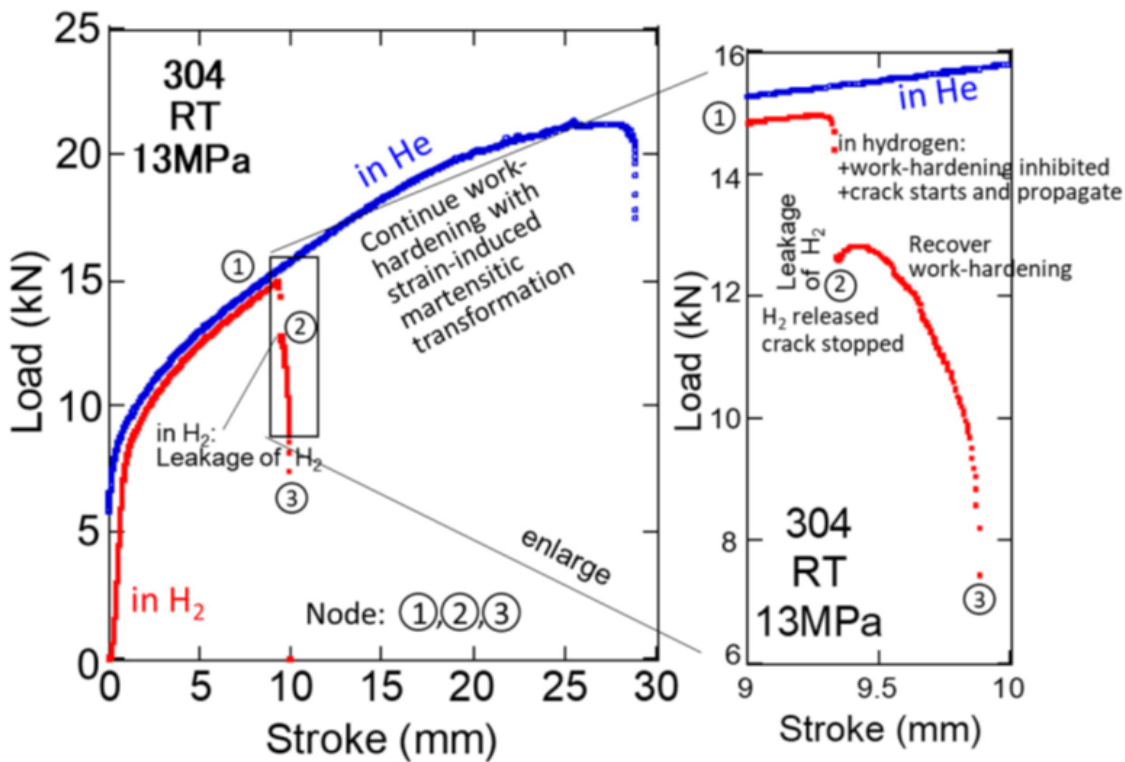
halkeama jatkoi kasvamistaan sitkeän murtuman muodossa (mt.). Tutkimuksen pohjalta Ogata (2025) esittää teoriaa, jossa materiaalin vetyhauraus johtuu sen muokkauslujittumisen estymisestä, syventyen materiaalien atomien elektronien käyttäytymiseen vedyn vaikutuksesta. (Ogata 2025.)



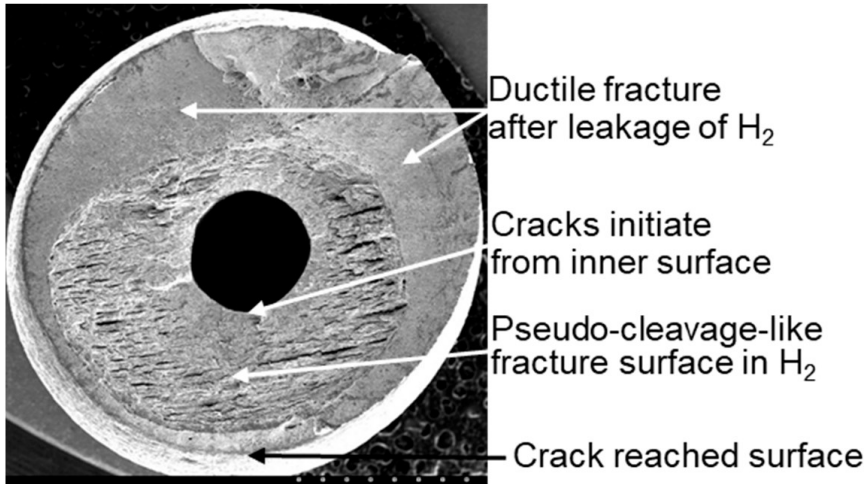
Kuvio 9. SUS316L-teräksen testaus tulos (Ogata 2025, 7).



Kuvio 10. SUS316L-teräksen testauksen ilmiöt (Ogata 2025, 9).

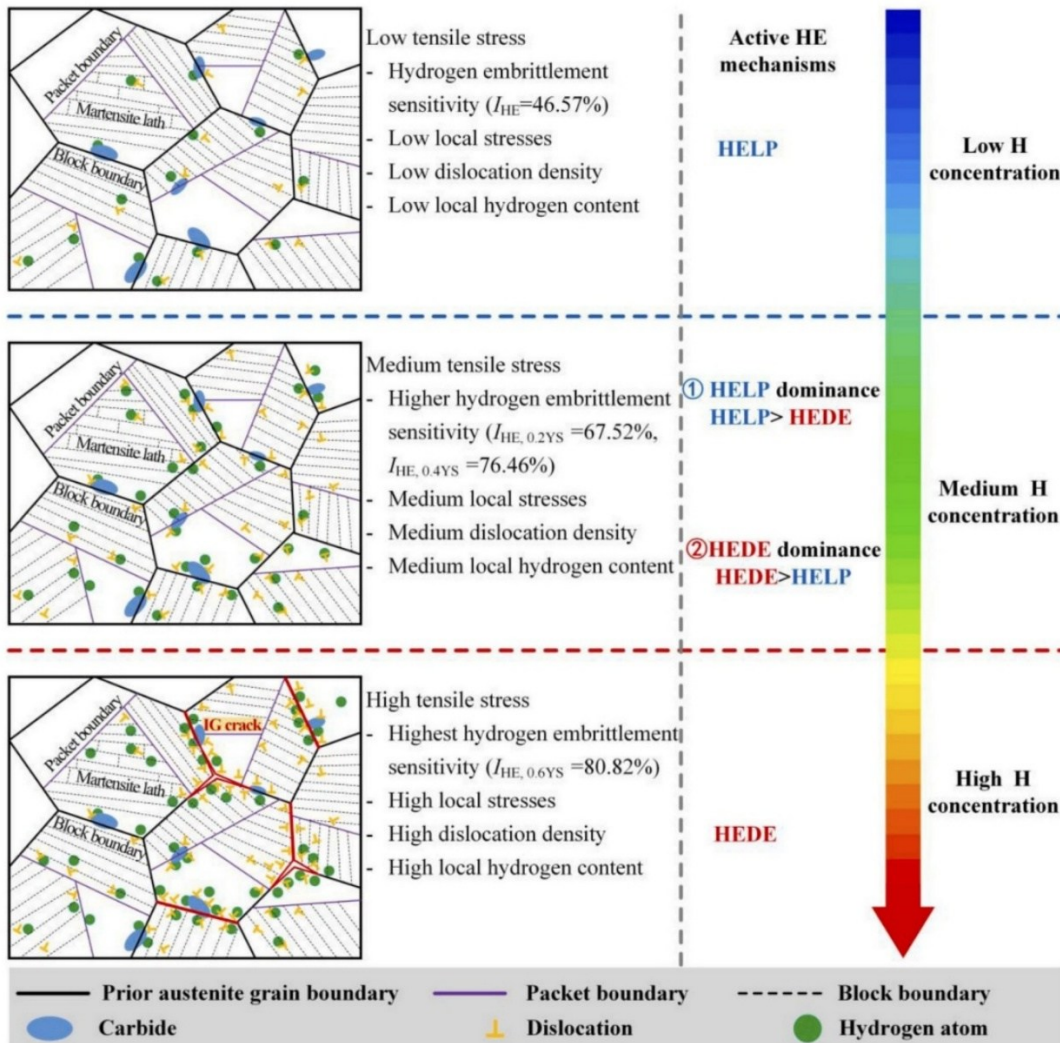


Kuvio 11. SUS304L-teräkselle tehdyn testin ilmiöt (Ogata 2025, 8).



Kuvio 12. SUS316L-teräksen ontton kappaleen murtumispinta (Ogata 2025, 8).

Vedyllä testattavan kappaleen kuormitus ja vety-ympäristö vaikuttaa myös vedyn ja sen aiheuttamien murtumismekanismien käyttäytymiseen materiaaleissa. Alhaiset jännitustasot eroavat murtumismekanismiltaan korkealla jännitustasolla olevista ja eri murtumismekanismi on myös havaittavissa, kun verrataan eri vetyrasituksia keskenään. (Sun, Ding, Chen, Lu, Li & Wang 2025; Fukunaga 2025.) Vedyn vaikutusmekanismin eteneminen materiaalin vetypitoisuuden noustessa ja sen mukana tulevien mikrorakenteen muutokset on esitettyinä kuviossa 13.



Kuvio 13. Vedyn vaikutusten muuntuminen eri rasituksessa ja vetypitoisuudessa (Sun ym. 2025, 13).

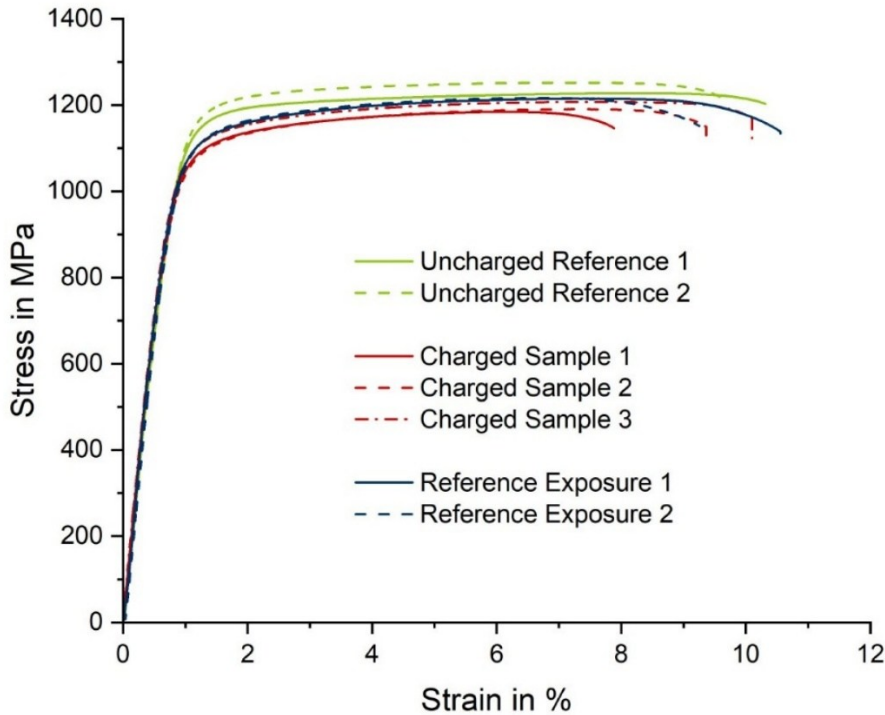
Vetyhaurauden vaikutusten testausmetodit ja niissä käytettävät parametrit voivat vaikuttaa vetyhauraudesta saataviin havaintoihin ja koska testausmetodit ovat siirtymässä kohti käyttöolosuhteita paremmin vastaavia, paremmin sovellettavia ja standardisoituja testausmenetelmiä, korostuu tutkimusten suunnittelun ja tulosten tarkastelun tarkkuus ja tärkeys tulevaisuudessa. Tarkasti määritellyt testausstandardit materiaalin vetysoveltuvuutta varten voisivat parantaa tutkimusten vertailua keskenään nopeuttaen teknologista kehitystä. Nykyisiä suunnittelu ja vaatimuskriteereitä voitaisiin parantaa huomioimalla eri jännitysten ja vetyrasitusten luomat yhteisvaikutukset materiaaliin.

9.2 Materiaalin valinta

Materiaalin valinnassa vetysovelluksiin tulisi huomioida materiaalin mikrorakenteen ja seostuksen lisäksi myös materiaalin muokausprosessien vaikutus vetyhaurauteen. Mitsuhiro, Wen & Kondo (2024) tutkivat SUS304-teräksen muokausprosesseja, jonka tuloksissa materiaalin korkeampi vetytitoisuus korreloi materiaalin korkeammassa sisäisessä rasituksessa. Vedyn vaikutukset eivät esiintyneet vetolujuustesteissä, mutta korostuivat väsytykskokeissa. (Mitsuhiro, Wen & Kondo 2024.)

Materiaalin mikrorakenne ja seostus voivat joko lisätä tai vähentää vetyhaurausriskiä. Nb ja Nb-V seostus, raekoon pienentäminen ja tehokkaat vetyloukut vähentävät vedyn diffuusiota ja halkeaman etenemistä vedyn vaikutuksesta. (Jürgensen, Frehn, Ohla, Stolz & Pohl 2024; Li, Zhang, Yang, Wan, Ma, & Wang 2025; Cho, Cho, Seo, Lee & Kim 2023.)

Hienorakenteinen mikrorakenne, tehokkaat vetyloukut ja alhaisen vedyn diffuusiokyvyn omaavat materiaalit soveltuvat hyvin vetysovelluksiin. Tietyt lujat kupariseokset kuten Alloy 25, austeniittiset teräkset ja muut hyväksi todetut, kattavasti testatut materiaalit voivat soveltua käyttökohteisiin, joissa perinteiset materiaalit kärsivät vetyhauraudesta. Materiaalien testausmetodeissa täytyy kuitenkin huomioida testausparametrit ja materiaalin ominaisuudet. (Kniep, Rudolphi, Ohla, Frehn & Galetz 2025; Fukunaga 2024; Jürgensen ym. 2024.) Lujan kupariseoksen Alloy 25 SSRT-testitulokset on esitetty kuviossa 14, jossa vedyttömiin vertailunäytteisiin verrattuna vetytitoisten näytteiden ominaisuuksissa ei havaittu merkittävää vedyn vaikutusta. Murtovenymä on pienentynyt, mutta kaikkien testikappaleiden näytteet murtoivat plastisen alueen sisällä. (Jürgensen ym. 2024.)

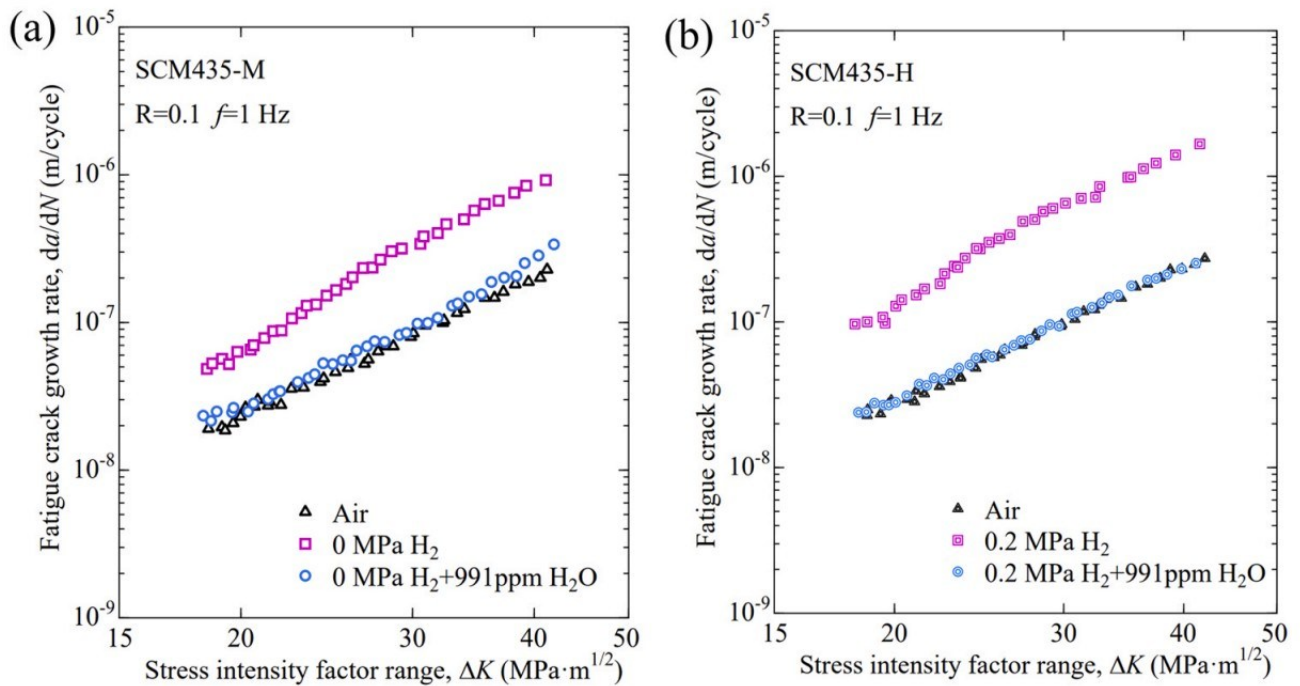


Kuvio 14. Vedyn vaikutus Alloy 25 SSRT-testituloksiin (Jürgensen ym. 2024, 9).

Materiaalin mikrorakenteen, seostuksen ja itse materiaalin valinnan vaikutukset korostavat materiaalien kokonaisvaltaisen huomioimisen merkitystä painesäiliöiden turvallisuudessa. Lisäksi materiaalin valmistus ja käsittely on huomioitava. Lupaavat tulokset muilla materiaaleilla kuin teräksillä olisi hyvä huomioida tulevaisuuden teknologisia ratkaisuja kehittäessä painesäiliöihin ja standardeja laatiessa.

9.3 Optimoitu suunnittelu ja vetyhaurauden ehkäisy

Shang, Umezaki, Masuda, Yusalla, Okana, Naho, Staykov & Kubota (2025) osoittavat tutkimuksessaan, että 991 vol ppm vesihöyryn lisääminen vetykaasuun esti vedyn vaikutusta teräksessä olevassa halkeamassa. Halkeaman kasvunopeus vesihöyryä sisältävässä vedyssä hidastui merkittävästi kuivaan vetyyn verrattuna tutkimuksen materiaalin molemmilla lujuuksilla, mikä voidaan havaita kuviosta 15. Vesihöyrypitoisen vedyn altistukselle joutuneen materiaalin murtumispinnoilla oli sitkeää murtumaa ja ilman vesihöyryä vedylle altistuneen materiaalin murtumispinta oli hauraampi vahvistaen vesihöyryn vaikutuksen. (Shang ym. 2025.)



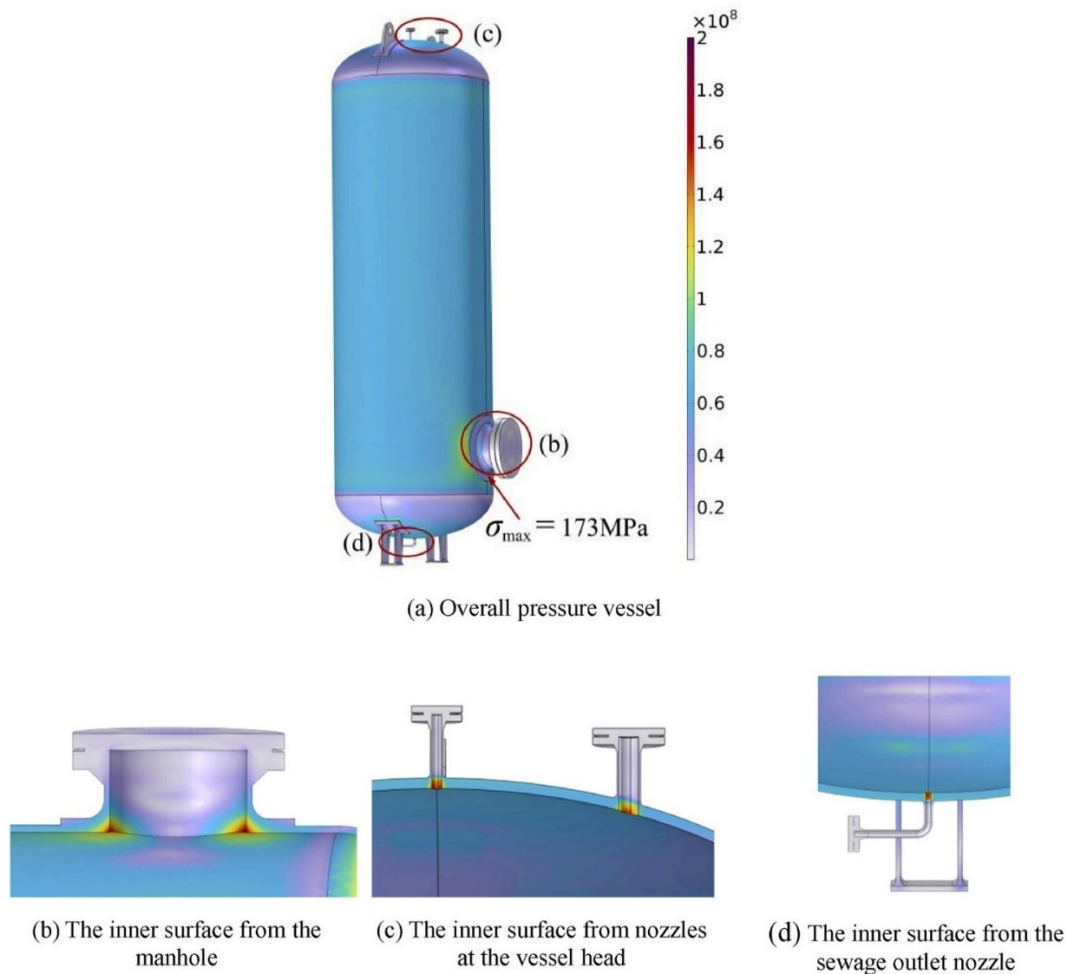
Kuvio 15. Vesihöyryn lisäämisen vaikutus halkeaman kasvuun paineistetussa vedyssä (Shang ym. 2025, 4).

Electric Pulse Treatment (EPT)-käsittelyn avulla voidaan muokata teräksen mikrorakennetta, parantaa korroosion kestoa ja käyttää osana materiaalin vetytitoisuuden vähentämisen prosessissa. Mikrorakenteessa EPT-käsittely voi muuttaa raekokoja, raerajan kulmaa ja vähentää martensiittia. (Hu, Geng, Babaei, Gramlich, Bai, Zhao, Li, Sun, Zhang, Krupp & Luo 2025; Tong, Qin, Ma Pan, Xiao, Jiang, Yang & Deng 2025; Chun-huan, Zhe-ming, Shu-bang, Qian-fei, Tao & Feng-chun 2024.)

Vesihöyryn lisääminen vetykaasuun ja EPT-käsittely osoittavat vetyhaurauden riskin pienentämisen mahdollisuuden myös muilla tavoin kuin materiaalivalinnoilla. Vesihöyryn lisääminen vetykaasuun ja EPT-käsittely voivat tarjota uusia mahdollisuuksia käyttö- ja huoltovaatimukseen painesäiliöille. Materiaalien ominaisuuksia parantava EPT-käsittely voisi soveltua vedylle tarkoitetun painesäiliön toimintakyvyn ylläpitoon koko elinkaaren ajaksi ja vastaavasti vesihöyry voisi olla jatkuvasti hyödynnettävä metodi. Painesäiliöiden turvallisuuden lisäämiseksi standardeissa voisi olla hyödyllistä huomioida materiaalin ja vetykaasun käsittelymenetelmät vetyhaurastumista vastaan.

Painesäiliöiden suunnittelussa vetykäyttöön on hyödyllistä käyttää laskenta- ja simulointiohjelmiä sekä olemassa olevista painesäiliöistä kerättyä dataa painesäiliön rakenteen, käytön ja elinkaaren

optimointiin. Ohjelmien avulla voidaan havaita vedyn aiheuttamat rasitukset painesäiliön tietyissä osissa ja minkä suuruisia ne ovat. Rasituksia aiheuttavat mahdolliset halkeamat ja painesäiliön käytöstä johtuva painevaihtelu. (Kim, Lee, Lee, & Ha 2024; Ma, He, Song, He, Chen, Shen, Baig, Luo, & Wang 2024.) Kuviossa 16 nähdään mahdollisia vedyn aiheuttamia rasituksia painesäiliön rakenteessa sekä niiden voimakkuuksia kuviossa 16 esiintyvän asteikon mukaan.



Kuvio 16. Kuormituskohtia vedyn vaikutuksesta painesäiliössä (Ma ym. 2024, 7).

Vetysovelluksia varten kehitetyt uudet ohjelmat sekä olemassa olevista vetysovelluksista kerätty data voisivat tehostaa painesäiliöiden suunnittelua ja tarjota paremmat lähtökohdat turvallisemmalle suunnittelulle. Valmiit suunnittelu pohjat voisivat mahdollistaa materiaalien yksityiskohtaisen vertailun painesäiliön suunnittelussa ja elinkaaren optimoinnissa. Ohjelmien kautta voisi myös onnistua eri standardien vaatimusten tulkinta ja hyödyntäminen tulevaisuuden teknisten ratkaisujen suunnittelussa.

10 Pohdinta

10.1 Tutkimuksen luotettavuus

Hyvään tieteelliseen tutkimuksen toteuttaminen kattaa tutkimuksen monta eri osa-aluetta. Tutkimuksen suunnitteluun, toteutukseen, raportointiin, tulosten esittämisessä ja arvioinnissa sekä talentamisessa tulee käyttää rehellisyyttä, huolellisuutta ja tarkkuutta. Muiden tutkijoiden työhön kuuluu viitata asianmukaisesti ja kunnioittavasti. (Hyvä tieteellinen käytäntö (HTK) 2023.)

Kirjallisuuskatsauksissa tulisi tehdä kaksi laadunarviointia, katsaukseen valittavien tutkimusten ja itse kirjallisuuskatsauksen laadunarviointi. Keskeisessä asemassa kirjallisuuskatsauksen arvioinnissa on valitun aineiston valintakriteerien sekä tutkimusten hyödyllisyys ja merkitys tutkimuskysymyksiin nähtynä. Kirjallisuuskatsauksen tekijän pitäisi pystyä perustelemaan päätöksensä selkeästi ja läpinäkyvästi katsauksen aineiston sisällyttämisen- ja poissulkemisen- kriteereistä. (Vilka 2023, 92–95, 104.)

Tässä tutkimuksessa aineistonkeruuprosessi on nähtävillä aineiston hankinta sekä haun valinta ja tulokset-osiossa. Osioista käy ilmi valitut tietokannat, hyödynnetyt hakusanat ja rajaukset perusteltuina. Katsaukseen valittujen tutkimusten laadunarviointi on sijoitettu liitteeseen 2. Laadunarvioinnissa arvioitiin tutkimusten sisäisiä ja ulkoisia tekijöitä. Aineiston laadunarvioinnista nousi erityisesti esiin tutkimusten ulkoiset rahoitukset, tuet ja yhteistyöt. Tästä syystä aineiston laadun varmistamiseksi kerättyjen tutkimusten osa-alueita erityisesti viitekehystä ja käytettyjä lähteitä tarkasteltiin tutkimuksen tieteellisen tarpeen vahvistamiseksi riippumatta ulkoisista rahoituksista, tuista ja yhteistyöstä.

Yksilöllistä harkintaa aineistonkeruussa käytettiin otsikoiden perusteella valikoinnissa, tutkimusten tiivistelmien lukemisessa, ja tekstin arvioinnissa sen soveltuvuudesta vastaamaan tutkimuskysymyksiin. Yksilöllisen harkinnan vaikutus pyrittiin minimoimaan tutkimuksen luotettavuuden parantamiseksi hakusanojen muodostamisen metodilla, tarkkuudella ja yksilöllisen harkinnan progressiivisella kiristämällä, sillä yksilöllisen harkinnan kautta voi tulla virheitä ja hyvää aineistoa voi jäädä katsauksen ulkopuolelle ja huonoa aineistoa jäädä katsauksen sisälle.

Tutkimus koskettaa monia laajoja aihepiirejä, jotka vaativat hyvää ymmärrystä ja perehtymistä kuten vetyhauraus, painelaitteet ja standardisointi. Tämä on aiheuttanut ongelmia tutkimuksen rajaamisessa ja tarkkuudessa, sillä kaikkia aihepiirejä ei ole voitu käydä syvällisesti ja perusteellisesti läpi. Syvällistä ja perusteellista läpikäyntiä erityisesti rajoittivat tutkimuksen suositeltu pituus, käytävissä oleva aika ja kirjoittajan kyvykyys tehdä tutkimusta. Näistä syistä tutkimuksen monet osa-alueet jäivät rajallisiksi. Siitä huolimatta tutkimuksessa pyrittiin tuomaan tietoperustasta lähtien aihepiirien konkreettisia asioita esille ja hyödyntämään niitä tehokkaasti tutkimuksen hyödyllisyyden lisäämiseksi sekä aihepiirien muodostaman kokonaiskuvan tilanteen hahmottamiseksi.

10.2 Tutkimuksen eettisyys

Tutkimus toimii uuden ja ajankohtaisen tiedon löytämistä varten ja toimii mahdollisesti päätöksenteon tukena tulevaisuuden hankkeita varten. Toimeksiantajan toimeksianto ei ohjaa työtä tiettyyn ideologiseen suuntaan ja vaikka työn aiheeseen sitoutuu tiettyssä määrin tiettyjä poliittisia päätöksiä ja linjauksia, on tutkimuksessa pyritty olemaan neutraali ja keskitytty tieteeseen. Tutkimuksessa esitellyt tulokset ja johtopäätökset on pyritty tuomaan tutkijoiden tuomaa tietoa kootusti, vilpittömästi ja vääristämättä. Tekoälyä hyödynnettiin työssä alustavan tiedonkeruun vaiheessa alkuperäislähteiden etsinnässä ja kirjallisuuskatsauksen karkean rakenteen järjestelyn ideoinnissa (ChatGPT), käänöksissä (Deep L) ja asioiden sekä ilmiöiden kuvauksen alkuperäislähteiden etsinnässä (Microsoft Copilot, Google Gemini). Tässä tutkimuksessa esitetyt asiat ovat kirjoittajan omia havaintoja tutkimuksien, teosten ja julkaisujen pohjalta, joiden keräämiseen ja käsittelyyn on hyödynnetty yksilöllisiä metodeja, hakusanoja sekä rajauksia. Tästä syystä väärinymmärryksiä tai puutteita voi esiintyä. Tutkimusten viittaukset ja lähteet ovat selkeästi saatavilla, jotta tutkimuksen lähteiden kriittinen tarkasteleminen on tarvittaessa mahdollista lukijalle. Tutkimusten lähteet ovat tästä syystä sijoitettu liitteeseen 1 parantamaan selkeyttä.

10.3 Johtopäätökset

Poliittisten päätösten tuoma tarve tehokkaille, turvallisille ja pitkäikäisille vetyteknologian ratkaisuille on kiihdyttänyt uusien tutkimusten ja standardien tarvetta, että määrä. Ongelmia kuitenkin aiheuttaa vedyn käyttäytyminen materiaaleissa. Vetyhaurauden vaikutukset painesäiliöiden suunnitteluun kattaa monta erilaista aihepiiriä, joissa keskeisinä tekijöinä ovat vetyhaurauden vaikutukset materiaalien mikrorakenteeseen ja painesäiliöiden turvalliseen suunnitteluun.

Katsauksessa käsiteltyjen tutkimusten ja niistä saatujen havaintojen perusteella ymmärrys vetyhauraudesta ja sen ehkäisemisestä kehittyy hyvällä ja kiinnostavalla tahdilla. Vetyhaurauden vaikuttamismekanismit materiaaleihin ovat hyvin tiedossa, mutta täydellistä ymmärrystä niistä ei vielä ole. Testausmetodien soveltaminen, uusien metodien käyttöönotto ja metodien vertailu keskenään ovat kuitenkin vieneet ymmärrystä parempaan suuntaan. Materiaalien seostuksesta ja käsittelystä tiedetään paljon, mutta vetyhaurauden suhteen kehitystä tapahtuu jatkuvasti ja nykykaisten mallinnusohjelmien käyttö nopeuttaa ja tehostaa kokonaisvaltaista kehitystä. Jatkuvan kehityksen ja paremman ymmärryksen kautta syntyy todennäköisesti laadukkaampia tutkimuksia, joista voidaan tehdä parempia johtopäätöksiä ja mahdollisesti uusia tai paremmin toimivia teknisiä ratkaisuja. Jatkuvan kehityksen kautta todennäköisesti tavoitetaan myös tiettyjä kestävän kehityksen Agenda 2030-ohjelman asettamia tavoitteita.

Jatkuva kehitys materiaaliteknologiassa ja muissa teknisissä ratkaisuissa aiheuttavat haasteita suunnittelustandardien luomiselle. Riskinä on liian tiukat standardit, joissa rajoitetaan ominaisuuksia ja ratkaisuja, joiden soveltuvuutta ei ole vielä täysin todettu mahdottomaksi. Vetyhaurauden testausstandardit voisivat ottaa isompaa roolia tutkimusten sisällön suhteen mahdollistaen tutkimusten tulosten tehokkaamman vertailun, tulosten vahvistamisen ja kenties uusien ilmiöiden löytämisen.

Tulevaisuuden ratkaisut vetykäyttöön suunniteltujen lämmittämättömien painesäiliöiden suhteen tulee konkretisoitumaan teknologisiin ratkaisuihin, joita voidaan hyödyntää tulevaisuuden standardien luomien rajoitusten sisällä. Standardien rajoitteissa parhaimmat teknologiset ratkaisut luonut tulee todennäköisesti parhaiten menestymään vetytalouteen siirtyessä. Se kuinka paljon ja millä tavalla standardeissa tullaan rajoittamaan kaikkien mahdollisten teknologisten ratkaisujen hyödyntämistä, on vielä mysteeri. Todennäköisesti parhaiten standardien rajoitusten sisällä toimiva ratkaisu on paperilla varsin yksinkertainen eli materiaali, joka kestää puhdasta vetyä hyvin ilman ylimääräisiä käsittelyjä ja huoltoja, on kustannustehokas, omaa suuren lujuuden ja sopii nykyisten lämmittämättömien painesäiliöiden standardien mukaisen suunnittelun parametreihin.

10.4 Jatkotutkimusehdotukset

Jatkotutkimuksiksi katsauksen pohjalta ehdotetaan tutkimuksia, joissa vetyhaurauden vaikutusten ehkäisemiseksi hyväksi todettuja materiaaleja, menetelmiä ja ratkaisuja tutkitaan yhdessä ja tiukoilla testausparametreilla, jotta tutkimuksista saatujen tulosten vertailu olisi suoraviivaista ja tehokasta. Tulosten tehokkaampi vertailu nopeuttaisi jatkotutkimusten luomista, uusien ratkaisujen testaamista edistäen teknologista kehitystä ja lopulta myös standardisointia.

Vetyhaurautta ja siihen vaikuttavia asioita tutkitaan laajasti ja paljon, minkä olisi hyödyllistä ylläpitää viimeisintä tietoa uusimmista tutkimuksista ja niiden tuloksista spesifien kirjallisuuskatsausten muodossa. Monien spesifien kirjallisuuskatsausten kautta pystyttäisiin luomaan tarkkaa kokonaiskuvaa nykytilanteesta ja luomaan parempia tutkimuksia sekä teknologisia ratkaisuja vetyhaurauden kitkemiseksi, sekä mahdollisesti hyödyntämään standardien luomia rajoitteita tai mahdollisuuksia.

Lähteet

About ISO. N.d. Verkkójulkaisu iso.org sivustolla. Viitattu 19.10.2025. <https://www.iso.org/about> .

Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation N.d. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development. Verkkosivu yhdistyneiden kansakuntien sivustolla. Viitattu 16.2.2026. https://sdgs.un.org/goals/goal9#targets_and_indicators .

CEN, the European Committee for Standardization, is an association that brings together the National Standardization Bodies of 34 European countries. N.d. Verkkójulkaisu About CEN sivustolla. Viitattu 19.10.2025. <https://www.cencenelec.eu/about-cen/> .

Djukic, M., Bakic, G., Zeravcic, V., Sedmak, A. & Rajcic, B. 2016. Hydrogen Embrittlement of Industrial Components: Prediction, Prevention, and Models. Corrosion (Houston, Tex.) 2016-07, Vol.72 (7), p.943-943. Viitattu 10.11.2025. https://janet.finna.fi/PrimoRecord/pci.cdi_proquest_miscellaneous_1835612826?sid=4860869176, ProQuest Central.

Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. N.d. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Sustainable Development. Verkkosivu yhdistyneiden kansakuntien sivustolla. Viitattu 16.2.2026. https://sdgs.un.org/goals/goal7#targets_and_indicators .

EU ja standardointi. N.d. SFS Suomen Standardit ry. Verkkopalvelu. Viitattu 19.10.2025. <https://sfs.fi/standardeista/mika-on-standardi/eu-ja-standardointi/#harmonisoidut-standardit> .

Gallon, N. 2020. Hydrogen Pipelines - Design and Material Challenges and Mitigations. Kirjallisuuskatsaus, raportti. Guidelines, Papers. European Pipeline Research Group e. V. (EPRG). Viitattu 3.9.2025. https://www.eprg.net/fileadmin/EPRG_Dokumente/FR-221_2020_Literature_study_hydrogen.pdf

Gavriliuk, V. G., Shyvaniuk, V. M. & Teus, S. M. 2022. Hydrogen in engineering metallic materials: From atomic-level interactions to mechanical properties. 1st edition. Cham, Switzerland: Springer. Viitattu 10.11.2025. https://janet.finna.fi/PrimoRecord/pci.cdi_askewsholts_vlebooks_9783030985509?sid=5176127291, Knovel general engineering & project administration academic.

Hiiliteräsputki soveltuu vedyn siirtoon reunaehdot huomioiden. 2024. Ajankohtaista, Gasgrid Finland Oy:n www-sivulla 10.12.2024. Viitattu 3.6.2025. <https://gasgrid.fi/2024/12/10/hiiliterasputki-soveltuu-vedyn-siirtoon-reunaehdot-huomioiden/> .

Hyvä tieteellinen käytäntö (HTK). 2023. Tutkimuseettinen neuvottelukunta (TENK). Viitattu 11.1.2026. <https://tenk.fi/fi/tiedevilppi/hyva-tieteellinen-kaytanto-htk>.

Image 12 of 13. N.d. Kuva Geoputki yrityksen referenssit verkkosivulla. Viitattu 29.10.2025. <https://www.geoputki.fi/referenssit/teollisuus> .

img__pressure-vessels--11.jpg. N.d. Kuva painesäiliöstä Glacier Energy yrityksen tuotesivulla. Viitattu. 29.10.2025. <https://www.glacierenergy.com/products-services/heat-transfer-solutions/pressure-vessel-design-manufacture#galleryc5451e4408-2> .

Lee, J, A. & Woods, S. 2016. Hydrogen Embrittlement. Tekninen muistio. NTRS - NASA Technical Reports Server. Viitattu 3.6.2025. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160005654> .

Li, X., Ma, X., Zhang, J., Akiyama, E., Wang, Y. & Song, X. 2020. Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention. Acta metallurgica sinica: English letters, 33(6), pp. 759-773. Viitattu 10.11.2025. https://janet.finna.fi/PrimoRecord/pci.cdi_proquest_journals_2933170406?sid=5175593177, ProQuest Central.

Mikä on standardi?. N.d. SFS Suomen Standardit ry. Verkkopalvelu. Viitattu 3.6.2025. <https://sfs.fi/standardeista/mika-on-standardi/> .

Painelaitemateriaalit (SR 107). N.d. Standardisointiryhmät verkkojulkaisu METSTA:n sivustolla. Viitattu 19.10.2025. <https://metsta.fi/standardisointiryhma/painelaitemateriaalit-sr-107/> .

Painelaitestandardien tilannekatsaus 25.11.2025. 2025. METSTA ry. Tilannekatsauksen PDF-tiedosto METSTA ry:n Painelaitteet (SR 267) sivustolla. Viitattu 14.2.2026. <https://metsta.fi/wp-content/uploads/2025/12/Painelaitestandardit-tilannekatsaus-2025-11-25.pdf> .

Painelaitteet (SR 267).N.d. Standardisointiryhmät verkkojulkaisu METSTA:n sivustolla. Viitattu 19.10.2025. <https://metsta.fi/standardisointiryhma/painelaitteet-sr-267/>

Painelaitteet. N.d. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Verkkopalvelu. Viitattu 3.6.2025. <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet> .

Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi. N.d. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Verkkopalvelu. Viitattu 14.8.2025. <https://tukes.fi/tietoa-tukesista/materiaalit/painelaitteet/painelaitteiden-suunnittelu-valmistus-ja-vaatimustenmukaisuuden-arviointi> .

Roadmap on hydrogen standardisation. 2023. Projekti julkaisu Hydrogen Europe sivustolla. PDF-tiedosto. Viitattu 8.9.2025. <https://hydrogeneurope.eu/ech2a-publishes-h2-standardisation-roadmap/> .

SFS-EN 10028-1:2017. Painelaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 4.8.2017. Viitattu 19.10.2025.

SFS-EN 10028-2:2017. Painelaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräkset. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 4.8.2017. Viitattu 19.10.2025.

SFS-EN 10028-3:2017. Painelaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 3: Normalisoidut hienorateräkset. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 4.8.2017. Viitattu 19.10.2025.

SFS-EN 10229:1998. Evaluation of resistance of steel products to hydrogen induced cracking (HIC). Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 17.8.1998. Viitattu 19.10.2025.

SFS-EN 13445-1:2021. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 1: Yleistä. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 21.5.2021. Viitattu 19.10.2025.

SFS-EN 13445-2:2021. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 21.5.2021. Viitattu 19.10.2025.

SFS-EN 13445-3:2021. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 3: Suunnittelu. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 21.5.2021. Viitattu 19.10.2025.

SFS-EN 13445-4:2021 + A1:2023. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 4: Valmistus. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Vahvistettu 12.5.2023. Viitattu 19.10.2025.

Standardization Roadmap for Hydrogen Technologies. 2024. Projekti julkaisu DIN-sivustolla. PDF-tiedosto. Viitattu 25.8.2025. <https://www.din.de/resource/blob/1142068/351140225e43fc560c074b860251ba16/nrm-wasserstoff-2024-engl-web-final-midres-pdf-data.pdf> .

Standardization Roadmap for Hydrogen Technologies. 2025. Projekti julkaisu DIN-sivustolla. PDF-tiedosto. Viitattu 9.11.2025. <https://www.din.de/resource/blob/1251952/d501acfd2e66d2c4d795452f5984088/nrm-wasserstoff-2025-englisch-data.pdf> .

Standardointi Suomessa ja maailmalla. N.d. SFS Suomen Standardit ry. Verkkopalvelu. Viitattu 19.10.2025. <https://sfs.fi/osallistu-ja-vaikuta/standardointi-suomessa-ja-maailmalla/> .

Steel components in the hydrogen environment. 2025. Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH. Tekninen asiakirja H2steelLab projektin nettisivulla. Viitattu 9.11.2025. https://www.h2steelab.de/fileadmin/footage/MEDIA/SZAG_microsites/h2_steelab/Whitepaper-Steel_Components_in_the_hydrogen_economy.pdf .

Strateginen standardointi edistää Suomen kilpailukykyä. N.d. SFS Suomen Standardit ry. Verkkopalvelu. Viitattu 19.10.2025. <https://sfs.fi/standardeista/standardien-hyodyt/strateginen-standardointi-edistaa-suomen-kilpailukyky/> .

Suomessa standardointityö on jaettu eri toimialoja edustaville organisaatiolle. N.d. SFS Suomen Standardit ry. Verkkopalvelu. Viitattu 19.10.2025. <https://sfs.fi/sfs-ry/meista/toimialayhteisot/> .

Tutkittua tietoa standardeista. N.d. SFS Suomen Standardit ry. Verkkopalvelu. Viitattu 19.10.2025. <https://sfs.fi/standardeista/standardien-hyodyt/tutkittua/#Yritykset> .

Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus. 2024. Tukes. Toiminnanharjoittajille suunnattu opas, jossa käsitellään vedyn tuotanto-, siirto- ja jakelumuotoja, sekä turvallisia toteutusratkaisuja. Viitattu 14.8.2025. <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#vety-lainsaadannossa> .

Vedyn standardointi tuotannosta käyttöön. N.d. Kuvaus vedyn arvoketjun standardoinnista SFS Suomen Standardit ry nettisivulla. Viitattu 25.8.2025. <https://sfs.fi/osallistu-ja-vaikuta/aihealueet/energia-ala/vedyn-standardointi-tuotannosta-kayttoon/> .

Vilkkä, H. 2023. Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina. Ensimmäinen painos. Art House Oy. Viitattu 8.9.2025. <https://janet.finna.fi>. Ellibslibrary.

Liitteet

Liite 1. Kirjallisuuskatsauksessa käytetyt lähteet

Campari, A., Konert, F., Sobol, O. & Alvaro, A. 2024. A comparison of vintage and modern X65 pipeline steel using hollow specimen technique for in-situ hydrogen testing. *Engineering Failure Analysis* Volume 163, Part A, September 2024, 108530. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630724005764> .

Cho, H-J., Cho, Y., Seo, H.J., Lee, S. & Kim, S-J. 2023. Effects of Nb addition on resistance to hydrogen embrittlement in SA 372 steels used for hydrogen-gas storage containers. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 50, Part A, 2 January 2024, Pages 224-235. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923049844> .

Chun-huan, G., Zhe-ming, F., Shu-bang, W., Qian-fei, S., Tao, D. & Feng-chun, J. 2024. Effect of electropulsing treatment on microstructure and mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials Letters* Volume 382, 1 March 2025, 137905. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X24020457> .

Fukunaga, A. 2024. Hydrogen embrittlement behaviors during SSRT tests in gaseous hydrogen for cold-worked type 316 austenitic stainless steel and iron-based superalloy A286 used in hydrogen refueling station. *Engineering Failure Analysis* Volume 160, June 2024, 108158. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630724002048> .

Fukunaga, A. 2025. Hydrogen embrittlement behaviors of A286 in high-pressure gaseous hydrogen and pre-charged hydrogen A286. *Procedia Structural Integrity* Volume 68, 2025, Pages 1059-1065. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321625001714> .

Hu, B., Geng, S., Babaei, N., Gramlich, A., Bai, Y., Zhao, W., Li, J., Sun, X., Zhang, C., Krupp, U. & Luo, H. 2025. Fully restoring the damaged ductility of H-charged medium Mn steel via pulsed current. *Scripta Materialia* Volume 262, 1 June 2025, 116663. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646225001265> .

Jürgensen, J., Frehn, A., Ohla, K., Stolz, S. & Pohl, M. 2024. Effect of Hydrogen Charging on the Mechanical Properties of High-Strength Copper-Base Alloys, Austenitic Stainless Steel AISI 321, Inconel 625 and Ferritic Steel 1.4511. *Metals* 2024, 14(5), 588. Viitattu 5.1.2026.

<https://www.mdpi.com/2075-4701/14/5/588> .

Kim, J.H., Lee, H-y., Lee, M-K., & Ha, S-J. 2024. Predictive maintenance and reinspection strategies for hydrogen refueling station pressure vessels: A case study in South Korea. *Journal of Energy Storage* Volume 97, Part B, 10 September 2024, 112860. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24024460> .

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24024460> .

Kniep, D., Rudolphi, M., Ohla, K., Frehn, A. & Galetz, M.C. 2025. Hydrogen diffusivity, solubility, and embrittlement of high-strength copper alloys in comparison to stainless steel. *NPJ Materials Degradation*; London Vol. 9, Iss. 1. Viitattu 5.1.2026. <https://www.proquest.com/docview/3206250439/48F7BA4F2FCA48DEPQ/43?accountid=11773&sourcetype=Scholarly%20Journals#> .

Konert, F., Campari, A., Nietzke, J., Sobol, O., Paltrinieri, N. & Alvaro, A. 2024. Evaluation of the tensile properties of X65 pipeline steel in compressed gaseous hydrogen using hollow specimens. *Procedia Structural Integrity* Volume 54, 2024, Pages 204-211. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245232162400074X> .

Li, J., Zhang, S., Yang, C., Wan, J., Ma, T. & Wang, T. 2025. Effects of hydrogen pressure and multi-microalloying on the hydrogen embrittlement of P110 casing steels used for underground hydrogen storage. *Engineering Failure Analysis* Volume 182, Part C, 1 December 2025, 110169. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630725009100> .

Ma, Y., He, S., Song, D., He, X., Chen, T., Shen, F., Baig, O., Luo, S. & Wang, J. 2024. Crack propagation characteristics and fatigue life of the large austenitic stainless steel hydrogen storage pressure vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* Volume 210, August 2024, 105226. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016124001030> .

Michler, T., Schönborn, S. & Oesterlin, H. 2025. Crack initiation due to low cycle fatigue in X60 pipeline steel tested in high pressure gaseous hydrogen using hollow and conventional specimens. *International Journal of Fatigue* Volume 204, March 2026, 109354. Viitattu 5.1.2026.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112325005511> .

Mitsuhiro, O., Wen, H. & Kondo, R. 2024. Hydrogen embrittlement of austenitic stainless steels with different surface treatments. *International Journal of Steel Structures*, 24(3), 477-487. Viitattu 5.1.2026.

<https://www.proquest.com/docview/3254968908/48F7BA4F2FCA48DEPQ/89?accountid=11773&sourcetype=Scholarly%20Journals> .

Ogata, T. 2025. Hydrogen Does Not Embrittle Materials Themselves but Inhibits the Work Hardening of Materials. *Processes* 2025, 13(10), 3236. Viitattu 5.1.2026. <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/10/3236> .

Shang, J., Umezaki, S., Masuda, T., Yussalla, V.I., Okano, H., Naho, I., Staykov, A. & Kubota, M. 2025. Suppressing gaseous hydrogen embrittlement of Cr–Mo steel by introducing water vapor: Insights from experiments and calculations. *Corrosion Science* Volume 256, November 2025, 113252. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X25005797> .

Sun, Y., Ding, W., Chen, Z., Lu, X., Li, M. & Wang, C. 2025. Effect of elastic tensile stress on hydrogen diffusion kinetics and embrittlement mechanisms in AISI 4130 steel. *Materials Science and Engineering: A* Volume 943, October 2025, 148861. Viitattu 5.1.2026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509325010858> .

Tong, X., Qin, C., Ma, H., Pan, Y., Xiao, A., Jiang, B., Yang, W. & Deng, Y. 2025. Simultaneously enhancing corrosion resistance and mechanical properties of 304 stainless steel via electropulsing treatment. *Surfaces and Interfaces* Volume 77, 15 November 2025, 108041. Viitattu 5.1.2026.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468023025022928> .

Liite 2. Kirjallisuuskatsauksen valittujen aineistojen laadunarviointi

| Arvioitu lähde | Viitekehys | Tutkimusmenetelmien kuvaus | Tulosten ja johtopäätösten ilmaisuus | Puolueettomuus | Lähteiden luotettavuus | Kokonaisarvosana x/3 |
|--------------------|-------------------------------------|---|---|---|--|----------------------|
| Fukunaga, A. 2024. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Tuoreita lähteitä hyvin. Omaan tuotokseen viitattu ja joihinkin lähteisiin pääsyssä ongelmia. (2) | 2,6 / 3 |
| Fukunaga, A. 2025. | Viitekehys hyvin kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu. (2) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Ei merkkejä puolueellisuudesta. (3) | Tuoreita lähteitä hyvin. Omaan tuotokseen viitattu reilusti. Ottaen huomioon tutkimuksen tekijän auktoriteetin ja kokemuksen pidetään luotettavuus hyväksyttävänä. (2) | 2,4 / 3 |

| | | | | | | |
|--|---|---|---|---|--------------------------------------|----------------|
| Campanari, A., Konert, F., Sobol, O. & Alvaro, A. 2024. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,8 / 3 |
| Hu, B., Geng, S., Babaei, N., Gramlich, A., Bai, Y., Zhao, W., Li, J., Sun, X., Zhang, C., Krupp, U. & Luo, H. 2025. | Viitekehys kuvattu, mutta tutkimuksen raportin osia ei ole otettu huomioon. (1) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,4 / 3 |
| Kniep, D., Rudolphi, M., Ohla, K., Frehn, A. & Galetz, M.C. 2025. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti, mutta tutkimuksen raportin rakenne normaalista poikkeava ja sen takia hieman erikoinen lukea. (1) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta ottaen huomioon viitekehysten lähteet. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,4 / 3 |
| Konert, F., Campanari, A., Nietzsche, J., Sobol, O., Paltrinieri, N. & Alvaro, A. 2024. | Viitekehys hyvin kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Kattavasti lähteitä. (3) | 2,8 / 3 |

| | | | | | | |
|---|-------------------------------------|---|---|---|--------------------------------------|----------------|
| Chun-huan, G., Zhe-ming, F., Shu-bang, W., Qian-fei, S. Tao, D. & Feng-chun, J. 2024. | Viitekehys lyhyehkö. (2) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Lähteitä vähänlaisesti. (2) | 2,4 / 3 |
| Cho, H-J., Cho, Y., Seo, H.J., Lee, S. & Kim, S-J. 2023. | Viitekehys lyhyehkö. (2) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta ottaen huomioon viitekehysten ja käytetyt lähteet. (2) | Kattavasti lähteitä. (3) | 2,6 / 3 |
| Jürgensen, J., Frehn, A., Ohla, K., Stolz, S. & Pohl, M. 2024. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja kahden tutkimuksen tekijän yhteys yritykseen huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta ottaen huomioon muut tutkimuksen tekijät ja heidän roolinsa tutkimuksessa. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,8 / 3 |
| Kim, J.H., Lee, H-y., Lee, M-K. & Ha, S-J. 2024. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta ottaen huomioon tulosten ja johtopäätösten luonteen. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,8 / 3 |
| Li, J., Zhang, S., Yang, C., Wan, J., Ma, T. & Wang, T. 2025. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu (2) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,6 / 3 |

| | | | | | | |
|---|-------------------------------------|---|---|---|---|----------------|
| Shang, J., Umezaki, S., Masuda, T., Yussalla, V.I., Okano, H., Naho, I., Staykov, A. & Kubota, M. 2025. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta ottaen huomioon viitekehysten ja käytetyt lähteet. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,8 / 3 |
| Mitsuhiro, O., Wen, H. & Kondo, R. 2024. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Ei merkkejä puolueellisuudesta. (3) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 3,0 / 3 |
| Michler, T., Schönborn, S. & Oesterlin, H. 2025. | Viitekehys lyhyehkö. (2) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta ottaen huomioon tulosten ja johtopäätösten luonteen. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,6 / 3 |
| Ogata, T. 2025. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Ei merkkejä puolueellisuudesta. (3) | Tuoreita lähteitä hyvin. Omaan tuotokseen viitattu reilusti. Ottaen huomioon tutkimuksen tekijän auktoriteetin ja kokemuksen, pidetään luotettavuus hyväksyttävänä. (2) | 2,6 / 3 |
| Tong, X., Qin, C., Ma, H., Pan, Y., Xiao, A., Jiang, B., Yang, W. & Deng, Y. 2025. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,8 / 3 |

| | | | | | | |
|--|-------------------------------------|---|---|---|--------------------------------------|----------------|
| Ma, Y., He, S., Song, D., He, X., Chen, T., Shen, F., Baig, O., Luo, S. & Wang, J. 2024. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Kattavasti lähteitä. (3) | 2,8 / 3 |
| Sun, Y., Ding, W., Chen, Z., Lu, X., Li, M. & Wang, C. 2025. | Viitekehys kattavasti kuvailtu. (3) | Testausmenetelmät kuvattu tarkasti. (3) | Tulokset ja johtopäätökset ovat selkeät ja tarkasti kuvailtu. (3) | Yhteistyö ja rahoitus huomioitu. Tutkimukseen nähtynä ei vaikuta merkittävästi puolueelliselta. (2) | Kattavasti ja tuoreita lähteitä. (3) | 2,8 / 3 |