

Jopa 4000 km hitsiä! Oletko valmis?

- Vedyn siirtoputkistot ja niiden hitsauksessa huomioitavia asioita -

■ **Timo Kauppi**

Suomeen rakennetaan 2030 luvun alkupuolella n. 1000 km vedyn siirtoputkistoja, joissa tullaan käyttämään mahdollisimman lujia teräksiä, jotka ovat vielä turvallisia vedyn aiheuttama haurastuminen huomioiden. Eräät haasteet voivat liittyä puutteelliseen lainsäädäntöön ja standardisointiin sekä siihen, miten hitsauksen tuottavuus saadaan niin korkeaksi, että pysytään suunnitelluissa aikatauluissa. Näiden lisäksi tarvitaan tutkimustietoa vedyn ja hitsausparametrien vaikutuksista hitsiliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin ja haurastumiseen. Kaikki tämä tulee vaatimaan tulevien urakoitsijoiden toiminnan kehittämistä niin hitsauksen tuottavuuden ja laadunhallinnan, kuin vedyn aiheuttamien riskien ennaltaehkäisyn osalta.

Suomen kaasumarkkinat avattiin kilpailulle 1.1.2020. Samalla Gasum Oy:n siirtoverkko toiminnat eriytettiin omaksi yhtiökseen ja siitä lähtien siirtoverkkotoiminnasta on vastannut Suomen valtion omistama siirtoverkkoyhtiö Gasgrid Finland Oy. (Gasgrid 2025a)

Gasgrid on kaasujen siirrosta ja siirtojärjestelmästä vastaava verkonhaltija Suomessa ja kansallisen vetyverkon rakentaja. Gasgrid toimii järjestelmävastaavana kaasun siirtoverkonhaltijana Suomessa ja Gasgrid Finland Oy:n täysin omistama tytäryhtiö Floating LNG Terminal Finland Oy vastaa Inkoon LNG-terminaalin toiminnasta ja terminaalilaivasta. Gasgrid on saanut mandaatin Suomen valtiolta kansallisen vetyverkon kehittämiseen sekä rajat ylittävään infrastruktuuriyhteistyöhön. (Gasgrid 2025b)

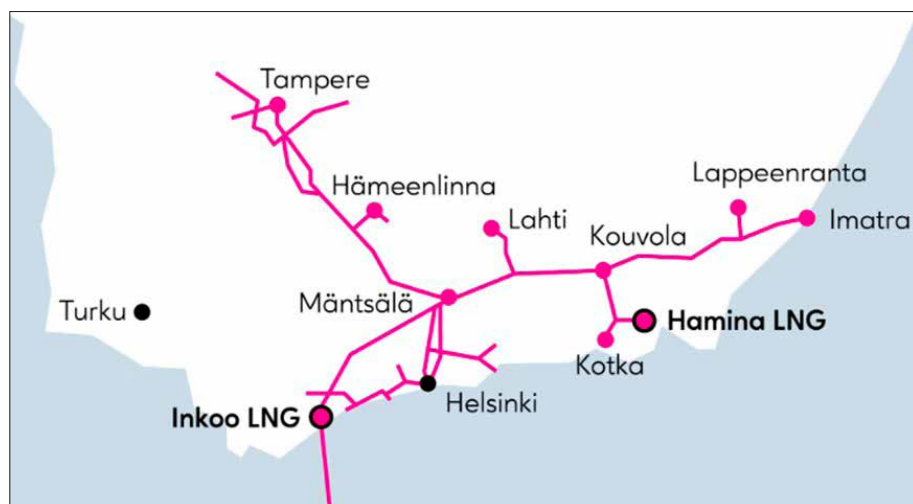
Suomessa toimii kaasun siirtoalusta, jota käytetään maakaasulle. Se käsittää 1150 km pitkän korkeapaineisen siirtoputkiston (kuva 1). Putkiston halkaisija vaihtelee välillä DN100-DN1000 ja 80 % putkista voidaan tarkastaa sisäpuolisesti. Putket ovat teräsputkia, joista suurin osa on PE muovilla pinnoitettuja. Korkeapaineisen putken lisäksi verkossa on 60 km matalapaineista putkea. Siirtoputkiston vanhimmat osat on otettu käyttöön vuonna 1974. Siirtoputkistossa on kompressoriasemia, joiden avulla nostetaan kaasun painetta siirto kapasiteetin lisäämiseksi. Näitä on Suomen maakaasun siirtoverkoissa yhteensä neljä kappaletta. Ne ovat

kaasuturbiinikäyttöisiä, akseliteholtaan yhteensä 54 MW. Näiden lisäksi Inkoossa on sähkömoottorikäyttöinen kompressorisykko, teholtaan 6,4 MW. Siirtoputkistossa on 8–32 km välein venttiiliasemia, joiden linjasulkuventtiileillä voidaan tarvittaessa katkaista kaasun siirto ja jakelu sekä tyhjentää putki kaasusta ulospuhaltamalla. Venttiiliasemia on 166 kpl, joista 40 kpl kaukovalvottuja. Siirtoputkistoon kuuluu myös 77 km pitkä teräksinen meriputki, joka kulkee Inkoosta Viron Paldiskiin. (Gasgrid 2025c)

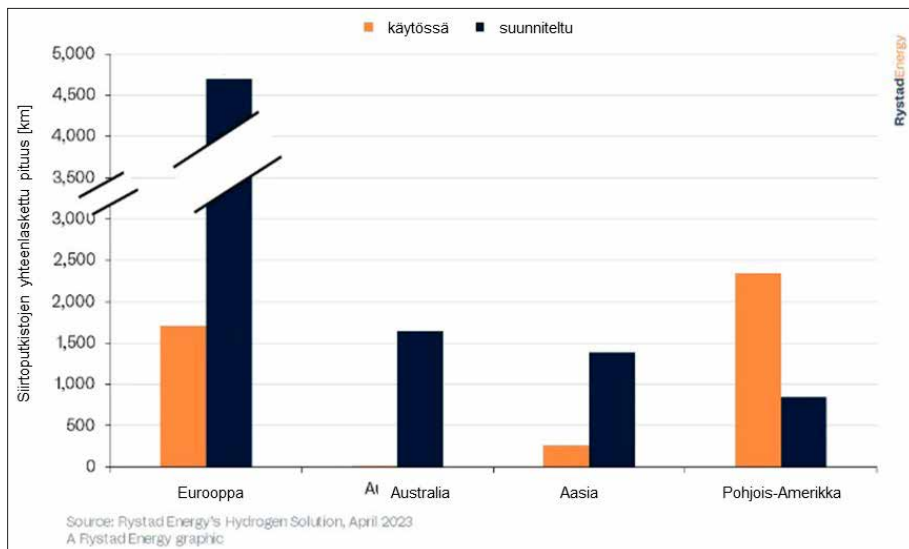
Torniossa Röytän satamassa sijaitseva Manga LNG -maakaasun tuontiterminaali on teollisuusyhtiöiden Outokummun, SSAB Europen, energiayhtiö Energyn ja energiayhtiö Gasumin yhteisyritys, jolla on 50000 m³ LNG-varastointikapasiteetti. Varastossa oleva nestemäinen maakaasu toimitetaan Röytän teollisuusalueen asiakkaille yhdysputkia pitkin sekä teollisuusasiakkaille ja tankkausasemille maanteitse säiliöautoilla. (Gasum 2025a)

Vuonna 2023 voimaan tulleessa direktiivissä EU/2023/2413 todetaan seuraavasti: "Venäjän hyökkäys Ukrainaan ja covid-19-pandemian vaikutukset ovat saaneet aikaan yleislilanteen, jossa energian hinnat nousevat yleisesti kaikkialla unionissa, ja tämä korostaa tarvetta nopeuttaa energiatehokkuuden parantamista ja lisätä uusiutuvan energian käyttöä unionissa."

Vuoteen 2030 mennessä tavoiteltava uusiutuvan energian osuus energialähteiden yhdistelmässä kaksinkertaistetaan.



Kuva 1. Suomen maakaasun siirtoputkisto. (Gasgrid 2025c)

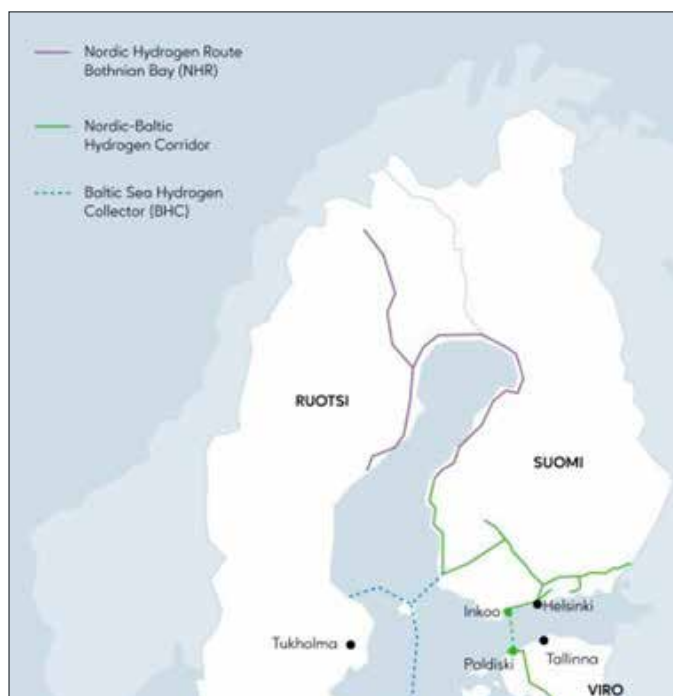


Kuva 2. Vuonna 2023 arvioitu vedynsiirtoputkistojen pituus vuonna 2035. (Rystadenergy 2025, mukaillen)

täisiin vuoden 2020 tasosta siten, että se olisi vähintään 40 prosenttia. Komission 18 päivänä toukokuuta 2022 antamassa tiedonannossa esitetyllä REPowerEU-suunnitelmalla pyritään unionin riippumattomuuteen Venäjän fossiilisista polttoaineista hyvissä ajoin ennen vuotta 2030. (EU/2023/2413)

Vety on avainasemassa uusiutuvana energialähteenä. Euroopassa on asetettu tavoitteeksi tuottaa vetyä 10 miljoonaa tonnia ja tuoda sitä 10 miljoonaa tonnia vuositasona vuoteen 2030 mennessä. Tätä varten tarvitaan vedyn tuotantoa ja sen siirtämistä käyttökohteisiin. Tällä hetkellä vedyn siirtoputkistoja on maailmanlaajuisesti noin 5000 km (kuva 2). On arvioitu, että vuonna 2035 siirtoputkistoja olisi jo yli 30000 km (Rystadenergy 2025).

Suomen valtio on antanut Gasgridille tehtäväksi edistää kansallisen vetyverkon, kansainvälisen infrastruktuuriyhteistyön sekä Itämeren alueen vetymarkkinan kehittymistä. Tehtävänä on kehittää vedynsiirtoinfrastruktuuria, joka mahdollistaa vetytalouden skaalautumisen sekä korostaa Suomen merkittävää roolia koko Euroopan vetytaloudessa. Suomen kansallisen vetyverkon rungon muodostavat kaksi laajaa infrastruktuurihanketta (kuva 3) – *Nordic Hydrogen Route* ja *Nordic-Baltic Hydrogen Corridor* – ovat nyt vaiheessa, jossa Gasgrid pääsee aloittamaan konkreettisten reittivaihtoehtojen kartoituksen yhdessä maakuntien ja kuntien kanssa. Gasgrid selvittää parhaillaan kansallisen vetyinfrastruktuurin linjausvaihtoehtoja sekä vedynsiirtotarpeita Suomessa ja Itämeren alueella. (Gasgrid 2025d)



Kuva 3. Alustava havainnekuva kehityshankkeissa suunnitelluista vedynsiirtoputkistoista (Gasgrid 2025d)

Lainsäädäntö ja standardit

Suomessa ei ole vedylle erillistä lainsäädäntöä, vaan vety katsotaan vaaralliseksi kemikaaliksi kuten muutkin syttyvät kaasut, mutta vedyn erityisomaisuuksien vuoksi on ilmennyt tarve linjata lainsäädännön tulkintoja sopimaan vetytalouden tarpeisiin. (Tukes 2025a)

Vedyn siirtoputkistosta puhutaan, kun putkisto kulkee tuotantolaitosten ulkopuolella. Tuotantolaitoksen alueella tuotantolaitoksen toiminnanharjoittaja vastaa putkistosta, mutta siirtoputkistolle on haettava erikseen Tukesilta rakentamislupa. Siirtoputkistolle tulee nimetä putkiston vastuuhenkilö, joka huolehtii siitä, että putkistoa käytettäessä toimitaan säädösten ja rakentamislupa-ehdojen, sekä toiminnanharjoittajan laatimien toimintaperiaatteiden mukaisesti. Laitosalueen ulkopuolella kulkeva vedyn siirtoputkisto ei kuulu painelaitedirektiivin (PED) soveltamisalaan. (Tukes 2025a)

Siirtoputkisto voi kulkea esim. maalla, meren pohjassa tai ilmassa putkisillalla ja sen paine voi vaihdella muutamasta baarista kymmeneen baareihin. Lainsäädännössä vedylle ei ole määritelty jakeluputkistotermiä eli kaikki laitosalueiden ulkopuoliset putkistot ovat siirtoputkistoja. (Tukes 2025a)

Vedyn siirtoputkiston tarkastaa Tukesin hyväksymä kansallinen tarkastuslaitos ennen putkiston käyttöönottoa ja sen jälkeen määräajoin. Sopiva tarkastusväli vedyn siirtoputkistolle on 5 vuotta. Tukesin hyväksymät tarkastuslaitokset ovat DEKRA Industrial Oy, Kiwa tarkastus Oy ja Tarkes Inspection Oy. (Tukes 2025a, Tukes 2025b)

SFS on päivittänyt ja on parhaillaan päivittämässä vetyyn liittyviä standardeja. Lisäksi hankkeissa voidaan soveltaa esim. ISO- ja ASME-standardeja. Standardien päivytystä hidastaa teknisen datan puute, ja Euroopan laajuisten yhtenäisten standardien osalta työstöprosessit ovat pitkiä ja eri jäsen maiden näkemykset toisistaan poikkeavia. (TEM 2025, 60)

Suoraan vedyn siirtoputkistoja koskeva standardi on ASME B31.12 (Hydrogen Piping and Pipelines), jonka soveltamista ei edellytetä viranomais määräyksissä. Nykytilanteessa Suomen kansallisen kemikaaliturvallisuuslainsäädännön katsotaan kattavan vedyn vaarallisen kemikaalina erityyppisissä käytöissä ja tämä mahdollistaa jo nykyisellään vetyinvestointien läpiviennin Suomessa (TEM 2025, 13). Muita standardeja, joissa vety on sallittu aine ja joissa on vetyyn liittyviä vaatimuksia ovat IGEM/TD/1 (Edition 6 steel pipelines for high pressure gas transmission supplement 2) ja DVGW G 409 (Conversion of high-pressure gas steel pipelines for a design pressure of more than 16 bar for transportation of hydrogen) (DNV 2025, 6)

Nykytilanteessa on mahdollista, että tulkinvaraa jättävät säädökset johta-

vat tilanteeseen, jossa saman tyyppisillä vetyhankkeilla on toisistaan poikkeavia teknisen turvallisuuden järjestelmiä ja tasoja riippuen hanketta toteuttavan tahon turvallisuuskulttuurista, resursseista sekä osaamisesta. Riskinä nähdään alan uudet toimijat, joiden osaaminen vedyn turvallisuudesta ei ole pitkään alalla toimineita vastaavalla tasolla (TEM 2025, 13).

Tukes suosittelee seuraavien standardien hyödyntämistä suunnittelun ja toteutuksen tukena:

- SFS 3353:2019 Palavien kemikaalien tuotantolaitos
- ISO 19880: 2020 Gaseous hydrogen — Fuelling stations
- ISO/TR 15916:2015 Basic considerations for the safety of hydrogen systems
- ISO 22734 - Hydrogen Generators
- EN 17533:2020 Gaseous hydrogen. Cylinders and tubes for stationary storage
- EN 17339:2020 Transportable gas cylinders. Fully wrapped carbon composite cylinders and tubes for hydrogen
- EN 17127:2020 Outdoor hydrogen refuelling points dispensing gaseous hydrogen and incorporating filling protocols
- ASME B31.12 Hydrogen Piping and Pipelines. (Tukes 2025a)

Vedyn haurastuttava vaikutus

Tukesi vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus-oppaan mukaan: "Vedyn siirtoputkistossa vältetään liian lujien teräslaatuojen käyttöä, koska ne ovat alttiimpia vetyhauraudelle. Kokemusten perusteella lujuusluokaltaan soveltuvia teräslaatuja ovat esim. SFS-EN ISO 3183 (Petroleum and natural gas industries. Steel pipe for pipeline transportation systems) L360 tai API 5L (Specification for Line Pipe) Grade X52 tai lujuudeltaan alhaisemmat teräslaadut. Näillä hiiliteräslaaduilla on suhteellisen alhainen myötölujuus, mikä antaa kestävyttä vetyhaurautta ja muita hauras-murtumamekanismeja vastaan." (Tukes 2025a)

Taulukossa 1 on annettu putkiterästen L360NE ja Grade X52 ainesstandardien kemiallisen koostumuksen vaatimukset. Vaatimuksia on annettu vain hiilelle, mangaanille ja vanadiinille. Muut seosaineet on huomioitu antamalla hiiliekvivalentin (CEV/P_{cm}) enimmäisarvo.

Taulukko 1. L360 ja Grade X52 putkien kemiallisen koostumuksen vaatimukset. (SFS-EN ISO 3183 2019, 13; API 5L 2012, 29)

Teräs	%C	%Mn	%V	CE	P _{cm}
L360NE	0.22	0.45	0.1	0.43	0.25
X52	0.28	1.4	-	0.43	0.25

Kun vety pääsee tunkeutumaan teräkseen, se haurastuttaa teräksen. Vedyn metalleja haurastuttava vaikutus havaittiin ensimmäisen kerran jo v. 1874, mutta vasta 1976 Hirth & Johnson julkaisivat ensimmäisen kerran tutkimuksen, jossa oli tehty yhteenveto erityyppisistä vedyn aiheuttamista haurausilmiöistä. Hirth & Johnsonin mukaan vety aiheuttaa teräksissä mm. seuraavia haurausilmiöitä: 1. vety-ympäristön aiheuttama haurastuminen (HEE = Hydrogen Environmental Embrittlement), 2. vedyn aiheuttama jännitysmurtuma (HSC = Hydrogen Stress Cracking) ja 3. vetyhyökkäys (HA = Hydrogen Attack). Muita vedyn aiheuttamia haurastusilmiöitä ovat mm. vedyn aiheuttama murtuma (HIC = Hydrogen Induced Cracking), jännityksen suuntaama vedyn aiheuttama murtuma (SOHIC = Stress Oriented Hydrogen Induced Cracking) ja sulfidien aiheuttama jännityskorroosio (SSCC = Sulphide Stress Corrosion Cracking). (Gavriliuk ym. 2022, 201).

Vedyn haurastuttavaa vaikutusta voidaan tutkia määrittämällä hidasvetoko-keella (SSRT) lovellisen vetokoesauvan murtolujuus (NTS), sileän vetokoesauvan plastinen venymä (EL) tai murtokurouma (RA) ja laskemalla niiden suhteelliset arvot kaavalla:

$$HEE = \frac{NTS_H}{NTS_0}, \frac{EL_H}{EL_0}, \frac{RA_H}{RA_0}$$

missä alaindeksi 0 viittaa määritettävään arvoon, kun hidasvetokoe tehdään ilmatmosfäärissä tai heliumissa ja alaindeksi H taas määritettävään arvoon, kun hidasvetokoe tehdään vetyatmosfäärissä tai vedynlatauksen jälkeen. Mitä suurempi HEE arvo on, sitä paremmin testattava materiaali kestää vedyn aiheuttamaa haurastumista.

NASA:n julkaisussa TM-2016–218602 on esitetty raja-arvoja NTS-suhteelle, joita voidaan käyttää materiaalin vetyhaurastumisalttiuden arviointiin (taulukko 2). Taulukossa 3 on annettu HEE arvoja eri metallisilla materiaaleilla.

Kuvassa 4 on esitetty eri materiaalien myötölujuuksia ja murtovenymän HEE indeksin eli suhteellisen murtovenymän arvoja. Kuvan perusteella kolmella teräksellä (AISI 316L, X70 ja X80) suhteellisen murtovenymän arvo on yli japanilaisten asettaman kriittisen rajan. (Liu ym. 2023, 105)

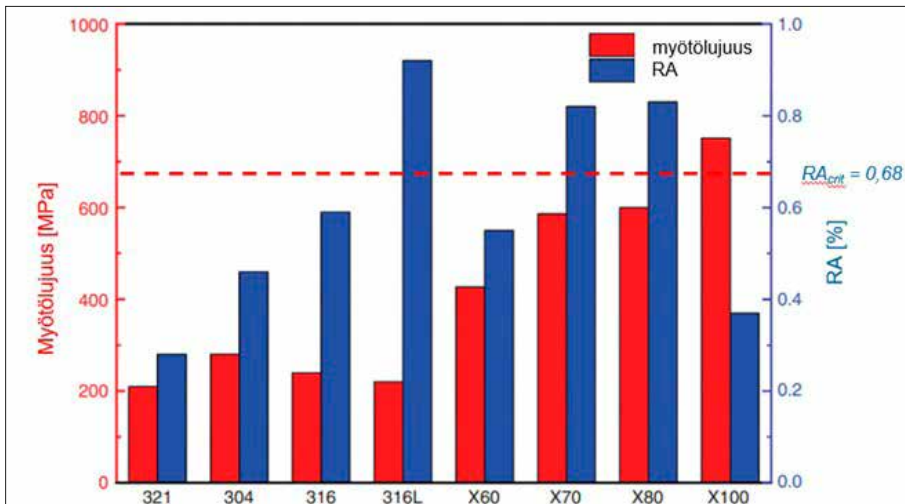
Jos putkistojen materiaalinvalintaa tarkastellaan puhtaasti vedyn aiheuttaman haurastumisen kannalta, niin edellä esitetyn perusteella runsaasti nikkelillä seostettu austeniittinen ruostumaton teräs olisi

Taulukko 2. HEE indeksin (NTS suhde) raja-arvoja vetyhaurastumisalttiuden arviointiin. (Lee 2016, 7, mukaillen)

HEE alttius	HEE Indeks (NTS suhde)	Huomioitavaa
merkityksetön	1.0 - 0.97	Materiaaleja voidaan käyttää määrättyssä paineessa ja lämpötilassa murtumismekaniikka ja särön kasvu
pieni	0.96 - 0.90	
suuri	0.89 - 0.70	Materiaaleja voidaan käyttää harkiten, vaatii murtumismekaniikka ja särönkasvuun perustuvan tarkastelun vety-ympäristössä.
ankara	0.69 - 0.50	Ei suositella käytettäväksi olosuhteissa, jossa HEE indeksi on määritetty.
äärimmäinen	0.49 - 0.0	

Taulukko 3. HEE indeksin arvoja eri metallisilla materiaaleilla. (Lee 2016, 8–12, mukaillen)

Materiaali		P _{H2} (MPa)	HEE alttius	HEE Indeks		
				NTS	EL	RA
Nickel 270	nikkeli	68.9	korkea	0.70	0.92	0.75
Inconel 625	Ni-seos	34.5	korkea	0.76	0.36	0.36
AW 5086	Al-seos	68.9	merkityksetön		1.05	1.03
Cu-OFHC	kupari	68.9	merkityksetön	1.00	1.00	1.00
70-30 messinki	Cu-seos	68.9	merkityksetön		0.98	1.20
304L	rst	68.9	korkea	0.87	0.92	0.91
316L	rst	68.9	merkityksetön	1.00	0.95	1.04
A106-Gr. B	C-Mn	6.9	korkea		0.78	0.86
API 5L X42	HSLA	6.9	korkea	0.86	0.79	0.61
API 5L X65	HSLA	6.9	pieni	0.94	1.00	0.63
API 5L X70	HSLA	6.9	pieni	0.90	1.00	0.82



Kuva 4. Eri terästen myötölujuuksia ja RA arvoja. (Liu ym. 2023, 105, mukailen)

parhaita vaihtoehtoja. Tämä johtaisi tietysti huomattavasti kalliimpiin putkistoratkaisuihin, kuin mihin päästään käyttämällä esim. lujaa X70 terästä, jonka myötölujuus ($R_e > 485$ MPa) on yli 2,5-kertainen AISI 316L tyyppiseen teräkseen verrattuna.

ASME B31.12 standardi

Standardin ensimmäinen painos on julkaistu 2009 ja voimassa oleva painos 2023. Standardi määrittelee vaatimukset vedyn siirtoon ja jakeluun tarkoitettuille putkistoille ja putkiverkostoille ja se on jaettu kolmeen osaan: GR (General Requirements), IP (Industrial Piping) ja PL (Pipelines). Standardissa esitetään vaatimuksia:

- materiaaleille ja niiden valinnalle
- putkistojen suunnittelulle, paine- ja lämpötilarajoille, turvallisuusmarginaaleille, suunnittelukertomille, jne.
- pysyville liitoksille hitsauksen, juottamisen, niihin liittyvien lämpökäsittelyjen sekä ruuvi- ja laippaliitosten osalta
- testaukselle ja tarkastukselle sisältäen rikkomattoman aineenkoetuksen, paine- ja vuototestit
- käytölle ja ylläpidolle kattaen kunnossapidon ja korjaukset sekä vuodonhallinnan ja hätätilanteet

Standardi sallii 33 erilaista terästä käytettäväksi siirtoputkistojen rakennemateriaalina. Nämä sisältyvät materiaalistandardeihin ASTM A53, A106, A135, A139, A333, A381 sekä API 5L. Kaikki ovat seostamattomia tai niukkaseosteisia putkiteräksiä, joiden myötölujuudet vaihtelevat välillä $R_{p0.2} = 205\text{--}555$ MPa ja murtolujuudet välillä $R_m = 330\text{--}625$ MPa.

Taulukossa 4 on annettu API 5L standardin vaatimuksia ASME B31.12 standardin sallimille teräksille. Maakaasun siirtoputkistoissa paljon käytetyn X70 teräksen myötölujuus on lähes 500 MPa, joten se on luja teräs ja hitsaaminen vaatii erityisosaamista. Teräksen alttius vedyn aiheuttamalle haurastumiselle on taulukon 3 mukaan

pieni. On syytä tiedostaa, että tämä pätee toimitustilaiselle teräkselle ja hitsauksen aiheuttama lämpösykli voi helposti paikallisesti altistaa haurastumiselle. Standardi rajoittaa teräksen hiilipitoisuuden 0,28 p-%, mikä on tietysti korkea hitsattavalle teräkselle. Kirjallisuuden perusteella X70 teräksen mikrorakenne voi vaihdella paljon riippuen seostuksesta ja valmistustavasta.

Hitsaajien ja hitsausmenetelmien pätevönnit pitää tehdä ASME B31.12 standardin vaatimuksissa ASME BPVC Section IX vaatimusten mukaan.

Hitsien NDE-tarkastus

ASME standardeissa rikkomattomasta aineenkoetuksesta käytetään lyhennettä NDE (Non-Destructive Examination). Hitsien tarkastuksissa käytetään valtaosin normaaleja rikkomattoman aineenkoetuksen tarkastusmenetelmiä: VT, RT, UT, PT, MT ja ET. Tarkastajien pitää olla päteviä standardin ASME BPVC Section V, subsection A, Article 1 vaatimusten mukaisesti. Hyväksymisrajat on esitetty ASME B31.12 standardissa osissa IP ja PL.

Siirtoputkistoihin (Transmission Pipelines) liittyvässä osassa (PL) vaaditaan seuraavaa rikkomatonta aineenkoetusta hitseille:

- 100 % VT
- päittäishitseille 100 % RT/UT
- piena- ja tulppahitseille 100 % MT tai vastaavanlainen pintatarkastusmenetelmä (PT/ET)

Hyväksymisrajojen on oltava kaikissa tapauksissa API 1104 mukaiset. (ASME B31.12 2023, 145–146)

Tuotantohitseille pitää tehdä myös kovuuden testausta. Se pitää tehdä:

- hitsatussa tilassa (AW) oleville materiaaliyhmän P-1 teräksille, jotka on hitsattu prosesseille 121 (SAW) ja 136 (FCAW),
- hitsatussa tilassa (AW) oleville liitoksille, joiden hitsaukseen käytetyssä hitsauslisäaineessa on yli 1,6 % mangaania,
- kaikille hitseille, joille on tehty hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely (PWHT). (ASME B31.12 2023, 146)

Kovuuden testaus tehdään kannettavalla kovuusmittarilla standardien ASTM A833 tai ASTM E110 vaatimusten mukaan. Kovuuden testauksen vähimmäismäärä kehällä on putken koosta riippuvainen seuraavasti:

- $\leq$ NPS 6 (≤ 150 mm), kovuus mitataan yhdestä kohdasta
- $>$ NPS 6 $\leq$ NPS 12 (≤ 300 mm), kovuus mitataan kahdesta kohdasta
- $>$ NPS 12 (> 300 mm), kovuus mitataan kolmesta kohdasta (ASME B31.12 2023, 146)

Kovuuden testaus tehdään putken kehältä 90° välein, kun vaaditaan testaus useammasta kuin yhdestä kohdasta. Testaus tehdään pituussuunnassa hitsiaineesta muutosvyöhykkeen yli. Kovuuden pitää olla alle 237 BHN (250 HV) ellei toisin vaadita. (ASME B31.12 2023, 146)

Testauslaajuus on seuraava:

- MAOP $<$ 40 % SMYS, 5 % satunnaisotos
- MAOP $\geq$ 40 % SMYS, 20 % satunnaisotos
- kun käyttöpaine on suurempi kuin 140 bar tai putkistoon kohdistuu

Taulukko 4. API 5L standardiin sisältyvien terästen kemiallisen koostumuksen ja mekaanisten ominaisuuksien vaatimukset. (API 5L 2013, 28)

API	grade	%C	%Mn	%S	%P	R_e [MPa]	R_m [MPa]
5L	A	<0.22	<0.90	<0.030	<0.030	205	390
5L	B	<0.28	<1.20	<0.030	<0.030	240	415
5L	X42	<0.28	<1.30	<0.030	<0.030	290	415
5L	X52	<0.28	<1.40	<0.030	<0.030	360	455
5L	X56	<0.28	<1.40	<0.030	<0.030	385	490
5L	X60	<0.28	<1.40	<0.030	<0.030	415	515
5L	X65	<0.28	<1.40	<0.030	<0.030	450	535
5L	X70	<0.28	<1.40	<0.030	<0.030	485	570
5L	X80	<0.28	<1.40	<0.030	<0.030	555	625

vaihtokuormitus, niin kaikki hitsit tarkastetaan. (ASME B31.12 2023, 146)

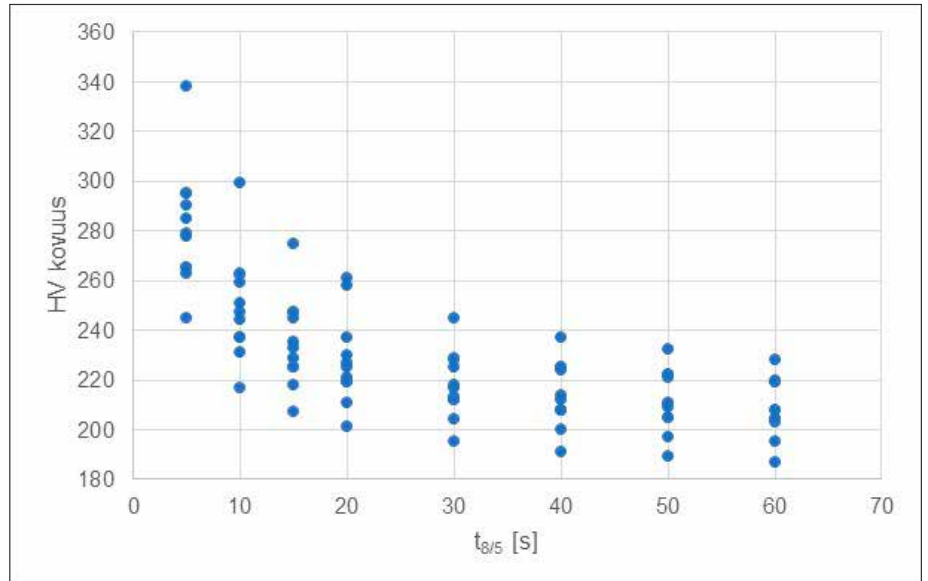
MAOP = suurin sallittu käyttöpaine (Maximum Allowable Operating Pressure)
SMYS = materiaalin vähimmäis myötölujuus (Specified Minimum Yield Strength)

API 5L X70 putkiteräs

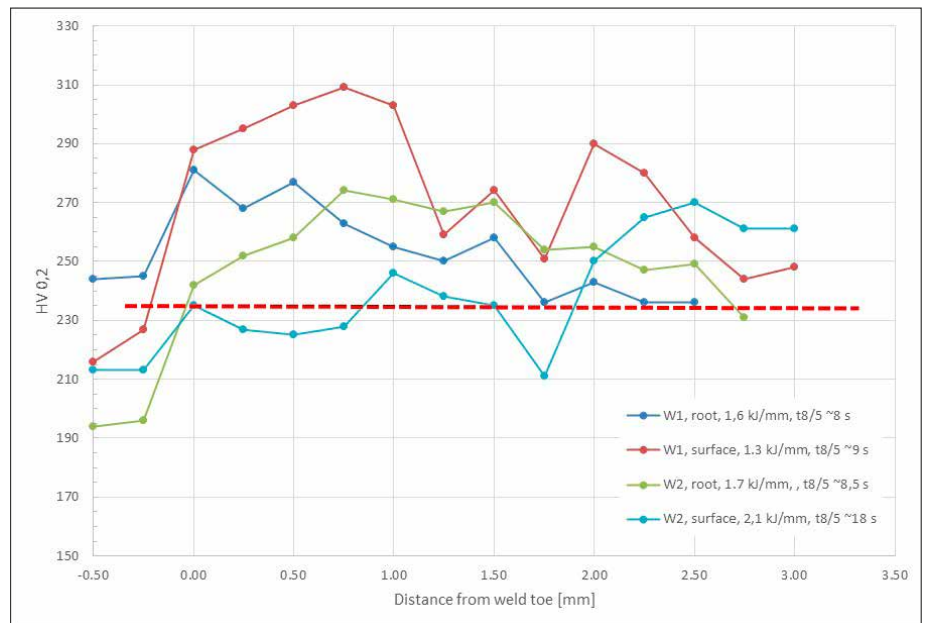
Tämän hetken suunnitelmien mukaan Suomessa rakennettavassa vedyn siirtoputkistossa tullaan käyttämään API 5L standardin vaatimusten mukaista X70 putkiterästä, putkikoko tulee olemaan DN 700-1000 ja seinämänpaksuus luokkaa $s = 10-20$ mm (Gasgrid 2025e). Kirjallisuudesta löytyy paljon julkaistua tietoa kyseisen teräksen hitsattavuudesta. Taulukossa 5 annetaan esimerkkejä eri julkaisuissa tutkittujen X70 terästen kemiallisista koostumuksista, hiiliäkvivalentin arvoista ja hitsin kovuuksista. Kirjallisuuden perusteella teräkset ovat termomekaanisesti valssattuja, mikä mahdollistaa maltilliset hiiliäkvivalentit. Kovuudet ovat valtaosin ASME B31.12 standardin antaman ylärajan (235 HV, Table GR-3.10-1) alapuolella.

Muutosvyöhykkeen kovuutta voidaan arvioida käyttämällä esimerkiksi Thysen-Kruppin Proweld 6.0 hitsauslaskuria. Taulukossa 4 annettujen kemiallisten koostumusten perusteella ko. hitsauslaskuri antaa kuvassa 5 nähtävän ennusteen hitsien kovuudesta eri jäähtymisajoilla $t_{8/5}$. Kuvan perusteella aiemmin esitetty kovuuden enimmäisarvo 235 HV on alitettavissa, kun $t_{8/5} > n. 20$ s, mikä tarkoittaa sitä, että liian pieniä lämmöntuonteja on vältettävä.

Lapin AMKin hallinnoimassa EAKR rahoitteisessa "Arktisten alueiden vihreät energiamuodot (AAVE)" hankkeessa tehtiin tähän liittyen suppea tutkimus, jossa hitsattiin kaksi päittäisliitosta paksuudeltaan $s = 18$ mm olevaan X70 teräkseen (CEV = 0,39). Ensimmäinen hitsi (W1) tehtiin seitsemällä (7) palolla, lämmöntuonnin vaihdellessa välillä 1,25–1,62 kJ/mm. Tässä tapauksessa välipalkolämpötila vaihteli välillä 100–155 °C. Toinen hitsaus (W2) tehtiin neljällä (4) palolla, jolloin lämmön-



Kuva 5. Proweld 6.0 hitsauslaskurilla taulukon 4 mukaisilla kemiallisilla koostumuksilla laskeutuja X70 teräksen hitsin kovuuksia eri $t_{8/5}$ ajoilla.



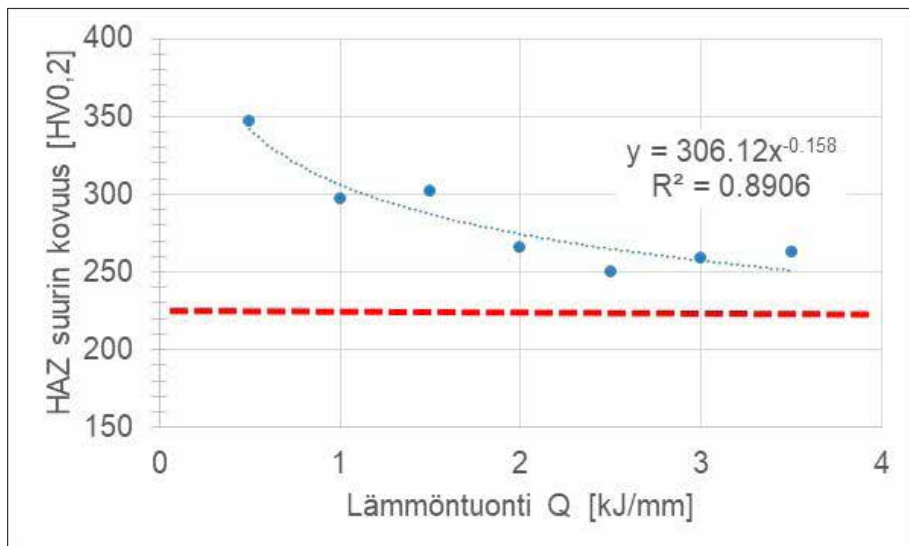
Kuva 6. Koehitsien W1 ja W2 kovuudet.

tuonti vaihteli välillä 1,70–2,49 kJ/mm ja välipalkolämpötila oli enimmillään 210 °C. Kuvassa 6 nähdään kovuuden testaustu-

loket ja niiden perusteella kovuuden pitäminen kriittisen rajan 235 HV alapuolella on hyvin haasteellista.

Taulukko 4. API 5L X70 terästen kemiallisia koostumuksia ja CE hiiliäkvivalentin arvoja.

Tutkimus	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%Cu	%Nb	%Ni	CE	HV
Vafaei et. al.	0.050	0.19	1.600	0.010	0.24	0.040	0.010	0.040	0.170	0.39	208-265
Ike et. al.	0.109	0.239	1.536	0.024		0.045	0.011	0.045	0.011	0.38	-
Digheche et. al.	0.064	0.20	1.520	0.060	0.14		0.030		0.192	0.37	170-215
Turhan	0.060	0.39	1.580	0.210	0.11		0.040	0.060	0.050	0.39	185-252
Weglowski et. al.	0.101	0.34	1.774	0.039	0.009	0.008	0.118	0.051	0.165	0.43	190-220
Moore&Nicholas	0.060	0.29	1.670	0.140		0.004	0.017	0.040	0.017	0.37	200-250
Aksöz et. al.	0.064	0.23	1.525	0.222	0.151	0.029	0.005	0.059	0.012	0.40	-
Siciliano&Stalheim	0.040	0.15	1.600	0.350				0.080		0.38	≈350
API 5L grade X70	0.073	0.19	1.440	0.300		0.070	0.014		0.040	0.39	201-264
L485MB	0.080	0.29	1.370	0.070	0.02	0.050	0.030	0.050	0.060	0.34	-
L485MB	0.070	0.28	1.260	0.050	0.01	0.070	0.030	0.050	0.210	0.32	-



Kuva 7. Lämmöntuonnin vaikutus X70 teräksen muutosvyöhykkeen suurimpaan kovuuteen yksipalkko päällehitsissä.

Lämmöntuonnin vaikutusta muutosvyöhykkeen kovuuteen tutkittiin tekemällä yhden palon päällehitsejä samaan teräkseen. Käytetyt lämmöntuonnit vaihtelivat välillä 0,5–3,5 kJ/mm ja laskennallinen $t_{8/5}$ aika vaihteli välillä 2,6–18,5 s. Kuvan 7 perusteella suurin kovuus pysyi 235 HV yläpuolella kaikilla käytetyillä lämmöntuonneilla.

Taulukossa 5 on tarkasteltu kuinka suuri lämmöntuonnin pitää vähintään olla, että $t_{8/5} > 15$ s ja suurin sallittu kovuus (235 HV) alitetaan. Suurimmalla aineenpaksuudella vaaditaan jo kohtuullisen suurta lämmöntuontia, ellei käytetä esikuumennusta. ASME BPVC, Section IX standardin mukaan X70 teräs edustaa P-No 1 materiaaliyhmää. Standardin ASME B31.12 uusin painos, joka on julkaistu vuonna 2023, ei edellytä P-No 1 materiaaliyhmän teräksille esikuumennusta, kun aineenpaksuus $s < 25$ mm (ASME B31.12 Table GR-3.5-1). Myöskään hitsauksen jälkeistä lämpökäsittelyä (PWHT) ei tarvitse tehdä, kun aineenpaksuus $s < 20$ mm (ASME B31.12 Table GR-3.6-1). Vedyn siirtoputkistoa tul- laan hitsaamaan maastossa käytännössä

Taulukko 5. Kriittisen kovuuden (235 HV) alittamiseksi vaadittavat lämmöntuonnit eri aineenpaksuuksilla ja työlämpötiloilla.

s [mm]	T_p [°C]		
	20	100	150
	Q [kJ/mm]		
10	1.21	1.01	0.89
15	1.82	1.52	1.33
20	2.42	2.02	1.78

joka säässä, joten ainakin 100 °C esikuumennus on käytännössä enemmän kuin tarpeen!

Siirtoputkiston haasteet

Gasgrid Finland on julkistanut vedyn siirtoinfrastruktuurin rakentamisen tavoiteaikataulun (kuva 8). Mikäli tavoitteet toteutuvat, niin siirtoputkistoa tehdään vuosien 2027–2030 aikana eli noin 1000 km put-

kiston rakentamiseen on neljä kalenterivuotta aikaa.

Jos tarkastellaan seinämäpaksuudeltaan $s = 20$ mm DN1000 hitsattua 1000 km pituista putkilinjaa, voidaan esittää seuraavia tunnuslukuja:

- yksittäisten putkien pituus on 12 tai 18 m
- jatkoshitsejä putkilinjassa tarvitaan n. 55000–83000 kpl yksittäisen putken pituudesta riippuen
- hitsin kokonaispituus 12 m pituisia putkia käytettäessä on luokkaa 3900 km, 18 m putkia käytettäessä n. 2600 km
- neljän vuoden aikana pitää hitsata 58 jatkoshitseä vuorokaudessa koko projektin ajan, jos käytössä on 12 m putket, 18 m putken käyttö vaatii 39 jatkoshitsin hitsaamisen vuorokaudessa

Luvut ovat tietysti täysin teoreettisia, mutta antavat kuitenkin antavat käsityksen siitä, että hitsauksessa tullaan tarvitsemaan pitkälle menevää mekanisointia ja sen, että laaduntuottokykyyn tulee olla erittäin hyvällä tasolla.

Nyt tarvitaan rajuja kehitystoimenpiteitä suomalaisissa hitsaavissa konepajoissa, mikäli yritykset aikovat kyetä kilpailemaan kohta tarjolla olevasta massiivisesta putkiston rakennusurakasta. Kehitystyössä tarvitaan myös korkeakouluja, ammatillista koulutusta, hitsauskone- ja lisäainevalmistajia ja maarakennusurakoitsijoita. Joten tämän artikkelin otsikon teksti: **”Jopa 4000 km hitsiä! Oletko valmis?”** on enemmän kuin aiheellinen.

LÄHTEET

Aksöz A. Ada H. & Özer A. Toz Altı Ark Kaynak Yöntemiyle Üretilen API 5L X70 Kalite Çelik Boruların Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri. GU J Sci, Part C, 5(1): 55-64 (2017). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/28467/303414>.



Kuva 8. Osa vedyn siirtoinfrastruktuurin tavoiteaikataulusta (Gasgrid 2025d, mukaillen)

Digheche K., Boumezoug Z., Diafi M. & Saadi K. 2017. INFLUENCE OF HEAT TREATMENTS ON THE MICROSTRUCTURE OF WELDED API X70 PIPELINE STEEL. Acta Metallurgica Slovaca, Vol. 23, 2017, No. 1, p. 72-78. DOI 10.12776/ams.v23i1.879.

DNV. 2023. Monsma V., Illson T., Thodla R. & Hussain A. Repurposing onshore pipelines for hydrogen: Guiding operators through the re-evaluation process. White paper. Viitattu 23.3.2025 <https://www.dnv.com/focus-areas/hydrogen/repurposing-pipelines-for-hydrogen-guiding-operators-through-the-re-evaluation-process/>.

Gasum. 2025a. Tornion -LNG-terminaali. Viitattu 6.3.2025. <https://www.gasum.com/fi/gasum/toimitusketju/lng-terminaalit/tornion-lng-terminaali/>.

Gasgrid 2025a. Yhtiö. Esittely. Viitattu 6.3.2025 <https://gasgrid.fi/yhtio/esittely/>.

Gasgrid. 2025b. Ajankohtaista. Viitattu 6.3.2025 <https://gasgrid.fi/2025/02/27/yhteisty-fingridin-ja-gasgridin-valilla-vahvistaa-suomen-energiajarjestelmaa/>.

Gasgrid. 2025c. Kaasun siirtoverkosto. Viitattu 6.3.2025 <https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/>.

Gasgrid. 2025d. Kehityshankkeet. Viitattu 6.3.2025 <https://gasgrid.fi/kehitys/suomesta-maailman-houkuttelevin-vetytalousmaa/#kehityshankkeet>.

Gasgrid. 2025e. Siirrämme energiaa. Koulutusaineisto. Esitetty Balanus Oy sisäinen koulutus 28.3.2025.

Gavriljuk V. G., Shyvaniuk V. M. & Teus S. M. 2022. Hydrogen in Engineering Metallic Materials from Atomic-Level Interactions to Mechanical Properties. ISBN 978-3-030-98550-9 (eBook).

Ike T. M., Adedipe O., Abolarin M.S. & Lawal S.A. Mechanical Characterization of Welded API X70 Steel Exposed to Air and Seawater: A review. Materials Science and Engineering 413 (2018). doi:10.1088/1757-899X/413/1/012034.

Lee J.A. 2016. NASA TM-2016-218602. Hydrogen Embrittlement. National Aeronautics and Space Administration. Marshall Space Flight Center. Huntsville, Alabama. Viitattu 15.3.2025 <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160005654/downloads/20160005654.pdf>.

Liu J., Zhao M. & Rong L. 2023. Overview of hydrogen-resistant alloys for high-pressure hydrogen environment: on the hydrogen energy structural materials. Clean Energy, 2023, Vol. 7, No. 1, 99-115. Viitattu 7.3.2025 <https://doi.org/10.1093/ce/zkad009>.

Moore P. & Nicholas J. 2013. The Effect of Inclusions on the Fracture Toughness of Local Brittle Zones in the HAZ of Girth Welded Line Pipe. Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering June 9-14, 2013, Nantes, France. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/effect-of-inclusions-on-the-fracture-toughness-girth-welded-line-pipe>.

RystadEnergy. News. Viitattu 2.3.2025 <https://www.rystadenergy.com/news/building-the-future-hydrogen-pipelines-start-to-materialize-in-europe>.

Siciliano F. & Stalheim D. G. Modern High Strength Steels for Oil and Gas Transmission Pipelines. Conference Paper. January 2008. DOI: 10.1115/IPC2008-64292.

TE. 2025. Vedyn teollisen käsittelyn turvallisuus vaatimukset ja lainsäädännön päivitystarpeet. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia. 2024:37. ISSN pdf: 1797-3562.

Tukes. 2025a. Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus, Viitattu 6.3.2025 <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus>.

Tukes. 2025b. Tukesin hyväksymät tarkastuslaitokset. Viitattu 6.3.2025 <https://tukes.fi/teollisuus/tarkastuslaitokset/tukesin-hyvaksymat-tarkastuslaitokset>.

Turhan Ş. Ö. 2020. FATIGUE BEHAVIOR OF WELDED API 5L X70 PIPELINE STEEL. M. Sc. Thesis. Metallurgical and Materials Engineering. Middle East Technical university. <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12625389/index.pdf>.



LAPIN AMK
Lapland University of Applied Sciences



Euroopan unionin osarahoittama



LAPIN LIITTO

AAVE, Arktisten Alueiden Vihreät Energiamuodot

Lapin AMKin toteuttama hanke, jossa selvitetään arktisten alueiden vaikutuksia vihreän energian tuotantoon, varastointiin ja logistiikkaan.

Budjetti 429 453 €, josta EU-rahoitusta 343 560 €
Toteutus 1.1.2025 – 31.12.2027

Lisätietoja:
Jukka Leinonen
jukka.leinonen@lapinamk.fi



Vafaei M., Mashhuriazar A., Omidvar H. & Sajuri Z. In-service welding of X70 steel gas pipeline: Numerical and experimental investigations. Journal of materials research and technology. 2023. 26. 6907-6918.

Węglowski M. St., Dymek S., Kopyściański M., Niagaj J., Rykała J., De Waele W. & Hertelé S. 2020. A comprehensive study on the microstructure and mechanical properties of arc girth welded joints of spiral welded high strength API X70 steel pipe. Archives of Civil and Mechanical Engineering. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00018-0>.

Timo Kauppi, IWE, IWI-C, TkL Oulun yliopisto / Lapin ammattikorkeakoulu
timo.kauppi@lapinamk.fi