

Vedyn siirtäminen putkistossa, maantiellä, raiteilla tai vedessä

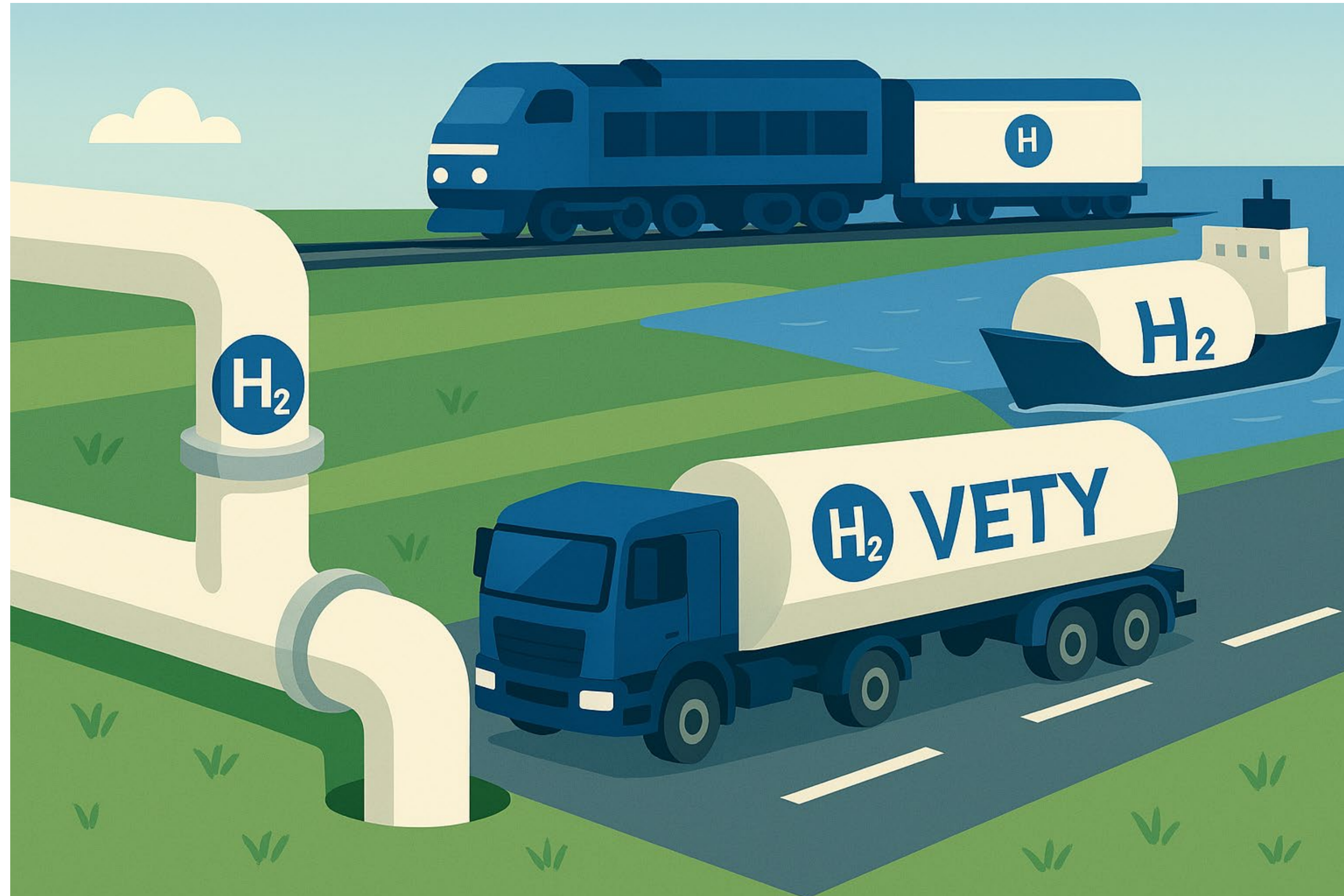
Materiaalin koostamisessa on hyödynnetty alkuperäistä materiaalia:

Vedyntuotanto ja vetytalouden arvoketjut – koulutus 2024

Vedyn kuljetus ja varastointi, Markku Ikonen Turun AMK



OSAO



**Euroopan unionin
osarahoittama**

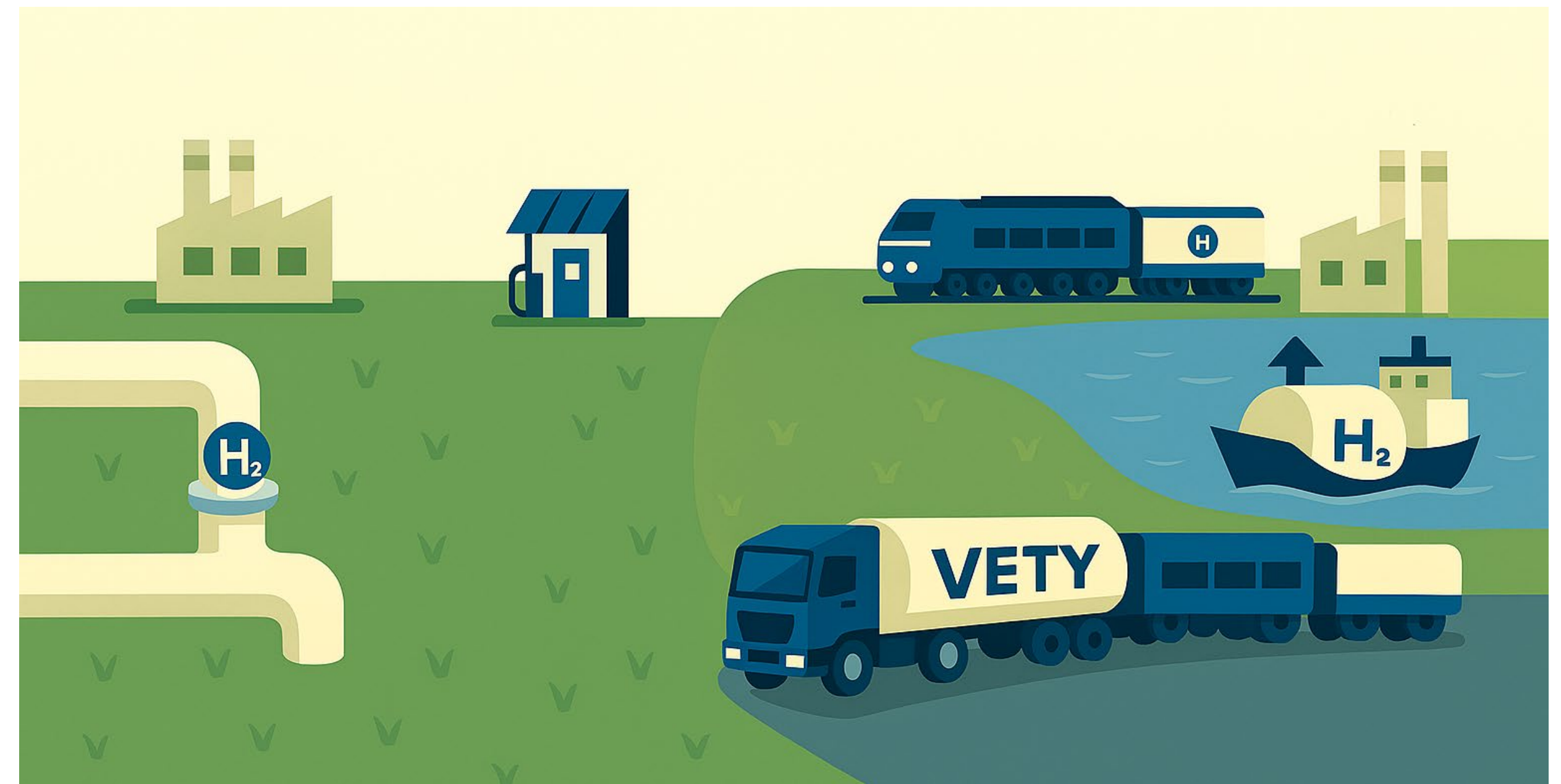
Vedyn siirtäminen putkistossa, maantiellä, raiteilla tai vedessä

- vety on tuttu kaasu prosessiteollisuudesta, josta on paljon käyttökokemuksia sekä soveltuvia ratkaisuja saatavilla
- vedyn laajempi käyttö edellyttää, että vety voidaan kuljettaa turvallisesti ja taloudellisesti valmistuspaikalta käyttöpaikalle, kuten esim. teollisuuslaitokseen tai tankkausasemalle
 - valmistuspaikan sijainnilla suuri vaikutus kuljetuskustannuksiin
 - valmistuksen sijoittaminen lähelle käyttöpaikkaa tai sen yhteyteen pienentää kuljetuksen kustannuksia tai jopa poistaa ne
 - toisaalta: suuret keskitetyt laitokset pystyvät tuottamaan vetyä pienemmin kustannuksin, mutta tällöin kuljetusmatkat kasvavat ja kuljetus on kalliimpaa



Vedyn siirtäminen putkistossa, maantiellä, raiteilla tai vedessä

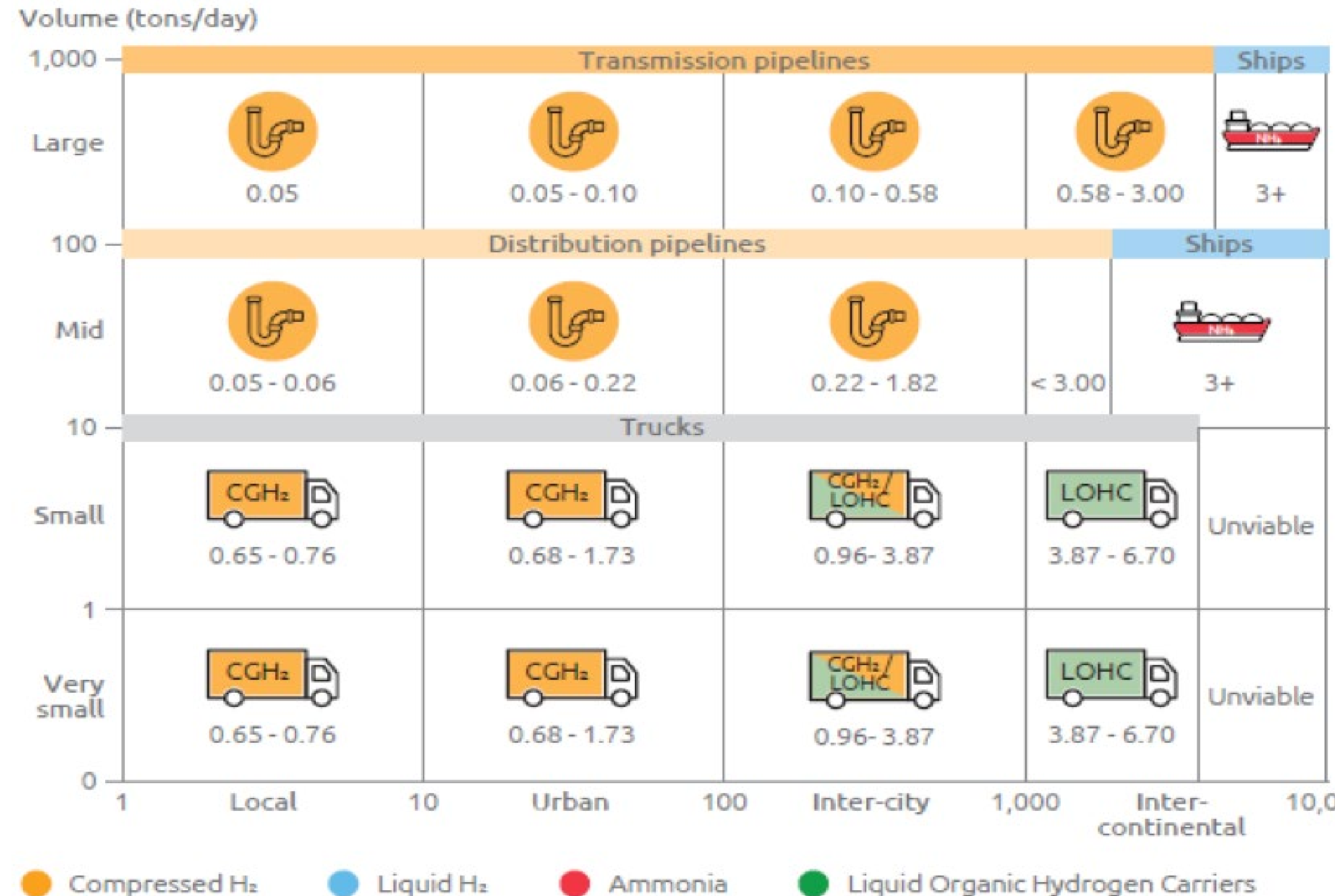
- vetyä tuotetaan kaasuna ja sitä voidaan kuljettaa
 - kaasuna, nesteinä tai molempien yhdistelmänä
 - kyseessä oleva muoto vaatii aina omat turvajärjestelmänsä
- vetyä voidaan siirtää
 1. kaasuna putkistossa
 2. kaasuna tai nesteinä kuorma-autolla
 3. kaasuna tai nesteinä junalla
 4. kaasuna tai nesteinä laivalla



Vedyn siirtäminen putkistossa, maantiellä, raiteilla tai vedessä

- putkisiirron kustannukset ovat matalimmat, koska siirrettävät määrät ovat suuria ja teknologia yksinkertaista
- laivaaminen on kallista, koska nesteyttäminen vaatii paljon energiaa ja kiehuva vety täytyy uudelleen nesteyttää (boil-off gas, BOG)
 - vedyn siirtäminen kantajaaineessa tai valmiina tuotteen esim ammoniakki on parempi menetelmä
- rekkakustannukset mahdollistavat joustavan ja kustannustehokkaan jakelun lyhyillä matkoilla ja pienissä määrissä

KULJETUSKUSTANNUKSET ETÄISYYDEN JA MÄÄRÄN MUKAAN (USD/KG)

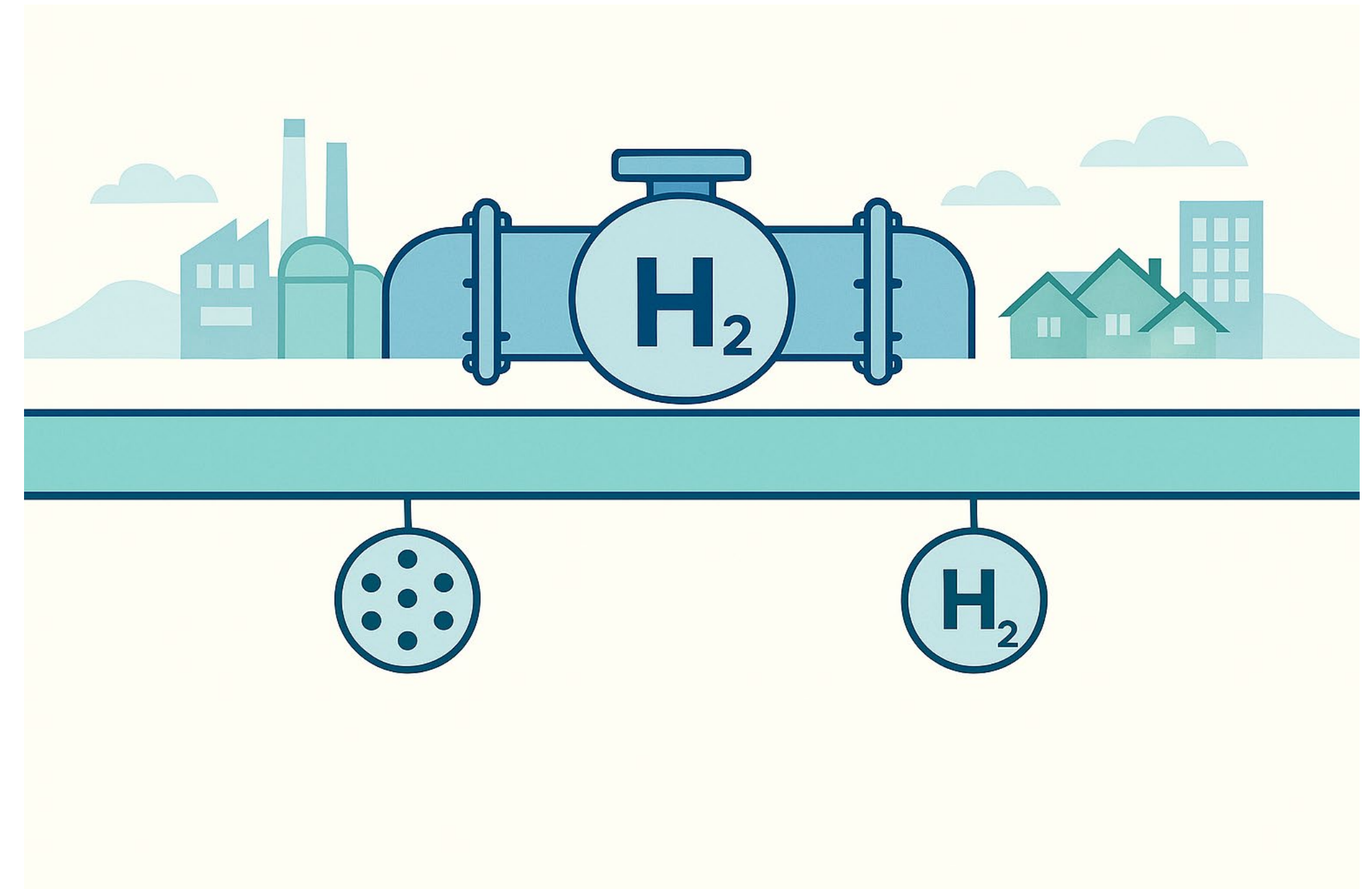


Euroopan unionin
osarahoittama

Lähde: International Gas Union, BloombergNEF and Snam (2020). Global Gas Report 2020

Vedyn siirtäminen putkistossa

- putkilinjastoja käytetään useimmiten lähellä sijaitsevien tuotantolaitosten ja kuluttajien välillä sekä laajemmilla maantieteellisillä alueilla, joilla odotuksena on vakaa, pitkän aikavälin kysyntä
- vetyä voidaan siirtää putkia pitkin
 - hyödyntäen olemassa olevaa metaaniverkkoa tai rakentamalla uutta vedylle suunniteltua verkkoa
 - olemassa olevaa metaaniputkistoa voidaan hyödyntää joko
 - sekoittamalla vetyä metaanin joukkoon (blending) 5 – 15 % (tämän määrän ei tiedetä aiheuttavan ongelmia tai muutostarpeita käyttäjien laitteisiin)
 - korvaamalla metaanin käyttö vedyllä (repurposing).



Vedyn siirtäminen putkistossa

- Hyödynnettäessä nykyistä maakaasuverkkoa on huomioitava, että maakaasuputket ovat kuitenkin ajan kuluessa kuluneet ja niihin on kertynyt epäpuhtauksia, joten vedyn kuljettamiseksi ne on ainakin osittain uudistettava.
- Ongelma vanhoissa ja teräksisissä maakaasuputkissa on hitsausliitosten haurastuminen vedylle.

Vaihtoehtoja ovat mm.

1. verkostoa voidaan tehdä kuituvahvistetusta polymeeristä. Pidempinä elementteinä saumojen määrä pienenee.
2. vetyvirtaan voidaan sekoittaa inhibiittoria, joka estää vedyn absorption teräsputken seinämään. Inhibiittorit ovat hiilimonoksiedeja tai rikkidioksiedeja, jotka puolestaan ovat myrkyllisiä ja ne on käyttöpaikassa eroteltava pois vedystä.
3. vetyputki voidaan myös päällystää sisäpuolelta, mutta silloin vanha maakaasuputki on kaivettava esille
4. uusi putki voidaan rakentaa myös vanhan maakaasuputken sisälle, jolloin vanhasta putkesta muodostuu suoja uudelle putkelle mekaanisia vaurioita vastaan. Tässäkin tapauksessa putki on kaivettava esiin.



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Kuvan lähde: <https://clarus.co.nz/content-hub/blending-hydrogen-into-gas-pipelines>

Vedyn siirtäminen putkistossa, maantiellä, raiteilla tai vedessä

Vetyverkon suunnittelussa auttaa pitkä kokemus maakaasuputkista. Putken lisäksi moni muu asia on samanlainen - vedyn siirtoputkiston varrella on pumppausasemia, venttiiliasemia, tuotantolaitoksia sekä voima- ja teollisuuslaitoksia, aivan kuten maakaasun siirtoputkistossakin. Lisäksi esimerkiksi painetasot ja rakentamisen periaatteet ovat samaa luokkaa.

Mitä kaikkea vedyn käyttäminen vaatii ympäristöltä?

- putkilinjoja
- nesteytyslaitoksia
- tankkiautoja, junan tankkivaunuja
- varastoja
- höyrystyslaitteita
- kompressoreita
- jakelulaitteita

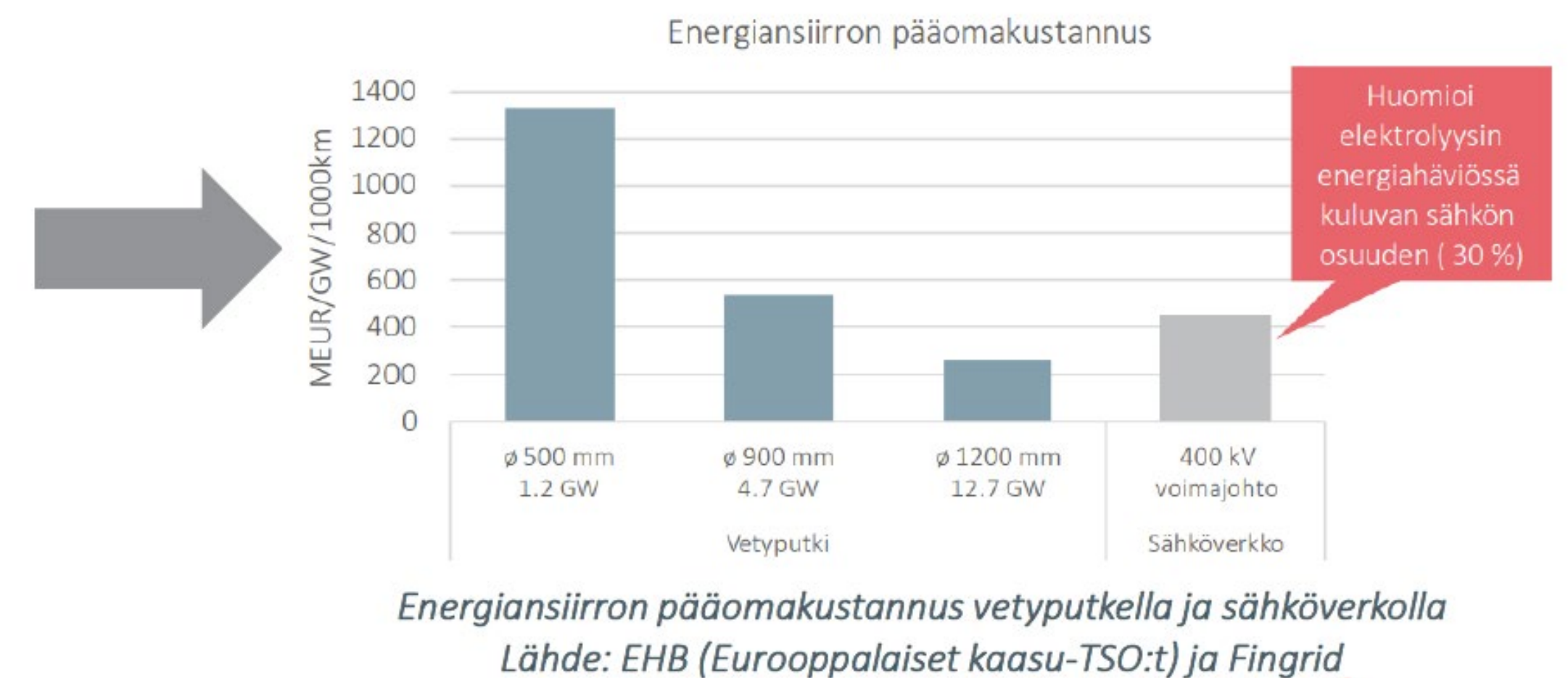
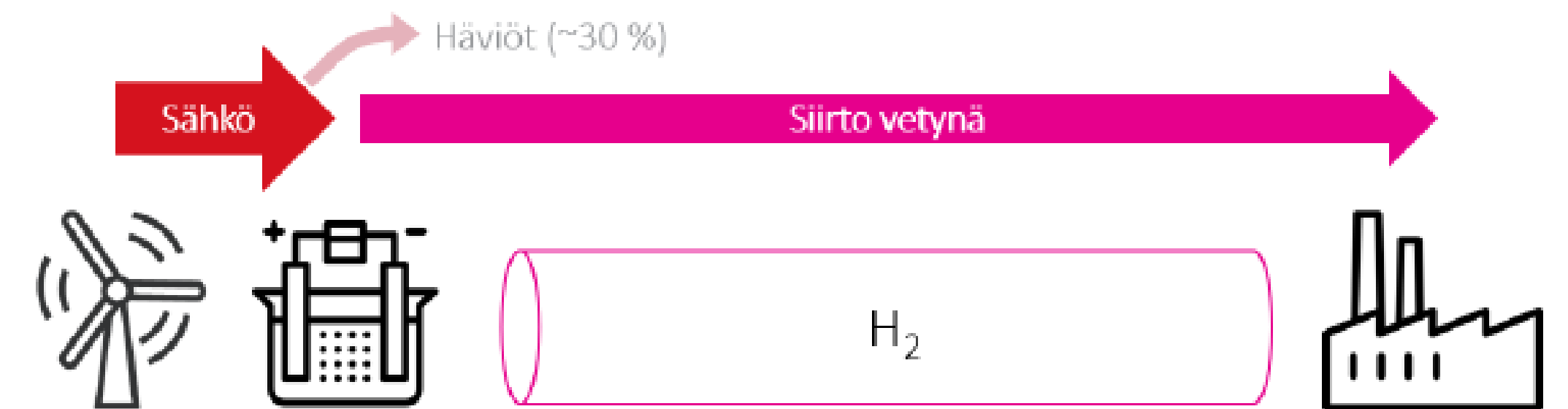


**Euroopan unionin
osarahoittama**

Kuvan lähde: <https://balkangreenenergynews.com/romania-successfully-tests-blending-hydrogen-in-natural-gas-distribution-grid-households/>

Vedyn siirtäminen putkistossa

- mikäli energian loppukäyttö on vetynä, sähkönä joudutaan siirtämään enemmän energiaa verrattuna vetyyn elektrolyysin häviöistä johtuen
- tällöin suuria energiamääriä siirrettäessä vedyn siirto putkistossa on kilpailukykyistä sähkön siirtoon verrattuna



Euroopan unionin
osarahoittama

Lähde: Gasgridin ja Fingridin vetytalous Hankkeen loppuseminaari

Vedyn siirtäminen putkistossa

Kuten aiemmin mainittu vedyn kuljetus tuotantopaikasta käyttöpaikkaan voidaan toteuttaa putkistoja pitkin tai kulkuneuvoilla

- silloin kun putkisto kulkee tuotantolaitoksen ulkopuolella, puhutaan siirtoputkistosta
 - siirtoputkistolle on haettava TUKES:lta lupa. Siirtoputkisto ei kuulu painelaitedirektiivin (PED) soveltamisalueeseen.
- putkistoja käytetään, kun kuljettavat määrät ovat suuria ja käyttöpaikassa tarvitaan vetyä pitkäaikaisesti.

Vetyputkiston rakentaminen on suuri ja kustannuksiltaan kallis hanke

- siirtoputkisto voi kulkea esim. maalla, meren pohjassa, putkisillan kannattamana ilmassa tai maahan upotettuna.

Kansalliset ohjeet vedyn laajamittaiselle siirrolle putkistossa ovat kehitysvaiheessa. Esitetään, että vetyasetustasolla ei asetettaisi tarkkoja määritteitä koskien putkiston ja komponenttien suunnittelua, materiaalivalintoja, valmistusta, hitsausta, testausta ja tarkastusta sekä operointia (TEM julkaisu 37/2024) Vedyn siirtoputkiston tarkastaa ennen käyttöönottoa ja viiden vuoden määrävälein Tukesin hyväksymä kansallinen tarkastuslaitos.



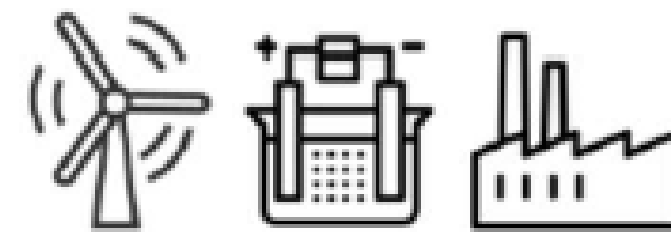
**Euroopan unionin
osarahoittama**

Kuvan lähde: <https://www.uni-potsdam.de/en/headlines-and-featured-stories/detail/2023-09-28-when-a-pipeline-has-a-leak-hydrogen-is-to-become-a-key-element-for-the-post-fossil-age>

Vedyn siirtäminen putkistossa

Erilaisia vaihtoehtoja uusiutuvan sähköenergian hyödyntämiseen vetytaloudessa yksiköiden sijoittelun suhteen tarkasteltuna

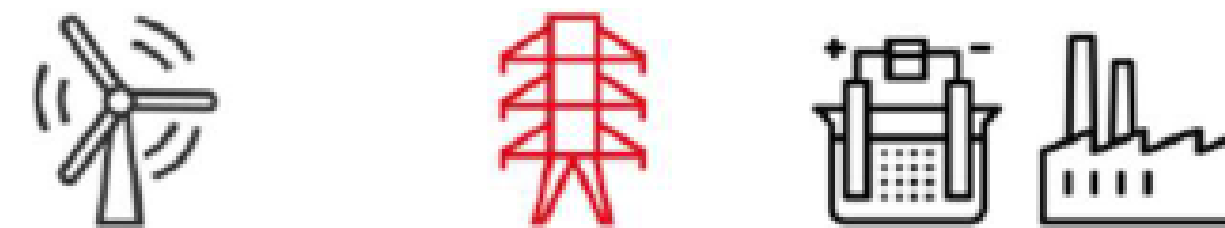
Uusiutuvan sähköntuotanto + vedyn tuotanto (elektrolyysi) + vedyn käyttö ja jatkojalostus



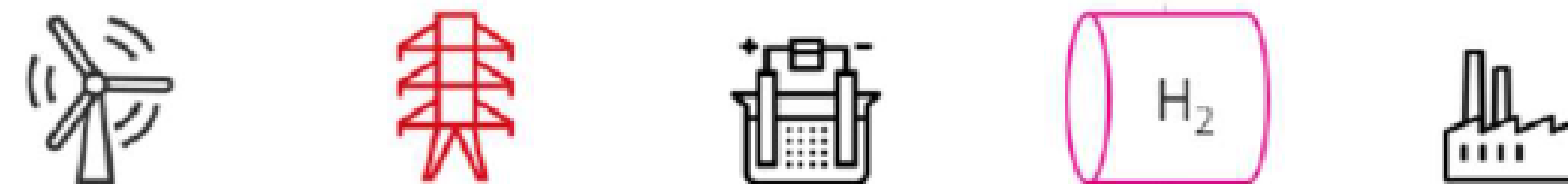
Uusiutuvan sähköntuotanto + vedyn tuotanto (elektrolyysi) + **vedyn siirto** + vedyn käyttö ja jatkojalostus



Uusiutuvan sähköntuotanto + sähkön siirto + vedyn tuotanto (elektrolyysi) + vedyn käyttö ja jatkojalostus



Uusiutuvan sähköntuotanto + sähkön siirto + vedyn tuotanto (elektrolyysi) + **vedyn siirto** + vedyn käyttö ja jatkojalostus



**Euroopan unionin
osarahoittama**

<https://www.fi.endress.com/fi/kest%C3%A4v%C3%A4n-kehityksen-ratkaisut-teollisuuteen/vedyn-kuljetys-varastointi#toc10>

Vedyn siirtäminen putkistossa

- vedyn putkistoon liittyy oleellisesti putkistossa käytettävä materiaali
 - tässä vaiheessa ei ole vielä selvillä, mikä on paras teräslaatu vetyverkostoon, jossa on suuret putkimäärät
 - materiaalia on olemassa ja käytössä eri puolilla maailmaa, mutta mikä on juuri oikea materiaali Suomen oloissa?
 - sinällään putkistoissa käytettävä materiaali ei ole mitään "ihmeellistä."
- vetyhaurastumisen riski on sitä suurempi mitä lujemmasta teräksestä on kyse
 - suurlujuusteräket sekä titaani- ja alumiiniseokset ovat alttiita vetyhaurastumiselle.
- Suomessa metaaniputkissa käytetään tyypillisesti materiaaleja X42, X52, X60 ja X70 (hiiliteräksiä)
 - vetyputkissa tullaan käyttämään samantyyppisiä materiaaleja, mutta mahdollisesti suositaan matalampia lujuuksia vetyhaurastumisriskin minimoimiseksi (AISI316)
 - matalampi lujuus yhdessä korkean painetason ja paineen vaihteluiden kanssa johtaa todennäköisesti vetyputkien suurempaan paksuuteen metaaniputkiin verrattuna
- siirtoputkiston rakenne ja rakentamistapa on teollisuudessa pitkän ajan kuluessa koeteltu - se on erittäin kestävä
 - koko elinkaari huomioiden ennakoivalla kunnossapidolla suuri merkitys - sisäpuolisilla tarkastuksilla varmistetaan putken kunto



Vedyn siirtäminen putkistossa

- suuren kokoluokan vetyjärjestelmistä ja korkeista paineista ei kuitenkaan ole vielä saatavilla pitkän aikavälin kokemuksia ja dataa
 - ensimmäisissä järjestelmissä varaudutaan suurempiin varmuuskertoimiin kuin mahdollisesti myöhemmin rakennettavissa putkistoissa.
- materiaalivalinta tulee vaikuttamaan putkiston operatiiviseen käyttöön koko elinkaaren ajan.
- optimaalisen materiaalin valinnassa tulee huomioida monia asioita mm: siirtokapasiteetti, vaihtoehtoisin teräslaatuihin liittyvät ominaisuudet, eri käyttöolosuhteissa.
 - lähtökohtana materiaalivalinnassa on ensisijaisesti huomioitava turvallinen käyttö ja turvallisuuslähtöinen elinkaariajattelu!
- sinällään kaasuverkoston infrarakentaminen on tavanomaista.



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Kuvan lähde: <https://www.wingoil.com/hydrogen-pipeline-materials/>

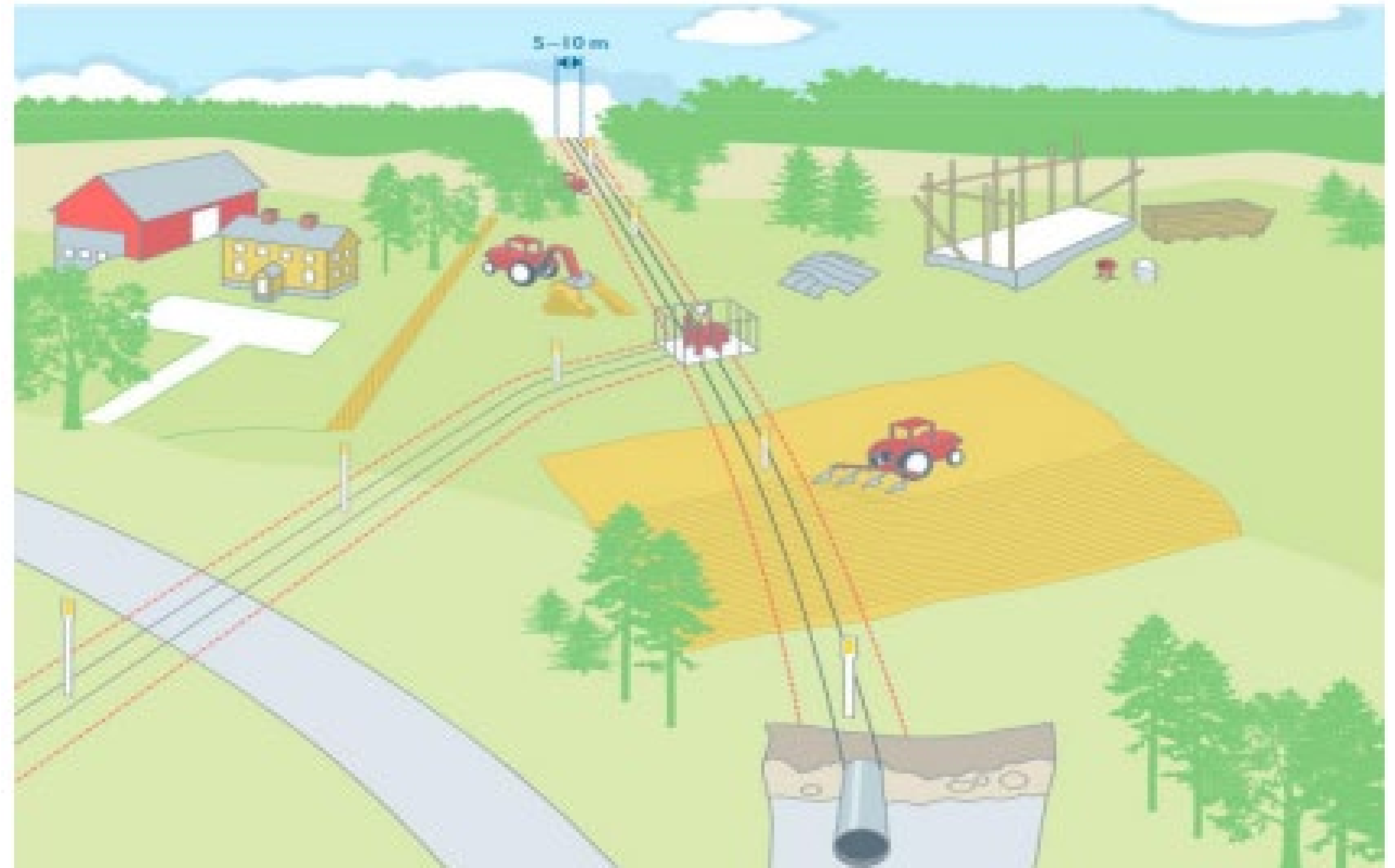
Vedyn siirtäminen putkistossa

- vetyputkistoissa pyritään minimoimaan saumojen määrä, koska saumat ovat tyypillisimpiä vuotokohtia – yhtenäinen, hitsattu putkilinja ei voida
 - yksittäiset putket valmistetaan ensisijaisesti saumattomina.
- joissain tilanteissa saumoja on kuitenkin käytettävä ja yksittäiset putket liitetään toisiinsa hitsaamalla
 - vedyn siirtoputkistoissa liitosten tulee olla ensisijaisesti hitsattuja (kierre- ja laippaliitosten sijaan) mahdollisten vuotokohtien minimoimiseksi
- maanalaisissa putkistoissa liitosten tulee olla hitsattuja.
- putkiston valmistuksessa että asennuksessa tehdyistä hitsausaumoista tarkastetaan kaikki saumat (röntgen, ultraääni)
- esim. vetyputki voi olla vaikka kuinka jyvettä tekoa tahansa - suurimman riskin muodostavat hitsaus- ja muut liitokset - pitävätkö ne kaikissa mahdollisissa olosuhteissa?



Vedyn siirtäminen putkistossa

- metsäalueilla ja taajamissa on havaittavissa 5–10 metriä leveä puuton vyöhyke, jonka keskellä sijaitsee maanalainen vetyputkisto
 - kaikki rakentaminen ja työskentely putken läheisyydessä on luvanvaraista
- halkaisijaltaan metrin vetyputkella voidaan korvata jopa 15 suurta sähkölinjaa
- kun putki kaivetaan maahan, se tarvitsee 5–10 metriä leveän, puuttoman maakaistan
 - putkiston päällä voidaan esimerkiksi viljellä normaalisti.
- kaasuputkia on rakennettu paljon viimeisen 50 vuoden aikana - putkivauriot harvinaisia. Suurin riski on kaivinkone, tosin piikkikauhallakin varustetun kaivinkoneen kauhalla ei saa putken kylkeen muuta kuin naarmuja.



Vedyn siirtäminen putkistossa

Kuvassa esitetyt

- Nord Stream 1 ja 2: kaasuputki Venäjän ja Saksan välillä
- Balticconnector: kaasuputki Suomen (Inkoo) ja Viron välillä, 77 km pitkä
 - meriputken koko on DN500 ja suunnittelupaine 80 bar

LNG-terminaalit (Liquefied Natural Gas) Haminassa ja Inkoossa. Lisäksi Exemplar niminen terminaalilaiva Inkoossa.

Haminassa iso satama ja yhdistyy Suomen sisäiseen kaasuputkistoon (kuva seuraavalla sivulla)

Biokaasua viideltä suomalaiselta biokaasulaitokselta.

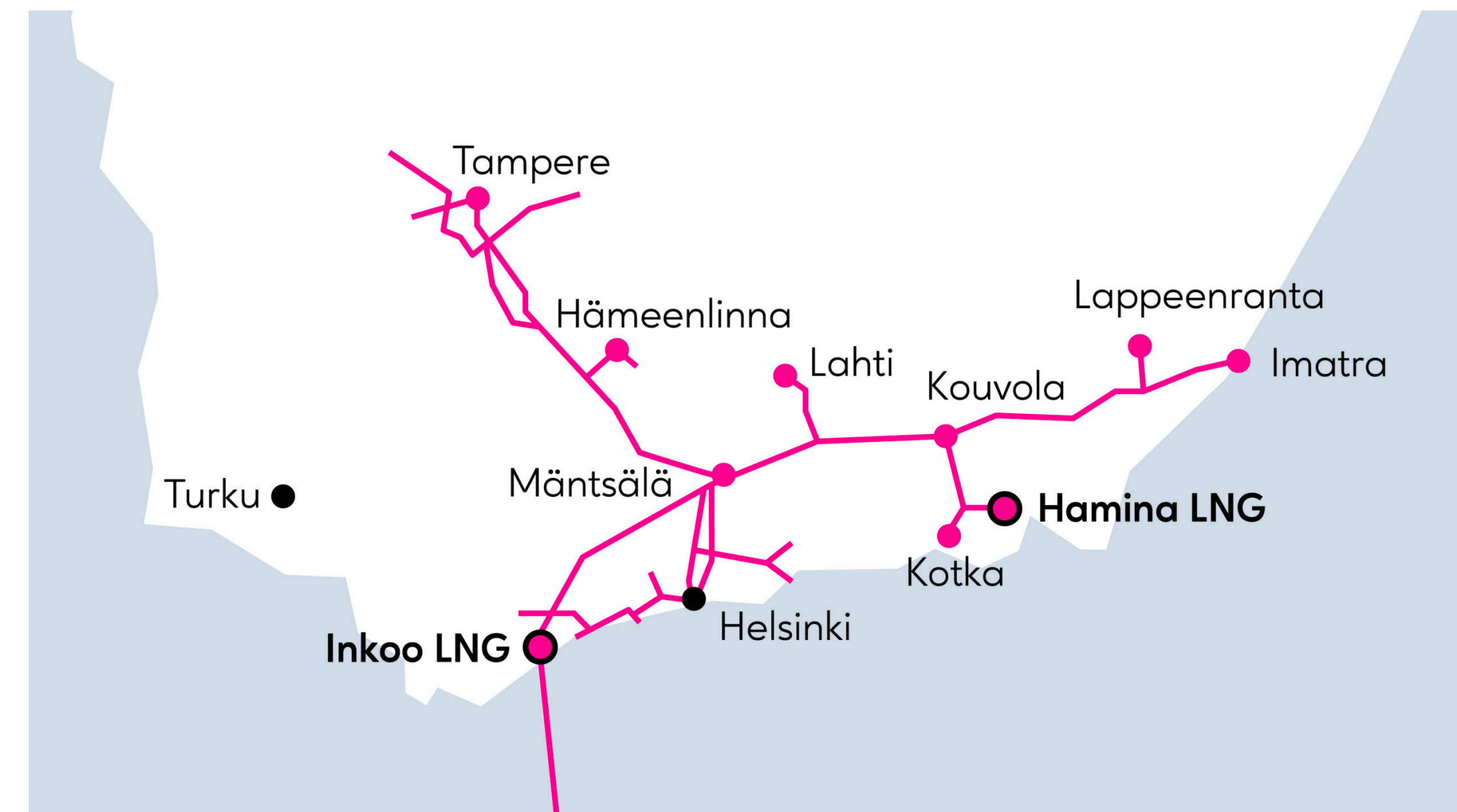


Euroopan unionin
osarahoittama

Kuvan lähde: <https://yle.fi/a/3-12641995>

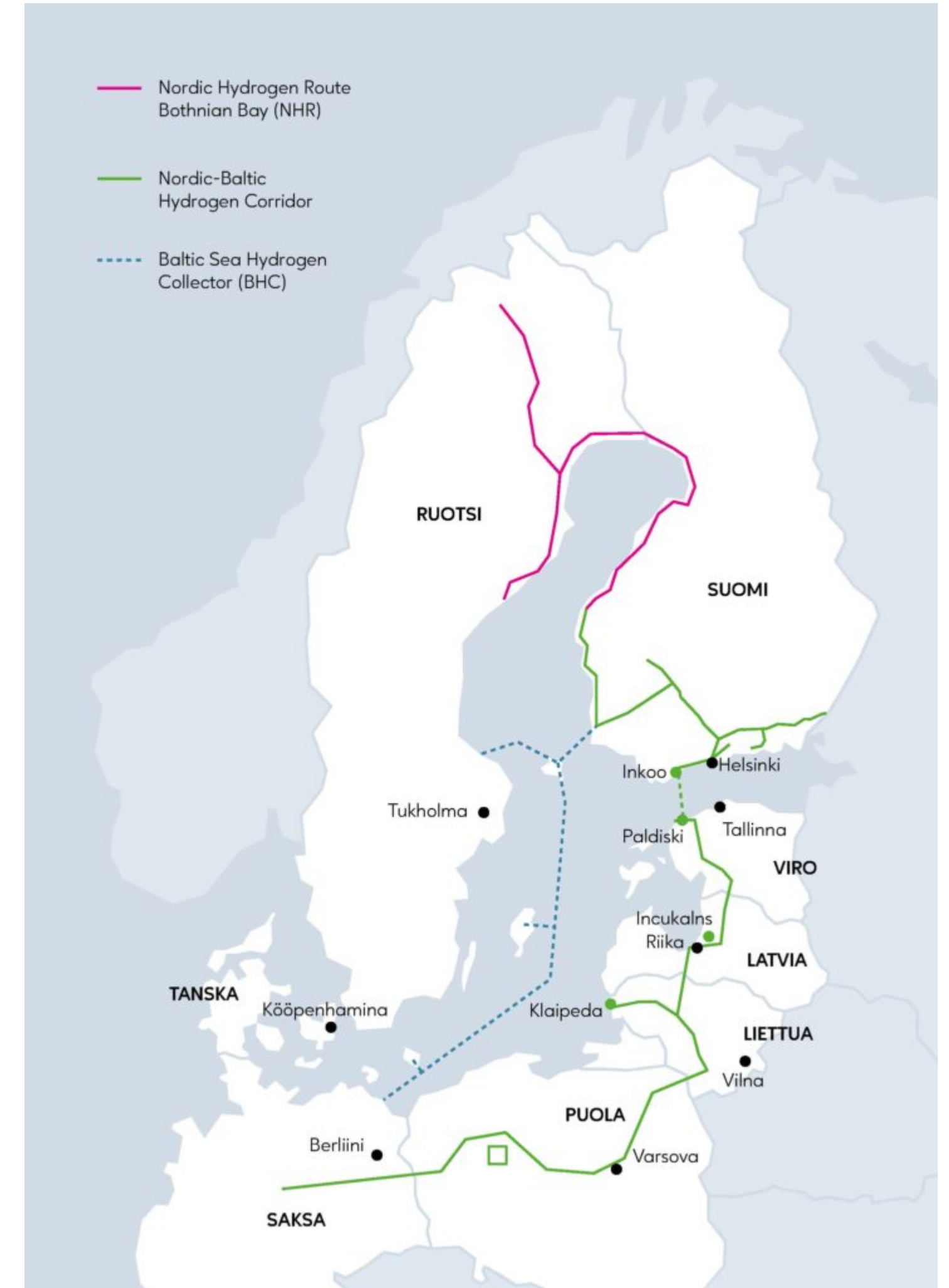
Vedyn siirtäminen putkistossa

- Suomen korkeapaineinen kaasun siirtoverkosto on 1150 km pitkä ja putkisto on suurimmalta osin polyeteenimuovilla päällystettyä teräsputkea
 - kaasuputkisto on suojattu pinnoitteen lisäksi katodisella suojausjärjestelmällä
 - teräsputkiston koko vaihtelee välillä DN100 - DN1000 ulkohalkaisijat (114,3 mm – 1016,0 mm). Maakaasun paine vaihtelee 30 – 54 Bar.
- korkeapaineisen putkiston lisäksi verkkoon kuuluu matalapaineista putkea 60 km
- kaasuverkostossa virtaa maakaasua, nesteytettyä maakaasua (LNG) ja biokaasua
- Vetyputkistoa on maailmalla n. 4500 km, josta yli puolet USA:ssa
 - Kiina suunnittelee rakentavansa vuoteen 2050 mennessä 6000 km vety putkistoa (nyt alle 100 km).



Vedyn siirtäminen putkistossa

- Nordic Hydrogen Route on Gasgrid Finlandin ja Nordion Energin yhdistämä hanke, jonka tarkoituksena on nopeuttaa vetytalouden tavoitteita vetyinfrastruktuurin avulla, luomalla vetymarkkina-alueiden välille putkiverkosto, joka ylettää Ruotsin Lapista, Perämeren ja Suomen rannikon kautta aina Saksaan asti
- NHR edistää Euroopan energiaomavaraisuutta ja tukee hiilineutraalisuustavoitteiden saavuttamista
- NHR on verkoston pohjoisin osa, Perämeren rannikko ja haara Ruotsin Kiirunan teollisuusalueelle
- projektin aikataulu on
 - esisuunnittelu 2022–24
 - suunnittelu 2024–26
 - rakentaminen 2026–30
 - tavoitteena avoin vetymarkkina vuodesta 2030 eteenpäin
- uuden putkiverkon pituudeksi on suunniteltu 1000 km



**Euroopan unionin
osarahoittama**

<https://www.vaasainsider.fi/fi/teknologia/vatgasekonomi-skapas-med-gemensamma-krafter-stora-gasledningsprojekt-kopplar-ihop-finland-med-europa/>

Vedyn siirtäminen putkistossa

Kartassa näkyvät alueet, joissa vedyn tuotanto ja käyttö ovat potentiaalisia, liittyvät tuulivoiman, sähköverkon, CO₂-lähteiden, metaaniverkon, rataverkon ja satamien sijaintiin.

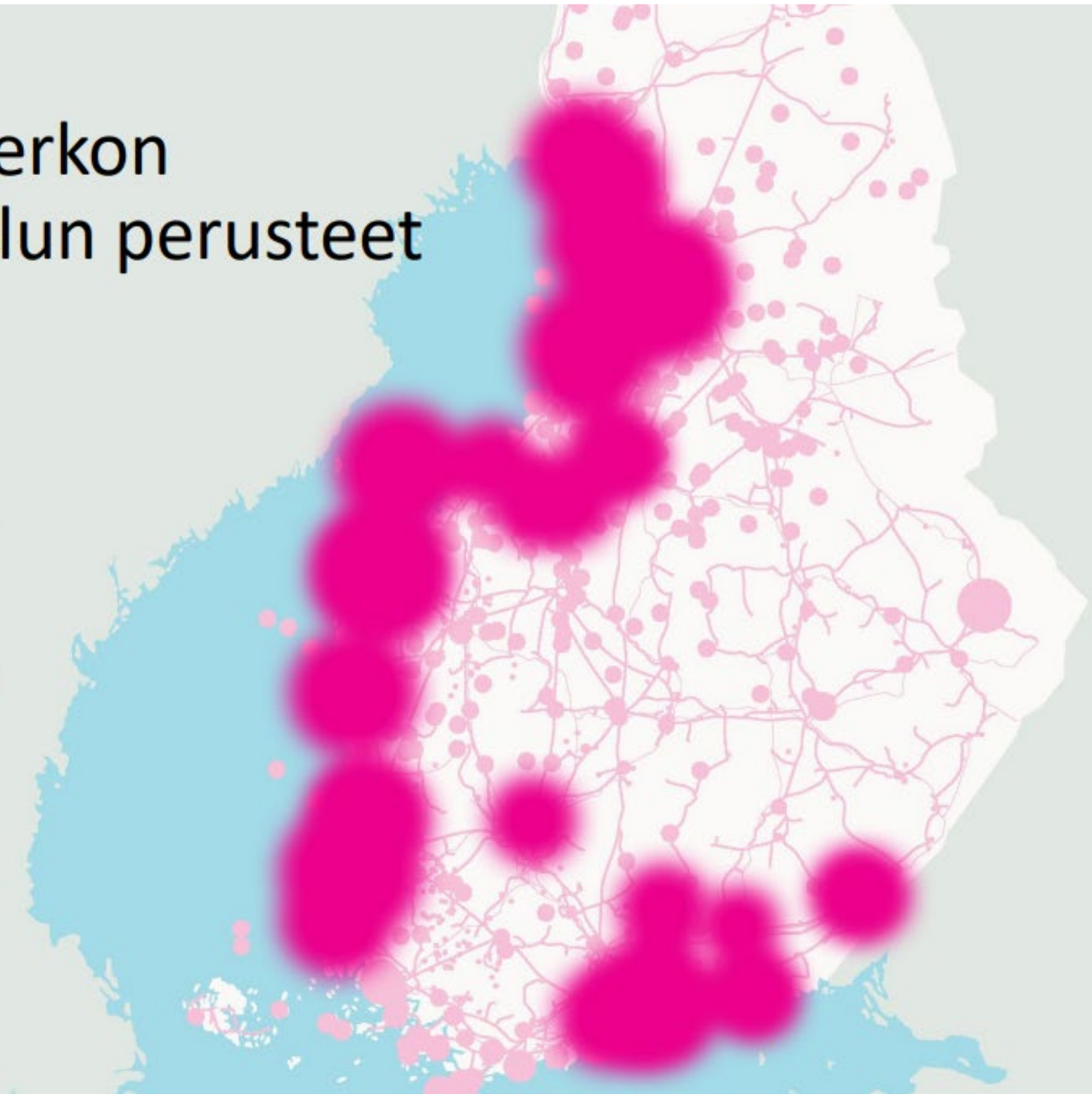
Näiden infrastruktuurien yhdistäminen mahdollistaa tehokkaan vedyn siirron ja jakelun koko maassa.

Putkiverkosto vaatii mm. kompressoriasemat, joissa nostetaan kaasun painetta ja siten lisätään kaasuverkoston siirtokapasiteettia. Kompressoriasemilla (Imatra, Kouvola, Mäntsälä) on yhteensä 8 kpl kaasuturbiinikäyttöistä kompressoriyksikköä, joiden akseliteho on yhteensä 54 MW. Näiden lisäksi Gasgrid Finland operoi Inkoon sähkömoottorikäyttöistä kompressoriyksikköä, jonka teho on 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

H₂-siirtoverkon suunnittelun perusteet

- + Tuulivoima
- + Sähköverkko
- + CO₂
- + Metaaniverkko
- + Rataverkko
- + Satamat
- + Vedyn käyttö ja tuotanto, potentiaali



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Kuvan lähde: https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Gasgrid_Kaasujen-tulevaisuus_Vetyvarma-Suomi_27112024_esitysmateriaali_FINAL-1.pdf
<https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/>

Vedyn siirtäminen putkistossa

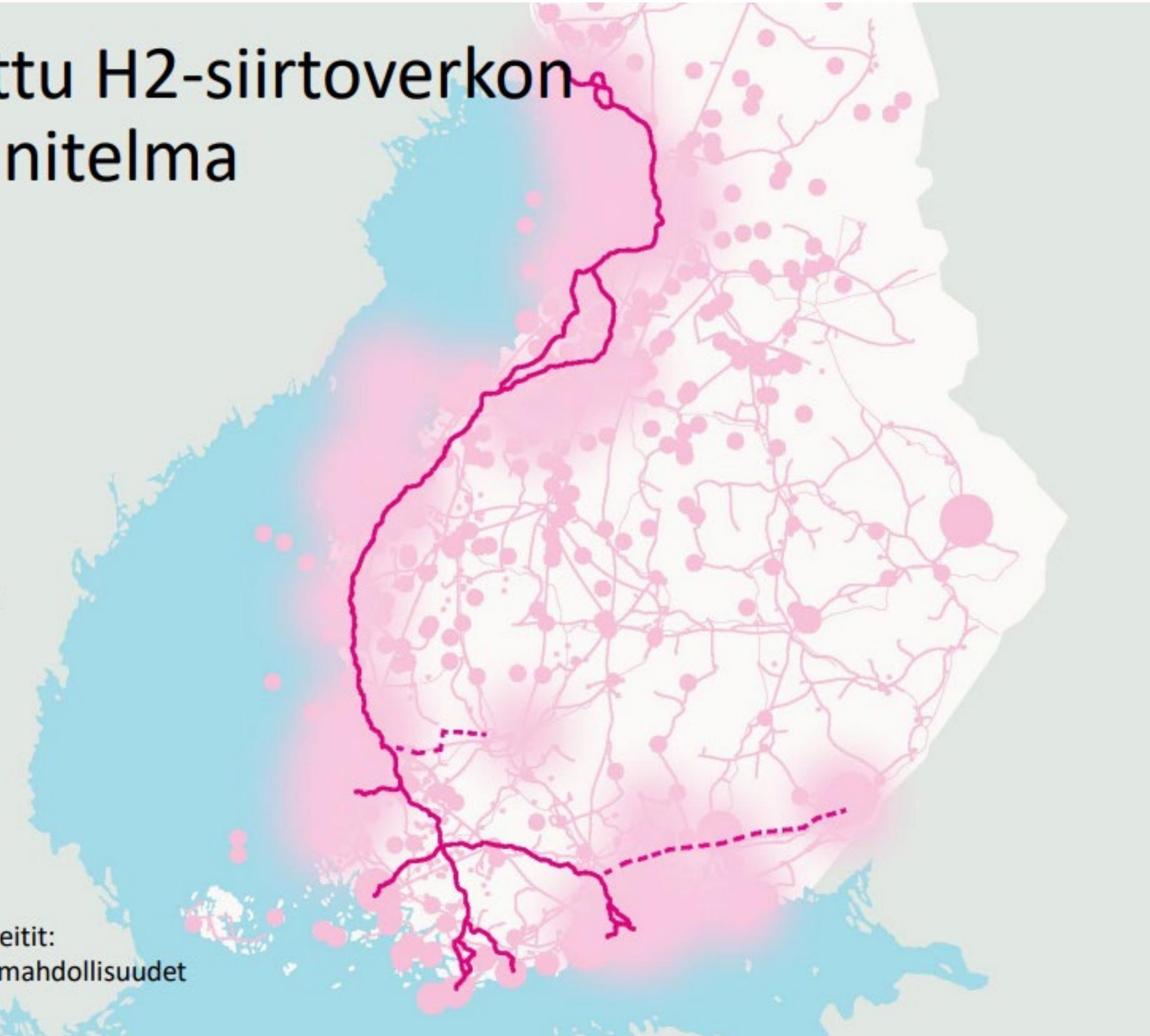
Vetyverkoston suunnitteluperiaatteet huomioiden oheisessa kuvassa on esitetty kaavaillun vetyputkiston vaihtoehtoiset reitit.

Tarkennettu H₂-siirtoverkon reittisuunnitelma

- + Tuulivoima
- + Sähköverkko
- + CO₂
- + Metaaniverkko
- + Rataverkko
- + Satamat
- + Vedyn käyttö ja tuontanto, potentiaali

= H₂-reitti

--- Jatkoselvitettävät reitit: monikaasualustan mahdollisuudet



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Kuvan lähde: https://gasgrid.fi/wp-content/uploads/Gasgrid_Kaasujen-tulevaisuus_Vetyvarma-Suomi_27112024_esitysmateriaali_FINAL-1.pdf

Vedyn siirtäminen maantiellä

Laiva-, juna- tai maantiekuljetus antaa mahdollisuuksia kuljettaa vetyä sijainnista riippuen vapaammin.

- lyhyillä matkoilla kuorma-autokuljetus tapahtuu yleisimmin joko kaasuna (200-700 bar) konteissa tai pitkänomaisissa korkeapainesylintereissä, jotka on pinottu putkiperävaunuun, tai nestevetysäiliöissä kryogeenisissä lämpötiloissa
 - nesteytys kasvattaa varastointitiheyttä ja parantaa pitkän matkan kuljetuksen kannattavuutta - kuljetettava energiamäärä jää kuitenkin vedyn maantiekuljetuksessa suhteellisen alhaiseksi
 - maantiekuljetus soveltuukin pääsääntöisesti lyhyiden matkojen (alle 500 km) ja pienien vetymäärien (alle 10 tonnia vetyä/päivä) kuljetukseen.



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Lähde: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/860354/Morko_Jari.pdf?sequence=2

Vedyn siirtäminen maantiellä

- kaasumaista vetyä voidaan siirtää ja varastoida kaasumaisena kaasupullokonteissa tai putkiperävaunuissa
- alle 500 km siirtomatkat suoriutuvat rekoilla ja tapauskohtaisesti myös junilla
 - säiliöiden paine on tyypillisesti 180-640 bar
- rekkakuljetuksissa perävaunuun lastattavan vedyn määrä riippuu käytettävästä säiliötyypistä.
 - esimerkiksi kaasupulloja käytettäessä vedyn määrä voi olla 380-900 kg ja putkiperävaunun tyypillinen vedyn kuljetusmäärä on 400 kg.
- suuremmat määrät vaativat kevyemmät komposiittisäiliöt
- nestemäisen vedyn kuljetus vaatii kryogeenisen säiliön
- nestemäistä vetyä voidaan siirtää säiliössä kerrallaan 300-4000 kg



Vedyn siirtäminen maantiellä

- suurimmat kaasumaisen vedyn kuljetus säiliöt ovat mitoiltaan 26 m³, painetaso 500 bar ja maksimi vetymäärä 1100 kg
 - Normaalipaineisena tilavuus olisi 12 000 m³
- nestemäisenä vetyä mahtuu suurimpiin rekalla kuljetettaviin säiliöihin 68 m³ ja 4450 kg, paineen ollessa 10,7 bar.
- maantiekuljetuksissa käytetään yleisimmin nesteytettyä vetyä (LH2), varsinkin pitemmillä reiteillä ja suurilla vetymäärillä
 - nesteyttäminen (jäähdyttäminen -253°C:een) on energia-intensiivistä ja aiheuttaa kustannuksia
 - etuna tiheyden kasvu n. 1.7-kertaiseksi 700 barin kaasuun nähden
 - suurimmat LH2:n kulj.säiliöt 50 m³, maksimi vetymäärän ollessa 3500 kg
 - normaalipaineisena lähes 40 000 Nm³
- vaikka nesteytys maksaa, kuljetettava määrä kasvaa, jolloin kuljetettuun määrään suhteutetut kustannukset alenevat kaasumaisena kuljettamiseen nähden
 - haittana ns. boil-off: lämmön vuotaessa kryogeeniseen säiliöön osa nesteestä kaasuuntuu => paine kasvaa => kaasua on päästettävä ulos säiliöstä
 - Boil-off-ilmion seuraukset: energiahukkaa ja negatiivisia ympäristövaikutuksia



Vedyn siirtäminen raiteilla tai vedessä

- junavaunuja käytetään nestemäisen vedyn kuljettamiseen keskipitkillä matkoilla
- laivat ottavat raskaita kuormia pitkän matkan kuljetuksiin
 - nesteytys kasvattaa varastointitiheyttä ja parantaa pitkän matkan kuljetuksen kannattavuutta
- nesteytettynä tankkiautolla tai junassa autotankkausasemalle kuljetettu vety
 - joko tankataan määränpäässä sellaisenaan nestevedyn säiliöillä varustettuihin ajo-neuvoihin (yleensä vähintään keskiraskaisiin)
 - tai höyrytetään määränpäässä ja varastoidaan kaasumaisena 700 barin paineeseen, josta sitä jaetaan (kevyisiin) ajoneuvoihin

Toyota Mirai: kulutus 0,8 - 1 kg/100 km - noin 600 kilometrin toimintamatka. Tankkaus 700 bar kestoltaan muutama minuutti. Tankki 140 l.

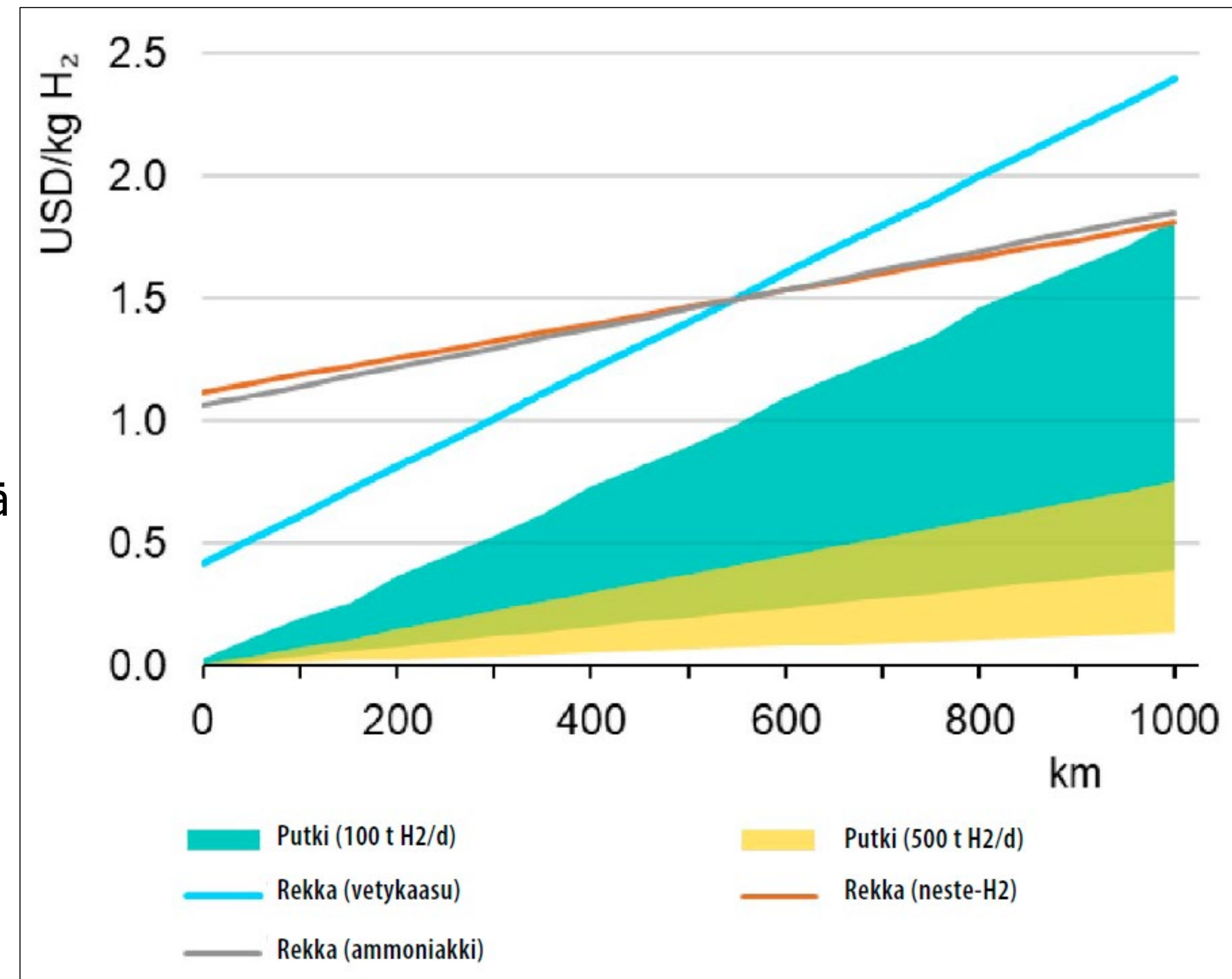


**Euroopan unionin
osarahoittama**

Lähde: <https://teknavi.fi/ilmio/tuhat-kilometria-tanskasta-suomeen-vetyautolla-tatako-on-tulevais>

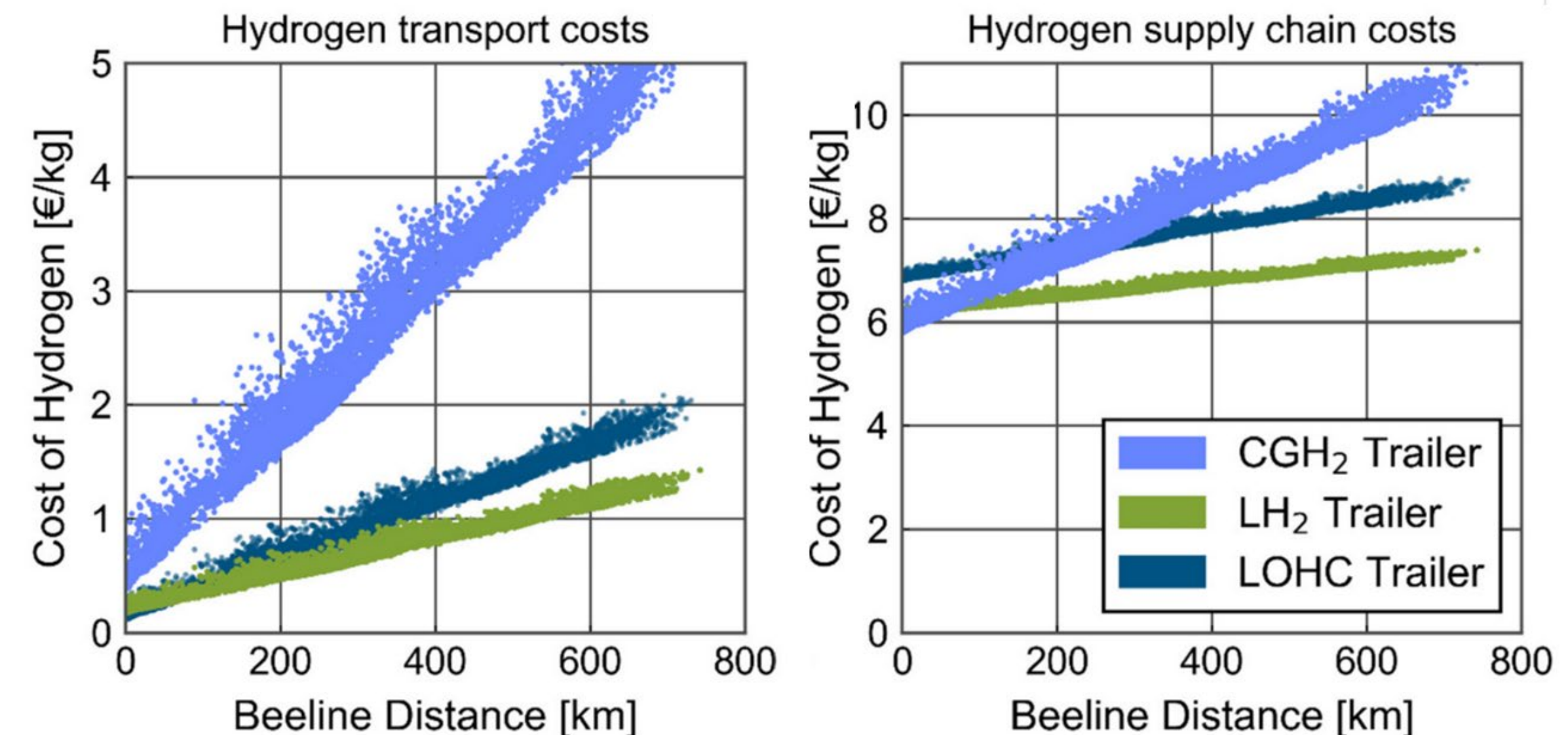
Vedyn siirtäminen

- Vaihtoehdot: rekka GH2, rekka LH2, rekka ammoniakki, kaksi putkikuljetusvolyymia
 - rekkakuljetus kaasumaisena edullisinta runsaaseen 500 km:iin
 - tätä pitemmillä matkoilla rekkakuljetus nesteenä tai ammoniakkina edullisempaa
- rekkakuljetus nestevetynä tai ammoniakkina: ei juuri eroa
- putkikuljetus 500 t/pvä: kustannus alle puolet vain 100 t/pvä kuljettavaan putkeen verrattuna
- keskimääräisen kuljetusetäisyyden ollessa 500 km muodostuu maantiellä kuljetuskustannukseksi 1– 1.5 US-dollaria/kg. Putkistokuljetuksessa 0,3 – 0,8 US-dollaria/kg



Vedyn siirtäminen

- tarkastelussa mukana kaasumainen vety, nesteytetty vety sekä nestemäiseen orgaaniseen kantajaan (LOHC) sitoutettu vety (LOHC = Liquid Organic Hydrogen Carrier)
- kyseessä maantiekuljetus vedyn tuotantopaikasta tankkausasemalle
 - vasemmassa kuvassa kuljetuskustannus, oikealla koko toimitusketjun kustannus
- kuvaajista havaitaan, että kuljetusetäisyys on merkittävä kustannustekijä
 - lyhyillä etäisyyksillä lastaus/purkaus-aika merkittävä kustannustekijä
 - kuljetus: LOHC kilp.kykyinen LH2:lle 50 km:iin
 - kokonaiskustannus: kaasumainen edullisin vain erittäin lyhyillä etäisyyksillä
 - pitemmillä etäisyyksillä LH2 selvästi edullisin sekä kuljetuksen että kokonaiskustannusten osalta
 - kokonaiskustannus kuljetusetäisyyden mukaan 6–10 €/kg



Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System: A Case Study for Germany through 2050

by [Markus Reuß](#)¹, [Paris Dimos](#)^{1,2}, [Aline Léon](#)³, [Thomas Grube](#)^{1,*}, [Martin Robinius](#)¹ and [Detlef Stolten](#)^{1,4}



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Lähde: opetusmateriaali M. Ikonen (Turun AMK)