



GALIMYBIŲ TRANSPORTUOTI VANDENIŲ ĮVAIRIŲ RŪŠIŲ TRANSPORTO PRIEMONĖMIS ANALIZĖ

Lietuvos energetikos agentūra
Dr. Indrė Gečaitė, projektų vadovė



TIKSLAS

2024 m. gruodžio 11 d. Lietuvos Respublikos Vyriausybė priėmė nutarimą Nr. 1070 „Dėl Vandenilio plėtros Lietuvoje 2025–2027 metais gairių įgyvendinimo veiksmų plano patvirtinimo“, kuriame numatytos veiklos, už kurias atsakingu vykdytoju paskirta viešoji įstaiga Lietuvos energetikos agentūra. Viena iš jų – **atlikti analizę, įvertinant galimybes transportuoti vandenilį įvairių rūšių transporto priemonėmis.**

UŽDAVINIAI

1. Potencialių vandenilio ir jo išvestinių produktų gamybos ir panaudojimo vietų nustatymas.
2. Vandenilio energijos nešiklių pasirinkimas ir analizė.
3. Informacijos apie tarptautinę praktiką surinkimas.
4. Infrastruktūros duomenų rinkimas ir atstumų vertinimas.
5. Transportavimo galimybių skirtingomis transporto priemonėmis techninis vertinimas.
6. Ekonominių rodiklių duomenų rinkimas ir modelio sudarymas.
7. Teisinio reglamentavimo analizė.
8. Ribojimų bei saugos analizė.
9. Scenarijų sudarymas.
10. Vandenilio ir jo išvestinių produktų transportavimo kaštų modeliavimas ir išvesties duomenų vizualizacija.
11. Apdorojimo ir panaudojimo vietų nustatymas.



Šaltinis: North American Clean Energy

01 | TECHNINĖS GALIMYBĖS

01



Šaltinis: Rotarex.com

02



Šaltinis: chartindustries.com

03



Šaltinis: Shutterstock

1. **Transportavimas suslėgto vandenilio vamzdinėmis puspriekeabėmis (200–500 bar)** – technologiškai brandus sprendimas, pasižymintis santykinai paprasta logistika ir nereikalauja cheminės rekonversijos galutiniame taške. Vandenilio suslėgimas iki aukšto slėgio gali sunaudoti apie 13–18 proc. jo energinės vertės, todėl mažina bendrą grandinės efektyvumą, o saugojimui ir transportavimui būtini specialūs aukštam slėgiui, difuzijai ir vandenilio trapumui atsparūs slėginiai indai.
2. **Transportavimas sunkvežimiais suskystinto vandenilio cisternomis** naudojamas ilgesniems atstumams ir didesniems kiekiam, nes dėl didesnio tūrinio vandenilio tankio leidžia vienoje cisternoje pervežti didesnius kiekius (apie 2–7,5 t). Tačiau šis sprendimas reikalauja palaikyti itin žemą temperatūrą (apie –253 °C), o didelės energijos sąnaudos suskystinimui, garavimo nuostoliai ir griežti kriogeninės saugos reikalavimai mažina bendrą grandinės efektyvumą.
3. **Transportavimas vandenilio vamzdynais** paprastai laikomas vienu ekonomiškai efektyviausių sprendimų dideliems ir pastoviems kiekiam, ypač kai reikia užtikrinti nepertraukiamą tiekimą tarp gamybos ir vartojimo centrų. Vamzdynų diametras parenkamas pagal perduodamą vandenilio kiekį, atstumą, slėgio režimą, kompresorių logiką ir planuojamą panaudojimo lygį. Mažesnio diametro vamzdynai (4–10 colių) paprastai naudojami skirstomajam tiekimui, o didesnio diametro vamzdynai (20–48 colių) – perdavimo tinklui, didelio masto vandenilio

04



Šaltinis: Tramesa

05



Šaltinis: Shutterstock

06



Šaltinis: NYK

- Amoniakos transportavimas cisternomis ir geležinkeliais.** Transportuojamas kaip suskystintos dujos specialiose slėginėse cisternose (5–12 bar) arba šaldytose talpyklose ($-33\text{ }^{\circ}\text{C}$), tiek kelių, tiek geležinkelių transportu. Geležinkelis dažniausiai naudojamas didesniems kiekiams ir ilgesniams atstumams, nes leidžia efektyviau pervežti didelius krovinius, tačiau reikalauja griežtų saugos ir sandarumo užtikrinimo priemonių.
- Metanolio transportavimas cisternomis ir geležinkeliais.** Metanolis yra skystis aplinkos sąlygomis, todėl gali būti transportuojamas cheminėms medžiagoms skirtomis cisternomis ir geležinkelio cisterniniais vagonais, nereikalaujant aukšto slėgio ar kriogeninių sąlygų. Dėl to logistika paprastai yra paprastesnė nei dujinių produktų atveju, o geležinkelis dažnai būna palankus didesniems ir stabilesniems kiekiams vežti, nors būtina laikytis degių ir toksiškų medžiagų transportavimo reikalavimų.
- Metanolio ir amoniako transportavimas laivais.** Tarptautinei vandenilio prekybai metanolis ir amoniakas šiuo metu laikomi brandesniais jūrinio transporto sprendimais, o LH_2 gabenimas laivais dar nėra plačiai komercializuotas. Metanolis gabenamas kaip skystas krovinytis cheminiais tanklaiviais, o amoniakas – specializuotais dujovežiais kaip suskystintos dujos, reikalaujant griežtesnių saugos ir temperatūros kontrolės sistemų.

IŠVADOS

- Vandenilio transportavimas vamzdynais** naudojamas dideliems kiekiams ir ilgiems atstumams, kai yra stabili paklausa. Tai ekonomiškai efektyviausias sprendimas masinei rinkai su mažais energijos nuostoliais. Pagrindiniai trūkumai – labai didelės pradinės investicijos, medžiagų suderinamumo ir vandenilio trapumo iššūkiai, ekonominis pagrįstumas stipriai priklauso nuo paklausos ir infrastruktūros apkrovimo, tačiau ilgalaikėje perspektyvoje tai pagrindinė vandenilio infrastruktūra (ypač 20–48 colių perdavimo tinklams).
- Suslėgto vandenilio transportavimas sunkvežimiais** (200–500 bar.). Tinkamas mažiems kiekiams ir trumpiems atstumams (iki 100–200 km), ypač ankstyvoje rinkos stadijoje, nes nereikalauja didelės infrastruktūros. Trūkumai – mažas tūrinis tankis, didelis sunkvežimių poreikis ir 13–18 proc. energijos nuostoliai suslėgimui, todėl didėjant mastui tampa ekonomiškai neefektyvus.
- Suskystinto vandenilio transportavimas sunkvežimiais** naudojamas esant ilgiems pervežimo atstumams ir didesniems kiekiams, nes turi daug didesnį tankį ir leidžia ženkliai sumažinti transporto vienetų skaičių. Tačiau reikalinga itin žema temperatūra (-253 °C), didelės energijos sąnaudos (30–40 proc.) , didelės investicijos į skystinimo ir kriogeninio saugojimo infrastruktūrą bei garavimo nuostoliai riboja šio sprendimo efektyvumą.
- Transportavimas amoniako ir metanolio pavidalu** naudojamas esant ilgesniems pervežimo atstumams, tikslinei gamybai ir tarptautinei prekybai, nes šie nešikliai pasižymi palankesniais saugojimo ir transportavimo savybėmis nei grynas vandenilis ir gali naudoti iš dalies jau išvystytą infrastruktūrą, pvz., cisternas, laivus ir dalį chemijos pramonės logistikos grandinių. Trūkumai – papildomi sintezės ir galimos rekonversijos procesai, energijos nuostoliai bei didesnis technologinis sudėtingumas, tačiau tai viena perspektyviausių didelio masto eksporto krypčių.
- Transportavimas laivais** naudojamas tarptautiniam transportavimui dideliais kiekiais, kur vamzdynai yra sudėtingas sprendimas, ypač tinkamas amoniakui ir metanolui dėl išvystytos infrastruktūros.



02 | TEISINIS REGLAMENTAVIMAS

EUROPOS SUTARTIS DĖL PAVOJINGŲ KROVINIŲ TARPTAUTINIO VEŽIMO KELIAIS (ADR)



Vandenilio transportavimas reglamentuojamas kaip pavojingų krovinių vežimas, todėl svarbiausi reikalavimai yra susiję su klasifikavimu, ženkliniu, tinkama talpa, kvalifikuotu personalu ir iš anksto suplanuotomis saugos procedūromis.

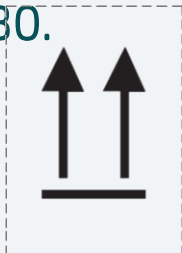
- **Pagrindinis teisinis pagrindas:** kelių transportui taikomas ADR, o Lietuvoje šiuos reikalavimus nacionaliniu lygiu įgyvendina Lietuvos Respublikos pavojingų krovinių vežimo automobilių, geležinkelių ir vidaus vandenų transportu įstatymas, priežiūrą vykdo Lietuvos transporto saugos administracija.
- **ADR tikslas** – nustatyti vienodas pavojingų krovinių vežimo taisykles, kad vandenilis būtų transportuojamas saugiai, sumažinant gaisro, sprogo, nuotėkio ir žalos žmonėms, infrastruktūrai bei aplinkai riziką.
- **Taikymo sritis:** reikalavimai taikomi suslėgto ir suskystinto vandenilio transportavimui keliais. Šios taisyklės taikomos tiek tarptautiniam, tiek vidaus transportavimui ES valstybėse.
- Vandenilis laikomas pavojingu kroviniu, todėl transportuojant taikomi reikalavimai dėl UN klasifikavimo, patvirtintos talpos, ženklavimo, dokumentų, transporto priemonių įrangos ir darbuotojų kvalifikacijos. ADR reikalavimai apibrėžia vairuotojų ir personalo mokymą, saugų pakrovimą/iškrovimą bei avarinių situacijų valdymą.
- Išimtys galimos tik ribotais atvejais – mažiems kiekiams, tam tikroms mažmeninėms ar pagalbinėms siuntoms, tačiau net ir tada išlieka baziniai saugos bei krovinio tvarkymo reikalavimai. Ženklavimas yra privalomas degių dujų etikete, pavojingumo bei oranžinėmis lentelėmis, o slėginiai indai ir kriogeninės talpos turi atitikti specialius ADR pakavimo, tvirtinimo ir periodinių patikrų reikalavimus.
- **Atsakomybės ir saugumas:** pakrovimo/iškrovimo operacijoms turi būti aiškiai paskirstytos vežėjo ir priimančios įmonės atsakomybės; įmonėms, kurioms netaikomos išimtys, privalomas saugos patarėjas, darbuotojų ADR mokymai, o didesniems nei 3000 l vandenilio kiekams cisternose ir aukštos rizikos krovinio saugumo planas.

KROVINIŲ ŽENKLINIMAS

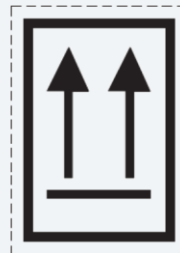
1. Kroviniams, kuriose yra UN 1049 (suslėgtas vandenilis), UN 1966 (suskystintas vandenilis) turi būti pritvirtinta pavojingumo etiketė 2.1 (Degios dujos)



2. Kriogeninės talpos (UN 1966) turi būti pažymėtos krypties rodyklėmis, rodyklės turi būti priešingose vertikaliose pusėse, turi rodyti „aukštyn“ bei turi būti aiškiai matomos. Atitinka ISO 780.



ARBA



3. Transporto priemonės, vežančios pavojingus krovinius, turi būti pažymėtos dviem oranžinėmis lentelėmis, viena priekyje ir viena gale: viršuje – pavojingumo kodas, apačioje – UN numeris.



4. Ant kiekvieno slėginio indo (pvz., dujų baliono) turi būti nurodytas pavojingos medžiagos UN numeris su priešdėliu „UN“. Pakartotinai pildomi slėginiai indai turi būti pažymėti aiškiai įskaitomais ir patvariais ženklais su visa informacija:

	(m) 25E	(n) D MF	(o) 765432	(p) H
	(f) PH300BAR	(g) 62.1KG	(h) 5.8MM	
(a) UN	(b) ISO 9809-1	(c) LT	(d) IB	(e) 2000/12

VANDENILIO TRANSPORTAVIMO MARŠRUTŲ PLANAVIMAS

ADR nenustato konkrečių privalomų maršrutų, tačiau vandenilio maršrutas planuojamas ne pagal trumpiausią kelią, o pagal saugiausią ir leistiną transportavimo koridorių.

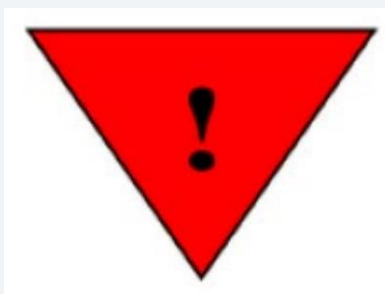


- **Maršruto planavimo tikslas** – parinkti tokį kelią, kad vandenilis būtų vežamas ne tik trumpiausiu, bet ir teisės aktų bei saugos požiūriu tinkamu maršrutu, įvertinant ADR reikalavimus, kelio infrastruktūrą ir vietinius ribojimus.
- ADR nustato bendrus saugos reikalavimus, tačiau praktikoje maršrutą gali papildomai riboti tunelių kategorijos, savivaldybių nustatyti pavojingų krovinių maršrutai, draudimai miestų centruose ar laikini eismo apribojimai.
- Svarbiausias techninis aspektas – tuneliai: transportuojamam vandeniliui gali būti draudžiama važiuoti per tam tikrų kategorijų tunelius, todėl maršrutas turi būti tikrinamas ne tik pagal atstumą, bet ir pagal leistiną infrastruktūrą.
- Lietuvoje maršruto tinkamumą lemia kelių ženklinimas: būtina įvertinti, ar pasirinktuose keliuose nėra pavojingų krovinių draudimų, masės, ašies apkrovos, aukščio, pločio ar kitų fizinių apribojimų.
- Maršrutų planavimas turi remtis aktualiais eismo duomenimis: tam galima naudoti tokius šaltinius kaip eismoinfo.lt ir AB „Via Lietuva“ GIS žemėlapis, kurie padeda nustatyti realius apribojimus ir parinkti praktiškai įgyvendinamą maršrutą.
- Lietuvoje vandenilio transportavimui kelių transportu taikomi bendrieji transporto priemonių ir jų junginių matmenų, bendrosios masės bei ašių apkrovų apribojimai, kurie nustato fizines ribas planuojant tokio krovinio logistiką.

TARPTAUTINIO PAVOJINGŲ KROVINIŲ VEŽIMO GELEŽINKELIAIS TAISYKLĖS (RID)

RID reglamentuoja vandenilio vežimo geležinkeliais saugos, ženklavimo ir krovos reikalavimus.

- **RID paskirtis** – nustatyti vienodas pavojingų krovinių, įskaitant suslėgtą ir suskystintą vandenilį, vežimo geležinkeliais taisykles, siekiant užtikrinti saugų transportavimą visose šios konvencijos šalyse.
- Lietuvoje RID taikomas kartu su nacionaliniais teisės aktais, o jo laikymąsi prižiūri Lietuvos transporto saugos administracija (LTSA). RID reikalavimai taikomi įvairioms transportavimo formoms: cisterniniams vagonams, konteineriams-cisternoms, mobilioms cisternoms, bateriniams vagonams ir slėginių indų vienetams, pvz., balionams ar balionų rėmams.
- **Ženklinimas** geležinkeliuose iš esmės panašus į ADR, tačiau papildomai taikomos specifinės RID priemonės, pvz., oranžinės lentelės cisternoms ir manevravimo etiketė Nr. 13, reiškianti atsargų manevravimą.
- Pakrovimas ir iškrovimas leidžiamas tik specialiai pritaikytose vietose – terminaluose ar pramoninėse teritorijose su atitinkamomis saugos priemonėmis, elektrifikuotuose keliuose krovos metu kontaktinis tinklas turi būti išjungtas.
- Pavojingus krovinius vežantys vagonai negali būti naudojami kaip laikino saugojimo vieta, todėl ilgesnis jų stovėjimas galimas tik specializuotose, teisės aktų reikalavimus atitinkančiose teritorijose.



Manevravimo etiketės Nr. 13 pavyzdys

VANDENILIO TRANSPORTAVIMAS METANOLIO IR AMONIAKO FORMA



Metanolio ir amoniako transportavimui taikoma ta pati pavojingų krovinių sistema, tačiau konkretūs saugos reikalavimai priklauso nuo pačios medžiagos fizinių ir pavojingumo savybių.

- Jei vandenilis transportuojamas kaip metanolis ar amoniakas, jam taikomas bendras pavojingų krovinių transporto reglamentavimas: ES lygiu – Direktyva 2008/68/EB, ADR keliams ir RID geležinkeliams.
- Metanolio ir amoniako transportavimas reglamentuojamas skirtingai pagal jų pavojingumą: metanolis vertinamas kaip degus ir toksiškas skystis, o amoniakas – kaip toksiškos dujos, todėl amoniako atveju daug didesnė reikšmė tenka slėgio kontrolei, sandarumui ir nuotėkio prevencijai.
- Geležinkeliuose abi medžiagos gali būti vežamos tik specialiai pavojingiems kroviniams pritaikytais cisterniniais vagonais ar konteineriais-cisternomis, kurie turi atitikti konstrukcijos, ženklavimo, bandymų ir techninės priežiūros reikalavimus.
- Privaloma pilna transportavimo dokumentacija ir ženklavimas: UN numeris, oficialus medžiagos pavadinimas, pavojingumo klasė, cisternos identifikacija ir avarinės saugos instrukcijos.
- Pakrovimo ir iškrovimo infrastruktūra turi atitikti cheminės saugos reikalavimus: būtinos ventiliacijos, sandarumo kontrolės, išsiliejimo valdymo, įžeminimo, avarinio stabdymo ir ATEX priemonės, o darbuotojai turi būti specialiai apmokyti.
- Tokie terminalai gali būti vertinami ir aplinkosaugos požiūriu: priklausomai nuo planuojamų kiekių ir vietos, gali būti taikoma PAV arba atrankos procedūra, ypač jei veikla vykdoma jautriose teritorijose.

SAUGA



Kritiškiausias vandenilio tiekimo grandinės etapas yra ne pats vežimas, o saugus pakrovimas / iškrovimas ir prijungimas prie stacionarios infrastruktūros.

- Didžiausia rizika kyla ne vien transportavimo metu, o vandenilio perdavimo iš transporto priemonės į stacionarią infrastruktūrą etape, kai susikerta pavojingų krovinių, slėginių sistemų ir sprogios aplinkos rizikos.
- Šių operacijų sauga remiasi kelių reguliavimo sluoksnių deriniu: ADR/RID, slėginių įrenginių reikalavimais (PED), ATEX ir nacionalinėmis techninėmis taisyklėmis.
- Kritiniai techniniai parametrai – slėgio, temperatūros ir nuotėkio kontrolė: ESD* turi izoliuoti sistemą per ≤ 5 s, 10 proc. LEL** laikoma įspėjimo riba, 20 proc. LEL – automatinio stabdymo riba, o temperatūros ribos taikomos tiek sistemai, tiek transporto priemonės bakui.
- Iškvėtimo ir pildymo infrastruktūra turi būti projektuojama taip, kad nuotėkio ar degimo atveju poveikis būtų lokalizuotas: svarbūs saugūs išleidimo vamzdžiai, saugos atstumai, šiluminės spinduliuotės ribos, trumpos žarnos, aiškios manevravimo zonos ir netrukdoma prieiga avarinėms tarnyboms.
- Eksploatavimo metu būtina aktyvi operatoriaus kontrolė ir pilna dokumentacija: po saugos sistemos suveikimo įrenginys negali būti paleidžiamas automatiškai, turi būti vedami patikros, incidentų ir priežiūros registrai.
- Avarinis valdymas orientuotas pirmiausia į nuotėkio izoliavimą, sistemos sustabdymą ir evakuaciją, nes vandenilio liepsna gali būti sunkiai matoma, o jos gesinimas ne visada saugiausias sprendimas, todėl privalomi rizikos vertinimai, avariniai planai, TREM kortelės ir ryšys su avarinėmis tarnybomis.

REKOMENDACIJOS



1. Parengti nacionalinį praktinį vadovą vandenilio transportui ir logistikai, kuris paprastai ir aiškiai aprašytų: taikomus teisės aktus, institucijų vaidmenis ir kontaktus, tipines situacijas (A→B pervežimas, degalinės aptarnavimas, terminalas, laikinas stovėjimas, avarinė situacija), minimalius reikalavimus dokumentams, mokymams ir kontrolėms.
2. Sukurti institucijų atsakomybės matricą „kas už ką atsakingas“ vandenilio grandinėje.
3. Publikuoti standartizuotą iškrovimo procedūrų ir minimalų techninį reikalavimų vadovą, kurį taikytų visi operatoriai (nepriklausomai nuo tiekėjo).
4. Numatyti tarpsavivaldybinį maršrutų planavimo ir informavimo mechanizmą didesniems srautams.
5. Pereinamuoju laikotarpiu įsteigti „vieno langelio“ koordinavimą pilotiniams vandenilio projektams, kad projektai neįstrigtų tarp institucijų ir būtų taikoma vienoda praktika.

IŠVADOS

1. **Vandenilio transportavimas Lietuvoje turi būti vertinamas kaip pavojingų krovinių logistika, o ne tik kaip techninis pervežimas, jo organizavimą nustato ADR kelių transportui, RID geležinkelių transportui, ES Direktyva 2008/68/EB ir nacionaliniai teisės aktai.**
2. **Pagrindiniai reikalavimai apima visą transporto grandinę – nuo krovinio klasifikavimo, patvirtintos taros, ženklavimo ir dokumentacijos iki transporto priemonės įrangos, darbuotojų kvalifikacijos, saugos patarėjo paskyrimo ir avarinių situacijų valdymo.**
3. **Maršruto planavimas vandenilio transportui turi būti grindžiamas ne trumpiausio kelio, o leistino ir saugaus koridoriaus logika, įvertinant tunelių apribojimus, savivaldybių nustatytus pavojingų krovinių maršrutus, fizinius kelių tinklo ribojimus (masę, ašių apkrovas, aukštį, plotį) ir realaus laiko eismo informaciją.**
4. **Jeigu vandenilis transportuojamas metanolio ar amoniako forma, išlieka ta pati pavojingų krovinių reguliavimo sistema, tačiau praktiniai saugos reikalavimai reikšmingai skiriasi pagal medžiagos savybes: metanolio transportavime dominuoja degumo ir toksiškumo rizika, o amoniako transportavime – toksiškumo, sandarumo ir slėginės įrangos saugos reikalavimai. Abiem atvejais būtina specializuota cisterninė įranga, ženklavimas, dokumentacija ir cheminės saugos reikalavimus atitinkanti krovos infrastruktūra.**
5. **Geležinkelių transporte RID reikalavimai leidžia vandenilį, metanolį ir amoniaką vežti tik specialiai pavojingiems kroviniams pritaikytais vagonais ar konteineriais-cisternomis, o pakrovimas, iškrovimas ir ilgesnis stovėjimas galimi tik specializuotose teritorijose, todėl geležinkelio logistika iš esmės priklauso nuo tinkamai įrengtų terminalų ir pramoninės infrastruktūros prieinamumo.**
6. **Didžiausia saugos rizika susidaro ne pervežimo metu, o perdavimo tarp transporto priemonės ir stacionarios infrastruktūros etape, todėl kritinę reikšmę turi ESD veikimas, nuotėkio ir temperatūros kontrolė, ATEX sprendiniai, saugūs išleidimo keliai, aiškios manevravimo zonos, operatoriaus kontrolė, dokumentuota eksploatacija ir avariniai planai, orientuoti pirmiausia į greitą nuotėkio izoliavimą ir evakuaciją.**
7. **Praktiniu požiūriu vandenilio transportavimo sistemos įgyvendinamumą lemia ne vien transporto priemonė ar maršrutas, bet visa suderinta saugos, infrastruktūros, terminalų, personalo kompetencijos, aplinkosauginių procedūrų ir operacinės kontrolės sistema, todėl kiekvienas projektas turi būti vertinamas kaip integruota logistikos ir saugos grandinė.**



Šaltinis: Linde

03 | VANDENILIO GAMYBOS POTENCIALAS

VANDENILIO GAMYBOS VIETOMS NETINKAMOS TERITORIJOS

Pritaikyti sluoksniai ir buferinės zonos

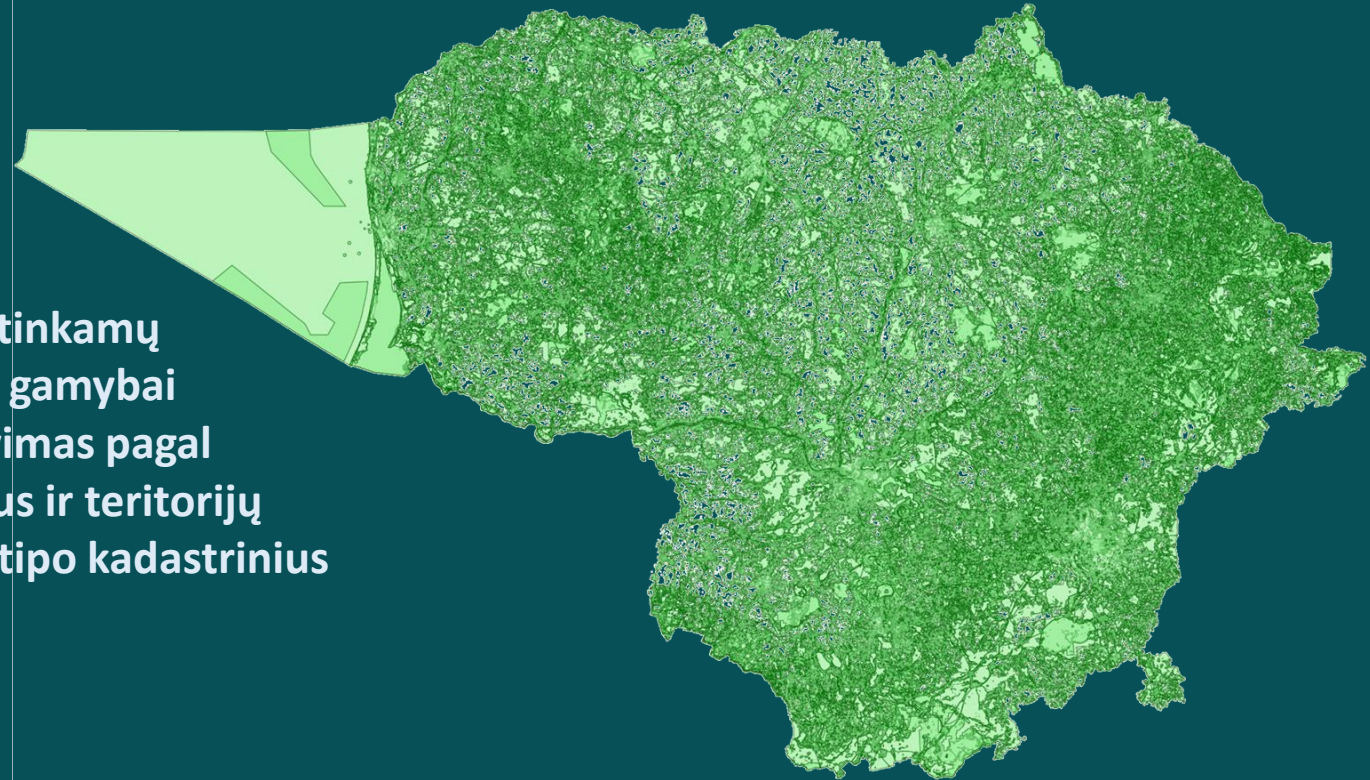
Sluoksnis	Buferis
Keliai	30 m.
Mišakai	30m.
Gamtos saugomi objektai	30 m.
Kultūriniai saugomi objektai	30m.
Pastatai	500 m.
Vandens telkiniai ir upės	30 m.
Kiti objektai	30 m.

01

Teritorijų, tinkamų vandenilio gamybai identifikavimas pagal geografinius ir teritorijų panaudos tipo kadastrinius duomenis

02

Įvertinta teritorijų sąveika su susisiekimo infrastruktūra, elektros tinklų linijomis ir planuojamu H2 dujotiekiu



03

Netinkamos vandenilio gamybai teritorijos eliminuotos iš tolimesnės analizės

LAISVOS TERITORIJOS, TINKAMOS VANDENILIO GAMYBAI

Suskirstyta pagal teritorijų plotą, tinkamą mažiems ir didesniems projektams vystyti

Identifikuoti laisvi žemės plotai, tinkami vandenilio projektų vystymui, kurių dydis leidžia įgyvendinti tiek mažesnį, tiek didesnio masto pramoninę veiklą. Šie plotai sudaro potencialų pagrindą vandenilio infrastruktūros plėtrai skirtinguose regionuose.

Vertinime nebuvo atsižvelgta į esamą žemės naudojimo paskirtį, todėl dalis teritorijų gali būti žemės ūkio ar kitos paskirties. Šių teritorijų panaudojimas galimas tik įvertinus paskirties keitimo galimybes ir susijusius apribojimus.



Iš visų tinkamų teritorijų išskirtos tos, kurios siekia **1 hektaro** plotą ar daugiau, tinkamos **mažos apimties** gamybai. Bendras plotas: **16 209 kv. km.**



Iš visų tinkamų teritorijų išskirtos tos, kurios siekia **5 hektarų** plotą ir daugiau, tinkamos **didelės apimties** gamybai. Bendras plotas: **15 106 kv. km.**

VANDENILIO GAMYBAI IR TRANSPORTAVIMUI SVARBI INFRASTRUKTŪRA

Vandenilio gamybai svarbi prieiga prie elektros tinklų ir vandens išteklių, o transportavimui būtina išvystyta logistinė ir energetinė infrastruktūra. Todėl identifikuojama infrastruktūra, kuri yra esminė efektyviam vandenilio tiekimo grandinės veikimui.

Analizėje įvertinta:

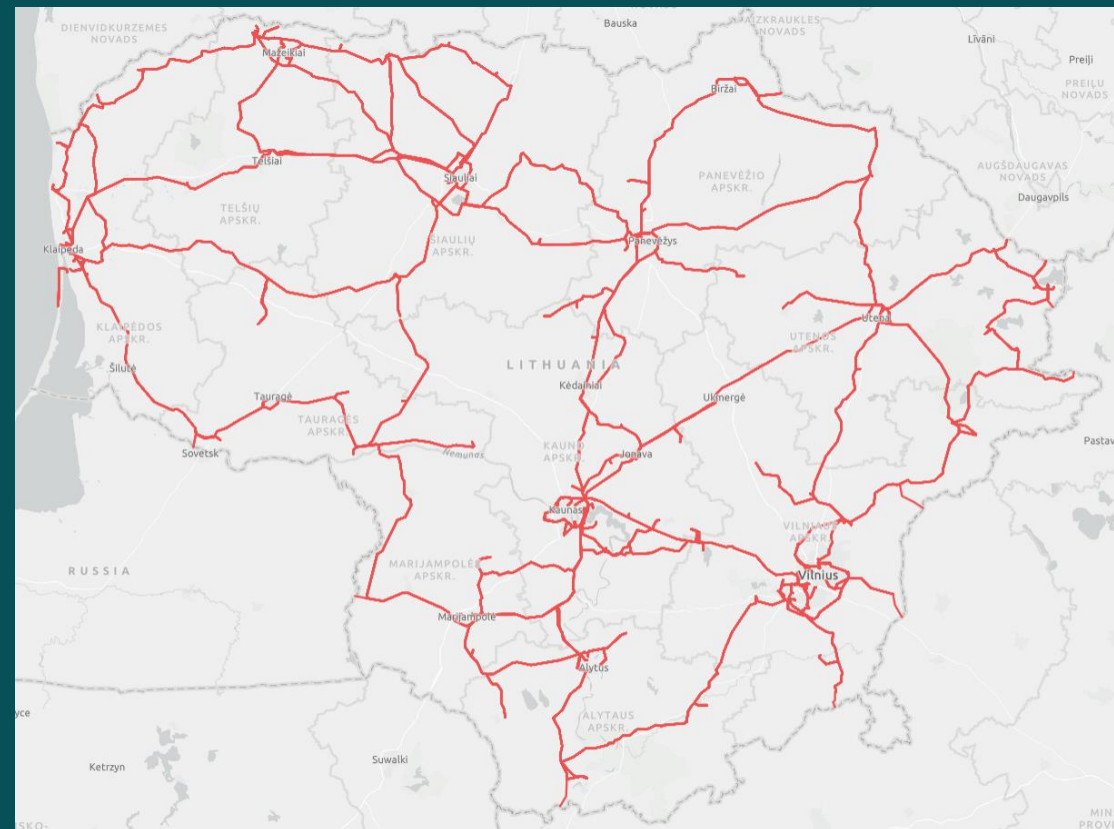
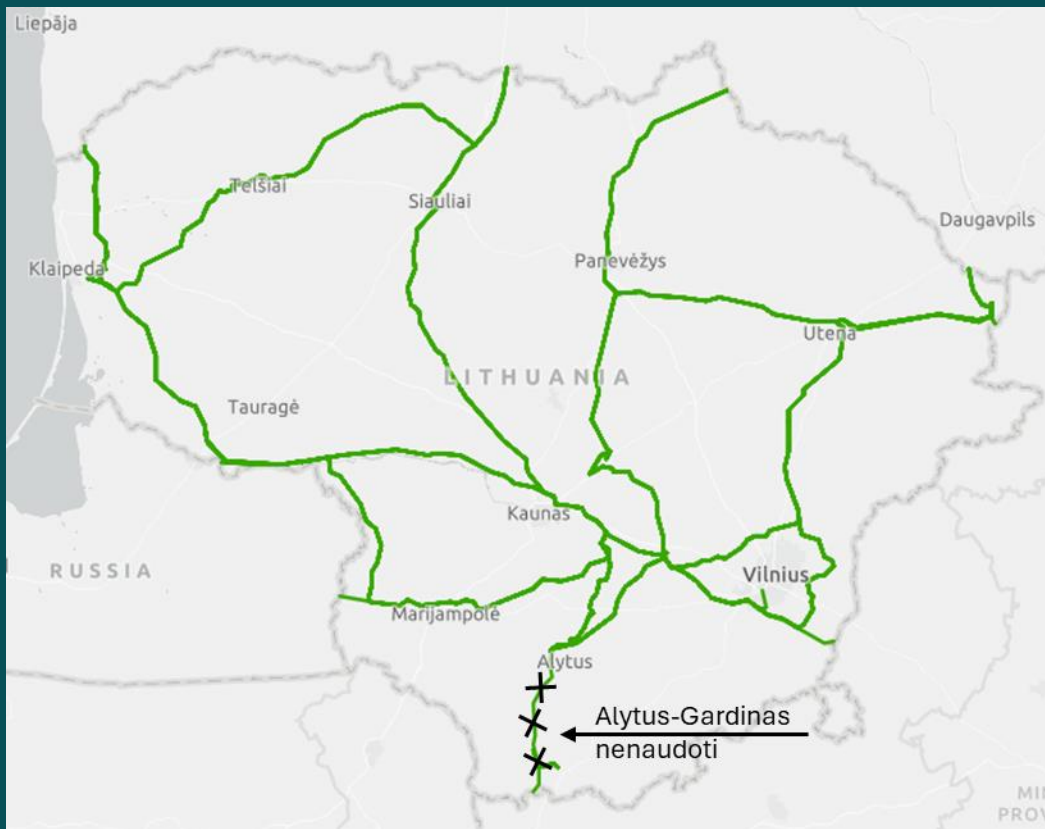
- ✓ Elektros tinklo linijos (110 ir 330 kV)
- ✓ Geležinkelio infrastruktūra
- ✓ Vandenilio planuojamas dujotiekis
- ✓ Kelių infrastruktūra
- ✓ Hidrologija

H2 GAMYBOS VIETOMS TINKAMOS TERITORIJOS PAGAL ELEKTROS TINKLĄ

Teritorijos, atitinkančios kriterijų, ne didesnis kaip 1 km iki
330 kV linijų dideliems projektams

**Pastaba: Alytus-Gardinas linija nenaudojama vandenilio
projektams tinkamų teritorijų identifikavimui**

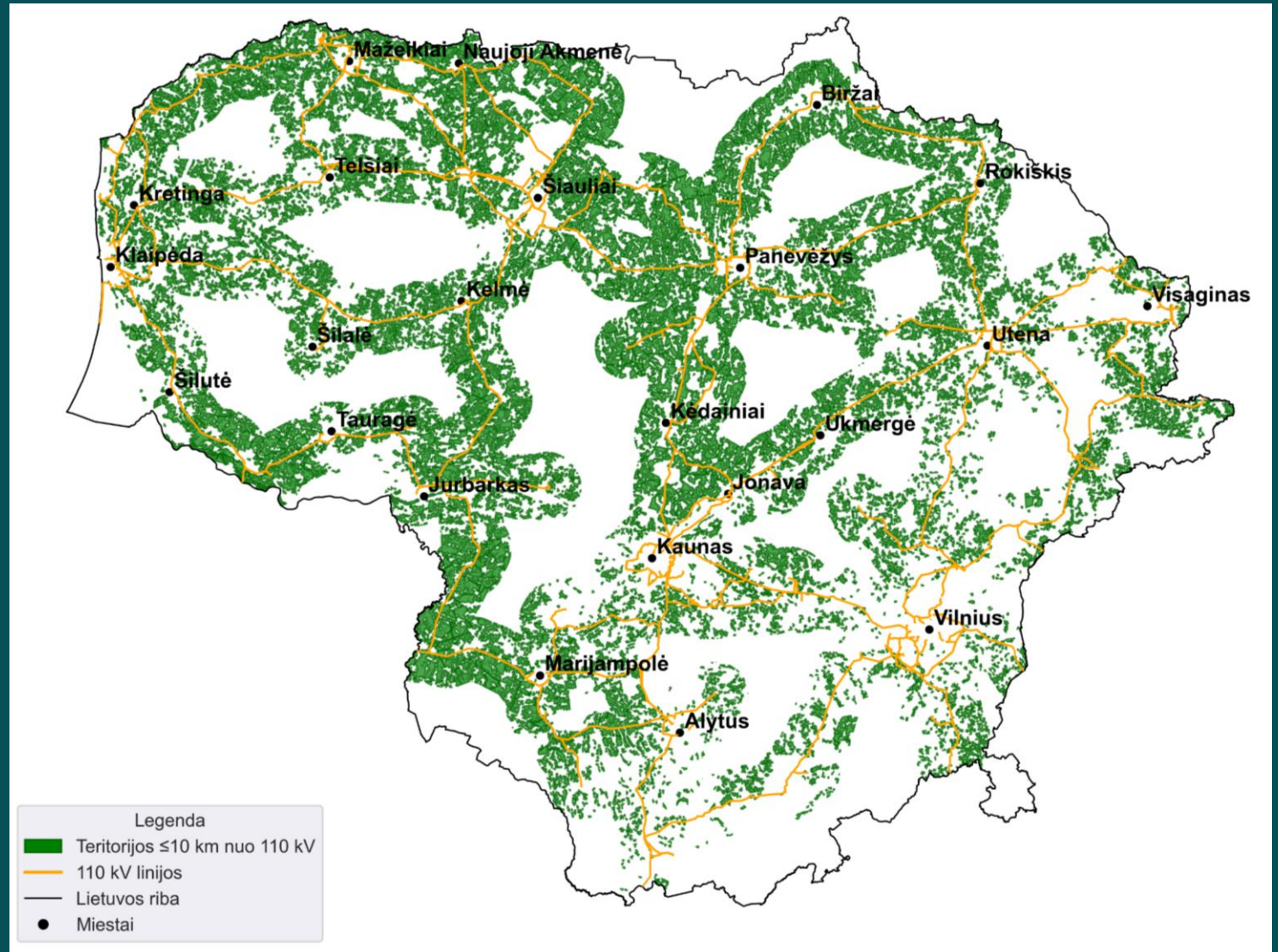
Teritorijos, atitinkančios kriterijų, ne didesnis kaip 10
km iki 110 kV linijų, mažesniems projektams



MAŽOS APIMTIES VANDENILIO GAMYBOS VIETOMS TINKAMOS TERITORIJOS PAGAL ELEKTROS TINKLĄ

Teritorijos, atitinkančios kriterijų – ne didesnis kaip 10 km atstumas iki **110 kV elektros tinklo linijų**, tinkamos mažos apimties vandenilio gamybai.

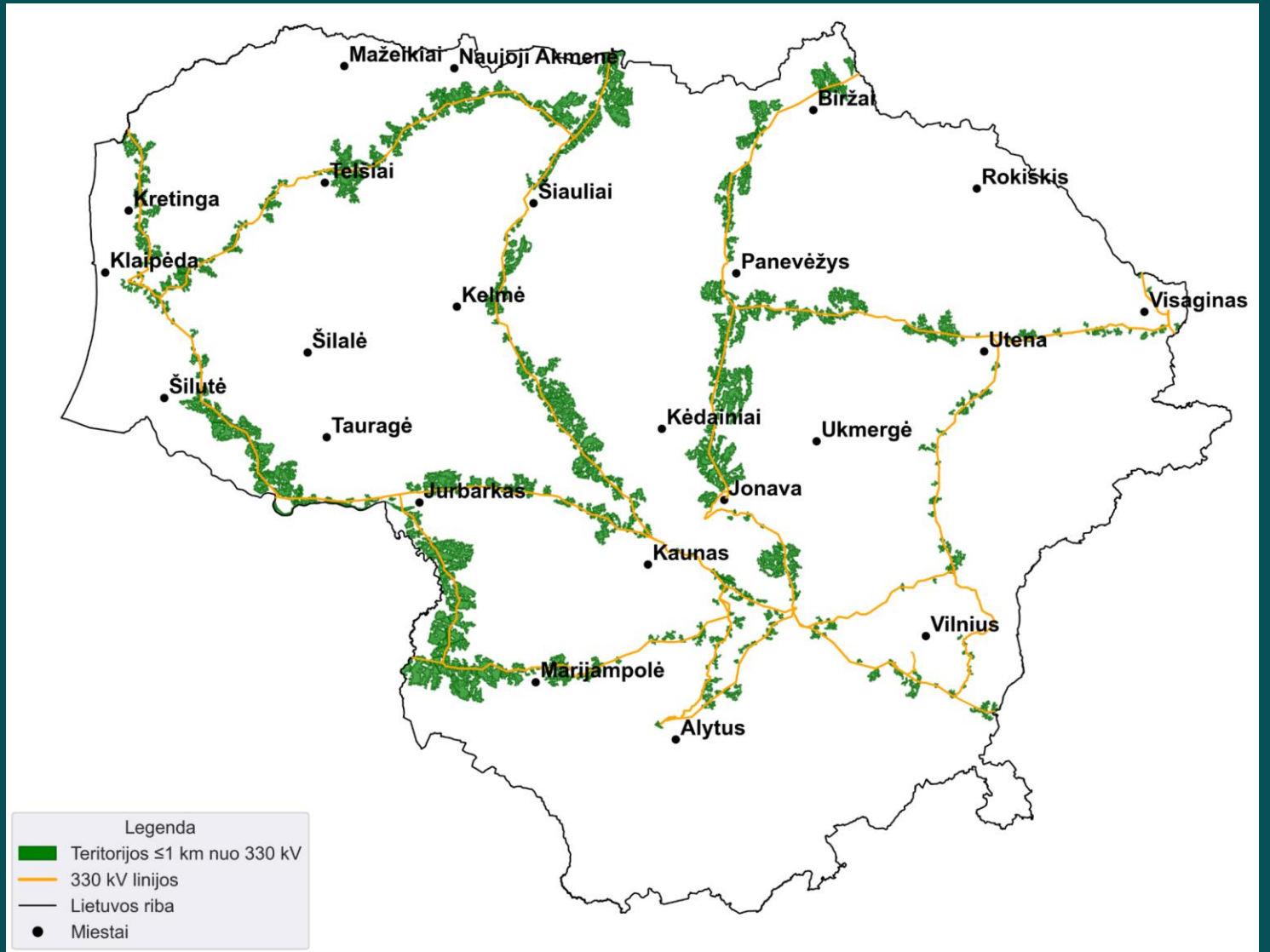
Iš viso tokių teritorijų plotas Lietuvoje siekia **11 651 kv. km**, nevertinant žemės panaudos statuso.



DIDELĖS APIMTIES VANDENILIO GAMYBOS VIETOMS TINKAMOS TERITORIJOS PAGAL ELEKTROS TINKLĄ

Teritorijos, atitinkančios kriterijų – ne didesnis kaip 1 km atstumas iki **330 kV elektros tinklo linijų**, tinkamos didelės apimties vandenilio gamybai.

Iš viso tokių teritorijų plotas Lietuvoje siekia **2 722 kv. km**, nevertinant žemės panaudos statuso.



VANDENILIO ENERGIJOS NEŠIKLIŲ PASIRINKIMAS IR ANALIZĖ

Amoniakas ir metanolis yra svarbūs vandenilio nešikliai, kurie gali būti pasirenkami tiek vandenilio transportavimui, tiek tiesioginiam naudojimui kaip kuras ar žaliava. Amoniakas pasižymi dideliu vandenilio tankiu ir išvystyta infrastruktūra, tačiau yra toksiškas ir reikalauja skaidymo į vandenilį. Metanolis yra lengviau valdomas ir saugesnis logistikoje, bet turi mažesnį vandenilio kiekį ir papildomus konversijos nuostolius.



Metanolis



- **Lengvai saugomas ir transportuojamas** – nereikalauja aukšto slėgio ar kriogenikos.
- **Didelė energijos tankio vertė tūryje** – efektyvus ilgų distancijų transportui.
- **Infrastruktūra** – terminalai, cisternos, tanklaiviai lengvai pritaikomi metanoliumi.
- Technologiškai **paprastas konversijos į H₂ procesas** – reformingas yra brandi technologija.
- **Naudojamas tiesiogiai** laivyboje ir sintetinių degalų gamyboje.



Amoniakas



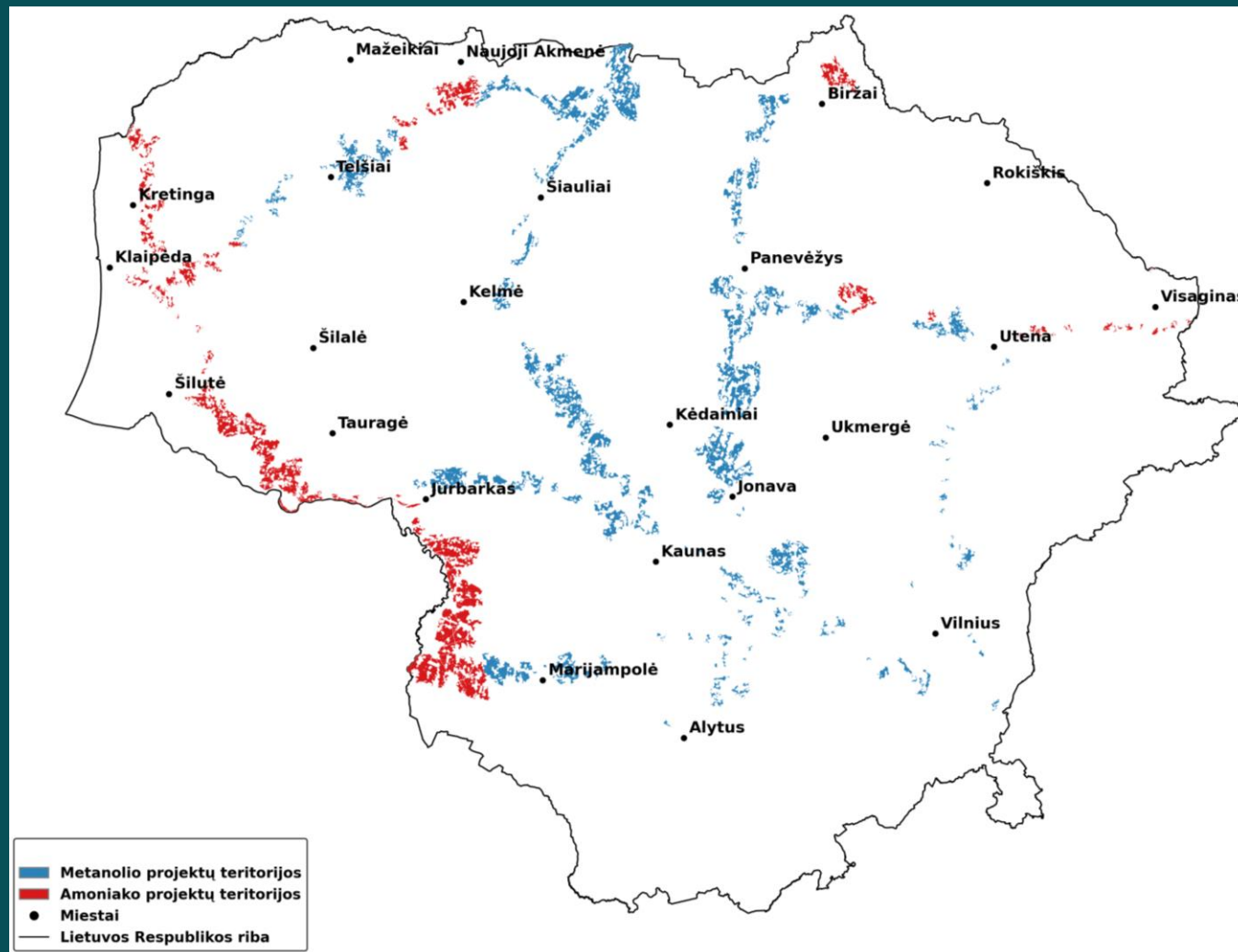
- **Labai didelis vandenilio kiekis tūryje** – 1 kub. m amoniako talpina apie 1.7 karto daugiau H₂ nei suskystintas H₂.
- **Lengvai suskystinamas** prie -33°C ir žymiai **pigesnis saugojimas**.
- **Infrastruktūra** – geležinkeliai, uostai ir terminalai lengvai pritaikomi.
- Gali būti **naudojamas tiesiogiai kaip kuras** (laivyba, turbinos).
- Gerai **integruojama į atsinaujinančios energijos sistemas (Power-to-X)**.

VANDENILIO IŠVESTINIŲ PRODUKTŲ POTENCIALIŲ GAMYBOS VIETŲ NUSTATYMAS

Pagal reikalingą infrastruktūrą, teritorijų panaudojimo galimybes ir CO₂ surinkimo potencialą, sudaryti metanoliui ir amoniakui gaminti tinkamų teritorijų žemėlapis

Teritorijos identifikuotos kaip tinkamos metanolio ir amoniako projektams, diferencijuojant jas pagal CO₂ surinkimo šaltinių artumą – metanolio projektams atrinktos teritorijos, kuriose per 100 km spindulį galima užtikrinti bent 700 kt CO₂ per metus kiekį, o likusios priskirtos amoniako projektams.

Pažymėtina, kad metanolio projektams tinkamos teritorijos taip pat yra tinkamos ir amoniako gamybos vystymui, todėl jų panaudojimas gali būti lankstus, priklausomai nuo technologinių, infrastruktūros ir rinkos sąlygų.





04 | EKONOMINIS VERTINIMAS

PASTABA

Ši analizė yra supaprastinto vertinimo pobūdžio ir pirmiausia skirta preliminariam transportavimo galimybių modeliui bei santykiniam skirtingų alternatyvų konkurencingumui atskleisti. Ji gali nepakankamai įvertinti projektavimo, servitutų, prijungimo mazgų, leidimų, žemės naudojimo, finansinių paskatų, papildomų susitarimų, tinklo ir infrastruktūros atnaujinimo bei kitų fiksuotų projektinių sąnaudų, įskaitant technologijų CAPEX kaitą, reikšmę. Todėl gauti rezultatai turėtų būti vertinami kaip kryptį rodanti analitinė indikacija, o ne kaip galutinis investicinis tarifas ar tiesiogiai taikytinas konkretaus projekto sprendinys. Kiekvienas projektas yra individualus, turi specifinių techninių, teritorinių ir reguliacinių niuansų, todėl realios jo sąlygos gali reikšmingai skirtis nuo šioje apibendrintoje apžvalgoje pateiktos situacijos.

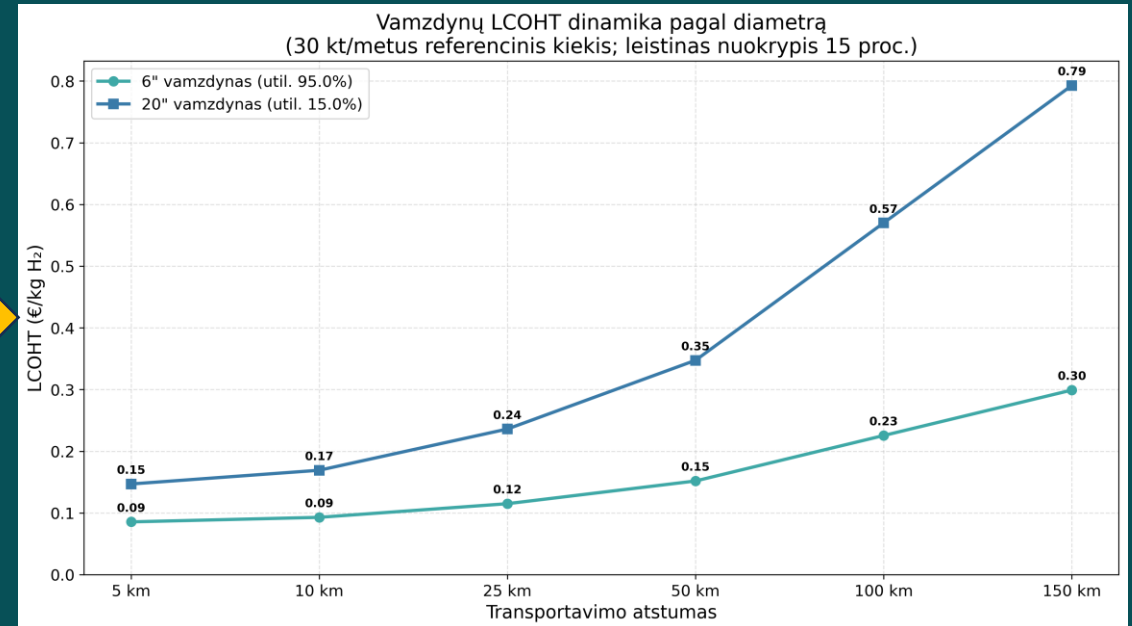
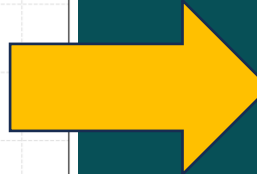
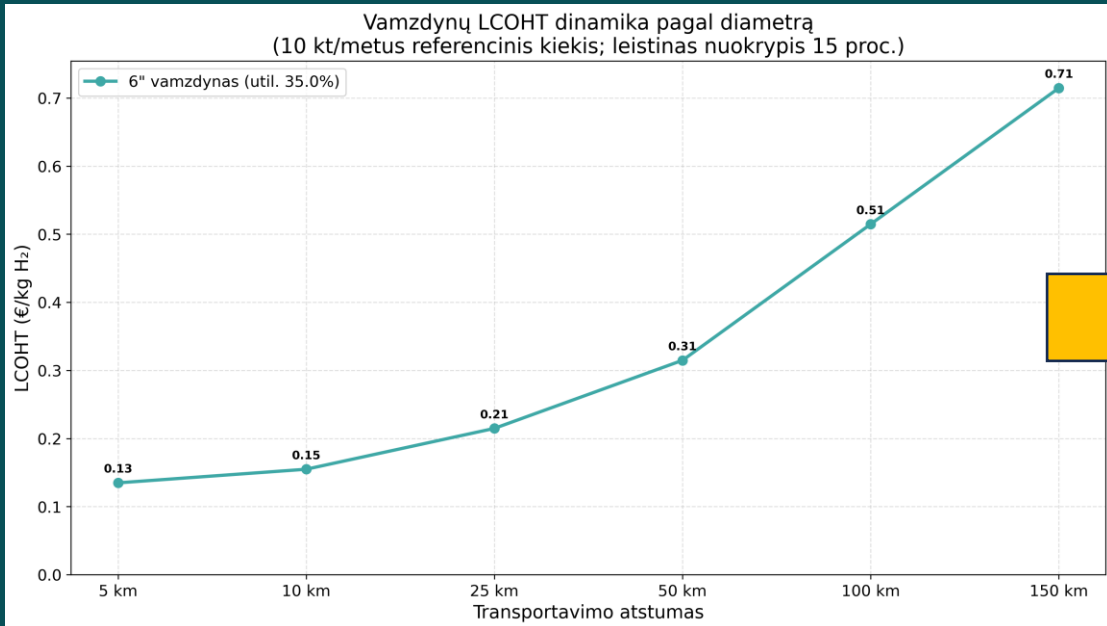
VANDENILIO TRANSPORTAVIMO VAMZDYNAIS MODELIO METODIKA

1. Vertinti trys reprezentatyvūs vamzdynų scenarijai: 6 colių skirstomasis vamzdynas, 20 ir 48 colių perdavimo tinklo vamzdynai, apimantys skirtingus projektinius kiekius ir infrastruktūros mastą.
2. Kiekvienam scenarijui modeliuotas ne tik maksimalus, bet ir dalinis apkrovimas: taikytas 15–95 proc. projektinio paros kiekio panaudojimo lygis, siekiant įvertinti tiek ankstyvos plėtros, tiek brandesnės sistemos veikimą.
3. Metinis pristatytas vandenilio kiekis apskaičiuotas pagal projektinį kiekį ir technologinius nuostolius: metinis transportuojamas kiekis nustatytas iš paros vandenilio kiekio ir panaudojimo koeficiento, o galutiniam rodikliui taikytas 0,3 proc. transportavimo nuostolis.
4. Į bendrus kaštus įtraukti vamzdyno ir kompresorių infrastruktūros komponentai: skaičiuoti vamzdyno CAPEX pagal €/km, kompresorių stočių CAPEX, metiniai kapitalo kaštai, eksploatacija ir priežiūra bei elektros sąnaudos suslėgimui.
5. Suslėgimo logika skiriasi pagal vamzdyno tipą: 6 colių vamzdynui vertintas tik įvadinis suslėgimas, o 20 ir 48 colių perdavimo tinklo vamzdynams papildomai įtrauktas atstumui proporcingas suslėgimo poreikis ir tarpinių kompresorių stočių logika.
6. Perdavimo tinklo vamzdynams atlikta papildoma techninė diagnostika: rankiniu būdu parinktas kompresorių stočių išdėstymas papildomai patikrintas hidrauliniu vertinimu, įvertinant slėgio kritimą ir srauto greitį segmentuose.
7. Galutinis rodiklis apskaičiuotas kaip bendros metinės sąnaudos vienam pristatytam vandenilio kilogramui: taip gautas LCOHT parodo pilną vandenilio transportavimo vamzdynais ekonomiką €/kg pristatyto vandenilio.

VANDENILIO TRANSPORTAVIMAS VAMZDYNAIS

10 kt/metus kiekiui ekonomiškai pagrįstas tik vietinio masto mažo diametro vamzdyno sprendimas, 30 kt/metus – strateginio pasirinkimo riba.

- **10 kt/metus kiekis yra per mažas perdavimo tipo infrastruktūrai**, ekonominiu požiūriui tai yra vietinio prijungimo, o ne perdavimo tinklo lygis. 6 colių vamzdyno kaštai nuo 5 iki 150 km padidėja apie 5,5 karto, todėl didėjant atstumui jo konkurencingumas greitai silpnėja.
- Pereinant prie 30 kt/metus kiekis, 6 colių vamzdyno apkrova padidėja nuo 35 iki 95 proc., o kaštai sumažėja nuo trečdaliao trumpuose atstumuose iki daugiau kaip pusės ilgesniuose ruožuose. Todėl mažo diametro vamzdyno ekonomiką pirmiausia lemia ne pats diametras, o jo apkrovimas: **pilnai apkrautas to paties diametro vamzdynas tampa ženkliai efektyvesnis**.
- **30 kt/metus jau beveik pilnai apkrauna mažo diametro infrastruktūrą**, bet dar nepakanka pilnavertei perdavimo jungčiai.
- Jei 30 kt/metus nėra galutinis gamybos lygis, o tik tarpinė pakopa į 50 kt/metus ar daugiau, 20 colių diametras jau turėtų būti svarstomas kaip strateginė kryptis. Nors trumpuoju laikotarpiu jis dar pralaimi 6 colių vamzdynui dėl nepakankamo apkrovimo, ilgo turto gyvavimo ciklo kontekste svarbu vertinti ne tik dabartinį kaštų minimumą, bet ir būsimos plėtros potencialą, sistemos lankstumą bei riziką.

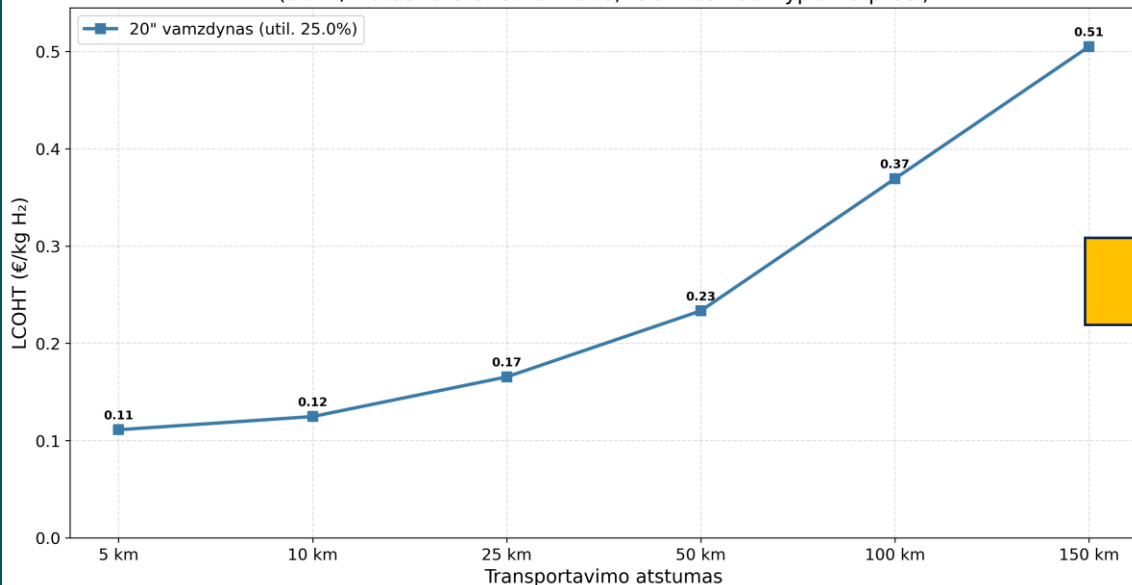


VANDENILIO TRANSPORTAVIMAS VAMZDYNAIS

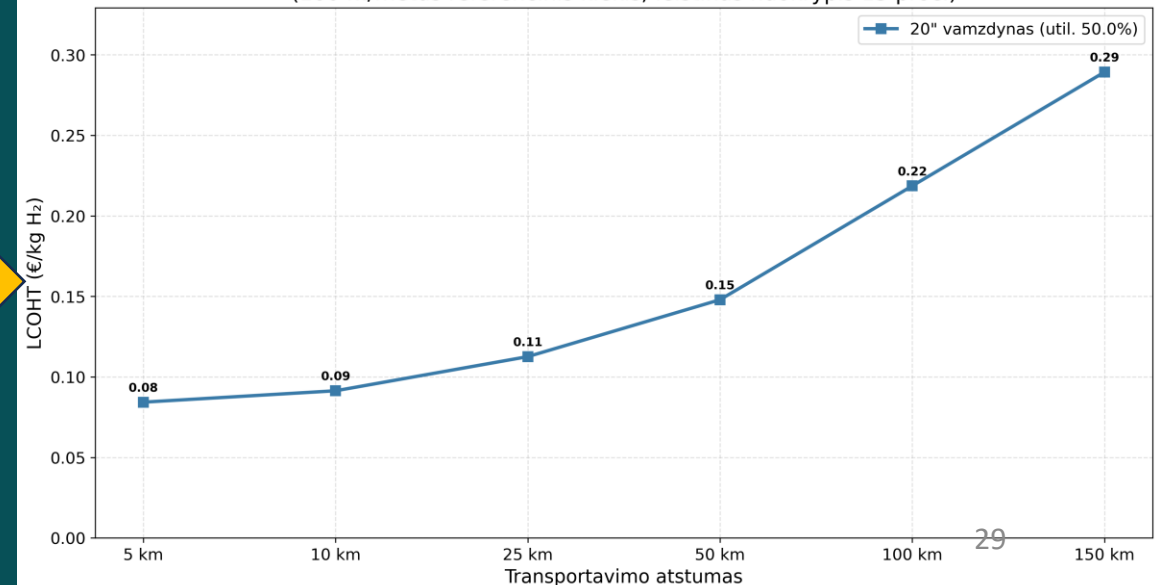
Nuo 50 kt/metus 20 colių vamzdynas tampa ekonomiškai racionalių sprendinių, o ties 100 kt/metus – ekonomiškai stipria perdavimo infrastruktūra.

- 50 kt/metus kiekis yra pakankamas pereiti iš teorinės 20 colių vamzdyno pasirinkimo galimybės į ekonomiškai racionalių ankstyvos perdavimo infrastruktūros sprendinį. Apkrovai padidėjus nuo 15 iki 25 proc., kaštai sumažėja apie 27–35 proc., ypač pagerinant vidutinių ir ilgesnių atstumų ekonomiką.
- 6 colių vamzdynas čia jau nėra pakankamas, o 20 colių tampa natūraliu kitu mastelio žingsniu.
- 100 kt/metus lygyje 20 colių vamzdynas jau tampa ekonomiškai stipriu perdavimo sprendiniu, o ne tik ankstyvos rinkos pasirinkimu. Apkrovai padvigubėjus nuo 25 iki 50 proc., kaštai papildomai sumažėja dar 25–43 proc. priklausomai nuo atstumo.
- Lyginant 50 ir 100 kt/metus, keičiasi ne tik vieneto kaštų lygis, bet ir pati atstumo ekonomika. Ties 50 kt/metus 20 colių kaštai nuo 5 iki 150 km padidėja apie 4,6 karto, o ties 100 kt/metus – apie 3,6 karto. Tai reiškia, kad didesnis kiekis ne tik mažina kaštus, bet ir daro ilgesnius perdavimo atstumus ekonomiškai labiau priimtinus.

Vamzdynų LCOHT dinamika pagal diametrą
(50 kt/metus referencinis kiekis; leistinas nuokrypis 15 proc.)



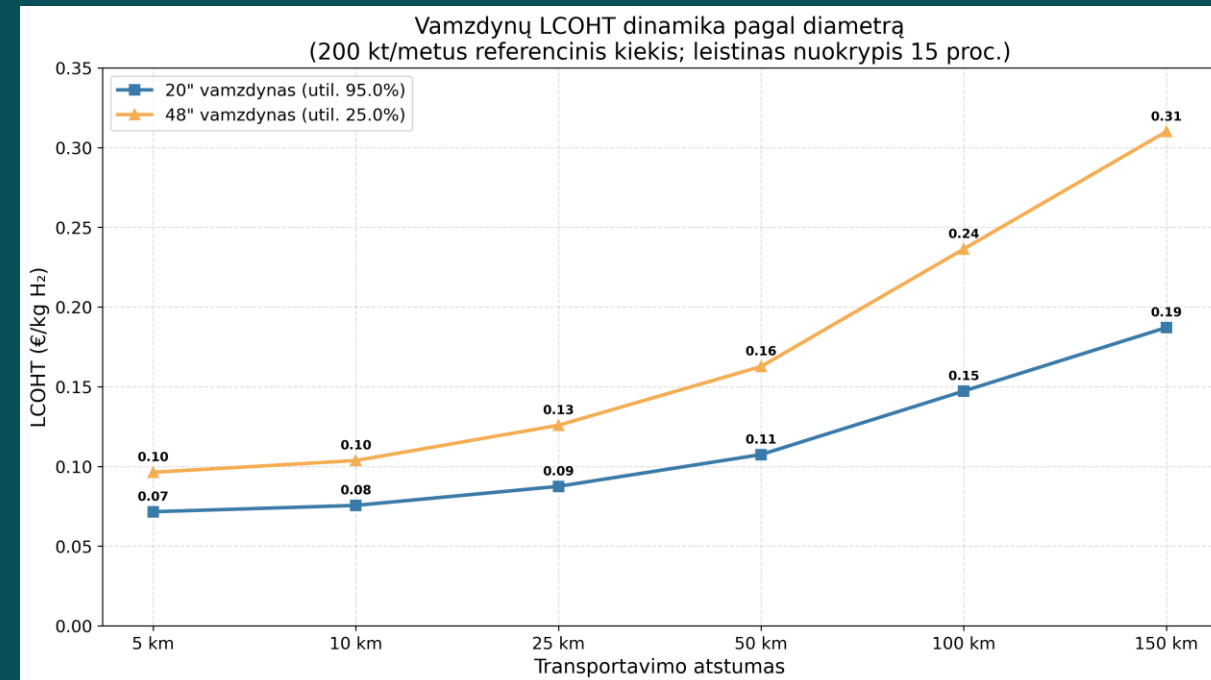
Vamzdynų LCOHT dinamika pagal diametrą
(100 kt/metus referencinis kiekis; leistinas nuokrypis 15 proc.)



VANDENILIO TRANSPORTAVIMAS VAMZDYNAIS

Ties 200 kt/metus 20 colių vamzdynas tampa aiškiu ekonominiu pasirinkimu, o 48 colių dar neatsiperka, tačiau gali būti pasirinktas kaip strateginė ateities galimybė.

- **Padvigubėjęs kiekis nuo 100 iki 200 kt/metus padidina 20 colių vamzdyno ekonominę naudą:** apkrovai padidėjus nuo 50 iki 95 proc., o LCOHT sumažėja maždaug 12–35 proc., didžiausią naudą sukuriant vidutiniuose ir ilgesniuose atstumuose.
- Ties 100 kt/metus 20 colių LCOHT nuo 5 iki 150 km padidėja apie 3,6 karto, o ties 200 kt/metus – apie 2,7 karto. Todėl **didesnis transportuojamas kiekis ne tik mažina kaštus, bet ir daro ilgesnius perdavimo atstumus ekonomiškai pateisinamus.**
- 200 kt/metus dar nėra tas srutas, kuriame 48 colių diametras tampa ekonomiškai naudingesnis už 20 colių. Nors 48 colių siūlo didesnį pralaidumą ir daugiau erdvės ateities plėtrai, prie 25 proc. apkrovos jo kapitalo kaštai vienam kilogramui vis dar per dideli. Todėl **didelis diametras savaime nesukuria ekonominio pranašumo**, jam reikia labai didelio ir stabilaus vandenilio kiekio.
- 48 colių vaidmuo šiame etape yra ne bazinis sprendinys, o strateginė ateities opcija. Jis gali būti svarstomas tik tada, kai tikimasi labai stambių, pastovių gamybos apimčių, kelių didelių *hub'ų* sujungimo arba tarptautinio perdavimo koridoriaus.



Pastaba: Modelyje 20 ir 48 colių vamzdynams taikomi 550 t/d ir 2300 t/d projektiniai paros kiekiai turėtų būti traktuojami kaip bazinės projektinės prielaidos, o ne absoliutūs fiziniai limitai, nes to paties diametro realus pralaidumas priklauso nuo techninės sistemos apibrėžties: nuo kompresorinių stočių išdėstymo ir galios, jėgimo bei išėjimo slėgių režimo, darbinio slėgio ir leistino slėgio kritimo segmente, todėl keičiant šiuos parametrus gali keistis ir to paties diametro vamzdyno panaudojimo lygis.

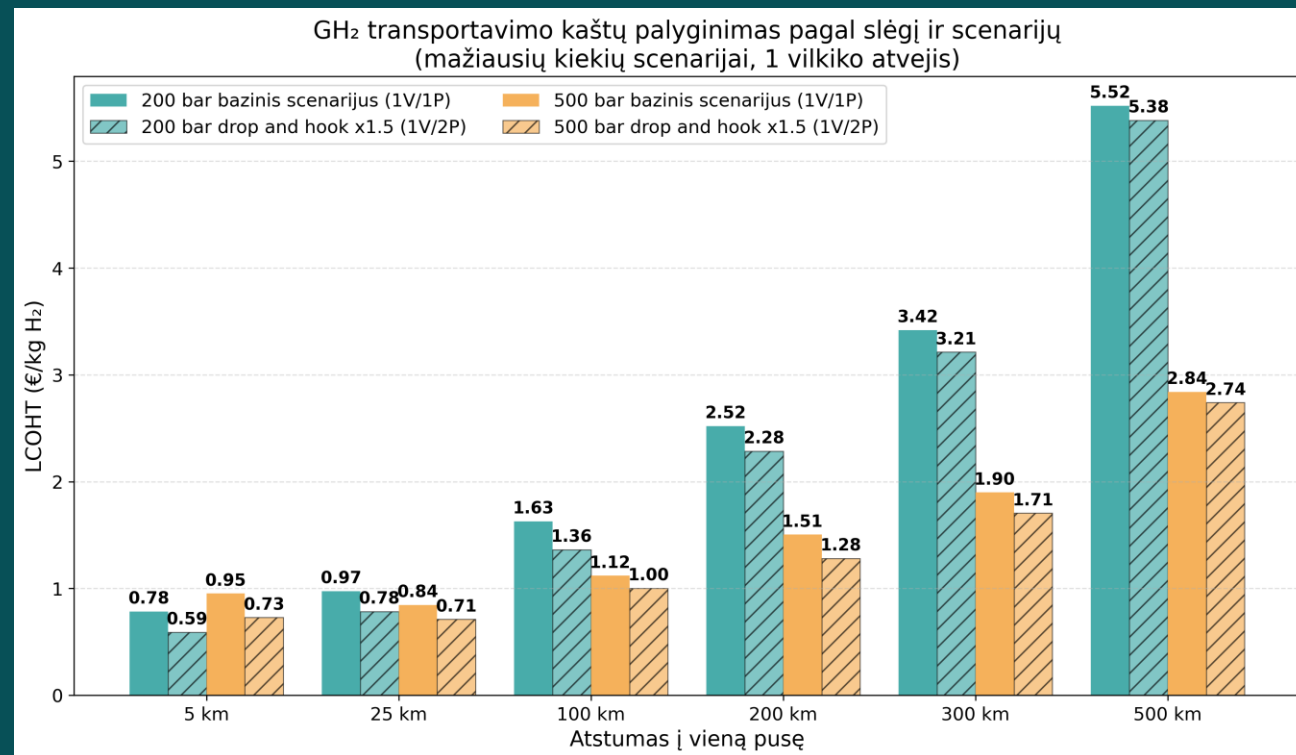
SUSLĖGTO VANDENILIO TRANSPORTAVIMO VILKIKAIS MODELIO METODIKA

1. Vertinti keli scenarijai: atstumas į vieną pusę 1–500 km, 1–10 vilkikų parkai, dvi suslėgto vandenilio technologijos (200 bar/320 kg ir 500 bar/900 kg) bei bazinis (1:1) ir *drop and hook** logistikos scenarijai.
2. Kiekvienam scenarijui apskaičiuotas pilnas transporto ciklas: važiavimo laikas, pakrovimas, iškrovimas, vartų/dokumentų procedūros ir papildomas poilsio laikas, jei vienos krypties kelionės laikas ilgesnis nei 5 valandos.
3. Sistemos pajėgumas nustatytas pagal ribojantį veiksni: vertintas vilkikų, puspriekabių ir pakrovimo vietų pajėgumas, o galutiniams skaičiavimams naudotas teorinis testinis pristatymų skaičius per parą.
4. Metinis pristatytas kiekis apskaičiuotas pagal puspriekabės naudingąją apkrovą, prieinamumą ir nuostolius: 200 bar scenarijui taikyta 320 kg, 500 bar scenarijui – 900 kg naudingoji apkrova, o metiniai kiekiai koreguoti pagal sistemos prieinamumą ir 0,1 proc. nuostolį per ciklą.
5. Į kaštus įtraukti ne tik mobilios technikos, bet ir pakrovimo infrastruktūros komponentai: vilkikų ir puspriekabių CAPEX, priežiūra, degalai, kelių mokesčiai, vairuotojų ir operatorių darbas, taip pat pakrovimo terminalų, kompresorinės įrangos ir jų eksploatacijos kaštai.
6. Galutinis rodiklis apskaičiuotas kaip bendros metinės sąnaudos vienam pristatytam vandenilio kilogramui: papildomai įtrauktos ir elektros sąnaudos vandenilio suslėgimui, todėl rezultatai parodo pilną suslėgto vandenilio transportavimo grandinės ekonomiką €/kg pristatyto H₂.

**Drop and hook* – tai priekabų keitimo scenarijus ir logistikos metodas, kai vilkikas nebelaukia kol priekaba bus pakrauta ar iškrauta, o tiesiog palieka vieną priekabą ir iš karto pasiima kitą, jau pakrautą ir paruoštą transportavimui.

Suslėgto vandenilio transportavimas vamzdinėmis puspriekabėmis yra racionalus sprendimas trumpiems atstumams, kai paklausa dar nedidelė ir svarbu greitai pradėti tiekimą be didelių investicijų.

- **Trumpuose atstumuose 200 bar dar gali būti racionalus**, bet nuo 25 km 500 bar daugumoje scenarijų perima ekonominį pranašumą. Lyginant mažiausių kiekių variantus, 500 bar ties 25 km tampa maždaug 9–13 proc. pigesnis, o ties 100–500 km jo pranašumas išauga iki maždaug 27–49 proc.
- **Pagrindinė priežastis – produktyvumas.** Esant tam pačiam vilkikų skaičiui, 500 bar sistema perveža apie 1,7–2,5 karto daugiau vandenilio baziniame scenarijuje ir apie 1,7–2,7 karto daugiau *drop and hook* scenarijuje, todėl kaštai vienam kilogramui pasiskirsto žymiai efektyviau.
- **Drop and hook nauda yra didžiausia trumpesniuose ir vidutiniuose maršrutuose.** 200 bar atveju LCOHT sumažėja maždaug 16–25 proc. trumpuose ruožuose, bet ilguose maršrutuose efektas sumažėja iki vos kelių procentų, 500 bar atveju efektas panašus – apie 11–24 proc. trumpuose ruožuose ir tik apie 4–10 proc. ilguose.
- **Ankstyvai rinkai ir išskaidytiems vartotojams kelių logistika išlieka lankstus pereinamasis sprendimas**, tačiau 200 bar sistema labiau tinka trumpiems ir mažesnių kiekių maršrutams, o 500 bar tampa racialesniu pasirinkimu, kai reikia aptarnauti didesnę teritoriją spindulį ir pervežti didesnius kiekius toje pačioje logistikos grandinėje.

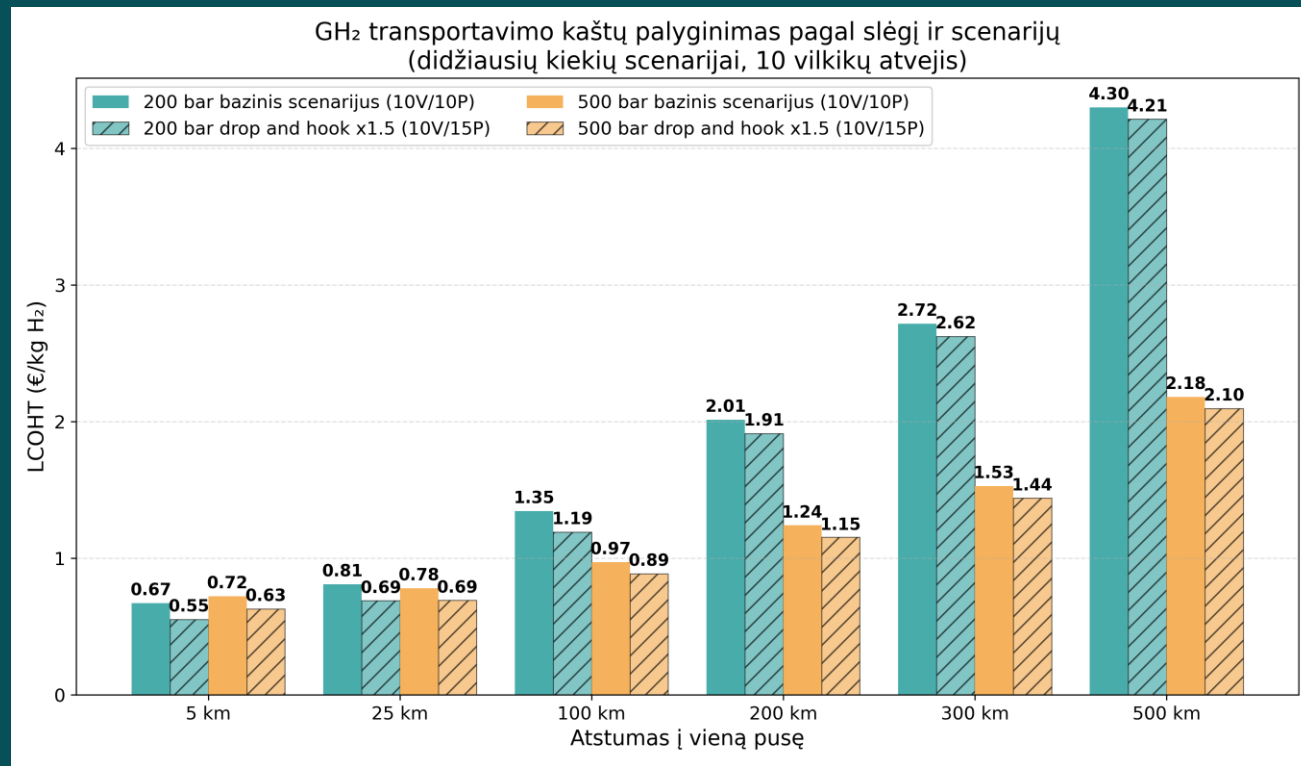


Atstumas	200 bar bazinis 1T/1R	200 bar D&H x1.5 1T/2R	500 bar bazinis 1T/1R	500 bar D&H x1.5 1T/2R
25 km	1 800 kg/d. (0.66 kt/m)	3 380 kg/d. (1.23 kt/m)	3 190 kg/d. (1.16 kt/m)	6 380 kg/d. (2.33 kt/m)
100 km	1 240 kg/d. (0.45 kt/m)	1 840 kg/d. (0.67 kt/m)	2 490 kg/d. (0.91 kt/m)	4 620 kg/d. (1.69 kt/m)
200 km	869 kg/d. (0.32 kt/m)	1 120 kg/d. (0.41 kt/m)	1 900 kg/d. (0.69 kt/m)	2 940 kg/d. (1.07 kt/m)
300 km	667 kg/d. (0.24 kt/m)	808 kg/d. (0.29 kt/m)	1 540 kg/d. (0.56 kt/m)	2 160 kg/d. (0.79 kt/m)
500 km	407 kg/d. (0.15 kt/m)	456 kg/d. (0.17 kt/m)	1 010 kg/d. (0.37 kt/m)	1 250 kg/d. (0.45 kt/m)

SUSLĖGTO VANDENILIO TRANSPORTAVIMAS VILKIKAIS

Didinant vilkikų skaičių ženkliai mažėja LCOHT ir auga pristatomi kiekiai, todėl suslėgto vandenilio logistika tampa tinkama regioniniam tiekimui (100–200 km).

- Padidinus transporto parką, kelių logistika tampa ne tik didesnė, bet ir efektyvesnė – vieneto kaštai sumažėja beveik visais atstumais, tačiau didžiausia nauda matoma 500 bar sistemai. **10 kartų padidinus transporto parką, bazinio scenarijaus LCOHT sumažėja maždaug iki 24 proc.**, o didžiausia nauda dažniausiai pasireiškia vidutiniuose ir ilgesniuose maršrutuose.
- Didėjant parkui, *drop and hook* prasmė keičiasi: jis iš esminio efektyvumo sprendimo tampa papildomu optimizavimo įrankiu.
- Padidinus parką, ekonomiškai svarbiausia zona persikelia iš labai trumpų maršrutų į vidutinius atstumus, kur 500 bar sistema aiškiau išnaudoja savo našumo pranašumą.
- Didesnis parkas 200 bar sistemos atveju sumažina kaštus apie 14–17 proc. ties 5–25 km ir apie 20–22 proc. ties 200–500 km, tuo tarpu 500 bar yra iki 4 proc. pigesnis ties 25 km ir apie 38–40 proc. ties 200 km.
- Net ir padidinus parką, maždaug **200–300 km atkarpoje kelių logistika pradeda prarasti efektyvumą**, todėl dideliems atstumams jau reikia svarstyti vamzdynus arba kitus energijos nešiklius.



Atstumas	200 bar bazinis 10T/10R	200 bar D&H x1.5 10T/15R	500 bar bazinis 10T/10R	500 bar D&H x1.5 10T/15R
25 km	17 970 kg/d. (6.56 kt/m)	26 960 kg/d. (9.84 kt/m)	31 880 kg/d. (11.64 kt/m)	47 820 kg/d. (17.45 kt/m)
100 km	12 440 kg/d. (4.54 kt/m)	18 410 kg/d. (6.72 kt/m)	24 900 kg/d. (9.09 kt/m)	37 350 kg/d. (13.63 kt/m)
200 km	8 690 kg/d. (3.17 kt/m)	11 290 kg/d. (4.10 kt/m)	19 040 kg/d. (6.95 kt/m)	28 560 kg/d. (10.42 kt/m)
300 km	6 670 kg/d. (2.44 kt/m)	8 080 kg/d. (2.95 kt/m)	15 410 kg/d. (5.63 kt/m)	21 590 kg/d. (7.88 kt/m)
500 km	4 070 kg/d. (1.49 kt/m)	4 560 kg/d. (1.66 kt/m)	10 120 kg/d. (3.69 kt/m)	12 450 kg/d. (4.54 kt/m)

SUSKYSTINTO VANDENILIO IR JO PRODUKTŲ TRANSPORTAVIMO VILKIKAIS MODELIO METODIKA

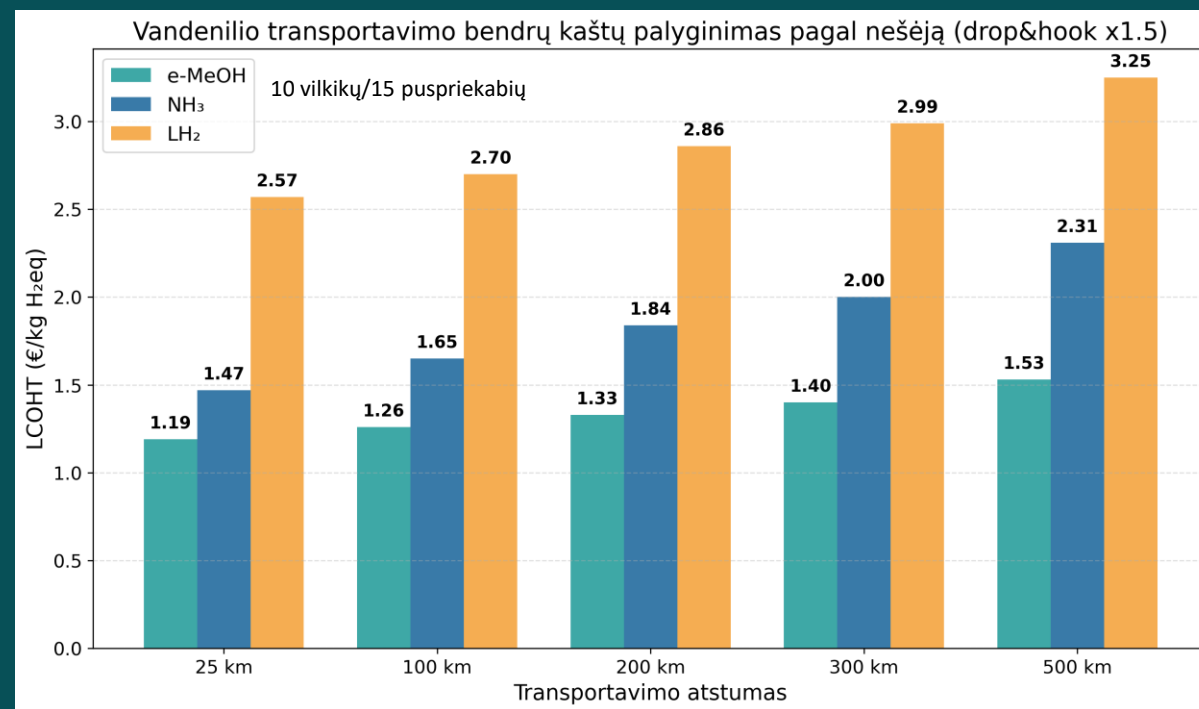
1. Vertinti keli logistiniai scenarijai: atstumas į vieną pusę 1–500 km, 2–10 vilkikų parkai, bazinis ir *drop and hook** scenarijai, kai puspriekabių yra 1,5 arba 2 kartus daugiau nei vilkikų.
2. Kiekvienam scenarijui apskaičiuotas pilnas transporto ciklas: važiavimo laikas, pakrovimas, iškrovimas, vartų / dokumentų procedūros ir papildomas poilsio laikas, jei vienos krypties kelionė viršija 5 valandas.
3. Sistemos pajėgumas nustatytas pagal ribojantį veiksni: vertintas vilkikų, puspriekabių ir pakrovimo vietų pajėgumas, o galutiniams skaičiavimams naudotas teorinis tęstinis pristatymų skaičius per parą.
4. Metinis pristatomas kiekis apskaičiuotas įvertinant techninius ir operacinius nuostolius: naudingoji puspriekabės apkrova, mobilios technikos ir terminalo prieinamumas, taip pat produkto nuostoliai transportavimo grandinėje.
5. Į bendrus kaštus įtraukti ne tik transportavimo, bet ir paruošimo grandinės kaštai: mobilios technikos kapitalinės investicijos ir priežiūra, degalai, kelių mokesčiai, darbo kaštai, o papildomai – vandenilio skystinimas ir buferinis saugojimas arba metanolio / amoniako sintezė, elektros sąnaudos, CO₂ ir laikinas saugojimas.
6. Rezultatai suvienodinti palyginimui: suskystinto vandenilio atveju skaičiuota €/kg pristatyto vandenilio, o metanolio ir amoniako atveju – €/kg pristatyto vandenilio ekvivalento, todėl galima tiesiogiai palyginti skirtingų energijos nešiklių santykinį konkurencingumą.

**Drop and hook* (liet. palik ir paimk) – tai priekabų keitimo scenarijus ir logistikos metodas, kai vilkikas nebelaukia, kol priekaba bus pakrauta ar iškrauta, o palieka vieną priekabą ir iš karto pasiima kitą.

SUSKYSTINTO VANDENILIO IR JO IŠVESTINIŲ PRODUKTŲ TRANSPORTAVIMAS CISTERNOMIS

Cheminiai nešikliai leidžia pervežti didesnį vandenilio ekvivalentą, tačiau pagal bendrus kaštus vienam kilogramui sąlyginai išlieka mažiau konkurencingi nei 500 barų suslėgto vandenilio transportavimas.

- **Didžiausias kelių transporto cisternomis pranašumas yra kiekio tankis**, o ne minimalūs kaštai. Palyginus su 500 bar sistema cheminiai nešikliai ir suskystintas vandenilis su toko paties dydžio transporto parku gali transportuoti maždaug 5–13 kartų daugiau vandenilio ekvivalento.
- **Kiekio pranašumas neatsveria bendro kaštų skirtumo.** Transportavimas cisternomis išlieka maždaug 0,7–3,5 kartus brangesnis. Todėl šiame modelyje cheminiai nešikliai išsprendžia kiekio ir logistikos tankio, o metanolio atveju tolimesniuose atstumuose potencialiai ir vieneto kaštų iššūkius.
- Šiame scenarijuje **metanolis visame 25–500 km atkarpoje išlieka pigiausias**, jo LCOHT yra maždaug 23–34 proc. mažesnis už amoniako ir apie 53–54 proc. mažesnis už suskystinto vandenilio. Tačiau **suskystinto vandenilio transportavimas yra mažiausiai jautrus atstumui**: nuo 25 iki 500 km jo LCOHT padidėja tik apie 23 proc., tuo metu metanolio – apie 27 proc., o amoniako – apie 48 proc.
- **Didinant puspriekabių skaičių, pervežamas vandenilio kiekis jo ekvivalentu trumpuose ir vidutiniuose atstumuose padidėja maždaug 15–50 proc.**, bet bendras LCOHT sumažėja tik apie 1–6 proc. Todėl *drop and hook* pirmiausia didina fizinį pralaidumą, o ne iš esmės keičia kaštų ekonomiką.

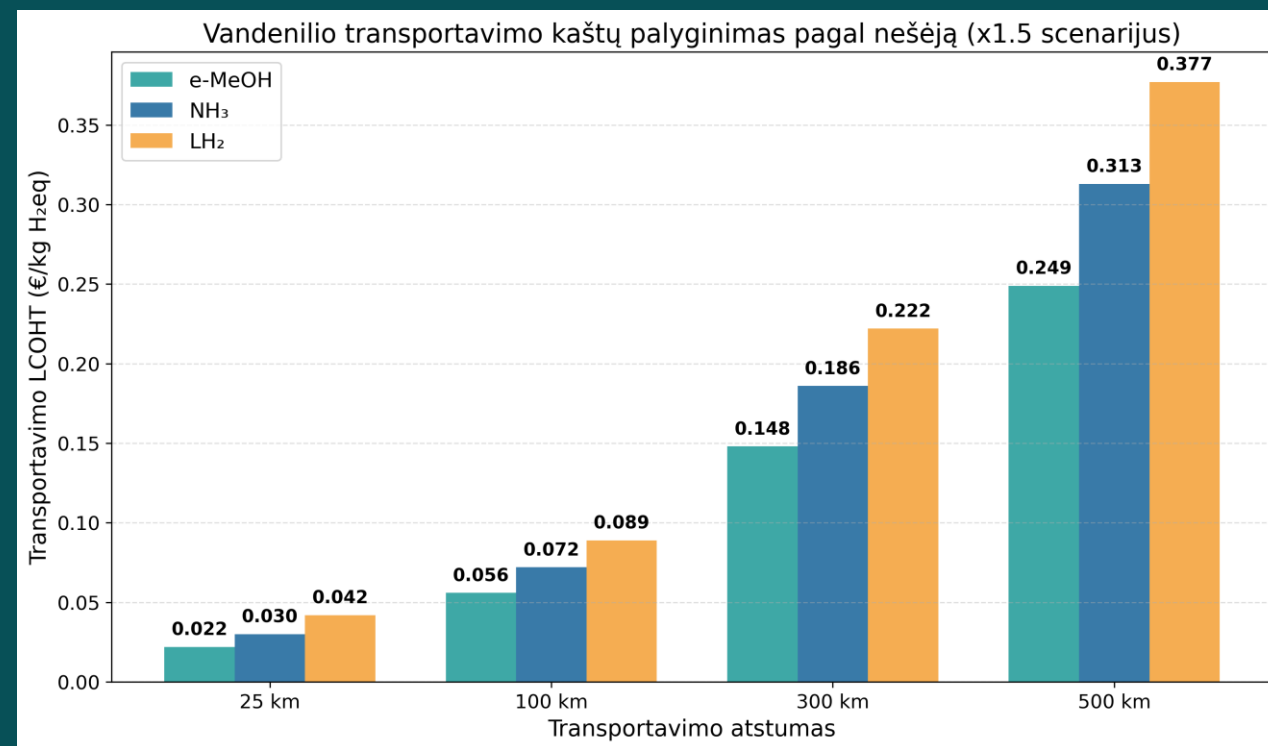


	25 km	100 km	200 km	300 km	500 km
MeOH	1013kt	528kt	316kt	225kt	126kt
NH ₃	802kt	445kt	271kt	195kt	110kt
LH ₂	150kt	90kt	55kt	40kt	22kt

SUSKYSTINTO VANDENILIO IR JO IŠVESTINIŲ PRODUKTŲ TRANSPORTAVIMAS CISTERNOMIS

Transportavimo dedamoji sudaro mažiau nei 10 proc. viso LCOHT ir vien tik kelių logistikos tobulinimas negali pakeisti nešiklių bendro konkurencingumo. Todėl nešiklio pasirinkimas turi būti grindžiamas visos tiekimo grandinės vertinimu.

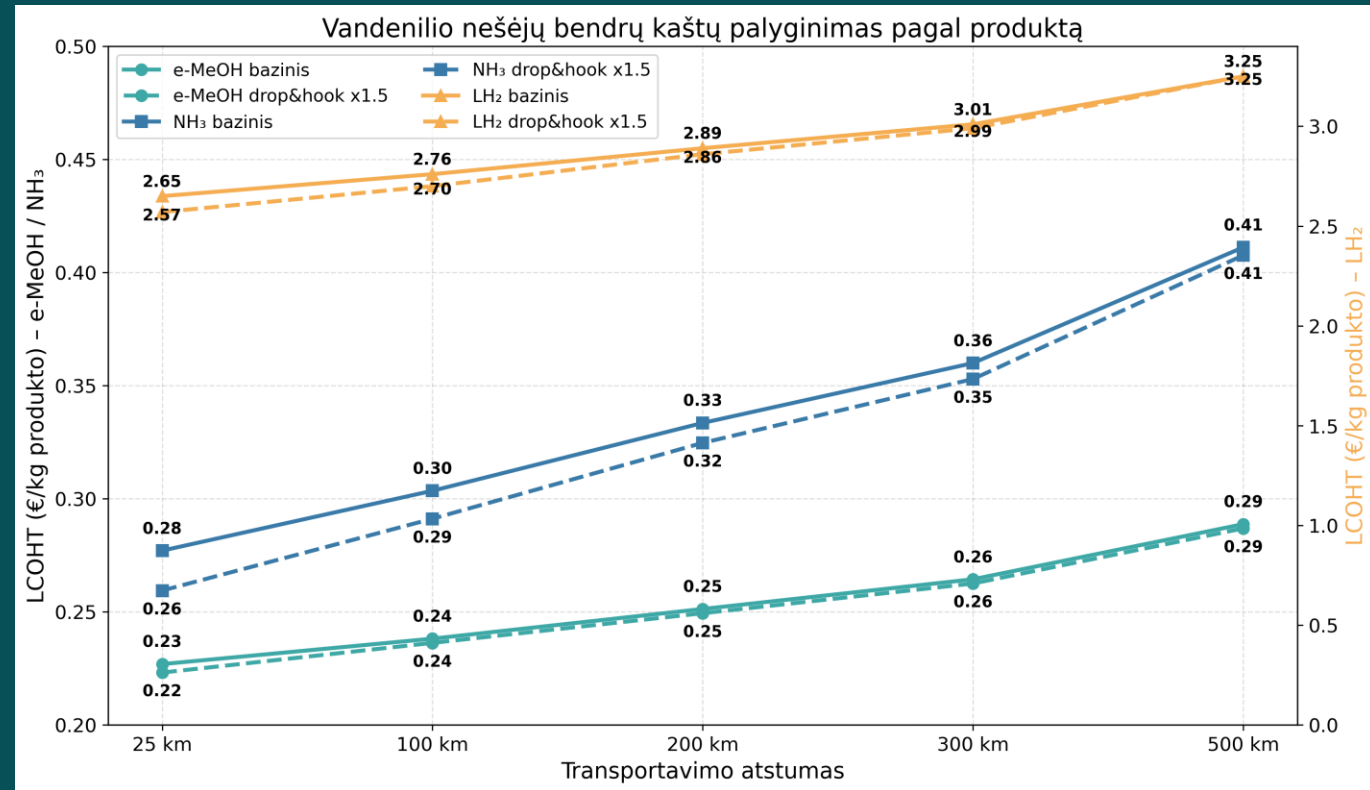
- **Transportavimo dalis bendrame kaštų krepšelyje išlieka maža net ilguose maršrutuose.** Ties 25 km ji sudaro tik apie 2,0 proc. bendrų kaštų, o ties 500 km apie 12–16 proc. Tai reiškia, kad transportas šiame scenarijuje nėra pagrindinis aukštų kaštų veiksnys, nors didėjant atstumui jo svoris bendrame kaštų krepšelyje aiškiai auga.
- Vertinant tik transporto dedamąją, **nešiklių eiliškumas nesikeičia visame atstumų intervale:** mažiausius transportavimo kaštus turi metanolis, po jo seka amoniakas, didžiausią – suskystintas vandenilis. Ties 25 km amoniako transportavimas yra apie 36 proc. brangesnis už metanolį, o suskystinto vandenilio – apie 91 proc. Ties 500 km šie skirtumai sumažėja atitinkamai iki 26 ir 51 proc.
- **Transportavimo kaštai su atstumu auga visų nešiklių atveju, bet ne vienodai.** Nuo 25 iki 500 km transporto dedamoji padidėja maždaug 11,3 kartų metanoliiui, 10,4 kartų amoniakui ir 9,0 kartus suskystintam vandeniliui.
- **Transporto dalyje amoniakas visada yra pigesnis už suskystintą vandenilį, ir bendruose kaštuose ši tvarka taip pat nesikeičia.** Ties 200 km suskystinto vandenilio bendras LCOHT yra apie 55 proc. didesnis už amoniako, o ties 500 km – apie 41 proc. didesnis.



SUSKYSTINTO VANDENILIO IR JO IŠVESTINIŲ PRODUKTŲ TRANSPORTAVIMAS CISTERNOMIS

Vertinant kaštus pagal galutinio produkto kilogramą, metanolio ir amoniako transportavimas tampa žymiai konkurencingesniais ir ekonomiškai racionalių pasirinkimu.

- Pereinant nuo kaštų už kilogramą vandenilio ekvivalento prie kaštų už kilogramą produkto, **metanolio kaštai sumažėja maždaug 81 proc.**, o amoniako – apie 82 proc. visame atstumų intervale.
- **Suskystintas vandenilis pagal kilogramą produkto tampa brangiausiu variantu:** ties 25 km transportavimo atstumu jis yra apie 11–12 kartų brangesnis už metanolį.
- Pagal kilogramą produkto amoniakas išlieka brangesnis už metanolį: maždaug 18–22 proc. – ties 25 km ir apie 41 proc. – ties 500 km transportavimo atstumu.
- **Amoniako transportavimo kaštai išlieka jautriausi atstumo didėjimui,** suskystinto vandenilio – mažiausiai jautrūs: nuo 25 iki 500 km amoniako kaštai padidėja apie 46 proc., metanolio – apie 26 proc., o suskystinto vandenilio – apie 23 proc.
- **Papildomų puspriekabių scenarijus abiejose scenarijuose duoda labai panašų efektą:** metanoliumi apie 1–4 proc., amoniakui apie 1–6 proc., suskystintam vandeniliui apie 0–3 proc.
- Jei tikslas yra tiekti patį galutinį produktą logiška naudoti eurus už kilogramą produkto.



AMONIAKO IR METANOLIO TRANSPORTAVIMO GELEŽINKELIU METODIKA

1. Vertinti keli geležinkelio scenarijai: atstumas į vieną pusę 1–500 km, keli savaitiniai transportuojami kiekiai ir galimas siuntų dažnis nuo 1 iki 14 kartų per savaitę.
2. Kiekvienam scenarijui apskaičiuotas pilnas geležinkelio ciklas: važiavimas pirmyn–atgal, pakrovimas, iškrovimas ir terminalo prastovos abiejuose kelionės galuose, taip nustatant vienos siuntos ciklo trukmę.
3. Modelis automatiškai parenka ekonomiškai palankiausią reisų dažnį: pagal atstumą ir savaitinį transportuojamą kiekį nustatomas optimalus siuntų dažnis, siuntos dydis, reikalingas vagonų skaičius ir saugojimo poreikis.
4. Metinis pristatomas kiekis apskaičiuotas įvertinant naudingą vagono apkrovą ir grandinės nuostolius: savaitiniai transportuojami kiekiai perskaiciuojami į išsiunčiamą ir faktiškai pristatytą kiekį po terminalo bei transportavimo nuostolių.
5. Transportavimo kaštus sudaro geležinkelio tarifas ir vagonų nuoma: taikytas LTG Cargo tarifas* pagal atstumą su cisterninių krovinių koeficientu, papildomai įtraukiant metines vagonų nuomos sąnaudas.
6. Į pilną LCOHT įtraukti ir konversijos bei saugojimo kaštai: sintezės CAPEX, elektros sąnaudos, laikino saugojimo infrastruktūra ir, metanolio atveju, papildomai CO₂ sąnaudos. Galutiniai rezultatai pateikti €/kg pristatyto H₂ ekvivalento forma.

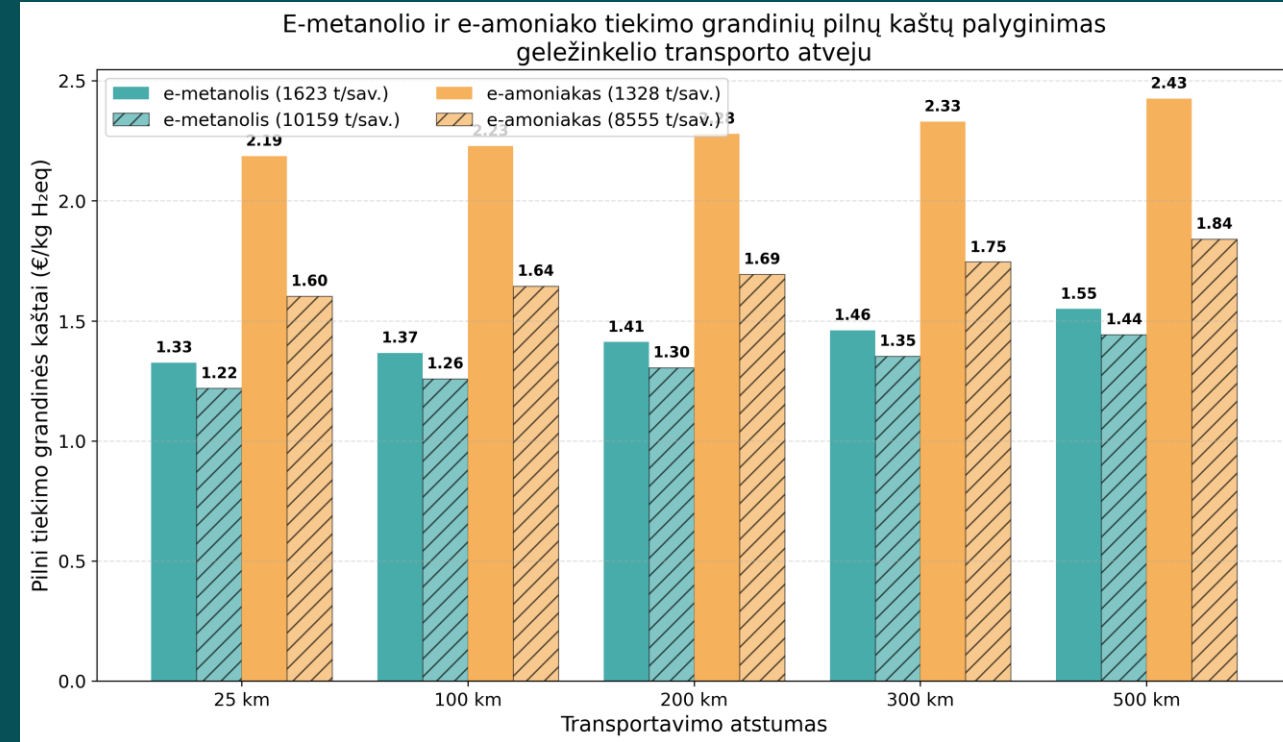
*LTG CARGO KROVINIŲ VEŽIMO TARIFŲ KNYGA 2025:

<https://doc.ltgcargo.lt/lt/dokumentai/kainodara/Tarifu%20knyga%20TKT-LTG%20Cargo%202025.pdf>

VANDENILIO IR JO IŠVESTINIŲ PRODUKTŲ TRANSPORTAVIMAS GELEŽINKELIU

Geležinkelis tampa ekonomiškai stiprus vežant ne trumpu atstumu, o kai kartu tenkinamos dvi sąlygos: didelės ir pastovios gamybos apimtys bei pakankamai ilgas transportavimo koridorius.

- **Atstumo poveikis geležinkeliui yra mažesnis negu cisternų logistikai.** Didelio kiekio geležinkelio scenarijuje metanolio kaštai nuo 25 iki 500 km padidėja apie 18 proc., o amoniako – apie 15 proc., kai cisternų logistikoje su papildomomis puspriekabėmis metanolio kaštai padidėja apie 29 proc., o amoniako – apie 57 proc.
- **Geležinkelio ekonomika pirmiausia priklauso ne nuo atstumo, o nuo apkrovimo:** padidinus savaitinį metanolio ir amoniako kiekį maždaug 6,4 karto, pilni tiekimo grandinės kaštai sumažėja maždaug 8 proc. metanoliumi ir iki 27 proc. amoniakui visame atstumų intervale.
- Mažesnių kiekių scenarijuje amoniako pilni kaštai yra apie 57–65 proc. didesni už metanolio, o prie didesnių kiekių skirtumas sumažėja iki 28–31 proc. Todėl didesnis mastas amoniako konkurencingumą ženkliai gerina, bet konkurencinio eiliškumo nepakeičia.
- **Esant mažesniems kiekiams, geležinkelis išlieka brangesnis už cisternas:** metanolio atveju maždaug 1–12 proc., amoniako apie 5–49 proc. Tačiau didelių kiekių scenarijuje tai pasikeičia: metanolio atveju ties 25 km geležinkelis dar yra apie 3 proc. brangesnis, bet ties 500 km jau apie 6 proc. pigesnis. Amoniako atveju situacija keičiasi ryškiau: ties 25 km geležinkelis dar yra apie 9 proc. brangesnis, ties 100 km praktiškai pasiekia lygybę, nuo 200 km tampa apie 8 proc. pigesnis, o ties 500 km – apie 20 proc. pigesnis už cisternų logistiką.

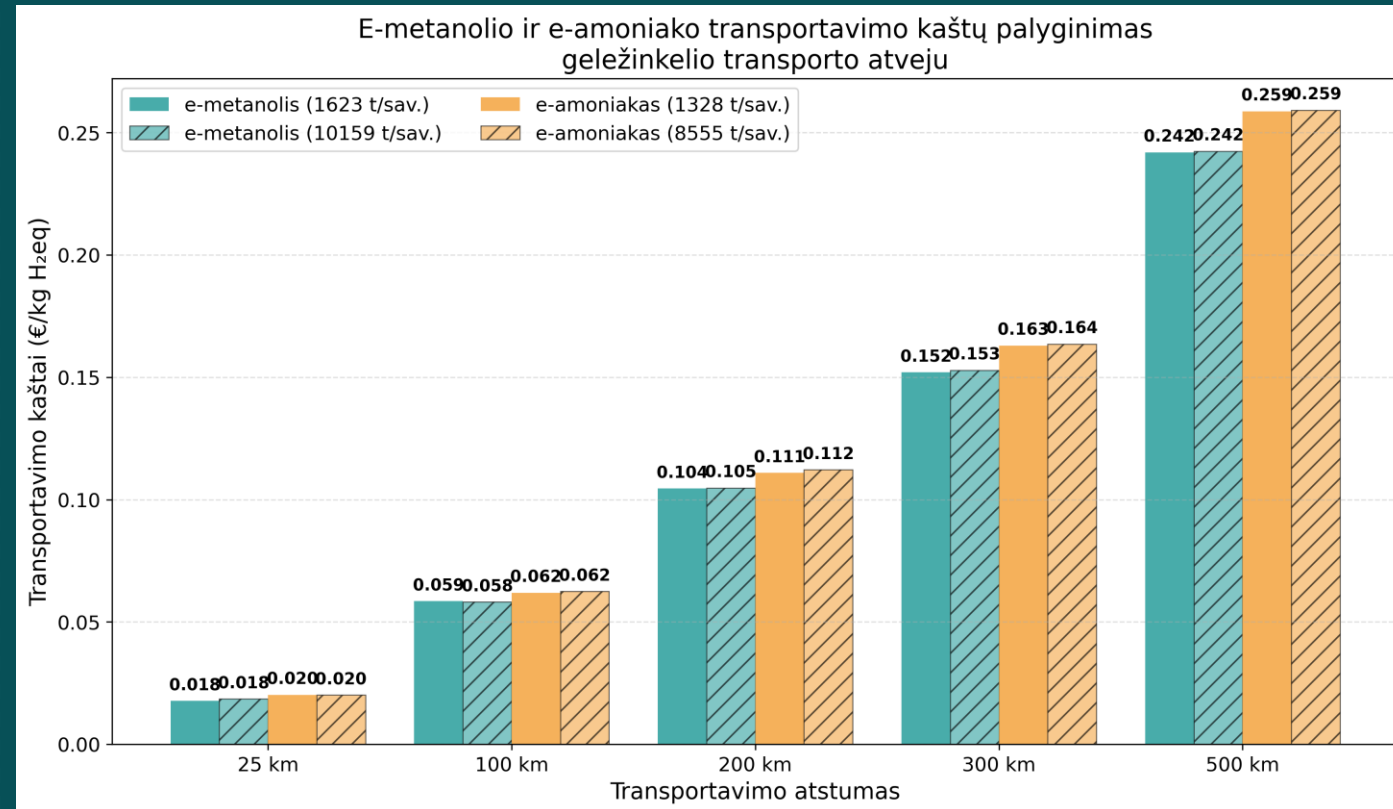


Geležinkelis tampa racionaliu pasirinkimu tada, kai vežami dideli ir pakankamai stabilūs metanolio arba amoniako kiekiai, yra reali geležinkelio prieiga, o atstumas jau pereina į vidutinį ar ilgesnį nuotolį. Metanolio atveju geležinkelis didelių kiekių scenarijuje gali tapti konkurencingas maždaug nuo 100–200 km, o amoniako atveju jo pranašumas ilgėjant atstumui išryškėja dar aiškiau. Trumpiems atstumams, mažesniems kiekiams ir ankstyvos rinkos sąlygoms racialesnis išlieka cisterninis kelių transportas, nes jis lankstesnis, mažiau jautrus apkrovimo lygiui ir nereikalauja tokios koncentruotos paklausos, kad atsipirktų geležinkelio grandinės kaštai.

VANDENILIO IR JO IŠVESTINIŲ PRODUKTŲ TRANSPORTAVIMAS GELEŽINKELIU

Geležinkelio transportavimo dedamoji bendrame kaštų krepšelyje yra maža, skirtumai tarp cheminių medžiagų nedideli, o kiekio didinimas beveik nekeičia kaštų rodiklio. Bendrą ekonomiką lemia ne pats pervežimas, o likusi tiekimo grandinė.

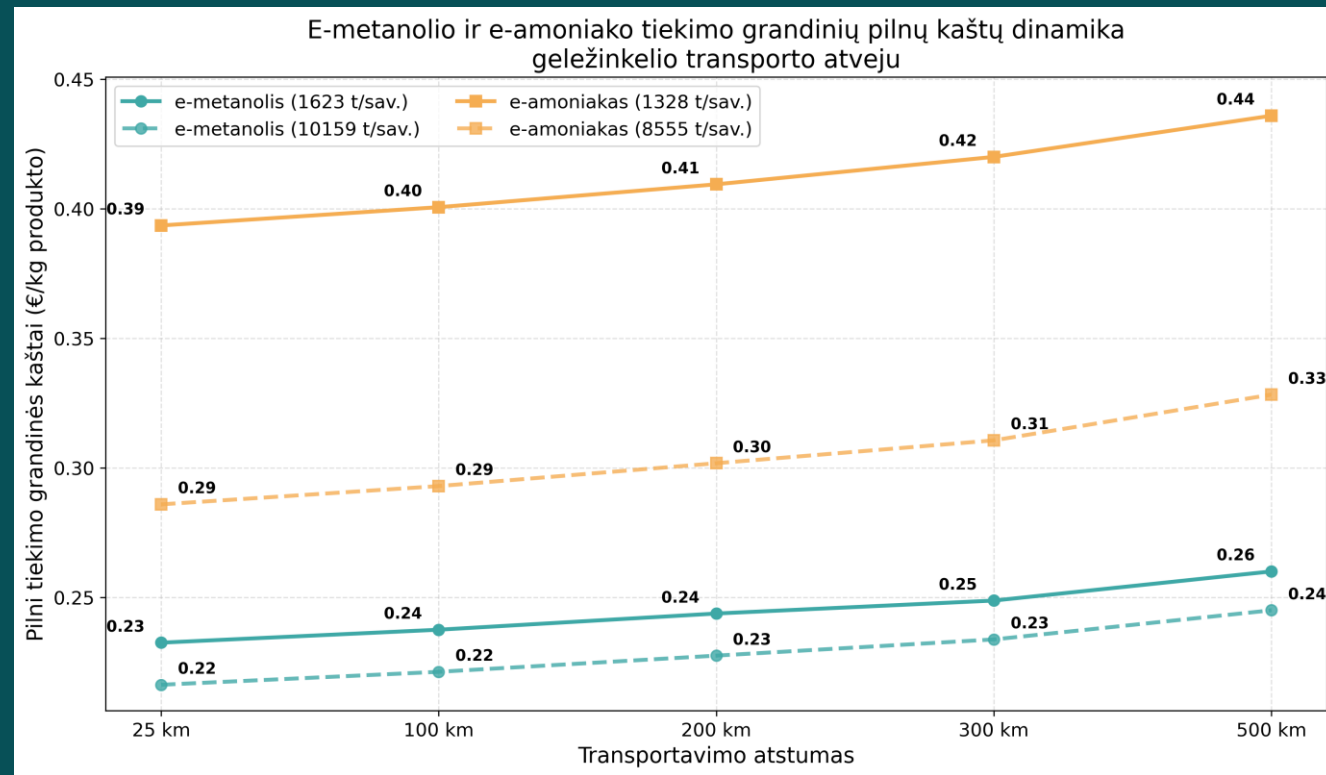
- Transportavimo dedamoji absoliučia verte yra maža net ilgiems atstumams. Tai reiškia, kad net vežant ilgu atstumu **pati geležinkelio logistika išlieka palyginti pigi** bendro kaštų krepšelio atžvilgiu. Ties 25 km ji sudaro tik apie 1,5 proc. pilnų tiekimo grandinės kaštų, o ties 500 km padidėja maždaug iki 11–17 proc., priklausomai nuo nešiklio ir kiekio scenarijaus.
- **Atstumas yra pagrindinis transporto dedamosios augimo veiksnys:** nuo 25 iki 500 km transportavimo kaštai padidėja maždaug 13 kartų abiem nešikliams.
- **Amoniako transportavimo dedamoji yra maždaug 5–11 proc. didesnė nei metanolio.** Tai atitinka pačią vandenilio ekvivalento fiziką: vienam kilogramui vandenilio ekvivalento reikia apie 5,67 kg amoniako, bet apie 5,33 kg metanolio, todėl vienam pristatytam vandenilio vienetai reikia pervežti šiek tiek didesnę amoniako masę.
- **Masto ekonomija geležinkelyje čia beveik nepasireiškia,** nes vieneto transporto kaina išlieka beveik tokia pati. Vadinas, kai bendri kaštai mažėja didinant kiekį, tai vyksta daugiausia ne dėl transportavimo dedamosios, o dėl kitų grandinės komponentų.



VANDENILIO IR JO IŠVESTINIŲ PRODUKTŲ TRANSPORTAVIMAS GELEŽINKELIU

Perskaičius kaštus ne pagal vandenilio ekvivalentą, o pagal paties produkto masę metanolio ir amoniako kaštai sumažėja apie 82 proc.

- **Atstumo poveikis kaštams pagal produkto masę išlieka palyginti nedidelis:** visoje atkarpoje metanolio pilni kaštai padidėja maždaug 9–13 proc., o amoniako – apie 13–14 proc.
- Perskaičius pagal produkto masę skirtumas tarp transportavimo kaštų padidėja: mažo kiekio scenarijuje amoniakas yra apie 67–71 proc. brangesnis už metanolį, o didelio kiekio scenarijuje – apie 30–38 proc. brangesnis.
- **Amoniako atveju masto ekonomijos efektas yra ryškesnis:** padidinus savaitinį transportuojamą kiekį, kaštai sumažėja apie 25–28 proc., tuo tarpu metanolio atveju sumažėjimas siekia tik apie 4–8 proc.
- Lyginant su cisternomis pagal produkto kaštus, geležinkelis metanolio atveju yra labai konkurencingas: mažo kiekio scenarijuje jis praktiškai sutampa su kelių transportu trumpesniuose atstumuose ir ties 200–500 km tampa maždaug 4–10 proc. pigesnis, o didelio kiekio scenarijuje geležinkelis jau yra apie 8–17 proc. pigesnis. Amoniako atveju situacija mišri: mažo kiekio geležinkelio scenarijus vis dar išlieka apie 7–39 proc. brangesnis už cisternas, tačiau didelio kiekio scenarijuje ties 25 km jis dar apie 12 proc. brangesnis, ties 100 km pasiekia beveik lygybę, o nuo 200 km tampa maždaug 6–20 proc. pigesnis už kelių logistiką.



IŠVADOS (1)

- Transportavimo vamzdynais grandinėje** lemiamas veiksnys yra ne maksimalus diametras, o tinkamas diametro ir realaus gamybos kiekio suderinimas. Esant mažiems gamybos kiekiams, ekonomiškai pagrįsti yra tik mažesnio diametro vietinio tipo skirstomasis vamzdynas. Bandytas ankstyvoje rinkoje projektuoti didelio diametro vamzdyną dažniausiai reikštų per didelį investavimą, o ne strateginį pranašumą, išskyrus tuos atvejus, kai numatomas ateityje ženklus gamybos apimčių padidėjimas. Didėjant kiekiui, ekonomiškai racionalus pasirinkimas palaipsniui pereina nuo mažesnių diametrų sprendimų prie 20 colių perdavimo tinklo, kuris nuo maždaug 50–100 kt per metus tampa pagrįsta regioninės perdavimo infrastruktūros dalimi. 48 colių diametras net ir esant didelei rinkai nebūtinai yra ekonomiškai pateisinamas, jei gamybos kiekis nepakankamas jam pilnai apkrauti. Todėl vertinant transportavimo vamzdynais galimybes, naudingesnis ne didžiausio diametro vamzdynas, o tas, kurio diametras ir kapitalinės investicijos geriausiai atitinka ilgalaikį ir stabilų gamybos apimčių bei transportavimo atstumą.
- Suslėgto vandenilio transportavimas vilkikais** yra racionaliausias ten, kur rinka dar tik formuojasi, gamybos kiekiai riboti, o svarbiausias tikslas yra greitai pradėti tiekimą be didelių pradinių investicijų. Ši grandinė ypač tinkama trumpiems maršrutams ir išskaidytiems vartotojams, tačiau ekonominė nauda ir pagrįstumas sparčiai mažėja didėjant atstumui, ypač transportui su mažesnio slėgio talpomis. Vertinant technologinius variantus, 500 bar sistema daugumoje scenarijų yra konkurencingesnė už 200 bar dėl didesnio vieno reiso transportuojamo kiekio, tačiau labai trumpuose atstumuose (iki ~25km) ir turint mažus kiekius 200 bar išlieka racionali sprendimu. Todėl suslėgto vandenilio logistika turėtų būti vertinama kaip pereinamojo laikotarpio arba nišinės rinkos sprendimas, o ne kaip ilgalaikė bazinė infrastruktūra dideliems ir pastoviems kiekiams.

IŠVADOS (2)

3. Vertinant **transportavimą cisternomis**, ekonomiškai palankiausias yra metanolis, tarpinę poziciją užima amoniakas, o brangiausias išlieka suskystintas vandenilis. Logistinių operacijų optimizavimas gali pagerinti bendrą rezultatą, tačiau jis nekeičia bazinės šios logistinės grandinės ekonomikos, nes visų pirma ją lemia ne vien transportavimo dedamoji, o visa tiekimo grandinė – ypač konversijos, saugojimo ir susijusios infrastruktūros sąnaudos. Todėl energijos nešiklio pasirinkimas turi būti grindžiamas ne vien transportavimo kaina, o platesne sistemos logika: galutiniu vartojimu, infrastruktūros prieinamumu, konversijos poreikiu ir strategine produkto paskirtimi.
4. **Drop and hook režimas** kelių logistikoje yra naudingas, bet jo poveikis ribotas ir nevienodas skirtingoms technologijoms. Didžiausią naudą jis duoda ten, kur pakrovimo operacijos sudaro didelę ciklo dalį, būtent todėl ryškiausia nauda matoma suskystinto vandenilio logistikoje trumpuose atstumuose. Tuo tarpu ilgesniuose maršrutuose, kai didžiausią kaštų dalį pradeda lemti pati kelionė, vairuotojų darbo laikas ir energijos sąnaudos, šio režimo nauda greitai mažėja ir kai kur tampa beveik nepastebima (arba neigiama). Tai reiškia, kad šis logistinis sprendimas turi būti vertinamas ne kaip universalus kaštų mažinimo instrumentas, o kaip lokali operacinė optimizacija, labiausiai pasiteisinanti trumpų atstumų ir intensyvios terminalo logistikos scenarijuose.
5. Vertinant **transportavimo cisternomis kaštus pagal galutinio produkto**, o ne vandenilio ekvivalento masę, nešiklių ekonominė interpretacija nesikeičia. Suskystintas vandenilis pagal kilogramą produkto išlieka akivaizdžiai brangiausias pasirinkimas, o metanolis ir amoniakas atrodo gerokai pigesni kaip komerciniai produktai, nors ir tarp jų išlieka reikšmingas skirtumas metanolio naudai. Todėl viena metrika negali būti universaliai taikoma visiems scenarijams. Jei analizuojama vandenilio tiekimo funkcija, pagrindinis rodiklis turėtų būti vandenilio ekvivalentas, o jei vertinama komercinė prekyba pačiu produktu, natūraliau pereiti prie produkto kaštų. Taigi metrikos pasirinkimas nėra techninė detalė – jis tiesiogiai keičia ekonominę interpretaciją ir gali lemti skirtingas strategines išvadas.

IŠVADOS (3)

6. **Metanolio ir amoniako transportavimo geležinkeliu** ekonomikoje svarbiausias veiksnys yra mastas, o ne atstumas. Didėjant savaitiniams transportuojamiems kiekiams, pilni tiekimo grandinės kaštai mažėja ryškiau, negu jie didėja ilginant transportavimo atstumą, todėl geležinkelio ekonomika yra gana atspari kilometražui, bet jautri apkrovimui. Šiame kontekste metanolis visame nagrinėjamame atstumų intervale išlieka ekonomiškai palankesnis už amoniaką tiek mažesnių, tiek didesnių kiekių scenarijuose, nors didėjant mastui šis skirtumas sumažėja. Skirtumą lemia ne tiek pats geležinkelio vežimas, kiek sintezės, saugojimo ir bendros grandinės struktūra. Praktiniu požiūriu tai reiškia, kad geležinkelio grandinės konkurencingumas priklauso ne tiek nuo maršruto ilgio, kiek nuo gebėjimo pagaminti pakankamai didelius ir stabilius produkto kiekius, kurie leistų išskaidyti fiksuotus kaštus. Kadangi geležinkelio transporto dedamoji abiejų nešiklių atveju sudaro tik nedidelę bendro kaštų krepšelio dalį, pagrindinis optimizavimo potencialas slypi ne pačioje transportavimo logistikoje, o platesnėje tiekimo grandinės struktūroje.
7. Vertinant **transportavimo geležinkeliu pagal galutinio produkto kaštus**, metanolis visame nagrinėjamame atstumų intervale taip pat išlieka ekonomiškai palankesnis už amoniaką. Masto ekonomija veikia abiem atvejais, nes didesni kiekiai mažina vieneto kaštus tiek metanolio, tiek amoniako grandinėje, tačiau ji nekeičia konkurencinio eiliškumo: ir mažesnių, ir didesnių kiekių scenarijuose metanolio absoliutus kaštų lygis išlieka mažesnis. Tai ypač svarbu tais atvejais, kai produktas vertinamas kaip savarankiška komercinė prekė, o ne vien kaip vandenilio nešiklis, nes pagal šią metriką metanolio grandinė išlieka ekonomiškai patrauklesnė už amoniako.
8. **Svarbi pastaba**: visi rezultatai turėtų būti vertinami kaip supaprastinto tipo techno-ekonominės išvados, kurios gerai parodo santykinį konkurencingumą ir masto logiką, tačiau neapima visų realaus projekto kaštų: trasavimo, servitutų, leidimų, žemės panaudos, prijungimo mazgų, papildomų saugos reikalavimų, finansavimo sąlygų ir kitų konkrečių projektų ir žemėnaudos specifinių veiksnių.



Šaltinis: Arcadis

05 | ALTERNATYVŲ PALYGINIMAS

VANDENILIO GAMYBOS (10 KT/M) VIETOMS TINKAMOS TERITORIJOS TRANSPORTAVIMUI KELIAIS IR VAMZDYNAIS IKI VANDENILIO KORIDORIAUS

Vandenilio koridorius gali suformuoti stiprią centrinę konkurencingumo ašį, tačiau jo ekonominis poveikis silpnėja tostant nuo pagrindinės trasos, todėl ankstyvoji rinka natūraliai koncentruosis ne visoje Lietuvoje, o prie jo prieigų.

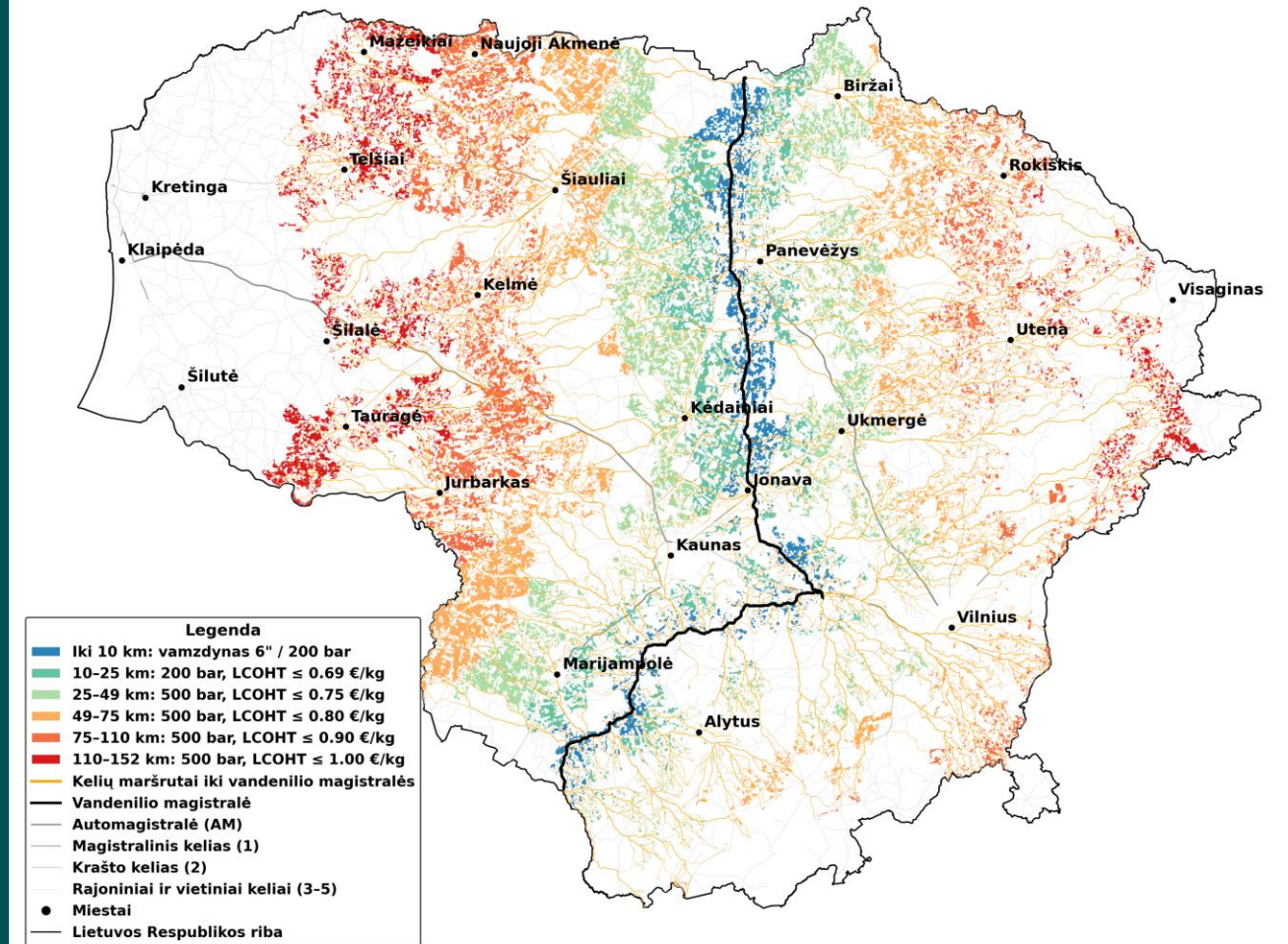
Iki maždaug 10 km nuo vandenilio koridoriaus racionaliausias sprendimas yra tiesioginis prijungimas mažo diametro skirstomuoju vamzdynu. Tai zona, kurioje vieneto kaštai mažiausi, o infrastruktūros prijungimas dar gali būti pagrįstas net ir esant palyginti nedideliam metiniam kiekiui.

Maždaug 1–25 km juostoje ekonomiškai dar išlieka konkurencingas 200 bar puspriekabių kelių transportas – lanksčios logistikos zona. Šiame diapazone svarbiausias tampa ne maksimalus našumas, o galimybė pradėti tiekimą be didelio išankstinio kapitalo poreikio.

Nuo maždaug 25 km ekonominė logika aiškiai persijungia į 500 bar puspriekabių kelių logistiką.

Maždaug 75–152 km atstumas yra praktinė riba, kur baigiasi patogi logistika ir prasideda logistinio jautrumo zona. Kaštai pradeda augti sparčiau, todėl projektai tampa jautresni apkrovimui, maršruto organizavimui ir vartojimo stabilumui.

Teritorijų suskirstymas pagal kelių atstumą iki pagrindinės vandenilio magistralės



VANDENILIO GAMYBOS (30 KT/M) VIETOMS TINKAMOS TERITORIJOS TRANSPORTAVIMUI KELIAIS IR VAMZDYNAIS IKI VANDENILIO KORIDORIAUS

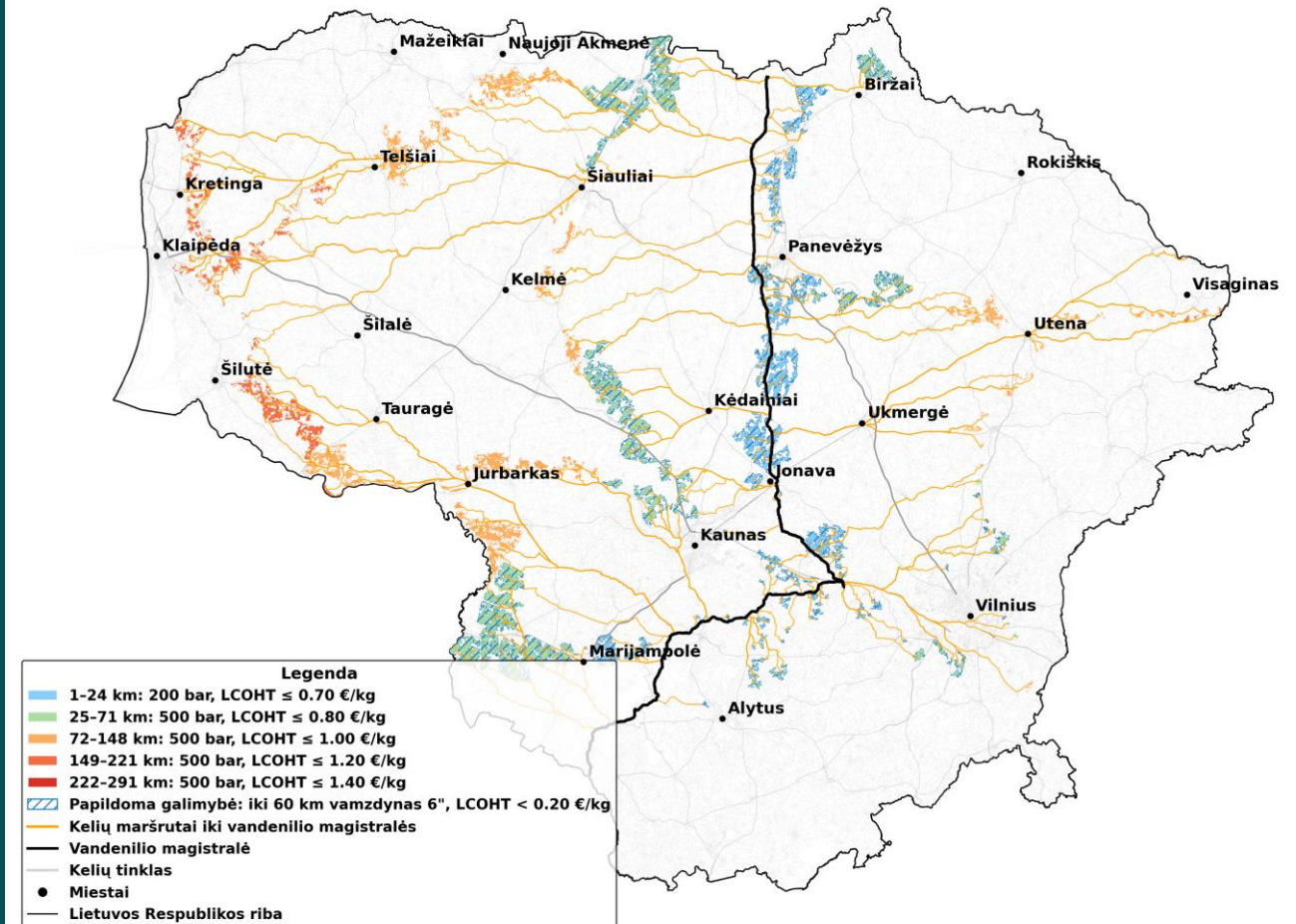
Esant 30 kt per metus kiekiui transportavimo logika keičiasi neženkliai, bet toks kiekis jau gali būti priskirtas prie stambesnių projektų: **dominuojančiu sprendimu išlieka 500 bar puspriekabių logistika, o 200 bar konkuruoja tik artimose teritorijose iki 24 km.**

Maždaug nuo 25 iki 291 km pagrindinę transportavimo funkciją perima 500 bar puspriekabių transportas. Būtent ši technologija 30 kt per metus scenarijuje sukuria plačiausią ekonomiškai pasiekiamą erdvę aplink vandenilio koridorių ir leidžia aptarnauti gerokai platesnį teritorinį spindulį.

Iki maždaug 60 km nuo koridoriaus susiformuoja svarbiausia sprendimų zona, nes čia atsiranda **reali konkurencija tarp 500 bar kelių logistikos ir vamzdyno**. Jei gamyba koncentruota, stabili ir ilgalaikė, išryškėja vamzdyno pranašumas. Tokiu atveju vamzdynas gali būti racionalesnis sprendimas už kelių logistiką, nes mažina priklausomybę nuo transporto parko dydžio, reisų dažnio ir operacinio sudėtingumo.

Tolstant nuo koridoriaus ekonomiškai svarbiais tampa ne tik patys kaštai, bet ir sistemos įgyvendinamumas. Nors 500 bar leidžia išlaikyti konkurencingumą didesniame nuotolyje, augant atstumui ir kiekiui sparčiai didėja reikalingas transporto parkas, todėl dalis tolimų teritorijų tampa ne tiek ekonomiškai neįmanomos, kiek operaciniu požiūriu vis sudėtingesnės. **150 km riba išlieka racionaliausia.**

Teritorijų suskirstymas pagal kelių atstumą iki pagrindinės vandenilio magistralės



VANDENILIO GAMYBOS (50 KT/M) VIETOMS TINKAMOS TERITORIJOS TRANSPORTAVIMUI KELIAIS IR VAMZDYNAIS IKI VANDENILIO KORIDORIAUS

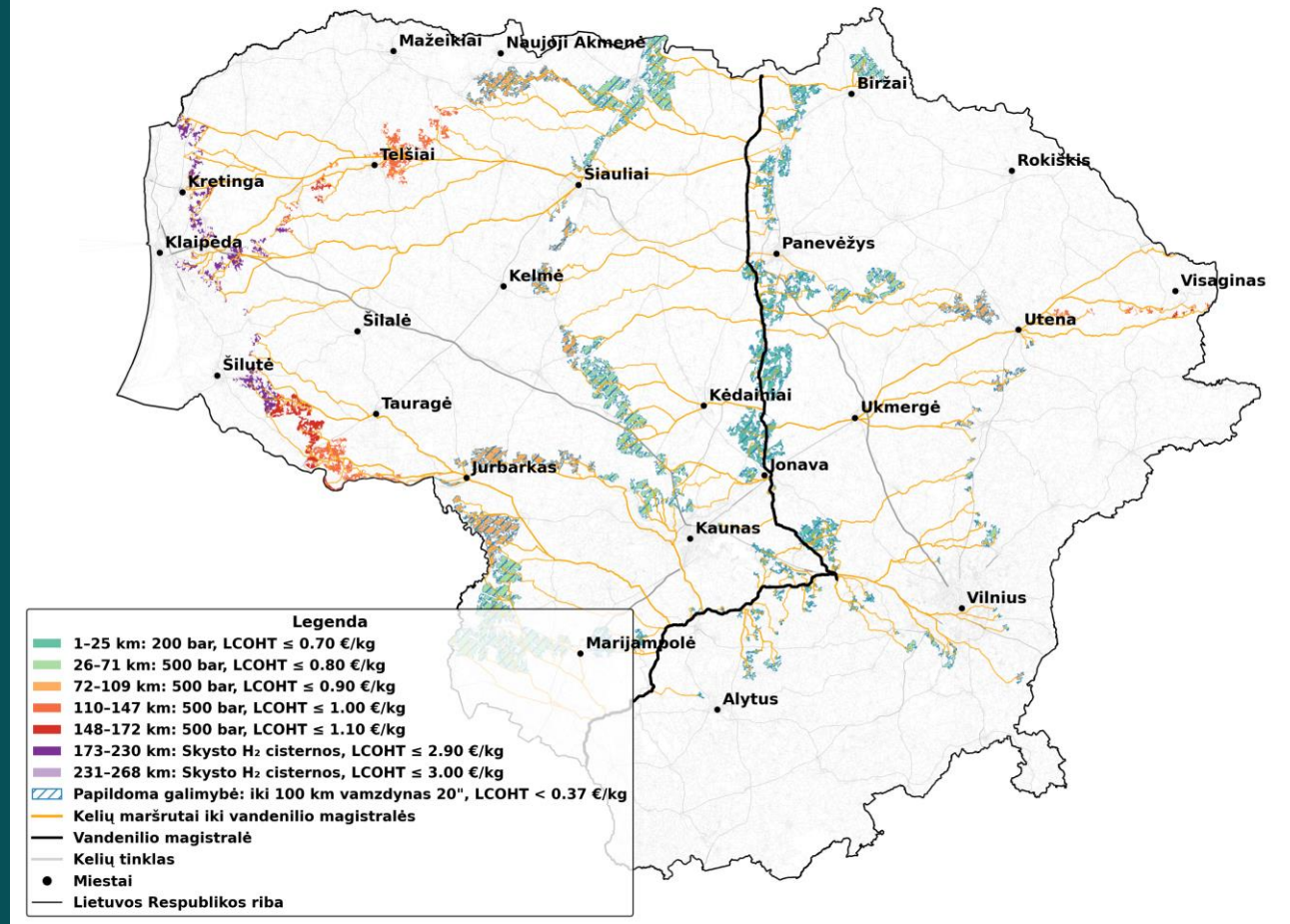
Esant 50 kt per metus kiekiui 20 colių vamzdynas jau tampa realia alternatyva teritorijoms, esančioms maždaug iki 100 km nuo koridoriaus. Tai reiškia, kad 500 bar sprendiniai išlieka svarbūs, tačiau nebėra vienintelis racionalus pasirinkimas.

Palyginti su 30 kt per metus scenarijumi, čia matomas aiškus lūžis: daliai teritorijų klausimas jau tampa nebe kuris kelių transporto variantas yra pigesnis, o ar apskritai verta likti prie kelių logistikos, nes didėjant atstumui sparčiai auga ir reikalingi transporto parkai, kai kur (maždaug ties 150 km) jie pasiekia net 40 vilkikų poreikį, todėl tokia logistika tampa vis sunkiau praktiškai įgyvendinama ir labai neracionali.

Transportavimas 200 bar puspriekabėmis šiame scenarijuje išlieka racionalus artimiausioje vandenilio koridoriaus zonoje iki 25 km. Toliau ekonomiškai palankesni tampa 500 bar sprendimai arba, esant labiau koncentruotai gamybai, 20 colių perdavimo tinklo vamzdynas.

Suskystinto vandenilio transportavimas cisternomis šiame scenarijuje atsiranda kaip teorinė alternatyva tolimai periferijai, tačiau jo praktinė reikšmė išlieka labai ribota dėl itin didelių kaštų.

Teritorijų suskirstymas pagal kelių atstumą iki pagrindinės vandenilio magistralės



VANDENILIO GAMYBOS (100 KT/M) VIETOMS TINKAMOS TERITORIJOS TRANSPORTAVIMUI KELIAIS IR GELEŽINKELIAIS IKI KLAIPĖDOS JŪRŲ UOSTO

Transportuojama amoniako ir metanolio pavidalu

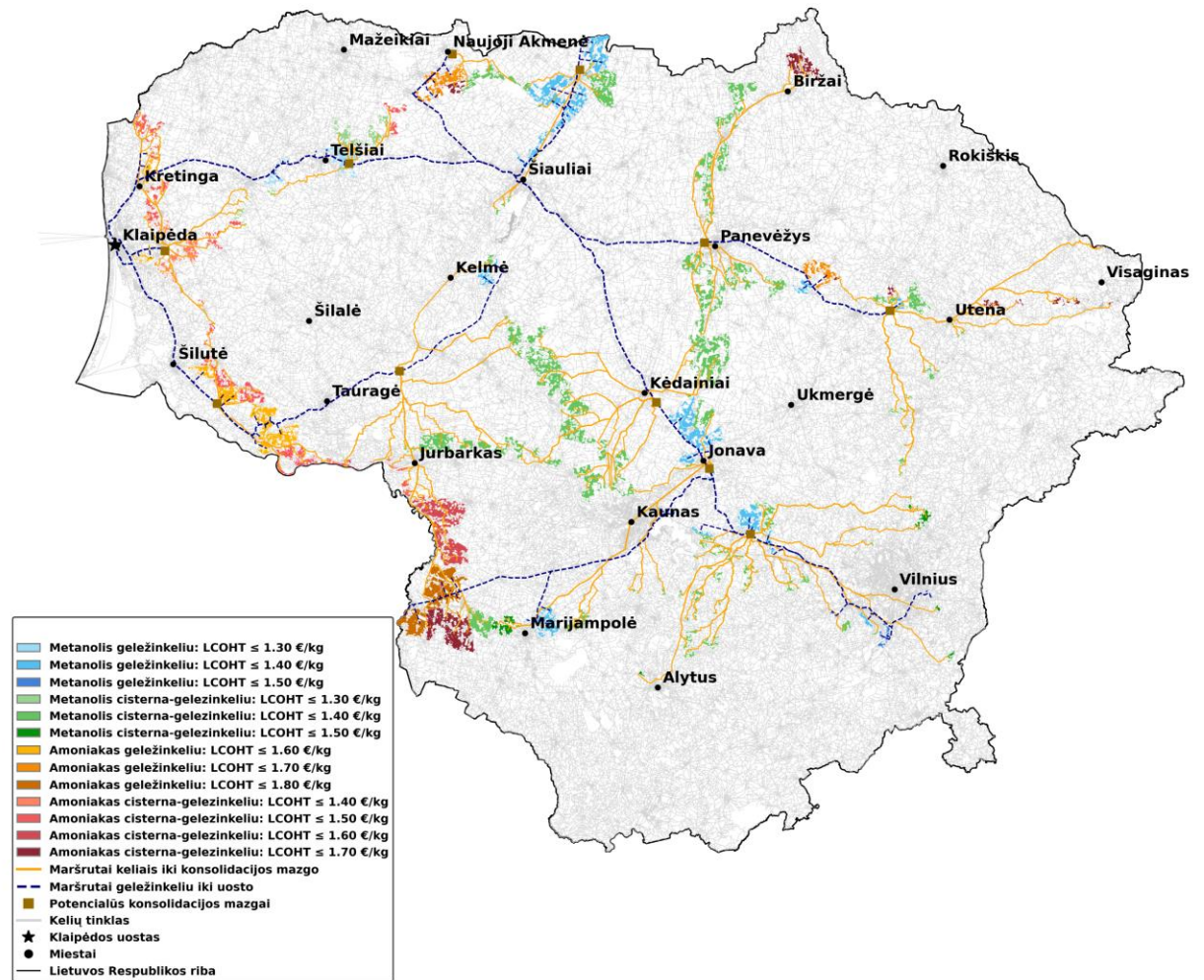
100 kt per metus vandenilio kiekis vienoje teritorijoje jau gali būti ne tik vietinės logistikos, o ir eksporto sistemos mastas. Šiomis sąlygomis vandenilio transportavimas gryna jo forma racionaliai persikelia į vamzdynų logistiką, o tolesnei eksporto grandinei ekonomiškai svarbiausi tampa molekuliniai nešikliai – metanolis ir amoniakas.

Jei tikslas yra eksportas, racionali tinklo logika yra dviejų pakopų sistema. Pirmoje pakopoje keliais surenkamas produktas iš teritorijų iki artimiausio koncentravimo arba pakrovimo mazgo, antroje – geležinkelis tampa pagrindine ilgesnio nuotolio eksporto ašimi į uostą.

Žemėlapis rodo ne vienodą nacionalinę aprėptį, o selektyvų eksporto koridorių tinklą. Didžiausią praktinį pranašumą įgyja teritorijos, kurios vienu metu turi gerą kelių prieigą, realų priėjimą prie geležinkelio maršrutų ir aiškų išėjimą į Klaipėdos uostą.

Kelių transportas šiame tinkle nėra pagrindinis eksporto sprendinys, o surinkimo mechanizmas. Jis svarbus trumpesniems ruožams ir teritorijoms, kurios turi produktą, bet neturi tiesioginės arba pakankamai efektyvios geležinkelio prieigos. Kuo teritorija toliau nuo geležinkelio koridoriaus, tuo labiau eksporto ekonomika ima blogėti.

Teritorijų suskirstymas metanolio ir amoniako transportavimui į Klaipėdos uostą (100 kt/metus)



IŠVADOS (1)

1. Vandenilio koridorius Lietuvoje galėtų būti vertinama kaip konkurencingumą koncentruojanti infrastruktūros ašis. Ji formuoja stiprų centrinį koridorių, kuriame atsiranda geros sąlygos ankstyvai paklausai, pramonės koncentracijai ir spartesniam rinkos startui, tačiau tai savaime neišsprendžia periferinių teritorijų aprūpinimo. Todėl koridoriaus buvimas nereiškia vienodos prieigos visiems – realų ekonominį efektą lemia tai, kiek toli nuo jos yra galutinis vartotojas.
2. Svarbiausias lūžis vandenilio logistikoje vyksta tarp skirtingų vandenilio gamybos kiekio apimčių. Mažų kiekių zonoje dominuoja lankstumo ekonomika: trumpiems atstumams ir nepakankamai užtikrintai paklausai racionaliausi išlieka kelių transporto arba mažo diametro skirstomieji vamzdynai lokaliems sprendimams. Tačiau didėjant kiekiui sistema pereina į visai kitą logiką, kur sprendimas vis dažniau priklauso nebe nuo to, kurį vilkiką rinktis, o ar jau verta pereiti prie vamzdynų infrastruktūros.
3. Technologijų pasirinkimą labiausiai lemia produkcijos mastas, paklausos koncentracija ir stabilumas, o ne vien geografinis atstumas. Trumpų atstumų ir mažų kiekių atveju konkurencingais išlieka lankstūs 200 bar puspriekabių sprendiniai, vidutinės apimties gamyboje dominuoja 500 bar puspriekabių logistika, o ten, kur paklausa pakankamai koncentruota ir ilgalaikė, pradeda ryškėti vamzdynų ekonominis pranašumas. Čia svarbiausias klausimas yra kokia prieigos forma geriausiai atitinka konkrečią paklausos struktūrą. Jei vartojimas išskaidytas ir dar neužtikrintas, laimi lankstumas, jei vartojimas didelis ir stabilus, laimi stabilios infrastruktūros pasirinkimas.
4. Periferinių teritorijų prijungimas neturėtų būti grindžiamas vien tiesioginio transportavimo principu. Tolstant nuo vartojimo taško logistika greitai brangsta, o transporto parkai stipriai išauga, pasiekdami adekvatumo ribą. Todėl ekonomiškai brandesnė strategija būtų ne tiesiškai plėsti vieną maršrutų planą visai šalies teritorijai, o taikyti diferencijuotą architektūrą: centrinėje šalies dalyje remtis vandenilio koridoriumi, artimoje ir vidutinėje prieigoje naudoti kelių logistiką ar skirstomuosius vamzdynus, o nutolusiose zonose svarstyti regioninius terminalus, konsolidavimo mazgus arba decentralizuotą gamybą. Universali nacionalinė tiekimo forma tikėtina nebūtų ekonomiškai optimali.

IŠVADOS (2)

5. Eksporto į Klaipėdos jūrų uostą logika turėtų būti planuojama kaip koridorių ir mazgų sistema, o ne kaip tiesioginis srauto nukreipimas į vieną tašką. Kelių tinklas lemia platų teritorinį surinkimą, tačiau geležinkelis tampa strategiškai svarbus tada, kai gali perimti didesnius ir tolimesnius gamybos taškus ir sumažinti priklausomybę nuo brangios kelių logistikos. Tai ypač aktualu toms transportavimo grandinėms, kurių ekonomika jautresnė transporto rūšies pasirinkimui ir kurios geriau veikia tik tada, kai gali remtis struktūruota masine logistika. Todėl ilgalaikė eksporto sistema turėtų būti kuriama ne vien aplink uostą, bet ir aplink vidaus konsolidavimo mazgus, kurie sujungtų kelių transportą su geležinkelio koridoriais.
6. Lietuvos vandenilio infrastruktūra turėtų būti vystoma etapais, pagal realų gamybos apimčių vystymąsi, o ne pagal išankstinę vienodos teritorinės aprėpties ambiciją. Ankstyvoje fazėje svarbiausia aktyvuoti centrinį vandenilio koridorių (arba kitą stambų vartotoją) ir artimos prieigos zonas, kuriose mažiausi kaštai ir didžiausia greito rinkos augimo tikimybė. Vėlesnėse fazėse, didėjant kiekiams, galima pereiti prie platesnės vamzdyninės logikos ir stipresnės eksporto architektūros. Tokia seka leistų išvengti perinvestavimo ankstyvoje stadijoje ir kartu sudarytų sąlygas ilgainiui pereiti nuo lanksčios logistikos prie brandesnės, masto ekonomija paremtos infrastruktūros.



Šaltinis: Jametlene Reskp Unsplash

06 | APIBENDRINANČIOS IŠVADOS

- 1) Vandenilio transportavimo būdo pasirinkimą pirmiausia lemia kiekis, gamybos ir paklausos stabilumas, atstumas bei infrastruktūros brandos lygis: ankstyvoje rinkos stadijoje ir gabenant trumpais atstumais racionaliausias yra suslėgto vandenilio transportavimas sunkvežimiais, didesniems kiekiams ir ilgesniems atstumams konkurencingumą perima suskystintas vandenilis arba vandenilio dariniai, ypač amoniakas ir metanolis, o esant dideliems, pastoviems gamybos kiekiams ekonomiškai efektyviausiu ilgalaikiu sprendimu tampa vamzdynai. Tarptautinėje prekyboje, kur reikia gabenti didelius kiekius itin dideliais atstumais, perspektyviausia kryptis yra laivyba, ypač amoniako ir metanolio pavidalu.
- 2) Vandenilio transportavimo įgyvendinamumą Lietuvoje lemia ne tik pasirinkta transporto rūšis, bet ir gebėjimas visą procesą organizuoti kaip vientisą pavojingų krovinių logistikos grandinę. Joje maršrutai turi būti planuojami pagal saugos ir leistinumą kriterijus, transportavimas vykdomas laikantis ADR, RID ir susijusių nacionalinių teisės aktų reikalavimų, o praktinis sistemos veikimas priklauso nuo tinkamai parinktos slėginės, cisterninės ar vagoninės įrangos, specializuotų terminalų, kvalifikuoto personalo, aiškiai apibrėžtų eksploatavimo procedūrų ir, ypač, saugiai valdomų krovos bei perdavimo operacijų, kurios visoje grandinėje kelia didžiausią riziką.
- 3) Nėra vieno universaliai geriausio vandenilio transportavimo būdo: optimalus sprendinys priklauso nuo metinio kiekio, atstumo, srauto pastovumo, infrastruktūros panaudojimo lygio, geografinės paklausos koncentracijos ir to, ar galutiniam vartotojui reikalingas grynas vandenilis, ar jo išvestinis produktas. Analizė aiškiai parodė, kad lemiamas veiksnys dažnai yra ne pati technologija, o jos apkrovimo režimas ir gebėjimas išlaikyti ekonomiškai pagrįstą veikimą konkrečiomis rinkos sąlygomis.
- 4) Mažų kiekių zonoje sprendinys priklauso nuo atstumo ir apkrovimo lygio. Ties 5 kt/metus trumpuose atstumuose dar gali būti racionalūs 6 colių vamzdynas ir 200 bar suslėgto vandenilio transportavimas, o vidutiniuose ir ilgesniuose maršrutuose stipriausia mobili alternatyva tampa 500 bar puspriekabės. Ties 10 kt/metus gerai apkrautas 6 colių vamzdynas jau rodo aišką ekonominį pranašumą, tačiau mobilūs sprendiniai vis dar išlieka svarbūs ankstyvai rinkos plėtrai.
- 5) 6 colių vamzdynas gali išlikti racionalus iki maždaug 30 kt/metus, jei yra gerai apkrautas, tačiau nuo maždaug 50 kt/metus aiškiai pradeda dominuoti 20 colių perdavimo tinklo logika. 200 bar puspriekabės tinka tik trumpiems maršrutams ir mažiems kiekiams, o 500 bar išlieka stipriausia mobili alternatyva iki maždaug 30 kt/metus. Didesniuose kiekiuose mobilus suslėgto vandenilio transportavimas greitai praranda praktinį konkurencingumą.

- 7) Suskystinto vandenilio cisternos pagal kaštus nekonkuruoja su vamzdynais ar kitomis pagrindinėmis alternatyvomis, todėl nėra racionalus pereinamasis sprendinys. Jų vaidmuo išlieka nišinis, kai reikia mobiliai tiekti didelį kiekį grynojo vandenilio vidutiniais ar didesniais atstumais, nepaisant aukštesnių kaštų.
- 8) Amoniakas ir metanolis dažniausiai nepralenkia vamzdynų pagal vandenilio ekvivalento kaštus, tačiau didesnių kiekių ir ilgesnių atstumų scenarijuose jie tampa svarbiausiomis nevamzdyninėmis alternatyvomis ir nuo maždaug 50 kt/metus gali veikti kaip konkurencingos mobilios transportavimo grandinės. Jų pranašumas ypač išryškėja tada, kai mobilus gryno vandenilio transportavimas praranda mastelio ekonomiją, o išvestiniai produktai leidžia išlaikyti stabilesnę ir praktiškiau įgyvendinamą logistikos struktūrą. Amoniakas ypač aktualus prekybai, didelių kiekių centralizuotam transportavimui ir chemijos bei trąšų sektoriui, o metanolis išsiskiria logistiniu paprastumu, brandžia transportavimo infrastruktūra ir galimybe produktą tiesiogiai naudoti kaip galutinį produktą pramonėje.
- 9) Didėjant transportuojamiems kiekiams, geležinkelis amoniako ir metanolio logistikos grandinėse pradeda įgyti aiškų sisteminių pranašumą prieš autocisternų logistiką. Pasiekus 100–300 kt/metus kiekius būtent transportavimas geležinkeliu išlieka kaip pagrindinė ekonomiškai racionali alternatyva sausumos kelių logistikoje, o autocisternų scenarijai, didėjant srautui, palaipsniui praranda konkurencingumą dėl ribotų mastelio galimybių. Todėl tokiam kiekių lygyje autocisternos jau labiau atlieka papildančios, o ne pagrindinės logistikos funkciją.
- 10) Nuo maždaug 200 kt/metus transportavimo sistema pereina į strateginės vandenilio perdavimo infrastruktūros planavimo lėgmenį. Šiame etape vamzdynai užtikrina itin žemas vieneto sąnaudas, todėl pagrindiniu klausimu tampa nebe pats jų ekonominis pagrįstumas, o infrastruktūros mastas, diametras ir atitiktis ilgalaikiai rinkos plėtros trajektorijai. 48 colių vamzdynas šiame kontekste išryškėja kaip ateities perdavimo tinklo sprendinys: nors ties 200 kt/metus jis dar nėra trumpalaikių kaštų minimumas, jis išlieka labai konkurencingas ir gali būti pagrįstas poreikiu iš anksto sukurti pajėgumų rezervą būsimiems srautams.
- 11) Ties 250–300 kt/metus sistema pereina į stambių pramoninių centrų ir eksporto koridorių planavimo logiką. Šiame etape vamzdynai tampa pagrindine infrastruktūros ašimi, o nevamzdyninės alternatyvos daugiausia reiškiasi per amoniako ir metanolio geležinkelio grandines. Todėl sprendimai šiame lygyje grindžiami jau nebe atskirų logistikos grandžių optimizavimu, o visos tiekimo sistemos architektūra ir ilgalaikės plėtros kryptimi.

- 11) Modelis patvirtina etapinės rinkos raidos logiką. Ties 5 kt/metus dominuoja mobilūs sprendiniai: 200 ir 500 bar suslėgto vandenilio transportavimas svarbiausias vidutiniuose ir ilgesniuose atstumuose, o 6 colių vamzdynas pagrįstas tik labai trumpoms vietinėms jungtims. Nuo maždaug 10 iki 30 kt/metus stipriu ekonominiu sprendiniu tampa gerai apkrautas 6 colių vamzdynas, tačiau jis dar veikia kartu su mobiliąja logistika, ypač 500 bar puspriekabėmis. Nuo 50 iki 200 kt/metus aiškiai dominuoja 20 colių perdavimo tinklo vamzdynas, o mobilios suslėgto vandenilio grandinės praranda praktinį konkurencingumą. Nuo 200 kt/metus sistema pereina į stambių perdavimo koridorių, eksporto ir pramoninių centrų planavimo lygmenį, kur stiprėja ir metanolio bei amoniako geležinkelio grandinių reikšmė.
- 12) Ilgalaikėje perspektyvoje logistika turėtų būti planuojama ne kaip pavienių srautų nukreipimas, o kaip koridorių ir konsolidavimo mazgų sistema. Kelių transportas išlieka svarbus teritoriniam surinkimui ir lankstumui, tačiau vamzdynai ir geležinkelis tampa strategiškai svarbūs perimant didesnius, reguliariesnius ir ilgesnio nuotolio srautus. Todėl vidaus ir eksporto sistema turėtų būti formuojama aplink vidaus konsolidavimo mazgus, jungiančius kelių transportą su vamzdynų ir geležinkelio koridoriais.
- 13) Analizė rodo, kad vandenilio rinkos plėtra neturėtų būti grindžiama vienos technologijos dominavimo prielaida. Racionaliausias kelias yra ne vieno universalaus sprendinio paieška, bet tarpusavyje derinamų infrastruktūrinių ir logistinių grandinių formavimas pagal konkrečią rinkos brandą, srautų mastą, transportavimo atstumą ir galutinio panaudojimo pobūdį. Tai reiškia, kad mobilios gryo vandenilio grandinės, vamzdynai, metanolio ir amoniako tiekimo sprendiniai bei geležinkelio logistika turėtų būti vertinami kaip vienas kitą papildantys elementai, o ne kaip absoliučiai tarpusavyje konkuruojančios alternatyvos.
- 14) Absoliutūs LCOHT dydžiai turi būti interpretuojami atsargiai. Supaprastinto techno-ekonominio vertinimo tipo analizė labai gerai atskleidžia skirtingų alternatyvų santykinį konkurencingumą, tačiau ji gali nepakankamai tiksliai atspindėti visas realaus projekto sąnaudas ir įgyvendinimo rizikas. Visų pirma, tokio tipo modeliai paprastai ribotai įvertina projektavimo, teritorijų planavimo, servitutų ir žemės paėmimo, trasos parengimo, prijungimo mazgų, terminalų integracijos, leidimų gavimo, aplinkosauginių ir saugos reikalavimų, vietos bendruomenių priimtimumo, statybos grafiko, rangos rizikų, infliacijos, finansavimo sąlygų, rezervinių pajėgumų poreikio, realių eksploatavimo sutrikimų bei kitų projektui specifinių fiksuotų ar pusiau fiksuotų sąnaudų reikšmę. Dėl šios priežasties ypač trumpų atstumų scenarijuose modelio rezultatai turėtų būti vertinami pirmiausia kaip strateginės krypties ir santykinio konkurencingumo indikatorius, o ne kaip galutinis investicinis tarifas ar tiesiogiai taikytina projekto sąmata.

PAPILDANTYS DOKUMENTAI

01 Vandenilio transportavimo teisinis reglamentavimas

04 Techno-ekonominio modeliavimo metodika ir parametų suvestinės

02 Vandenilio transportavimo galimybių techninis vertinimas.

05 Techno-ekonominio modeliavimo rezultatų analizė

03 Užsienio praktika, transportuojant vandenilį įvairių rūšių transporto priemonėmis, apžvalga.



Kontaktiniai duomenys klausimams ir pasiūlymams: indre.gecaite@ena.lt