



Vandenilio transportavimo įvairiomis transporto priemonėmis techno-ekonominio modeliavimo metodika

Lietuvos energetikos agentūra

Parengė: Dr. Indrė Gečaitė

2026

Turinys

Vandenilio transportavimo vamzdynais kaštų skaičiavimo metodika.....	3
Suslėgto vandenilio transportavimo vilkikais kaštų skaičiavimų metodika.....	8
Vandenilio ir jo išvestinių produktų transportavimas cisternomis.....	13
Skysto vandenilio transportavimo cisternomis kaštų skaičiavimas.....	13
Metanolio transportavimo cisternomis kaštų skaičiavimas.....	19
Amoniako transportavimo cisternomis kaštų skaičiavimas.....	23
Vandenilio išvestinių produktų transportavimas geležinkeliu.....	28
Amoniako transportavimo geležinkeliu kaštų skaičiavimas.....	28
Metanolio transportavimo geležinkeliu ekonominio vertinimo metodika.....	32

Vandenilio transportavimo vamzdynais kaštų skaičiavimo metodika

Ši metodika skirta įvertinti vandenilio transportavimo vamzdynais kaštus, išreikštus euraiis vienam pristatytam kilogramui vandenilio (€/kg). Modelis apima tiek mažesnio masto vietinius skirstomojo tipo vamzdynus, tiek didesnio masto perdavimo tinklo vandenilio transportavimo vamzdynus. Skaičiavimai atliekami trims reprezentatyviems scenarijams: 6 colių skirstomojo tipo vamzdynui, 20 colių perdavimo tinklo vamzdynui ir 48 colių perdavimo tinklo vamzdynui.

Modelyje pirmiausia nustatomas metinis transportuojamas ir faktiškai pristatomas vandenilio kiekis, vėliau apskaičiuojami metiniai vamzdyno kapitalo kaštai, kompresorių stočių kapitalo kaštai, vamzdyno ir kompresorių eksploatavimo bei priežiūros kaštai, elektros sąnaudos suslėgimui, o galiausiai visi metiniai kaštai padalinami iš pristatyto vandenilio kiekio.

Modelis kiekvienam scenarijui apskaičiuoja bendrą rodiklį LCOHT €/kg – bendrus diskontuotus vandenilio transportavimo vamzdynais kaštus, išreikštus euraiis vienam pristatytam kilogramui vandenilio.

Scenarijai

Modelyje vertinami trys vamzdynų scenarijai, apimantys skirtingo masto infrastruktūrą ir skirtingus transportuojamus kiekius:

a) **6 colių skirstomojo tipo vamzdynas** – mažesnio masto vietinis vamzdynas, modelyje darant prielaidą, kad jis skirtas maždaug 80 t/d projektiniam srautui. Šiame scenarijuje laikoma, kad suslėgimas vyksta tik įvade į vamzdyną, todėl papildomos tarpinės kompresorinės stotys nevertinamos.

b) **20 colių perdavimo tinklo vamzdynas** – vidutinio masto perdavimo tinklo vamzdynas, pagal modelio prielaidą skirtas 550 t/d projektiniam srautui. Šiame scenarijuje kompresorių stočių poreikis nustatomas ne pagal fiksuotą vienodą žingsnį, o pagal rankiniu būdu parinktą stočių logiką, priklausančią nuo bendro transportavimo atstumo.

c) **48 colių perdavimo tinklo vamzdynas** – didelio masto perdavimo tinklo vamzdynas, pagal modelį skirtas 2300 t/d projektiniam srautui. Šiame scenarijuje taip pat taikoma rankinė stočių parinkimo logika pagal bendrą atstumą.

Visiems trims scenarijams taikomas skirtingas panaudojimo lygis nuo 15 iki 95% nuo projekcinio paros srauto, kaip papildomi jautrumo analizės scenarijai. Tai reiškia, kad modelis vertina ne tik maksimaliai apkrautą infrastruktūrą, o ir sąlyginai mažo apkrovimo režimą, kuris labiau atitinka ankstyvos infrastruktūros vystymo etapą.

Pagrindinė skaičiavimų metodika

Metinis transportuojamas ir pristatytas vandenilio kiekis

Pirmiausia apskaičiuojamas metinis transportuojamas vandenilio kiekis pagal projekcinį paros srautą, pajėgumų išnaudojimo lygį ir 365 dienas per metus:

$$\text{metinis transportuojamas kiekis} = \text{projektinis srautas per dieną} \times 365 \times \text{panaudojimo koeficientas}$$

Toliau įvertinami metiniai technologiniai nuostoliai, todėl apskaičiuojamas faktiškai pristatytas vandenilio kiekis taikant 0,3% metinių transportavimo nuostolių normą:

$$\text{metinis pristatytas kiekis} = \text{metinis transportuojamas kiekis} \times (1 - \text{nuostolių norma})$$

Šis pristatytas kiekis naudojamas galutiniam LCOHT rodikliui apskaičiuoti.

Vamzdyno kapitalo kaštai

Vamzdyno kapitalo kaštai apskaičiuojami pagal vienetinį vamzdyno CAPEX, išreikštą eurais kilometrui, ir bendrą transportavimo atstumą tokiu būdu:

$$\text{vamzdyno CAPEX} = \text{atstumas} \times \text{CAPEX €/km}$$

Modelyje taikomi tokie vienetiniai vamzdyno CAPEX dydžiai:

- 6 colių vamzdynui – 0,50 mln. €/km
- 20 colių vamzdynui – 1,60 mln. €/km
- 48 colių vamzdynui – 3,50 mln. €/km

Gautos vamzdyno kapitalo išlaidos perskaičiuojamos į metines išlaidas naudojant kapitalo atkūrimo koeficientą (CRF), priklausantį nuo diskonto normos ir vamzdyno tarnavimo laiko. Modelyje laikoma, kad vamzdyno tarnavimo laikas yra 40 metų, o diskonto norma WACC = 6,0%.

Vamzdyno eksploatavimo ir priežiūros kaštai

Vamzdyno eksploatavimo ir priežiūros kaštai apskaičiuojami kaip pastovi metinė dalis nuo vamzdyno investicinės vertės. Todėl:

$$\text{vamzdyno OPEX} = \text{vamzdyno CAPEX} \times \text{vamzdyno OPEX norma}$$

Ši dedamoji modelyje skaičiuojama atskirai nuo kapitalo sąnaudų ir įtraukiama į bendras metines sąnaudas, kur OPEX norma yra lygi 1,5% per metus.

Kompresorių kapitalo kaštai

Kompresorių kapitalo kaštai skaičiuojami atskirai nuo vamzdyno kapitalo kaštų. Pirmiausia nustatomas reikalingas kompresoriaus galios poreikis pagal transportuojamą srautą ir specifinį suslėgimo energijos poreikį. Kompresoriaus galia modelyje apskaičiuojama pagal projekcinį, o ne panaudojimo koeficientu sumažintą srautą, nes laikoma, kad kompresorius turi būti projektuojamas pagal nominalią sistemos apkrovą.

Kompresoriaus CAPEX nustatomas remiantis baziniu 980 €/kW įkainiu, papildomu 1,90 CAPEX korekciniu koeficientu ir 0,83 mastelio ekonomijos eksponente. Tai reiškia, kad vieno MW bazinė investicinė vertė modelyje atitinka:

$$980 \times 1000 \times 1,90 = 1\,862\,000 \text{ €/MW}$$

Kompresorių kapitalo kaštai perskaičiuojami į metinius atskirai nuo vamzdyno kapitalo kaštų, taikant 6% diskonto normą ir 25 metų kompresorių tarnavimo laiką. Kompresoriams taip pat priskiriamos pastovios eksploatavimo ir priežiūros sąnaudos, kurios modelyje sudaro 4% per metus nuo kompresorių CAPEX.

Suslėgimo elektros sąnaudos

Suslėgimo elektros sąnaudos modelyje skaičiuojamos atskirai nuo kapitalo kaštų.

Skirstomojo tipo vamzdynas (6 colių)

Skirstomojo tipo vamzdynui laikoma, kad suslėgimas vyksta tik vieną kartą įvade į vamzdyną. Todėl suslėgimo energijos poreikis nepriklauso nuo atstumo. Modelyje šiam vienkartiniam įvadiniam suslėgimui taikoma 0,63 kWh/kg. Kadangi skirstomasis vamzdynas modelyje traktuojamas kaip trumpesnio nuotolio sistema be tarpinių kompresorių stočių, jam netaikoma nei atstumui proporcinga suslėgimo logika, nei papildomos tarpinės kompresorių stotys.

Perdavimo tinklo vamzdynai (20 ir 48 colių)

Perdavimo tinklo vamzdynams taikomos dvi suslėgimo dedamosios:

- įvadinis suslėgimas į perdavimo sistemą,
- atstumui proporcingas papildomas suslėgimo poreikis nagrinėjamoje atkarpoje.

Įvadiniam suslėgimui taikoma ta pati reikšmė kaip ir skirstomajam vamzdynui 0,63 kWh/kg. Papildomas linijinis suslėgimo energijos poreikis modelyje apibrėžtas kaip intervalas 0,14–0,23 kWh/kg per 150 km. Tolimesniuose skaičiavimuose naudojama šio intervalo vidutinė reikšmė, t. y. 0,185 kWh/kg per 150 km. Modelyje ši reikšmė papildomai nekoreguojama pagal slėgio santykį, todėl skaičiavimuose tiesiogiai taikoma kaip referencinis linijinio suslėgimo energijos poreikis. Taip pat šiame modelyje netaikomas atskiras hidraulinio mastelio koeficientas.

Gavus bendrą specifinį energijos poreikį, metinės suslėgimo elektros sąnaudos nustatomos padauginus metinį transportuojamą vandenilio kiekį iš bendro specifinio energijos poreikio ir iš elektros kainos. Modelyje naudojama elektros kaina yra 90 €/MWh, kas atitinka 0,09 €/kWh.

Kompresorių stočių išdėstymo logika

Šiame modelio žingsnyje kompresorių stočių poreikis nustatomas ne pagal vienodą fiksuotą stočių žingsnį, o pagal rankiniu būdu nustatytą taisyklę, priklausančią nuo atstumo ir vamzdžio diametro.

20 colių perdavimo tinklo vamzdynui:

- iki 200 km – 0 tarpinių stočių,
- daugiau nei 200 km ir iki 400 km – 1 stotis,
- daugiau nei 400 km – 2 stotys.

48 colių perdavimo tinklo vamzdynui:

- iki 300 km – 0 tarpinių stočių,
- daugiau nei 300 km – 1 stotis.

Kai nustatomas stočių skaičius, faktinis atstumas tarp stočių apskaičiuojamas dalijant bendrą trasos ilgį iš segmentų skaičiaus: $\text{stočių žingsnis} = \text{bendras atstumas} / (\text{stočių skaičius} + 1)$. Taigi modelis kiekvienam atstumui suformuoja konkretų segmentų ilgį, kuris vėliau naudojamas tiek linijinių energijos sąnaudų, tiek kompresorių stočių CAPEX skaičiavimui.

Hidraulinis patikrinimas

Nors kompresorių stočių išdėstymas modelyje parenkamas rankine logika, papildomai atliekamas hidraulinis diagnostinis patikrinimas, skirtas įvertinti, ar pasirinktas stočių išdėstymas yra techniškai logiškas. Šis patikrinimas atliekamas tik 20 ir 48 colių perdavimo tinklo vamzdynams. Hidraulinis patikrinimas modelyje grindžiamas šiomis prielaidomis:

- segmento įėjimo slėgis – 70 bar
- minimalus leistinas segmento išėjimo slėgis – 65 bar
- dujų temperatūra – 15 °C
- vidinis šiurkštumas – 0,013 mm
- dinaminė klampa – $8,7 \times 10^{-6}$ Pa·s
- suspaudžiamumo koeficientas $z - 1,0$
- maksimalus leistinas dujų greitis – 35 m/s
- skaičiavimo žingsnis – 5 km

Slėgio kritimas kiekviename segmente apskaičiuojamas pagal Darcy–Weisbach¹ lygtį, o trinties koeficientui nustatyti naudojama Haaland formulė². Taip apskaičiuojamas kiekvieno segmento minimalus slėgis ir didžiausias srauto greitis. Svarbu pažymėti, kad ši hidraulinė dalis šiame modelyje naudojama kaip diagnostinė patikra, o ne kaip automatinis stočių išdėstymo optimizavimo mechanizmas. Kitaip tariant, hidraulinis patikrinimas leidžia įvertinti, ar rankiniu būdu parinktas stočių sprendinys atrodo techniškai priimtinas, tačiau galutinis stočių skaičius šiame variante išlieka nustatomas pagal iš anksto apibrėžtą taisyklę.

¹ <https://www.lmnoeng.com/darcy.php>

² <https://engineerexcel.com/haaland-equation-for-friction-factor/>

Galutinio rodiklio skaičiavimas

Galiausiai sudedami visi metiniai kaštai: vamzdyno metinės kapitalo sąnaudos, kompresorių metinės kapitalo sąnaudos, vamzdyno eksploatavimo ir priežiūros kaštai, kompresorių eksploatavimo ir priežiūros kaštai, elektros sąnaudos suslėgimui. Tokiu būdu gaunamos bendros metinės vandenilio transportavimo vamzdynais sąnaudos. Galiausiai šios sąnaudos padalijamos iš faktiškai pristatyto vandenilio kiekio per metus:

$$LCOHT = \text{bendros metinės sąnaudos} / \text{per metus pristatytas kiekis}$$

Taip gaunamas galutinis rodiklis €/kg pristatyto vandenilio.

Pagrindinių parametų suvestinė

Parametras	Reikšmė	Paiškinimas
WACC	6 %	Diskonto norma ³
Vamzdyno tarnavimo laikas	40 metų	Vamzdyno kapitalo kaštų paskirstymui ⁴
Kompresoriaus tarnavimo laikas	25 metai	Kompresoriaus kapitalo kaštų paskirstymui ⁵
Elektros kaina	90 €/MWh	Naudojama suslėgimo elektros sąnaudoms
Įvadinio suslėgimo režimas	20 → 70 bar	Įvadinio suslėgimo režimas modelyje ⁶
Hidraulinės diagnostikos segmento režimas	70 → ≥65 bar	Hidraulinės diagnostikos segmento režimas modelyje
Linijinio suslėgimo energijos intervalas	0,14–0,23 kWh/kg per 150 km	Perdavimo tinklo vamzdynų prielaida ⁷
Linijinio suslėgimo energijos vidurkis	0,185 kWh/kg per 150 km	Naudojama skaičiavimuose
Skirstomojo tipo vamzdyno įvadinio suslėgimo energija	0,63 kWh/kg	Vienkartinis įvadinio suslėgimo poreikis
Perdavimo tipo vamzdyno įvadinio suslėgimo energija	0,63 kWh/kg	Pradinis suslėgimas perdavimo tinklo vamzdynams ⁸
6 colių vamzdyno CAPEX	0,50 mln. €/km	Naudojama vamzdyno CAPEX apskaičiuoti ⁹
20 colių vamzdyno CAPEX	1,6 mln. €/km	Naudojama vamzdyno CAPEX apskaičiuoti ¹⁰
48 colių vamzdyno CAPEX	3,5 mln. €/km	Naudojama vamzdyno CAPEX apskaičiuoti ¹¹

³ HyWay 27: hydrogen transmission using the existing natural gas grid?. 2021.

<https://www.entsog.eu/sites/default/files/2021-11/1.2.%20HyWay27%20Final%20report%20%28UK%29.pdf>

⁴ Patel et al. 2022. The techno-economics potential of hydrogen interconnectors for electrical energy transmission and storage. Journal of Cleaner Production, vol. 335, 130045. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130045>

⁵ IEA Greenhouse Gas R&D Programme. Technical Report 2024-08. Comparative analysis of electrolytic hydrogen production technologies with low-carbon (CCS-abated) hydrogen pathways.

⁶ Khan et al., The Techno-Economics of Hydrogen Pipelines. Transition accelerator technical briefs. Vol. 1, Issue 2. 2021.

⁷ Xie et al. A Review of Hydrogen Storage and Transportation. Energies 2024, 17(16), 4070; <https://doi.org/10.3390/en17164070>. Modifikuota.

⁸ ESMAP. Hydrogen production and the role of storage and transportation related infrastructure. 2024.

⁹ 6" vamzdyno laikomas adaptuota mažo masto skirstomojo vamzdyno prielaida, suderinta su literatūroje matoma CAPEX didėjimo pagal diametrą logika, remiantis 20" ir 48" naujų vandenilio vamzdynų orientyrais.

¹⁰ ACER, European hydrogen markets. 2024 Market Monitoring Report

¹¹ ACER, European hydrogen markets. 2024 Market Monitoring Report

Kompresoriaus CAPEX bazinė kaina pagal galią	980 €/kW	Naudojama kompresorių CAPEX apskaičiuoti ¹²
Kompresoriaus CAPEX koeficientas	1,90	Taikomas bazinei kompresoriaus kainai
Vieno MW bazinis CAPEX	1 862 000 €/MW	Gautas iš 980 €/kW × 1000 × 1,90
Kompresoriaus mastelio eksponentė	0,8335	Taikoma MW pagrindu skaičiuojamam CAPEX ¹³
Kompresoriaus OPEX	4% per metus	Skaičiuojama nuo kompresorių CAPEX ¹⁴
Vamzdyno OPEX	1,5% per metus	Skaičiuojama nuo vamzdyno CAPEX ¹⁵
Metiniai nuostoliai	0,3% per metus	Taikomi pristatomam vandenilio kiekiui ¹⁶
Metų dienų skaičius	365	Metiniam srautui apskaičiuoti
Paros valandų skaičius	24	Valandiniam srautui ir kompresorių galiui apskaičiuoti
6 colių terminalinės stoties paketinis CAPEX	1,5–6 mln. €	Mažesnio masto skirstomojo vamzdyno scenarijui ¹⁷
Segmento įėjimo slėgis	70 bar	Naudojamas hidraulinei diagnostikai
Minimalus segmento išėjimo slėgis	65 bar	Naudojamas hidraulinei diagnostikai
Dujų temperatūra	15 °C	Naudojama slėgio kritimui skaičiuoti
Vidinis šiurkštumas	0,013 mm	Naudojamas trinties koeficientui
Dinaminė klampa	$8,7 \times 10^{-6}$ Pa·s	Naudojama Reynolds skaičiui
Suspaudžiamumo koeficientas (z)	1,0	Supaprastinta prielaida
Maksimalus dujų greitis	35 m/s	Hidraulinis ribinis kriterijus
Vertinamas atstumo intervalas	1–500 km	Vienos krypties atstumų intervalas modelyje
6 colių projektinis srautas	80 000 kg/d	Skirstomojo tipo scenarijus
20 colių projektinis srautas	550 000 kg/d	Perdavimo tinklo scenarijus
48 colių projektinis srautas	2 300 000 kg/d	Perdavimo tinklo scenarijus
Panaudojimo lygis	15–95%	Taikomas visiems diametrams

¹² Carlotta Cosentini. PhD Thesis. Green Hydrogen Production via Electrolysis: From Laboratory-Scale Research to Industrial Applications. 2023-2024.

¹³ Khan et al., The Techno-Economics of Hydrogen Pipelines. Transition accelerator technical briefs. Vol. 1, Issue 2. 2021.

¹⁴ Khan et al., The Techno-Economics of Hydrogen Pipelines. Transition accelerator technical briefs. Vol. 1, Issue 2. 2021.

¹⁵ Di Lullo et al. Large-scale long-distance land-based hydrogen transportation systems: A comparative techno-economic and greenhouse gas emission assessment. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, Issue 83. 2022.

¹⁶ Goita, E.G., Beagle, E.A., Nasta, A.N. et al. Effect of hydrogen leakage on the life cycle climate impacts of hydrogen supply chains. Commun Earth Environ 6, 160 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02141-3>

¹⁷ Mulder, M., Perey, P., & Moraga, J. L. (2019). Outlook for a Dutch Hydrogen Market: Economic Conditions and Scenarios. CEER Policy Papers, No. 5, March 2019. Centre for Energy Economics Research (CEER). Adaptuota mažo masto skirstomojo vamzdyno prielaida.

Suslėgto vandenilio transportavimo vilkikais kaštų skaičiavimų metodika

Modeliu vertinami suslėgto vandenilio diskontuoti transportavimo kaštai vilkikais kaip LCOHT, išreikštas eurais pristatyto vandenilio kilogramui (€/kg). Rodiklis naudojamas alternatyvų palyginimui ir leidžia įvertinti, kaip kaštai priklauso nuo atstumo ir techninių/operacinių apribojimų. Bendra logika: per metus apskaičiuojamos kapitalo sąnaudos (metinės kapitalo sąnaudos) ir veiklos sąnaudos (OPEX), o suma padalinama iš per metus pristatyto vandenilio kiekio.

$$\text{LCOHT} = \frac{C_{\text{metinis}}}{H_{\text{pristatyta, metai}}}$$

Modelio logika remiasi tuo, kad pirmiausia apskaičiuojama vieno transporto ciklo trukmė, tada nustatoma, kiek reisų per dieną gali atlikti pasirinktas vilkikų ir puspriekabių parkas, atsižvelgiant į tris galimus ribojančius veiksnius: vilkikų pajėgumą, puspriekabių pajėgumą ir pakrovimo vietų pajėgumą. Toliau apskaičiuojamas per dieną ir per metus pervežamas bei faktiškai pristatomas vandenilio kiekis, o galiausiai bendros metinės sąnaudos padalinamos iš per metus pristatyto vandenilio kiekio.

Vertinami scenarijai

Modelis automatiškai vertina skirtingus scenarijus, keisdamas atstumą į vieną pusę nuo 1 iki 500 km, vilkikų skaičių – 1, 2, 4, 6, 8 ir 10, kintamą puspriekabių skaičių bei transportavimo technologinį variantą (200 arba 500 bar).

Modelyje vertinamos dvi suslėgto vandenilio technologijos:

- **A: 200 bar, 320 kg H₂**
naudingoji apkrova = 320 kg; pakrovimas 2 h; iškrovimas 1 h; priekabos CAPEX 150 000 €
- **B: 500 bar, 900 kg H₂**
naudingoji apkrova = 900 kg; pakrovimas 4 h; iškrovimas 1,5 h; priekabos CAPEX 550 000 €

Taip pat vertinami trys veikimo režimai:

a) **bazinis 1:1 scenarijus** – vilkikų ir puspriekabių skaičius yra vienodas, o tas pats vilkikas su ta pačia puspriekabe atlieka visą ciklą: pakrovimą, kelionę, iškrovimą ir grįžimą.

b) **drop and hook¹⁸ x1,5 scenarijus** – vilkikų skaičius išlieka fiksuotas, tačiau puspriekabių skaičius didinamas iki 1,5 karto daugiau nei vilkikų. Tokiu atveju vilkikas neprivalo laukti viso pakrovimo proceso su ta pačia puspriekabe, todėl jo darbo laikas išnaudojamas efektyviau.

c) **drop and hook x2 scenarijus** – puspriekabių skaičius padidinamas iki 2 kartų daugiau nei vilkikų, taip dar labiau atskiriant vilkikų ir puspriekabių užimtumą bei leidžiant efektyviau išnaudoti vilkikų darbo laiką.

Drop and hook scenarijuose puspriekabių skaičius apskaičiuojamas taip, kad jis būtų ne mažesnis nei vilkikų skaičius × daugiklis (1,5 arba 2) ir kartu ne mažesnis nei vilkikų skaičius plus viena papildoma puspriekabė.

¹⁸ „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.

Pagrindinė skaičiavimų metodika

Kelionės trukmė

Modelis apskaičiuoja vienos krypties kelionės laiką pagal atstumą. Naudojama tokia greičio logika: jei atstumas iki 50 km, taikomas 65 km/h greitis, kai atstumas didesnis nei 50 km, taikomas 75 km/h greitis. Tokiu būdu įvertinama, kad trumpesniuose maršrutuose greitis gali būti mažesnis dėl miesto aplinkos, sankryžų, šviesoforų ar kitų lokalių apribojimų. Taip pat įtraukiama supaprastinta poilsio taisyklė: jei vienos krypties važiavimo trukmė viršija 5 val., papildomai pridedama 1 val. poilsio. Todėl vienos krypties kelionės trukmė apskaičiuojama kaip važiavimo laikas ir, jei reikia, papildomas poilsio laikas.

Transporto ciklo trukmė

Modelis apskaičiuoja vieno transporto ciklo trukmę. Į ciklą įtraukiama kelionė pirmyn ir atgal, pakrovimo laikas, iškrovimo laikas ir vartų, dokumentų bei saugos procedūrų laikas. Šioje dalyje naudojamos scenarijų specifinės reikšmės.

200 bar, 320 kg scenarijui:

- pakrovimo laikas – 2,0 val.
- iškrovimo laikas – 1,0 val.
- vartų procedūrų laikas – 0,5 val.

500 bar, 900 kg scenarijui:

- pakrovimo laikas – 4,0 val.
- iškrovimo laikas – 1,5 val.
- vartų procedūrų laikas – 0,5 val.

Bazinio scenarijaus atveju tiek vilkiko, tiek puspriekabės ciklo trukmė apima visą kelionę pirmyn ir atgal, pakrovimą, iškrovimą ir vartų procedūras. Tai reiškia, kad vilkikas visą laiką lieka susietas su ta pačia puspriekabe. Tuo tarpu lanksčiajame (*drop and hook*) scenarijuje vilkiko ciklas sutrumpėja, nes pakrovimo laikas neįtraukiamas į vilkiko užimtumo laiką. Tokiu atveju laikoma, kad vilkikas atvyksta paimti jau paruoštos puspriekabės, vyksta į paskirties vietą, ten iškrauna, atlieka vartų procedūras ir grįžta. Tuo tarpu puspriekabės ciklas išlieka ilgesnis, nes į jį įtraukiamas ir pakrovimo laikas. Tokia logika leidžia geriau išnaudoti vilkikus, tačiau reikalauja didesnio puspriekabių skaičiaus.

Maksimalus pristatymų skaičius per dieną

Modelis apskaičiuoja teorinį pristatymų skaičių per dieną pagal tris apribojimus: vilkikų pajėgumą, puspriekabių pajėgumą ir pakrovimo vietų pajėgumą. Pirmiausia nustatoma, kiek reisų per dieną teoriškai galėtų atlikti vilkikai ir puspriekabės pagal jų ciklo trukmę. Toliau apskaičiuojamas pakrovimo vietų poreikis. Pakrovimo vietų skaičius parenkamas automatiškai taip, kad pakrovimas netaptų pagrindiniu sistemos apribojimu ir kad terminalo pajėgumas būtų suderintas su pasirinktu transporto parku. Pakrovimo vietų pajėgumas apskaičiuojamas naudojant operatorių darbo laiką per parą ir pakrovimo trukmę. Kad skaičiavimai būtų nuoseklūs su kompresorinės įrangos dydžio parinkimu, pakrovimo vietų efektyvus darbo laikas papildomai koreguojamas pakrovimo vietų prieinamumo koeficientu.

Toliau modelis apskaičiuoja:

- teorinį tęstinį pristatymų skaičių per dieną,
- sveikąjį pristatymų skaičių diagnostikai,
- pagrindinį sistemos apribojantį veiksnį.

Tolimesniems srautų ir kaštų skaičiavimams naudojamas teorinis tęstinis pristatymų skaičius per dieną, nes jis geriau atspindi vidutinį ilgalaikį sistemos pajėgumą.

Pakrovimo vietų ir terminalų skaičius

Modelyje laikoma, kad vienas terminalas gali turėti ribotą skaičių pakrovimo vietų. Jei reikalingų pakrovimo vietų skaičius viršija vienam terminalui leidžiamą maksimumą, automatiškai pridedamas papildomas terminalas. Tokiu būdu modelis kiekvienam scenarijui nustato kiek pakrovimo vietų reikia ir kiek terminalų reikia, kad tos vietos būtų sutalpintos. Ši logika leidžia ne tik skaičiuoti mobiliųjų priemonių kaštus, bet ir įvertinti, kaip didėjant transporto parkui ar trumpėjant ciklui kinta pakrovimo infrastruktūros poreikis.

Pervežamas suspausto vandenilio kiekis

Vienos puspriekabės naudingoji apkrova priklauso nuo pasirinktos technologijos:

- 200 bar scenarijuje – 320 kg H₂,
- 500 bar scenarijuje – 900 kg H₂.

Todėl per dieną transportuojamas kiekis apskaičiuojamas kaip pristatymų per dieną skaičius padaugintas iš vienos puspriekabės naudingo krovinio. Toliau apskaičiuojamas faktiškai pristatytas kiekis. Modelyje laikoma, kad suslėgto vandenilio tiekimo grandinėje patiriami nedideli produkto nuostoliai, todėl vienam ciklui taikomas 0,1% vandenilio nuostolis. Metiniai kiekiai skaičiuojami atsižvelgiant į 365 kalendorines dienas per metus, mobilios technikos prieinamumą 0,92 ir terminalo prieinamumą 0,92. Todėl metinis pristatytas H₂ kiekis apskaičiuojamas kaip dienos pristatytas kiekis, padaugintas iš 365 ir 0,92.

Transportavimo kaštų skaičiavimas

Mobilios technikos kapitalo kaštai

Skaičiuojami metiniai vilkikų ir puspriekabių kapitalo kaštai, naudojant kapitalo atkūrimo koeficientą (CRF). Vilkiams taikomas 15 metų tarnavimo laikas. Puspriekabėms taikomas dinaminis tarnavimo laikas, kuris negali viršyti 15 metų, tačiau gali būti trumpesnis, jei dėl didelio metinio reisų skaičiaus greičiau išnaudojamas maksimalus leidžiamas puspriekabės ciklų skaičius. Modelyje laikoma, kad viena puspriekabė gali atlikti ne daugiau kaip 12 000 ciklų per visą tarnavimo laikotarpį. Tokiu būdu puspriekabės metiniai kapitalo kaštai priklauso ne tik nuo jos įsigijimo kainos, bet ir nuo realaus naudojimo intensyvumo. Techninės priežiūros kaštai sudaro 4% per metus nuo vilkikų ir puspriekabių bendros vertės. Kuro sąnaudos skaičiuojamos pagal:

- dyzelino kainą – 1,6 €/l,
- dyzelino sąnaudas – 0,35 l/km,
- bendrą metinį nuvažiuotą atstumą.

Metinis nuvažiuotas atstumas nustatomas pagal atstumą pirmyn ir atgal bei metinį reisų skaičių.

Papildomai taikomas 0,25 €/km kelių mokestis. Šie kaštai taip pat apskaičiuojami pagal bendrą metinį nuvažiuotą atstumą.

Vairuotojų ir operatorių darbo kaštai

Vairuotojų darbo kaštai skaičiuojami pagal faktinį vilkiko užimtumo laiką ir 18 €/val. tarifą. Metinės vairuotojų darbo valandos apskaičiuojamos kaip metinis pristatymų skaičius padaugintas iš vilkiko ciklo trukmės. Kadangi *drop and hook* scenarijuje vilkiko ciklas trumpesnis, šiuo režimu vairuotojų darbo kaštai vienam pristatytam kilogramui gali sumažėti. Pakrovimo operatorių darbo kaštai taip pat įtraukiami, taikant 15 €/val. tarifą. Operatorių darbo laikas siejamas su pakrovimo operacija, todėl apskaičiuojamas kaip metinis pristatymų skaičius padaugintas iš pakrovimo trukmės.

Pakrovimo terminalo infrastruktūra

Be mobilios technikos modelis apima ir pakrovimo infrastruktūros kaštus. Kiekvienai pakrovimo vietai apskaičiuojama kompresorinės įrangos investicija pagal tos vietos valandinį srautą. Valandinis srautas nustatomas pagal vienos puspriekabės krovinį ir pakrovimo laiką, o kompresinės galios poreikis apskaičiuojamas naudojant atitinkamo scenarijaus specifines kompresijos elektros sąnaudas. Tuomet vienos pakrovimo vietos CAPEX apskaičiuojamas taikant mastelio funkciją. Taip modelyje išlaikomas masto ekonomijos efektas, kai didesnio galingumo kompresorinės sistemos nebūtinai brangsta tiesiškai.

Bendra terminalo investicija susideda iš dviejų dalių: visų pakrovimo vietų kompresorinės įrangos CAPEX ir fiksuoto terminalo CAPEX kiekvienam terminalui. Be to, terminalui priskiriami metiniai kapitalo kaštai, metiniai techninės priežiūros kaštai ir metiniai fiksuoti terminalo veiklos kaštai.

Elektros sąnaudos kompresijai

Modelyje įtraukiamos ir elektros sąnaudos vandenilio suslėgimui pakrovimo metu. Elektros kaštai skaičiuojami nuo išsiųsto, o ne po nuostolių pristatyto kiekio, nes suslėgimas vyksta prieš transportavimo ciklo nuostolius. Taikomos scenarijams specifinės energijos sąnaudos:

- 200 bar scenarijui – 1,10 kWh/kg,
- 500 bar scenarijui – 2,00 kWh/kg.

Elektros kaina modelyje yra 0,09 €/kWh. Todėl metinės kompresijos elektros sąnaudos apskaičiuojamos taip: *specifinės energijos sąnaudos* × *per metus išsiųstas kiekis* × *elektros kaina*.

Galutinio rodiklio skaičiavimas

Galiausiai sudedami visi metiniai kaštai: vilkikų metiniai kapitalo kaštai, puspriekabių metiniai kapitalo kaštai, mobilios technikos priežiūra, kuro kaštai, kelių mokesčiai, vairuotojų darbo kaštai, operatorių darbo kaštai, terminalo kapitalo kaštai, terminalo techninės priežiūros kaštai, fiksuoti terminalo veiklos kaštai ir elektros sąnaudos kompresijai. Tokiu būdu gaunamos bendros metinės suslėgto vandenilio tiekimo ir transportavimo sąnaudos. Galiausiai jos padalijamos iš per metus faktiškai pristatyto vandenilio kiekio:

$$LCOHT = \text{bendros metinės sąnaudos} / \text{per metus pristatytas H2 kiekis}$$

Rezultate gaunamas galutinis rodiklis – €/kg pristatyto vandenilio.

Pagrindinių parametru suvestinė

Parametras	Reikšmė	Paiškinimas
WACC	9%	Diskonto norma ¹⁹
Mobilios technikos prieinamumas	0,92	Vilkikų ir puspriekabių prieinamumas
Terminalo prieinamumas	0,92	Terminalo veikimo prieinamumas
Veiklos dienos per metus	365	Modelyje taikoma pilniems metams
Paros trukmė	24 val.	Naudojama ciklams
Trumpų atstumų greitis	65 km/h	Kai atstumas ≤ 50 km
Ilgų atstumų greitis	75 km/h	Kai atstumas > 50 km
Greičio ribinis atstumas	50 km	Riba tarp dviejų greičių
Vartų procedūrų laikas	0,5 val.	Dokumentų/saugos/vartų procedūros
Poilsio riba	5 val.	Jei vienos krypties važiavimas ilgesnis
Poilsio trukmė	1 val.	Pridedama prie kelionės
Vairuotojo darbo užmokestis	18 €/val.	Transporto darbo kaštai
Operatoriaus darbo užmokestis	15 €/val.	Pakrovimo darbo kaštai
Operatoriaus darbo laikas	16 val./d.	Pakrovimo vietų pajėgumui
Dyzelino kaina	1,6 €/l	Kuro kaštams
Dyzelino sąnaudos	0,35 l/km	Vilkiko kuro sunaudojimas ²⁰
Kelių mokestis	0,25 €/km	Kelių rinkliavos kaštai
Mobilios technikos priežiūra	4% per metus	Nuo vilkikų ir puspriekabių vertės ²¹
200 bar priekabos CAPEX	150 000	Vienos priekabos kapitalinės investicijos ²²
500 bar priekabos CAPEX	550 000	Vienos priekabos kapitalinės investicijos ^{18,19}
Vilkiko CAPEX	100 000 €	Vieno vilkiko kapitalinės investicijos ²³
Vilkiko tarnavimo laikas	15 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui ²⁴
Maksimalus puspriekabės ciklų skaičius	12 000	Per visą naudojimo laikotarpį ²⁵

¹⁹ Yang and Ogden. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 268 – 286 / Markus Reuß et al. Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System: A Case Study for Germany through 2050. Energies 2021, 14, 3166. <https://doi.org/10.3390/en14113166> - Adaptuota

²⁰ Delgado, O., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2017). Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for the 2020–2030 Time Frame. White paper. Washington, DC: International Council on Clean Transportation (ICCT)

²¹ Department for Energy Security and Net Zero. (2023). Hydrogen Transport and Storage Cost Report. GOV.UK. Modifikuota.

²² Poul D. et al. Model Development and Implementation of Techno-Economic Assessment of Hydrogen Logistics Value Chain: A Case Study of Selected Regions in the Czech Republic. Energies 2025, 18(7), 1741; <https://doi.org/10.3390/en18071741>. Adaptuota.

²³ Basma, H., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2021). Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: Battery electric versus diesel. International Council on Clean Transportation (ICCT).

²⁴ Basma, H., Buysse, C., Zhou, Y., and Rodríguez, F. (2023). Total cost of ownership of alternative powertrain technologies for Class 8 long-haul trucks in the United States. ICCT White Paper.

²⁵ U.S. Department of Energy (2022). Hydrogen Technologies – 2022 Subprogram Overview. FY 2022 Merit Review and Peer Evaluation Report. Adaptuota.

Pakrovimo vietos prieinamumas	0,92	Naudojama pakrovimo vietų efektyviam laikui
Maksimalus pakrovimo vietų skaičius terminale	4	Vieno terminalo talpa
Terminalo fiksuotas CAPEX	400 000 €	Vieno terminalo bazinė investicija ²⁶
Terminalo fiksuotas OPEX	40 000 €/metus	Vieno terminalo metiniai pastovieji kaštai ²⁷
Terminalo priežiūra	4% per metus	Nuo terminalo CAPEX ²⁴
Kompresoriaus kaina	1739 €/kW	Referencinė kompresoriaus investicija ²⁸
Kompresoriaus CAPEX faktorius	1,90	Įrangos ir integracijos koeficientas
Kompresoriaus mastelio koeficientas	0,90	Masto ekonomijos efektui
Elektros kaina	0,09 €/kWh	Kompresijos elektros kaštams

Scenarijų technologiniai parametrai

Parametras	200 bar GH2	500 bar GH2	Paiškinimas
Puspriekabės talpa	320 kg H2	900 kg H2	Vieno reiso krovinys
Pakrovimo laikas	2,0 val.	4,0 val.	Vienam reisui
Iškrovimo laikas	1,0 val.	1,5 val.	Vienam reisui
Specifinės kompresijos sąnaudos	1,10 kWh/kg	2,00 kWh/kg	Elektros poreikis suslėgimui ²⁹ 30
Vandenilio nuostolis per ciklą	0,1%	0,1%	Taikomas pristatytam kiekiui

Vandenilio ir jo išvestinių produktų transportavimas cisternomis

Skysto vandenilio transportavimo cisternomis kaštų skaičiavimas

Ši metodika skirta įvertinti pilną suskystinto vandenilio (LH2) transportavimo grandinės kaštą, išreikštą eurais vienam pristatyto vandenilio kilogramui (€/kg). Modelis apima ne tik patį transportavimą

²⁶ Hecht, E. S., & Pratt, J. W. (2017). Comparison of conventional vs. modular hydrogen refueling stations, and on-site production vs. delivery. Sandia National Laboratories / National Renewable Energy Laboratory. SAND2017-2790R. DOI: 10.2172/1347655. Adaptuota.

²⁷ Nexant et al. (2008). H2A Hydrogen Delivery Infrastructure Analysis Models and Conventional Pathway Options Analysis Results: Interim Report. DE-FG36-05GO15032. U.S. Department of Energy.

²⁸ Parks, G., Boyd, R., Cornish, J., & Remick, R. (2014). Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs. NREL Technical Report

²⁹ Gardiner, M. (2009). DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 9013: Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs. U.S. Department of Energy, Hydrogen and Fuel Cells Program.

³⁰ Abma, D., Atli-Veltin, B., Verbeek, R., & van der Groep, R. (2019). Feasibility study for a zero emission, hydrogen fuel cell powertrain for the Gouwenaar II (TNO Report 2019 R10453). TNO.

sunkvežimiais, bet ir LH2 skystinimo įrenginio kaštus, buferinio saugojimo infrastruktūrą, elektros sąnaudas skystinimui ir produkto nuostolius dėl garavimo (boil-off) efekto.

Pagrindinė logika yra tokia: pirmiausia nustatoma, kiek reisų per dieną gali atlikti pasirinktas vilkikų ir puspriekabių parkas, tada apskaičiuojama, kiek LH2 per metus gali būti išsiūsta ir faktiškai pristatyta po nuostolių, o galiausiai visi metiniai kaštai padalinami iš pristatyto vandenilio kiekio.

Modelis kiekvienam scenarijui apskaičiuoja bendrą rodiklį LCOHT €/kg – bendrus skysto vandenilio tiekimo ir transportavimo diskontuotus kaštus, išreikštus eurais vienam pristatyto vandenilio kilogramui.

Papildomai modelis pateikia tarpinius rodiklius, tokius kaip pristatytas kiekis per dieną, vairuotojų ir operatorių darbo valandos, reikalingas skystinimo įrenginio pajėgumas, reikalinga buferinė saugojimo talpa, garavimo (boil-off) nuostoliai, pakrovimo vietų skaičius bei pagrindinis sistemos apribojimas (vilkikai, puspriekabės ar pakrovimo vietos).

Scenarijai

Modelis automatiškai vertina skirtingus scenarijus, keisdamas atstumą į vieną pusę nuo 1 iki 500 km, vilkikų skaičių: 1, 2, 4, 6, 8 ir 10, puspriekabių skaičių, kur baziniame scenarijuje jų yra tiek pat, kiek ir vilkikų, o *drop and hook* scenarijuje – 1,5 arba 2 kartus daugiau nei vilkikų. Modelyje buvo vertinami du veikimo režimai:

a) bazinis 1:1 scenarijus - tas pats vilkikas su ta pačia puspriekabe atlieka visą ciklą: pakrovimą, kelionę, iškrovimą ir grįžimą.

b) drop and hook scenarijus - vilkikas neprivalo laukti viso pakrovimo proceso su ta pačia puspriekabe, todėl jo darbo laikas išnaudojamas efektyviau, tačiau sistemai reikia daugiau puspriekabių.

Pagrindinė skaičiavimų metodika

Kelionės trukmė

Pirmiausia modelis apskaičiuoja vienos krypties kelionės laiką pagal atstumą. Naudojama tokia greičio logika: jei atstumas iki 50 km, taikomas 65 km/h greitis, kai atstumas didesnis nei 50 km, taikomas 75 km/h greitis. Taip pat įtraukiama supaprastinta poilsio taisyklė, kai vienos krypties važiavimo trukmė viršija 5 val., papildomai pridedama 1 val. poilsio. Tokiu būdu kelionės trukmė susideda iš važiavimo laiko ir galimo poilsio laiko.

Transporto ciklo trukmė

Modelis apskaičiuoja vieno ciklo trukmę. Į ciklą įtraukiama transportavimas pirmyn ir atgal, pakrovimo laikas, iškrovimo laikas bei vartų/dokumentų/saugos procedūrų laikas. Šioje dalyje naudojamos šios reikšmės:

- pakrovimas: 1,5 val.
- iškrovimas: 1,0 val.
- vartų procedūros: 0,5 val.

Baziniame scenarijuje vilkiko ciklas apima: visą kelionę pirmyn–atgal, pakrovimą, iškrovimą bei dokumentų procedūras. *Drop and hook* scenarijuje vilkiko ciklas trumpesnis, nes pakrovimo dalis neįtraukiama į vilkiko užimtumo laiką, tačiau lieka puspriekabės cikle.

Maksimalus pristatymų skaičius per dieną

Modelis apskaičiuoja teorinį pristatymų skaičių per dieną pagal tris apribojimus: vilkikų pajėgumą, puspriekabių pajėgumą ir pakrovimo vietų pajėgumą. Pakrovimo vietų skaičius, jei reikia, parenkamas automatiškai taip, kad sistema galėtų aptarnauti turimą transporto parką. Toliau apskaičiuojama:

- teorinis tęstinis pristatymų skaičius per dieną;
- sveikasis pristatymų skaičius diagnostikai;

- pagrindinis apribojantis veiksnys (*bottleneck*).

Modelyje tolesniems srautų ir kaštų skaičiavimams naudojamas teorinis tęstinis pristatymų skaičius per dieną, kuris atspindi vidutinį ilgalaikį sistemos pajėgumą.

Pervežamas suskystinto vandenilio kiekis

Vienos LH2 puspriekabės naudingoji apkrova modelyje yra 4300 kg LH2, todėl per dieną pristatomas kiekis apskaičiuojamas taip:

$$\text{dienos kiekis} = \text{pristatymų per dieną skaičius} \times 4300 \text{ kg}$$

Metinis kiekis skaičiuojamas įvertinus 365 dienas per metus, mobilios technikos prieinamumą (0,92) ir terminalo prieinamumą (0,95). Efektyvus sistemos prieinamumas laikomas lygiu mažesnei reikšmei: *efektyvus prieinamumas* = $\min(0,92; 0,95) = 0,92$, todėl metinis pristatomas LH2 kiekis = $\text{dienos kiekis} \times 365 \times 0,92$.

Suskystinto vandenilio nuostolių skaičiavimas

Skysto vandenilio atveju modelyje įtraukiami nuostoliai dėl garavimo (boil-off). Tai reiškia, kad dalis produkto prarandama dėl garavimo per laiką, kol vandenilis yra skystoje būsenoje. Modelyje laikoma, kad garavimo norma yra 0,18% per dieną. Nuostoliai priklauso ne tik nuo atstumo, bet ir nuo bendro laiko, kiek LH2 išlieka paveikioje būsenoje. Šis laikas susideda iš vidutinio buvimo buferinėje talpoje laiko (3,0 val.), pakrovimo laiko (1,5 val.), vienos krypties kelionės laiko, iškrovimo laiko (1,0 val.) ir vartų procedūrų laiko (0,5 val.). Todėl:

$$\text{paveikus laikas} = \text{buferinės talpyklos laikas} + \text{pakrovimas} + \text{transportavimo laikas} + \text{iškrovimas} + \text{vartų procedūrų laikas}$$

Pagal šį laiką apskaičiuojama garavimo nuostolių dalis, o tada nustatomas faktiškai pristatytas LH2 kiekis per dieną ir per metus.

Transportavimo kaštų skaičiavimas

Mobilios technikos kapitalo kaštai

Skaičiuojami metiniai vilkikų ir puspriekabių kapitalo kaštai, naudojant kapitalo atkūrimo koeficientą (CRF), priklausantį nuo:

- WACC = 7,0 %;
- vilkiko tarnavimo laiko = 15 metų;
- puspriekabės tarnavimo laiko = 12 metų.

Mobilios technikos priežiūra

Techninės priežiūros kaštai sudaro 4% per metus nuo vilkikų ir puspriekabių vertės.

Kuro kaštai

Kuro sąnaudos skaičiuojamos pagal:

- dyzelino kainą = 1,6 €/l;
- dyzelino sąnaudas = 0,35 l/km;
- bendrą metinį nuvažiuotą atstumą.

Kelių mokesčiai

Taikomas 0,25 €/km kelių mokestis.

Vairuotojų darbo kaštai

Vairuotojų darbo kaštai skaičiuojami pagal faktinį vilkiko ciklo laiką 18 €/val. Modelyje vairuotojų darbo valandos dauginamos iš metinio pristatymų skaičiaus.

Operatorių darbo kaštai

Pakrovimo operatorių darbo kaštai taip pat įtraukiami 18 €/val. Operatoriaus darbo laikas siejamas su pakrovimo operacija.

Skystinimo ir buferinio saugojimo infrastruktūra

Be transportavimo dalies modelis apima ir LH2 paruošimo infrastruktūrą.

Skystinimo įrenginio pajėgumas

Modelyje skystinimo įrenginys parenkamas pagal reikalingą dienos LH2 kiekį. Projektinis skystinimo pajėgumas apskaičiuojamas įvertinant: faktinį dienos transportuojamą kiekį, 0,90 panaudojimo koeficientą bei 1,20 rezervinį koeficientą. Todėl:

įrengtas suskystinimo įrenginio pajėgumas = rezervinis koeficientas × per dieną transportuojamas kiekis (kg/d) / panaudojimo koeficientas.

Naudojami šie parametrai:

- referencinis pajėgumas: 27 000 kg/dieną
- referencinis CAPEX: 130 000 000 €
- mastelio koeficientas: 0,90
- tarnavimo laikas: 40 metų
- priežiūra: 4 proc. per metus

Skystinimo įrenginio CAPEX apskaičiuojamas taikant mastelio funkciją, todėl didesnio pajėgumo įrenginiai išlaiko masto ekonomijos efektą.

Buferinė saugykla

Modelyje taip pat apskaičiuojama reikalinga LH2 buferinė talpa. Daroma prielaida, kad įrengta buferio talpa turi atitikti 6 val. projektinį rezervą nuo įrengto skystinimo pajėgumo, todėl:

Įrengta buferinė talpa = skystinimo įrenginio įrengtas pajėgumas × 6/24

Naudojami šie parametrai:

- referencinė buferio talpa: 7500 kg
- referencinis CAPEX: 375 000 €
- mastelio koeficientas: 0,70
- tarnavimo laikas: 30 metų
- priežiūra: 3 proc. per metus

Buferinės saugyklos CAPEX taip pat apskaičiuojamas pagal mastelio funkciją.

Elektros sąnaudos LH2 skystinimui

Modelyje LH2 skystinimo elektros sąnaudos apskaičiuojamos pagal:

- specifines energijos sąnaudas: 10 kWh/kg,
- elektros kainą: 0,09 €/kWh.

Todėl *metinės elektros sąnaudos = 10 × per metus transportuojamas kiekis × 0,09.*

Svarbu tai, kad elektros sąnaudos skaičiuojamos nuo išsiųsto, o ne po pristatyto kiekio su nuostoliais, nes skystinimas atliekamas prieš transportavimo ir garavimo nuostolius.

Galutinio rodiklio skaičiavimas

Galiausiai sudedami visi metiniai kaštai: mobilios technikos kapitalo kaštai, mobilios technikos priežiūra, kuras, kelių mokesčiai, vairuotojų darbo kaštai, operatorių darbo kaštai, skystinimo įrenginio metiniai kaštai, buferinės saugyklos metiniai kaštai ir elektros sąnaudos skystinimui (parametrų suvestinė pateikta lentelėje). Tokiu būdu gaunami bendri metiniai LH2 tiekimo ir transportavimo grandinės kaštai. Galiausiai šie kaštai padalijami iš faktiškai pristatyto LH2 kiekio per metus:

$LCOHT = \text{bendros metinės sąnaudos} / \text{per metus faktiškai pristatytas kiekis}$ ir gaunamas galutinis rodiklis €/kg pristatyto vandenilio.

Pagrindinių parametrų suvestinė

Parametras	Reikšmė	Paaškinimas
WACC	7%	Diskonto norma
Mobilios technikos prieinamumas	0,92	Vilkikų ir puspriekabių prieinamumas
Terminalo prieinamumas	0,95	Terminalo veikimo prieinamumas
Veiklos dienos per metus	365	Modelyje laikoma pilnų metų veikla
Trumpų atstumų greitis	65 km/h	Kai atstumas ≤ 50 km
Ilgų atstumų greitis	75 km/h	Kai atstumas > 50 km
Greičio ribinis atstumas	50 km	Riba tarp dviejų greičių
Vartų procedūrų laikas	0,5 val.	Dokumentų / saugos / vartų procedūros
Poilsio riba	5 val.	Jei vienos krypties važiavimas ilgesnis
Poilsio trukmė	1 val.	Pridedama prie kelionės
Vairuotojo darbo kaina	18 €/val.	Transporto darbo kaštai
Operatoriaus darbo kaina	18 €/val.	Pakrovimo darbo kaštai
Operatoriaus darbo laikas	24 val./d.	Pakrovimo vietų pajėgumui
Dyzelino kaina	1,6 €/l	Kuro kaštams
Dyzelino sąnaudos	0,35 l/km	Vilkiko kuro sunaudojimas
Kelių mokestis	0,25 €/km	Kelių rinkliavos kaštai
Vilkiko CAPEX	100 000 €	Vieno vilkiko investicija ^{31 32}
Vilkiko tarnavimo laikas	15 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Mobilios technikos priežiūra	4% per metus	Nuo vilkikų ir puspriekabių vertės
Puspriekabės talpa	4300 kg LH2	Vieno reiso krovinys
Puspriekabės CAPEX	860 000 €	Vienos LH2 puspriekabės investicija ³³
Puspriekabės tarnavimo laikas	12 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Pakrovimo laikas	1,5 val.	Vienam reisui
Iškrovimo laikas	1,0 val.	Vienam reisui

³¹ Basma, H., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2021). Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: Battery electric versus diesel. International Council on Clean Transportation (ICCT).

³² Reuß, M., Grube, T., Robinius, M., Preuster, P., Wasserscheid, P., & Stolten, D. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. Applied Energy, 200, 290–302.

³³ Colbertaldo, P., et al. (2020). Clean mobility infrastructure and sector integration in a long-term sustainability perspective.

Garavimo (boil-off) norma	0,18% per dieną	LH2 nuostolių norma ³⁴
Vidutinis buvimo buferyje laikas	3,0 val.	Įtraukiama į garavimo rizikos laiką
Specifinės energijos sąnaudos vandenilio skystinimui	10 kWh/kg	Elektros poreikis skystinimui ³⁵ ³⁶
Elektros kaina	0,09 €/kWh	Naudojama skystinimo kaštams

Skystinimo ir buferio parametrų suvestinė

Parametras	Reikšmė	Paiškinimas
Skystinimo referencinis pajėgumas	27 000 kg/dieną ³⁷	Naudojamas skystinimo CAPEX funkcijai
Skystinimo ir terminalo referencinis CAPEX	130 000 000 €	Referencinio įrenginio investicija ³⁸
Skystinimo mastelio koeficientas	0,90	CAPEX mastelio funkcijai
Skystinimo tarnavimo laikas	40 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui ³⁹
Skystinimo priežiūra	4% per metus	Nuo skystinimo CAPEX ⁴⁰
Skystinimo panaudojimas	0,90	Projektiniam pajėgumui apskaičiuoti
Rezervinis koeficientas	1,20	Projektiniam pajėgumui apskaičiuoti
Buferio projektinė trukmė	6 val.	Įrengtos buferio talpos prielaidai
Buferio referencinė talpa	7 500 kg	Naudojama buferio CAPEX funkcijai
Buferio referencinis CAPEX	375 000 €	Referencinės talpos investicija ⁴¹
Buferio mastelio koeficientas	0,70	Buferio CAPEX mastelio funkcijai
Buferio tarnavimo laikas	30 metai	Kapitalo kaštų paskirstymui ⁴²
Buferio priežiūra	3% per metus	Nuo buferio CAPEX ⁴³

³⁴ Alekseev, A. et al. Hydrogen liquefaction, storage, transport and application of liquid hydrogen. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), TransHyDE white paper, 2023. DOI: 10.5445/IR/1000168281

³⁵ DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs. 2019.

³⁶ Cardella, U., Decker, L., Klein, H., Hake, J.-F., & Stolten, D. (2017). Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction. International Journal of Hydrogen Energy.

³⁷ DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs. 2019.

³⁸ Ahluwalia, R. K. (2023). System Level Analysis of Hydrogen Storage Options. U.S. Department of Energy Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting.

³⁹ DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs. 2019.

⁴⁰ Ideality. Integrated Design for Demonstration of Efficient Liquefaction of Hydrogen (IDEALHY). Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) 2013.

⁴¹ Burke, A. F., & Matorini, M. (2024). Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Costs. Adaptuota.

⁴² Ahluwalia, R. K., Papadimas, D. D., Peng, J.-K., & Roh, H. S. (2019). System Level Analysis of Hydrogen Storage Options. U.S. Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program, 2019 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Project ID ST001

⁴³ Houchins, C., Prosser, J. H., Graham, M., Watts, Z., James, B. D. 2024 m. gegužė. Hydrogen Storage Cost Analysis. Project ID: ST235, Award No. DE-EE0009630. DOE Hydrogen Program 2024 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting.

Metanolio transportavimo cisternomis kaštų skaičiavimas

Ši metodika skirta įvertinti diskontuotus metanolio pilnos tiekimo grandinės kaštus, išreikštus euraiis vienam pristatytam kilogramui vandenilio ekvivalento (€/kg H₂eq). Modelis apima ne tik patį transportavimą sunkvežimiais, bet ir metanolio sintezę, CO₂ sąnaudas, elektros sąnaudas bei laikino saugojimo infrastruktūrą. Modelis apskaičiuoja, kiek metanolio per metus galima fiziškai pervežti tam tikru vilkikų ir puspriekabių skaičiumi, kokie būtų visi metiniai kaštai, ir tuomet tuos metinius kaštus padalina iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio. Modelis kiekvienam scenarijui skaičiuoja du pagrindinius rodiklius: tik transportavimo kaštus ir bendrus kaštus, t. y. transportavimas + konversija + saugojimas. Modelis automatiškai skaičiuoja kelis scenarijus, keisdamas atstumą į vieną pusę nuo 1 iki 500 km, vilkikų skaičių: 1, 2, 4, 6, 8 ir 10, puspriekabių skaičių, kur baziniame scenarijuje yra 1:1 santykis su vilkikais, o *drop and hook* scenarijuje – puspriekabių daugiau nei vilkikų (1,5 karto arba 2 kartus daugiau). Modelyje buvo vertinami du veikimo režimai:

a) bazinis 1:1 scenarijus - vilkikas su ta pačia puspriekabe atvažiuoja, pasikrauna, išvažiuoja, išsikrauna ir grįžta.

b) drop and hook - vilkikas dalį laiko negaišta laukdamas pakrovimo, nes puspriekabės gali būti atkabintos ir keičiamos. Taip geriau išnaudojamas vilkiko laikas, bet reikia daugiau puspriekabių.

Pagrindinė skaičiavimų metodika

Kelionės trukmė

Pirmiausia modelis apskaičiuoja vienos kelionės laiką pagal atstumą: jei atstumas iki 50 km, naudojamas 65 km/h greitis ir jei atstumas didesnis nei 50 km, naudojamas 75 km/h greitis.

Taip pat įvertinama: važiavimo trukmė į vieną pusę, važiavimo trukmė pirmyn–atgal, vartų bei dokumentų operacijų laikas, pakrovimo laikas, iškrovimo laikas ir poilsio laikas vairuotojui, jei vienos atkarpos važiavimo laikas viršija 5 valandas. Jeigu vienos krypties važiavimas trunka ilgiau nei 5 val., papildomai pridedama 1 val. poilsio. Remiantis šiais rodikliais apskaičiuojamas vieno transporto ciklo laikas, t.y. kiek trunka pilnas vieno transporto vieneto ciklas.

Baziniame scenarijuje į ciklą įeina: važiavimas pirmyn ir atgal, pakrovimas, iškrovimas ir kitos procedūros. *Drop and hook* scenarijuje vilkiko ciklas trumpesnis, nes dalis pakrovimo laiko perkeliama į puspriekabių valdymą, todėl vilkikas gali atlikti daugiau reisų per dieną, bet puspriekabių reikia taip pat daugiau.

Maksimalus galimų reisų skaičius per dieną

Modelis įvertina, kiek reisų per dieną sistema gali realiai atlikti. Čia tikrinami trys apribojimai: vilkikų pajėgumas, puspriekabių pajėgumas ir pakrovimo vietų pajėgumas. Modelis parenka tiek pakrovimo vietų, kiek reikia, kad jos netaptų pertekliniu apribojimu. Tada apskaičiuojama:

- nepertraukiamų teorinių pristatymų skaičius per parą;
- sveikasis pristatymų skaičius per parą;
- kuris elementas tampa ribojančia vieta (*bottleneck*): vilkikai, puspriekabės ar pakrovimo vietos.

Tolimesniems metiniams srautams kode naudojama teorinė tęstinė reikšmė.

Metinis pervežamo metanolio kiekis

Vienos puspriekabės naudingoji apkrova yra 26 000 kg metanolio, todėl per dieną išvežamas metanolio kiekis apskaičiuojamas taip: $dienos\ kiekis = reisų\ per\ dieną\ skaičius \times 26\ 000\ kg$.

Metinis kiekis gaunamas įvertinus: 365 darbo dienas per metus, mobilios technikos prieinamumą (koef. 0,92) ir terminalo prieinamumą (koef. 0,95). Efektyvus sistemos prieinamumas laikomas lygiu mažesnei iš šių

reikšmių, t. y.: $efektyvus\ prieinamumas = \min(0,92; 0,95) = 0,92$. Galiausiai metinis išsiunčiamas kiekis: $metinis\ išsiunčiamas\ kiekis = dienos\ kiekis \times 365 \times 0,92$.

Nuostoliai tiekimo grandinėje

Modelis daro prielaidą, kad dalis produkto prarandama:

- terminale: 0,1 %;
- transportavimo metu: 0,7 %.

Remiantis šiais rodikliais, faktiškai pristatytas metanolio kiekis yra: $pristatytas\ kiekis = išsiųstas\ kiekis \times (1 - 0,003) \times (1 - 0,007)$. Būtent šis jau sumažintas kiekis naudojamas galutiniam €/kg H₂eq rodikliui skaičiuoti.

Perskaičiavimas iš metanolio į vandenilio ekvivalentą

Kadangi skaičiavimų galutinis tikslas yra palyginti skirtingas vandenilio tiekimo grandines, metanolio kiekis perskaičiuojamas į vandenilio ekvivalentą. Modelyje naudojama stoichiometrinė⁴⁴ prielaida: 1 kg H₂eq atitinka 5,3333 kg MeOH arba atvirkščiai: 1 kg MeOH = 1 / 5,3333 kg H₂eq.

Šis santykis gautas iš molinių masių: $32 / 6 = 5,3333$, todėl $kg\ H_2eq = kg\ MeOH / 5,3333$.

Transportavimo kaštų skaičiavimas

Mobilios technikos kapitalo kaštai

Apskaičiuojami metiniai vilkikų ir puspriekabių kapitalo kaštai, naudojant kapitalo atkūrimo koeficientą (CRF), kuris priklauso nuo:

- WACC = 7,0 %;
- vilkiko tarnavimo laiko = 15 metų;
- puspriekabės tarnavimo laiko = 12 metų.

Taip vienkartinės investicijos paverčiamos į metines sąnaudas.

Techninės priežiūros kaštai

Techninei priežiūrai taikoma 4 % per metus nuo vilkikų ir puspriekabių įsigijimo vertės.

Kuro kaštai

Dyzelino kaštai apskaičiuojami pagal:

- dyzelino kainą = 1,6 €/l;
- sąnaudas = 0,35 l/km;
- bendrą nuvažiuotą kelią per metus.

Kelių mokesčiai

Skaičiuojama 0,25 €/km.

Darbo kaštai

Įtraukiami vairuotojo darbo kaštai (18 €/val.) ir operatoriaus darbo kaštai (18 €/val.). Vairuotojo valandos siejamos su viso vilkiko ciklo trukme, o operatoriaus valandos – su pakrovimo operacija.

Konversijos ir saugojimo kaštų skaičiavimas

Ši dalis apima ne transportą, o pačio metanolio pagaminimo ir laikymo kaštus.

⁴⁴ Stoichiometrinė reakcija – reakcija, kur reagentai yra tiksliai tokiomis proporcijomis, kokių reikalauja lygtis

Gamyklos masto parinkimas

Modelis metanolio gamyklos dydį priskiria vienai iš trijų grupių:

- A: iki 30 000 t/metus
- B: nuo 30 000 iki 250 000 t/metus
- C: daugiau nei 250 000 t/metus

Kiekvienai grupei nustatomas atskiras CAPEX intensyvumas, atskiras referencinis pajėgumas ir atskiras mastelio ekonomijos laipsnis. Tai leidžia atsižvelgti į tai, kad didesnės gamyklos paprastai yra santykinai pigesnės vienam produkcijos vienetui.

Sintezės kapitalo kaštai

Sintezės įrenginio CAPEX skaičiuojamas ne tiesiškai, o naudojant mastelio formulę:

$$CAPEX = CAPEX_{ref} \times \left(\frac{Q}{Q_{ref}} \right)^{exp}$$

kur:

- Q – faktinis metinis metanolio kiekis,
- Q_{ref} – referencinis gamyklos dydis,
- exp – mastelio koeficientas.

Tai reiškia, kad didėjant gamybos mastui kaštai auga lėčiau nei proporcingai. Galiausiai šis CAPEX paverčiamas į metinius kaštus, naudojant WACC = 6,5 % ir sintezės įrenginio laiką = 20 metų. Papildomai pridedama 4 % per metus fiksuotų eksploatacinių kaštų nuo sintezės CAPEX.

Elektros kaštai sintezei

Priimta, kad metanolio sintezė sunaudoja 3,33 kWh/kg H₂eq. Elektros kaina modelyje naudojama 0,09 €/kWh, todėl *metinės elektros sąnaudos* = 3,33 × metinis H₂eq kiekis × 0,09.

CO₂ kaštai

Modelyje laikoma, kad vienai tonai metanolio reikia 1,375 t CO₂/t MeOH, ši reikšmė gaunama iš santykio: 44 / 32 = 1,375. Naudojama CO₂ kaina 100 €/t CO₂, todėl *metinės CO₂ sąnaudos* = metinis MeOH kiekis × 1,375 × 100.

Saugojimo infrastruktūra

Saugojimo CAPEX priklauso nuo laikymo talpos, kurios vertė yra 300 €/t talpos. Saugojimo talpa nustatoma kaip didesnė iš dviejų alternatyvių reikšmių: vieno sunkvežimio krovinio arba vienos dienos vidutinio metanolio srauto. Tai reiškia, kad sandėliavimas turi būti pakankamas bent vienam pilnam krovinio vienetui arba vienos dienos srautui. Saugojimo investicija metiniais kaštais paverčiama taikant WACC = 7,0 proc. ir tarnavimo laiką = 30 metų. Papildomai pridedama 4 proc. per metus saugojimo fiksuotų eksploatacinių kaštų.

Galutinio rodiklio skaičiavimas

Galiausiai sudedami visi metiniai transportavimo kaštai ir visi metiniai konversijos ir saugojimo kaštai. Tokiu būdu gaunami bendri metiniai tiekimo grandinės kaštai (pagrindinių parametrų suvestinė pateikta lentelėje). Galiausiai jie padalijami iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio: *LCOHT* = bendri metiniai kaštai / pristatytas kg H₂eq per metus ir gaunamas galutinis rodiklis €/kg H₂eq pristatyto produkto.

Pagrindinių parametru suvestinė

Parametras	Reikšmė	Paiškinimas
WACC	7%	Diskonto norma
Elektros kaina	0,09 €/kWh	Naudojama metanolio sintezei
CO2 kaina	100 €/t CO2	Naudojama sintezės kaštams ⁴⁵
Terminalo nuostoliai	0,1%	Praradimai terminale
Transporto nuostoliai	0,7%	Praradimai pervežimo metu ⁴⁶
Eksploataciniai kaštai OPEX	4% per metus	Fiksuoti eksploataciniai kaštai nuo CAPEX
Gamybos bloko CAPEX	A: 700 €/tpy B: 320 €/tpy C: 220 €/tpy	Kapitalinės investicijos pagal gamybos masto grupę ^{47 48}
Sintezės įrenginio tarnavimo laikas	20 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui ⁴⁹
Saugojimo įrenginio CAPEX intensyvumas	300 €/t talpos	Laikino saugojimo infrastruktūra ⁵⁰
Saugojimo įrenginio tarnavimo laikas	30 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui ⁵¹
Darbo dienos per metus	365	Modelyje laikoma visų metų veikla
Paros trukmė	24 val.	Naudojama ciklams
Mobilios technikos prieinamumas	0,92	Vilkikų / puspriekabių prieinamumas
Terminalo prieinamumas	0,95	Terminalo veikimo prieinamumas
Trumpų atstumų greitis	65 km/h	Kai atstumas ≤ 50 km
Ilgų atstumų greitis	75 km/h	Kai atstumas > 50 km
Greičio ribinis atstumas	50 km	Riba tarp dviejų greičių
Vartų procedūrų laikas	0,5 val.	Įvažiavimas / formalumai
Poilsio riba	5 val.	Jei vienos krypties važiavimas ilgesnis
Poilsio trukmė	1 val.	Pridedama prie kelionės
Dyzelino kaina	1,6 €/l	Kuro kaštams
Dyzelino sąnaudos	0,35 l/km	Vilkiko kuro sunaudojimas
Kelių mokestis	0,25 €/km	Kelių mokesčių kaštai
Vilkiko CAPEX	100 000 €	Vieno vilkiko investicija ⁵²

⁴⁵ International Energy Agency (IEA). 2021. Is carbon capture too expensive?

⁴⁶ Zomer, G., Finner, S., Harmsen, J., Vredeveldt, L., & van Lieshout, P. (2020). Green Maritime Methanol: Operation aspects and the fuel supply chain (TNO Report TNO 2020 R11105)

⁴⁷ International PtX Hub. 2023. A geothermal approach to Power-to-X in El Salvador, Chile, and Kenya. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

⁴⁸ Mucci, Simone; Mitsos, Alexander; Bongartz, Dominik. 2023. Cost-Optimal Power-to-Methanol: Flexible Operation or Intermediate Storage? arXiv preprint arXiv:2305.18338

⁴⁹ Mucci, Simone; Mitsos, Alexander; Bongartz, Dominik. 2023. Cost-Optimal Power-to-Methanol: Flexible Operation or Intermediate Storage? arXiv preprint arXiv:2305.18338

⁵⁰ Brown, T., & Hampf, J. (2023). Ultra-long-duration energy storage anywhere: methanol with carbon cycling. Engineers Ireland webinar. Perskaičiuota.

⁵¹ Omar, A. R. A. (2025). Cost-Optimization and Feasibility of e-Methanol Production in Lysekil. Chalmers University of Technology.

⁵² Basma, H., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2021). Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: Battery electric versus diesel. International Council on Clean Transportation (ICCT). Šiuose dokumentuose nurodomas vilkiko capex, ar jis teisingas?

Vilkiko tarnavimo laikas	15 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui ⁵³
Mobilios technikos priežiūra	4% per metus	Nuo vilkikų ir puspriekabių vertės ⁵⁴
Vairuotojo darbo kaina	18 €/val.	Transporto darbo kaštai
Operatoriaus darbo kaina	18 €/val.	Pakrovimo darbo kaštai
Operatoriaus darbo laikas	24 val./d.	Naudojama pakrovimo vietų pajėgumui
Puspriekabės talpa	26 000 kg	Vieno reiso kroviny
Puspriekabės CAPEX	90 000 €	Vienos puspriekabės investicija ⁵⁵
Puspriekabės tarnavimo laikas	12 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Pakrovimo laikas	1,0 val.	Vienam reisui
Iškrovimo laikas	0,8 val.	Vienam reisui
MeOH/H₂eq santykis	5,333 kg MeOH/kg H ₂ eq	Perskaičiavimui į H ₂ eq
CO₂ poreikis	1,375 t CO ₂ /t	Stoichiometrinis santykis ⁵⁶
Elektros poreikis sintezei	3,33 kWh/kg H ₂ eq	Sintezės energijos sąnaudos ⁵⁷

Šis modelis pirmiausia nustato, kiek reisų per dieną gali atlikti pasirinktas vilkikų ir puspriekabių parkas tam tikru atstumu. Remiantis gautu rezultatu apskaičiuoja, kiek metanolio per metus galima išsiųsti ir kiek jo faktiškai pristatoma po nuostolių. Po to sudedami visi svarbiausi metiniai kaštai: transporto priemonių kapitalas, priežiūra, kuras, kelių mokesčiai, darbo kaštai, metanolio sintezės įrenginiai, elektros sąnaudos, CO₂ sąnaudos ir saugojimo infrastruktūra. Galiausiai šie bendri metiniai kaštai padalinami iš pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio, todėl gaunamas vienas aiškus rodiklis, rodantis kiek kainuoja pristatyti 1 kg H₂eq naudojant metanolio transportavimo grandinę.

Amoniako transportavimo cisternomis kaštų skaičiavimas

Ši metodika skirta įvertinti diskontuotus amoniako pilnos tiekimo grandinės kaštus, išreikštus eurai vienam pristatytam kilogramui vandenilio ekvivalento (€/kg H₂eq). Modelis apima ne tik patį transportavimą sunkvežimiais, bet ir amoniako sintezę, elektros sąnaudas, laikino saugojimo infrastruktūrą bei produkto nuostolius tiekimo grandinėje. Pirmiausia modelis apskaičiuojama, kiek amoniako per metus gali būti fiziškai pervežta pasirinktu transporto parku, tada suskaičiuojami visi metiniai kaštai, o galiausiai jie padalijami iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio. Modelis kiekvienam scenarijui apskaičiuoja du pagrindinius rodiklius: tik transportavimo kaštus ir bendrus kaštus, t. y. transportavimas + konversija + saugojimas. Rezultatai pateikiami ne vienam kilogramui amoniako, o vienam kilogramui pristatyto vandenilio ekvivalento, kad būtų galima palyginti amoniako grandinę su kitomis vandenilio transportavimo alternatyvomis. Modelis automatiškai vertina daug scenarijų, keisdamas atstumą į vieną pusę nuo 1 iki 500 km, vilkikų skaičių: 1, 2, 4, 6, 8 ir 10, puspriekabių skaičių, kuris baziniame scenarijuje apibrėžia, kad puspriekabių yra tiek pat, kiek vilkikų, o *drop and hook* scenarijuje – puspriekabių 1,5 arba 2 kartus daugiau nei vilkikų.

Buvo nagrinėti du logistiniai scenarijai:

a) bazinis 1:1 scenarijus - tas pats vilkikas su ta pačia puspriekabe atlieka pilną ciklą: pakrovimas, nuvežimas, iškrovimas ir grįžimas.

⁵³ Remiantis bendrosiomis sunkiojo kelių transporto kapitalo paskirstymo prielaidomis.

⁵⁴ Department for Energy Security and Net Zero. (2023). Hydrogen Transport and Storage Cost Report. GOV.UK. Modifikuota.

⁵⁵ Rinkos apžvalgos informacija - autoline.info

⁵⁶ Fasihi, M., et al. (2024). Global production potential of green methanol based on renewable electricity and carbon dioxide. Energy & Environmental Science.

⁵⁷ Nieminen, H., Laari, A., & Koironen, T. (2019). CO₂ Hydrogenation to Methanol by a Liquid-Phase Process with Alcoholic Solvents: A Techno-Economic Analysis. Processes, 7(7), 405

b) drop and hook - vilkikas neprivalo laukti visų operacijų su ta pačia puspriekabe, puspriekabės gali būti atjungiamos ir pakeičiamos. Tai pagerina vilkiko panaudojimą, tačiau reikalauja didesnio puspriekabių skaičiaus.

Pagrindinė skaičiavimų metodika

Kelionės trukmė

Pirmiausia apskaičiuojama vienos kelionės trukmė pagal atstumą: jei atstumas iki 50 km, taikomas 65 km/h greitis, o jei atstumas didesnis nei 50 km, taikomas 75 km/h greitis. Toliau įvertinama važiavimo trukmė į vieną pusę, važiavimo trukmė pirmyn–atgal, įvažiavimo (vartų) operacijų laikas, pakrovimo laikas, iškrovimo laikas ir vairuotojo poilsio laikas, jei vienos krypties kelionė viršija 5 valandas. Jei vienos krypties važiavimas trunka ilgiau nei 5 val., papildomai pridedama 1 val. poilsio.

Vieno transporto ciklo laikas

Modelis nustato, kiek trunka pilnas vieno transporto ciklas. Baziniame scenarijuje į ciklą įtraukiama važiavimas pirmyn ir atgal, pakrovimas, iškrovimas ir vartų procedūros. Tuo tarpu *drop and hook* scenarijuje vilkiko ciklas sutrumpėja, nes dalis pakrovimo logikos perkeliama į puspriekabių valdymą, dėl to vilkikas gali atlikti daugiau reisų, tačiau šiame scenarijuje reikia daugiau puspriekabių.

Maksimalus pristatymų skaičius per dieną

Modelis apskaičiuoja, kiek reisų per dieną sistema gali realiai atlikti. Tam tikrinami trys galimi ribojantys veiksniai: vilkikų pajėgumas, puspriekabių pajėgumas, pakrovimo vietų pajėgumas. Jei pakrovimo vietų skaičius nėra nustatytas rankiniu būdu, modelis jas parenka automatiškai taip, kad pakrovimas netaptų nepagrįstai silpnu sistemos tašku. Galiausiai apskaičiuojama:

- teorinis pristatymų skaičius per dieną;
- sveikasis pristatymų skaičius per dieną;
- kuri sistemos dalis tampa pagrindiniu apribojimu (*bottleneck*).

Tolimesniems metiniams srautams kode naudojama teorinė tęstinė reikšmė.

Metinis pervežamo amoniako kiekis

Vienos puspriekabės naudingoji apkrova yra 23 000 kg amoniako, todėl per dieną išvežamas amoniako kiekis apskaičiuojamas taip: $dienos\ kiekis = pristatymų\ per\ dieną\ skaičius \times 23\ 000\ kg$. Metinis kiekis nustatomas įvertinant: 365 dienas per metus, mobilios technikos prieinamumą (0,92) ir terminalo prieinamumą (0,95). Efektyvus sistemos prieinamumas laikomas lygiu mažesnei reikšmei: $efektyvus\ prieinamumas = \min(0,92; 0,95) = 0,92$, todėl $metinis\ išsiunčiamas\ amoniako\ kiekis = dienos\ kiekis \times 365 \times 0,92$.

Nuostoliai tiekimo grandinėje

Modelyje daroma prielaida, kad dalis produkto prarandama:

- terminale: 0,5 %
- transportavimo metu: 0,5 %

Todėl faktiškai pristatytas amoniako kiekis apskaičiuojamas taip:

$$pristatytas\ kiekis = išsiųstas\ kiekis \times (1 - 0,005) \times (1 - 0,005)$$

Būtent šis sumažintas kiekis naudojamas galutiniam €/kg H₂eq rodikliui skaičiuoti.

Perskaičiavimas iš amoniako į vandenilio ekvivalentą

Kad rezultatai būtų palyginami su kitais vandenilio nešikliais, amoniako kiekis perskaičiuojamas į vandenilio ekvivalentą. Modelyje naudojama prielaida, kad 1 kg H₂eq atitinka 5,6667 kg NH₃ arba atvirkščiai

$1 \text{ kg NH}_3 = 1 / 5,6667 \text{ kg H}_2\text{eq}$. Šis santykis gaunamas iš molinių masių: $34 / 6 = 5,6667$, todėl $\text{kg H}_2\text{eq} = \text{kg NH}_3 / 5,6667$.

Transportavimo kaštų skaičiavimas

Mobilios technikos kapitalo kaštai

Skaičiuojami metiniai vilkikų ir puspriekabių kapitalo kaštai, naudojant kapitalo atkūrimo koeficientą (CRF), priklausantį nuo:

- WACC = 7 %
- vilkiko tarnavimo laiko = 15 metų
- puspriekabės tarnavimo laiko = 12 metų

Taip investicijos paverčiamos į metines sąnaudas.

Techninės priežiūros kaštai

Mobilijai technikai taikomas 5% per metus priežiūros koeficientas nuo vilkikų ir puspriekabių vertės. Tai yra šiek tiek daugiau nei metanolio modelyje, tikėtina dėl sudėtingesnės ir brangesnės amoniako transportavimo įrangos.

Kuro kaštai

Kuro kaštai apskaičiuojami pagal:

- dyzelino kainą = 1,6 €/l;
- sąnaudas = 0,35 l/km;
- bendrą metinį nuvažiuotą atstumą.

Kelių mokesčiai

Skaičiuojama 0,25 €/km.

Darbo kaštai

Į modelį įtraukiami:

- vairuotojo darbo kaštai = 18 €/val.
- operatoriaus darbo kaštai = 18 €/val.

Vairuotojo darbo valandos skaičiuojamos pagal vilkiko ciklo trukmę, o operatoriaus pagal pakrovimo laiką. Modelis papildomai grąžina ir metines vairuotojų bei operatorių darbo valandas, kad būtų aišku, kiek darbo resursų reikia kiekvienam scenarijui.

Konversijos ir saugojimo kaštų skaičiavimas

Ši modelio dalis apima amoniako sintezės ir saugojimo kaštus.

Gamyklos masto parinkimas

Metiniam transportuojamo amoniako kiekiui įvertinti naudojama masto ekonomijos logika, leidžianti atspindėti tai, kad didesnio pajėgumo gamyklos paprastai pasižymi mažesniais vieneto kapitalo kaštais. Amoniako sintezės kapitalo kaštai apskaičiuojami taikant vientisą masto ekonomijos funkciją visam pajėgumų diapazonui, todėl investicijos didėja ne linijškai, o pagal mastelio dėsnį. Tokiu būdu CAPEX kinta tolygiai didėjant metiniam pagaminamo ir transportuojamo amoniako kiekiui, o modelyje išlaikomas realistiškas

didesnio masto technologijų ekonominis pranašumas. Sintezės įrenginio kapitalo kaštai apskaičiuojami naudojant mastelio funkciją:

$$CAPEX = CAPEX_{ref} \times \left(\frac{Q}{Q_{ref}} \right)^{exp}$$

kur:

- Q – metinis pagaminamo amoniako kiekis (t/metus),
- Q_{ref} – referencinis gamyklos pajėgumas,
- $CAPEX_{ref}$ – referencinio pajėgumo kapitalo investicijos,
- exp – mastelio koeficientas.

Modelyje naudojami šie parametrai: referencinis pajėgumas 150 000 t NH₃ per metus, referencinis CAPEX intensyvumas: 1900 €/t/yr ir mastelio koeficientas: 0,78.

Apskaičiuotas sintezės įrenginio CAPEX paverčiamas į metinius kaštus taikant 7,0% diskonto normą (WACC) ir 20 metų technologijos tarnavimo laiką. Be to, pridedami fiksuoti eksploataciniai kaštai, sudarantys 4% per metus nuo investicijų vertės.

Elektros kaštai sintezei

Modelyje priimta, kad amoniako sintezei reikia 4,7 kWh/kg H₂eq, kur elektros kaina yra 0,09 €/kWh, todėl metinės elektros sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$\text{metinės elektros sąnaudos} = 4,7 \times \text{metinis kiekis} \times 0,09$$

Elektros poreikis amoniako sintezei modelyje išreiškiamas kilogramais vandenilio ekvivalento (H₂eq), siekiant užtikrinti tiesioginį palyginamumą su kitomis vandenilio transporto grandinėmis.

Saugojimo infrastruktūra

Saugojimo CAPEX intensyvumas apskaičiuojamas naudojant tolydžią mažėjančią funkciją, kuri atspindi masto ekonomiją. Modelyje daroma prielaida, kad mažesnio masto sistemoms saugojimo infrastruktūra vienai talpos tonai yra santykinai brangesnė, o didesnio masto sistemoms ši vertė mažėja. Todėl saugojimo CAPEX intensyvumas kinta tolygiai tarp dviejų ribų:

- mažiausia reikšmė didelio masto sistemoms: 900 €/t talpos;
- didžiausia reikšmė mažo masto sistemoms: 2500 €/t talpos.

Tolydi saugojimo intensyvumo funkcija apskaičiuojama pagal metinį amoniako kiekį, naudojant referencinį pajėgumą 30 000 t NH₃/metus ir mastelio koeficientą 0,20. Toks sprendimas leidžia išvengti dirbtinių šuolių saugojimo kaštuose. Bendra reikalinga saugojimo talpa nustatoma kaip didesnė iš dviejų reikšmių: vieno sunkvežimio krovinio arba vienos dienos vidutinio amoniako kiekio. Apskaičiuotas saugojimo CAPEX paverčiamas į metinius kaštus taikant WACC = 7,0% ir saugojimo infrastruktūros tarnavimo laiką = 30 metų. Papildomai pridedami 4% per metus fiksuoti eksploataciniai kaštai nuo saugojimo CAPEX.

Galutinio rodiklio skaičiavimas

Paskutiniame etape sudedami metiniai transportavimo kaštai ir metiniai sintezės ir saugojimo kaštai (pagrindinių parametru suvestinė pateikta lentelėje). Taip gaunamas bendras metinis tiekimo grandinės kaštas, kuris padalijamas iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio: $LCOHT = \text{bendri metiniai kaštai} / \text{pristatytas kg H}_2\text{eq per metus}$ ir gaunamas galutinis rodiklis €/kg H₂eq pristatyto amoniako.

Pagrindinių parametru suvestinė

Parametras	Reikšmė	Paaiškinimas
WACC	7%	Diskonto norma

Elektros kaina	0,09 €/kWh	Naudojama amoniako sintezei
Terminalo nuostoliai	0,5%	Praradimai terminale
Transporto nuostoliai	0,5%	Praradimai pervežimo metu
OPEX	4% per metus	Fiksuoti eksploataciniai kaštai nuo CAPEX
Sintezės referencinis pajėgumas	150 000 t NH ₃ /metus	Naudojamas vientisai CAPEX funkcijai
Sintezės referencinis CAPEX intensyvumas	1900 €/t _{py}	CAPEX intensyvumas referenciniame taške ⁵⁸
Sintezės mastelio koeficientas	0,78	CAPEX mastelio funkcijai
Elektros poreikis sintezei	4,7 kWh/kg H ₂ eq	Energijos poreikis NH ₃ sintezės procesui ⁵⁹
Sintezės įrenginio tarnavimo laikas	20 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Saugojimo tarnavimo laikas	30 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Mažiausias saugojimo CAPEX intensyvumas	900 €/t talpos	Didelio masto sistemoms ^{60 61 62}
Didžiausias saugojimo CAPEX intensyvumas	2500 €/t talpos	Mažo masto sistemoms ^{63 64 65}
Saugojimo referencinis pajėgumas	30 000 t NH ₃ /metus	Naudojamas tolydžiai saugojimo funkcijai
Saugojimo mastelio koeficientas	0,20	Saugojimo intensyvumo mažėjimui su mastu ⁶⁶
Darbo dienos per metus	365	Modelyje laikoma visų metų veikla
Paros trukmė	24 val.	Naudojama ciklams
Mobilios technikos prieinamumas	0,92	Vilkikų / puspriekabių prieinamumas
Terminalo prieinamumas	0,95	Terminalo veikimo prieinamumas
Trumpų atstumų greitis	65 km/h	Kai atstumas ≤ 50 km

⁵⁸ IRENA and AEA. (2022). Innovation Outlook: Renewable Ammonia. International Renewable Energy Agency and Ammonia Energy Association.

⁵⁹ IRENA and AEA. (2022). Innovation Outlook: Renewable Ammonia. International Renewable Energy Agency and Ammonia Energy Association.

⁶⁰ Nayak-Luke, R. M., Forbes, C., Cesaro, Z., Bañares-Alcántara, R., & Rouwenhorst, K. H. R. (2021). Techno-Economic Aspects of Production, Storage and Distribution of Ammonia. In A. Valera-Medina & R. Bañares-Alcántara (Eds.), Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector (pp. 191–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00008-4>

⁶¹ IRENA. (2022). Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi: IRENA.

⁶² IRENA & AEA. (2022). Innovation Outlook: Renewable Ammonia. International Renewable Energy Agency and Ammonia Energy Association. Abu Dhabi and Brooklyn. ISBN 978-92-9260-423-3

⁶³ Nayak-Luke, R. M., Forbes, C., Cesaro, Z., Bañares-Alcántara, R., & Rouwenhorst, K. H. R. (2021). Techno-Economic Aspects of Production, Storage and Distribution of Ammonia. In A. Valera-Medina & R. Bañares-Alcántara (Eds.), Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector (pp. 191–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00008-4>

⁶⁴ IRENA. (2022). Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part II – Technology review of hydrogen carriers. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi: IRENA.

⁶⁵ IRENA & AEA. (2022). Innovation Outlook: Renewable Ammonia. International Renewable Energy Agency and Ammonia Energy Association. Abu Dhabi and Brooklyn. ISBN 978-92-9260-423-3

⁶⁶ taikomas subjektyviai parinktas glodinimo parametras, kad saugojimo CAPEX intensyvumas mažėtų palaipsniui didėjant sistemos mastui.

Ilgų atstumų greitis	75 km/h	Kai atstumas > 50 km
Greičio ribinis atstumas	50 km	Riba tarp dviejų greičių
Vartų procedūrų laikas	0,5 val.	Įvažiavimas / formalumai
Poilsio trukmė	1 val.	Pridedama prie kelionės
Dyzelino kaina	1,6 €/l	Kuro kaštams
Dyzelino sąnaudos	0,35 l/km	Vilkiko kuro sunaudojimas
Kelių mokestis	0,25 €/km	Kelių mokesčių kaštai
Vilkiko CAPEX	100 000 €	Vieno vilkiko investicija ⁶⁷
Vilkiko tarnavimo laikas	15 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Mobilios technikos priežiūra	5% per metus	Nuo vilkikų ir puspriekabių vertės
Vairuotojo darbo kaina	18 €/val.	Transporto darbo kaštai
Operatoriaus darbo kaina	18 €/val.	Pakrovimo darbo kaštai
Operatoriaus darbo laikas	24 val./d.	Naudojama pakrovimo vietų pajėgumui
Puspriekabės talpa	23 000 kg NH ₃	Vieno reiso kroviny
Puspriekabės CAPEX	160 000 €	Vienos puspriekabės investicija
Puspriekabės tarnavimo laikas	12 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Pakrovimo laikas	1,2 val.	Vienam reisui
Iškrovimo laikas	1,0 val.	Vienam reisui
NH₃/H₂eq santykis	5,6667 kg NH ₃ /kg H ₂ eq	Perskaičiavimui į H ₂ eq

Šis modelis pirmiausia apskaičiuoja, kiek pilnų amoniako transportavimo reisų per dieną gali atlikti pasirinktas vilkikų ir puspriekabių parkas tam tikru atstumu. Tada nustatoma, kiek amoniako per metus galima išsiųsti ir kiek jo faktiškai pristatoma po nuostolių. Po to sudedami visi svarbiausi metiniai kaštai: vilkikų ir puspriekabių kapitalas, priežiūra, kuras, kelių mokesčiai, darbo kaštai, amoniako sintezės įrenginiai, elektros sąnaudos ir saugojimo infrastruktūra. Galiausiai šie metiniai kaštai padalijami iš pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio, todėl gaunamas vienas bendras rodiklis parodantis kiek kainuoja pristatyti 1 kg H₂eq naudojant amoniako transportavimo grandinę.

Vandenilio išvestinių produktų transportavimas geležinkeliu

Amoniako transportavimo geležinkeliu kaštų skaičiavimas

Ši metodika skirta įvertinti pilnus amoniako tiekimo grandinės kaštus, išreikštus eurais vienam pristatytam kilogramui vandenilio ekvivalento (€/kg H₂eq). Modelis apima ne tik patį transportavimą geležinkeliu, bet ir amoniako sintezę, elektros sąnaudas, laikino saugojimo infrastruktūrą bei produkto nuostolius grandinėje. Šioje dalyje įvertinama, kiek amoniako per metus gali būti išsiųsta geležinkeliu pasirinktu logistikos režimu, įvertinami visi metiniai kaštai ir galiausiai jie padalijami iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio. Modelis kiekvienam scenarijui apskaičiuoja du pagrindinius rodiklius: tik transportavimo kaštus, t. y. geležinkelio tarifą ir vagonų nuomą bei bendrus kaštus, t. y. transportavimas + konversija + saugojimas.

Rezultatai pateikiami ne vienam kilogramui amoniako, o vienam kilogramui pristatyto vandenilio ekvivalento, kad amoniako grandinę būtų galima palyginti su kitomis vandenilio transportavimo

⁶⁷ Basma, H., Rodríguez, F., & Muncrief, R. (2021). Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: Battery electric versus diesel. International Council on Clean Transportation (ICCT). Šiuose dokumentuose nurodomas vilkiko capex, ar jis teisingas?

alternatyvomis. Šiame geležinkelio modelyje naudojami savaitiniai amoniako kiekiai, kurie buvo parinkti taip, kad būtų kuo artimesni sunkvežimių modelio generuojamiems kiekiams, todėl transportavimo geležinkeliais ir sunkvežimiais LCOHT rezultatus galima palyginti korektiškiau. Modelis vertina:

- atstumą į vieną pusę nuo 1 iki 500 km,
- kelis savaitinius amoniako kiekius,
- galimus reisų dažnius nuo 1 iki 14 siuntų per savaitę.

Modelis kiekvienam atstumui ir savaitiniam kiekiui automatiškai parenka ekonomiškai palankiausią transportavimo dažnį.

Pagrindinė skaičiavimų metodika

Geležinkelio transporto ciklas

Pirmiausia apskaičiuojama vieno pilno geležinkelio ciklo trukmė. Šis ciklas apima važiavimą pirmyn ir atgal, pakrovimą, iškrovimą, terminalo prastovas abiejuose galuose. Modelyje daroma prielaida, kad:

- vidutinis traukinio greitis yra 45 km/h,
- pakrovimo greitis – 130 t/h,
- terminalo prastova yra 8 val. kiekviename gale, t. y. 16 val. visam pilnam ciklui.

Pilno ciklo trukmė apskaičiuojama taip:

$$\text{ciklo laikas} = \text{važiavimas pirmyn-atgal} + \text{pakrovimas} + \text{iškrovimas} + \text{terminalo prastovos}$$

Siuntos dydis ir vagonų poreikis

Vieno vagono naudingoji apkrova apskaičiuojama pagal vagono tūrį, amoniako tankį ir apkrovos ribą. Modelyje taikoma:

- vagono tūris = 90 m³
- amoniako tankis = 0,68 t/m³
- didžiausia vagono apkrova = 70 t

Todėl vieno vagono naudingoji apkrova yra: $\text{vagono kroviny} = \min(90 \times 0,68 ; 70) = 61,2 \text{ t NH}_3$, toliau apskaičiuojamas vienos siuntos dydis:

$$\text{siuntos dydis} = \text{savaitinis amoniako kiekis} / \text{siuntų skaičius per savaitę}$$

Jei reikia, siunta apvalinama į didesnę pusę iki pilnų vagonų. Jei vienai siuntai reikia daugiau nei leidžiamas vagonų skaičius viename traukinyje, siunta padalijama į kelis traukinių išvykimus. Modelyje taikoma maksimali riba 60 vagonų viename traukinyje.

Reisų dažnio optimizavimas

Modelis nagrinėja visus galimus siuntų dažnius nuo 1 iki 14 siuntų per savaitę ir kiekvienam variantui apskaičiuoja siuntos dydį, ciklo laiką, reikalingų vagonų skaičių, saugojimo poreikį ir bendrą metinį LCOHT. Galiausiai pasirenkamas tas reisų dažnis, kuris duoda mažiausią LCOHT. Tokiu būdu modelis optimizuoja reisų dažnį, o reikiama saugyklos išvedama iš modelio skaičiavimų pagal pasirinktą logistinį režimą.

Vagonų skaičius ir nuomos kaštai

Kitame etape apskaičiuojama, kiek vagonų reikia sistemai. Vagonų poreikis priklauso nuo vienos siuntos vagonų skaičiaus, ciklo trukmės ir siuntų intervalo. Kuo ilgesnis ciklas ir kuo dažnesnės siuntos, tuo daugiau vagonų reikia vienu metu sistemoje. Metinės vagonų nuomos sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$\text{metinė nuoma} = \text{vagonų skaičius} \times 45 \text{ €/d} \times 365, \text{ kur vieno vagono nuomos kaina} = 45 \text{ €/d.}$$

Transportavimo kaštų skaičiavimas

Geležinkelio tarifas

Transportavimo kaštų dalis šiame modelyje skaičiuojama pagal LTG Cargo TKT 2025 tarifų knygą⁶⁸. Tarifas taikomas €/t NH₃ pagal atstumą ir papildomai padauginamas iš cisterniniams kroviniams taikomo koeficiento, kuris lygus 1,15. Svarbu, kad šiame modelyje naudojama Mode A logika, t.y. TKT tarifas laikomas apimančiu visą geležinkelio vežimo paslaugą, todėl operatoriaus mokestis ir lokomotyvo dyzelio kaštai papildomai nebepridedami, kad nebūtų dvigubo skaičiavimo. Dėl šios prielaidos metinės transporto sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$\text{metinės transporto sąnaudos} = \text{LTG Cargo tarifas} + \text{vagonų nuoma}$$

Nuostoliai grandinėje

Modelyje daroma prielaida, kad dalis produkto prarandama bendroje amoniako sintezės ir saugojimo grandinėje - 1,0% ir transportavimo geležinkeliu metu - 0,1 %. Todėl faktiškai pristatytas Amoniako kiekis apskaičiuojamas taip:

$$\text{pristatytas kiekis} = \text{išsiųstas kiekis} \times (1 - 0,010) \times (1 - 0,001).$$

Būtent šis sumažintas kiekis naudojamas galutiniam LCOHT rodikliui skaičiuoti.

Perskaičiavimas iš NH₃ į H₂ ekvivalentą

Kad rezultatai būtų palyginami su kitomis vandenilio tiekimo grandinėmis, amoniako kiekis perskaičiuojamas į vandenilio ekvivalentą. Modelyje naudojama prielaida, kad $1 \text{ kg H}_2\text{eq} = 5,6667 \text{ kg NH}_3$. Šis santykis gaunamas iš molinių masių: $34 / 6 = 5,6667$.

Konversijos ir saugojimo kaštų skaičiavimas

Ši metodikos dalis yra analogiška amoniako transportavimo cisternomis modeliui, nes ji buvo suderinta tarp abiejų modelių, kad skirtumai tarp transportavimo geležinkeliu ir cisternomis rezultatų daugiausia atspindėtų transportavimo logiką, o ne skirtingas sintezės prielaidas.

NH₃ sintezės kapitalo kaštai

Amoniako sintezės kapitalo kaštai apskaičiuojami taikant vientisą masto ekonomijos funkciją visam pajėgumų diapazonui:

$$\text{CAPEX} = \text{CAPEX}_{ref} \times (Q / Q_{ref})^{exp}$$

kur:

- Q – metinis amoniako kiekis (t/metus),
- Q_{ref} – referencinis pajėgumas,
- CAPEX_{ref} – referencinio pajėgumo kapitalo investicijos,
- exp – mastelio koeficientas.

Modelyje naudojami šie parametrai:

- referencinis pajėgumas = 150 000 t NH₃/metus,
- referencinis CAPEX intensyvumas = 1 900 €/t per metus,
- mastelio koeficientas = 0,78.

Apskaičiuotas sintezės CAPEX paverčiamas į metinius kaštus taikant WACC = 7,0 % ir sintezės įrenginio tarnavimo laiką = 20 metų. Be to, pridedami fiksuoti eksploataciniai kaštai (OPEX) = 4% per metus nuo CAPEX. Svarbu pažymėti, kad vandenilio žaliavos kaina modelyje neįtraukiama, kaip ir kituose analogiškuose modeliuose.

⁶⁸ <https://doc.ltgcargo.lt/lt/dokumentai/kainodara/Tarifus%20knyga%20TKT-LTG%20Cargo%202025.pdf>

Elektros kaštai sintezei

Modelyje priimta, kad amoniako sintezei reikia 4,7 kWh/kg H₂eq, o elektros kaina yra 0,09 €/kWh. Todėl metinės elektros sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$\text{metinės elektros sąnaudos} = 4,7 \times \text{metinis H}_{2\text{eq}} \text{ kiekis} \times 0,09.$$

Saugojimo infrastruktūra

Saugojimo CAPEX intensyvumas apskaičiuojamas naudojant tolydžią mažėjančią masto funkciją, analogišką amoniako transportavimo cisternomis modeliui. Modelyje daroma prielaida, kad didelio masto sistemoms saugojimo intensyvumas artėja prie 900 €/t talpos, mažo masto sistemoms – prie 2 500 €/t talpos. Čia naudojami parametrai:

- referencinis pajėgumas = 30 000 t NH₃/metus
- mastelio koeficientas = 0,20

Skirtingai nei cisternų modelyje, šiame geležinkelio modelyje saugykla apskaičiuojama pagal siuntų logiką. Reikalinga talpa nustatoma kaip viena efektyvi siunta plius papildomas mažas buferis. Papildomas buferis priklauso nuo metinio srauto:

- A klasė (< 30 000 t/metus): 0,5 dienos
- B klasė (30 000–250 000 t/metus): 0,3 dienos
- C klasė (> 250 000 t/metus): 0,2 dienos

Todėl saugykla šiame modelyje nėra fiksuota dienų atsarga, o tiesiogiai priklauso nuo pasirinkto siuntų režimo ir sistemos masto. Apskaičiuotas saugojimo CAPEX paverčiamas į metinį kaštą taikant WACC = 7,0 proc. ir saugojimo tarnavimo laiką = 30 metų. Taip pat pridėdami 4 proc. per metus OPEX nuo saugojimo CAPEX.

Galutinio rodiklio skaičiavimas

Paskutiniame etape sudedami metiniai transportavimo kaštai, metiniai sintezės kaštai, metinės elektros sąnaudos ir metiniai saugojimo kaštai. Taip gaunami bendri metiniai tiekimo grandinės kaštai, kurie padalijami iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio:

$$LCOHT = \text{bendri metiniai kaštai} / \text{pristatytas kg H}_{2\text{eq}} \text{ per metus}$$

Papildomai apskaičiuojamas ir tik transportavimo rodiklis:

$$LCOHT_{\text{transportas}} = \text{transportavimo metiniai kaštai} / \text{pristatytas kg H}_{2\text{eq}} \text{ per metus}$$

Taigi modelis pateikia du rezultatus pilną LCOHT ir tik transportavimo dedamąją.

Pagrindinių parametrų suvestinė

Parametras	Reikšmė	Paaiškinimas
WACC	7%	Diskonto norma
Elektros kaina	0,09 €/kWh	Amoniako sintezei
NH ₃ grandinės nuostoliai	1,0 %	Bendri nuostoliai iki transporto
Transportavimo nuostoliai	0,1 %	Nuostoliai geležinkelio transporto metu
OPEX	4% per metus	Nuo sintezės ir saugojimo CAPEX
Sintezės referencinis pajėgumas	150 000 t NH ₃ /metus	CAPEX funkcijai
Sintezės referencinis CAPEX intensyvumas	1900 €/t	Referencinis taškas
Sintezės mastelio koeficientas	0,78	CAPEX mastelio funkcijai
Elektros poreikis sintezei	4,7 kWh/kg H ₂ eq	NH ₃ sintezės procesui
Sintezės tarnavimo laikas	20 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Saugojimo tarnavimo laikas	30 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui

Mažiausias saugojimo intensyvumas	900 €/t talpos	Didelio masto sistemoms
Didžiausias saugojimo intensyvumas	2500 €/t talpos	Mažo masto sistemoms
Saugojimo referencinis pajėgumas	30 000 t NH ₃ /metus	Saugojimo funkcijai
Saugojimo mastelio koeficientas	0,20	Saugojimo intensyvumo mažėjimui su mastu
Vagono tūris	90 m ³	Vieno vagono talpa
Amoniako tankis	0,68 t/m ³	Skysto amoniako tankis
Didžiausia vagono apkrova	70 t	Praktinis apkrovos limitas
Naudingoji vagono apkrova	61,2 t	Apskaičiuota pagal tūrį ir tankį
Maksimalus vagonų skaičius traukinyje	60	Praktinis apribojimas
Vagono nuomos kaina	45 €/d	Vienam vagonui
Vidutinis traukinio greitis	45 km/h	Kroviniui sąstatui
Pakrovimo greitis	130 t/h	Terminale
Terminalo prastova	8 h kiekviename gale	Iš viso 16 h per ciklą
NH₃/H₂eq santykis	5,6667 kg NH ₃ /kg H ₂ eq	Perskaičiavimui į H ₂ eq
Siuntų dažnis	1–14 per savaitę	Modelio optimizuojamas intervalas

*Rodikliai atitinka amoniako transportavimo cisternomis reikšmes

Šis modelis pirmiausia apskaičiuoja, kiek NH₃ per savaitę siunčiama vienu ar kitu logistikos režimu, tada nustato, kiek vagonų tam reikia, kiek kainuoja jų nuoma, kokia yra LTG Cargo vežimo kaina ir kokio dydžio saugykla būtina pasirinktai siuntų struktūrai. Po to suskaičiuojami konversijos, elektros ir saugojimo kaštai, įvertinami produkto nuostoliai, o visi metiniai kaštai padalijami iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio. Taip gaunamas vienas bendras rodiklis, parodantis, kiek kainuoja pristatyti 1 kg H₂eq naudojant amoniako geležinkelio tiekimo grandinę.

Metanolio transportavimo geležinkeliu ekonominio vertinimo metodika

Metanolio transportavimo geležinkeliu ekonominis vertinimas atliktas naudojant pilnos tiekimo grandinės kaštų metodą (LCOHT), kuriame įvertinami ne tik transportavimo kaštai, bet ir energijos nešiklio konversija, saugojimas bei logistinės infrastruktūros sąnaudos. Tokia metodika leidžia palyginti skirtingų energijos nešiklių tiekimo grandinių ekonominį efektyvumą naudojant bendrą rezultatų išraišką €/kg-H₂eq pristatyto produkto.

Modelyje laikoma, kad vandenilis jau yra prieinamas kaip žaliava, todėl jo gamybos kaina į skaičiavimus neįtraukiama. Analizuojama tiekimo grandinė apima šiuos etapus: metanolio sintezę iš vandenilio ir biogeninio CO₂, produkto saugojimą bei terminalo infrastruktūrą ir transportavimą geležinkeliu.

Transportavimo scenarijai ir srautai

Siekiant užtikrinti metodinį palyginamumą su kelių transporto modeliu, geležinkelio scenarijuose naudojami tokie savaitiniai metanolio srautai, kurie atitinka tipinius transportavimo mastus, gautus kelių transporto modelyje:

- 1623 t MeOH per savaitę

- 4063 t MeOH per savaitę
- 6491 t MeOH per savaitę
- 10159 t MeOH per savaitę

Tokie srautai leidžia įvertinti tiek vidutinio, tiek didelio masto tiekimo grandines ir išvengti pernelyg mažų transporto srautų, kurie geležinkelio transportui paprastai nėra ekonomiškai efektyvūs. Transportavimo atstumas modelyje kinta nuo 1 iki 500 km (viena kryptimi), o rezultatai pateikiami kaip funkcija nuo transportavimo atstumo. Taip pat modelis kiekvienam scenarijui apskaičiuoja du pagrindinius rodiklius: tik transportavimo kaštus, t. y. geležinkelio tarifą ir vagonų nuomą bei bendrus kaštus, t. y. transportavimas + konversija + saugojimas.

Rezultatai pateikiami ne vienam kilogramui metanolio, o vienam kilogramui pristatyto vandenilio ekvivalento, kad metanolio grandinę būtų galima palyginti su kitomis vandenilio transportavimo alternatyvomis. Šiame geležinkelio modelyje naudojami savaitiniai metanolio srautai, kurie buvo parinkti taip, kad būtų kuo artimesni sunkvežimių modelio generuojamiems srautams, todėl geležinkelio ir sunkvežimių LCOHT rezultatus galima palyginti korektiškiau. Modelis vertina:

- atstumą į vieną pusę nuo 1 iki 500 km;
- kelis savaitinius metanolio srautus;
- galimus reisų dažnius nuo 1 iki 14 siuntų per savaitę.

Kiekvienam atstumui ir savaitiniam srautui automatiškai parenkamas ekonomiškai palankiausias krovinių dažnis.

Pagrindinė skaičiavimų metodika

Geležinkelio transporto ciklas

Pirmiausia apskaičiuojama vieno pilno geležinkelio ciklo trukmė. Ciklas apima važiavimą pirmyn ir atgal, pakrovimą, iškrovimą ir terminalo pristovas abiejuose galuose. Modelyje daroma prielaida, kad:

- vidutinis traukinio greitis yra 45 km/h
- pakrovimo greitis – 130 t/h
- terminalo pristova yra 8 val. kiekviename gale, t. y. 16 val. visam pilnam ciklui.

Pilno ciklo trukmė apskaičiuojama taip:

$$\text{ciklo laikas} = \text{važiavimas pirmyn-atgal} + \text{pakrovimas} + \text{iškrovimas} + \text{terminalo pristovos}$$

Siuntos dydis ir vagonų poreikis

Vieno vagono naudingoji apkrova apskaičiuojama pagal vagono tūrį, metanolio tankį ir apkrovos ribą. Modelyje taikoma:

- vagono tūris = 90 m³,
- metanolio tankis = 0,79 t/m³,
- didžiausia vagono apkrova = 70 t.

Todėl vieno vagono naudingoji apkrova yra:

$$\text{vagono kroviny} = \min(90 \times 0,79 ; 70) = 70 \text{ t MeOH}$$

Toliau apskaičiuojamas vienos siuntos dydis:

$$\text{siuntos dydis} = \text{savaitinis metanolio kiekis} / \text{siuntų skaičius per savaitę}$$

Jei reikia, siunta apvalinama į viršų iki pilnų vagonų. Jei vienai siuntai reikia daugiau nei leidžiamas vagonų skaičius viename traukinyje, siunta padalijama į kelis traukinių išvykimus. Modelyje taikoma maksimali riba 60 vagonų viename traukinyje.

Reisų dažnio optimizavimas

Modelis nagrinėja visus galimus siuntų dažnius nuo 1 iki 14 siuntų per savaitę ir kiekvienam variantui apskaičiuoja siuntos dydį, ciklo laiką, reikalingų vagonų skaičių, saugojimo poreikį ir bendrą metinį LCOHT.

Galiausiai pasirenkamas tas reisų dažnis, kuris duoda mažiausią LCOHT. Modelis neoptimizuoja saugyklos, o optimizuoja reisų dažnį, tuo tarpu reikiama saugykla apskaičiuojama modelio viduje pagal pasirinktą logistinį režimą.

Vagonų skaičius ir nuomos kaštai

Kitame etape apskaičiuojama, kiek vagonų reikia sistemai. Vagonų poreikis priklauso nuo vienos siuntos vagonų skaičiaus, ciklo trukmės ir siuntų intervalo. Kuo ilgesnis ciklas ir kuo dažnesnės siuntos, tuo daugiau vagonų reikia vienu metu sistemoje. Metinės vagonų nuomos sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$\text{metinė nuoma} = \text{vagonų skaičius} \times 45 \text{ €/d} \times 365$$

kur vieno vagono nuomos kaina = 45 €/d.

Transportavimo kaštų skaičiavimas

Geležinkelio tarifas

Transportavimo kaštų dalis šiame modelyje skaičiuojama pagal LTG Cargo TKT 2025 tarifų knygą⁶⁹. Tarifas taikomas €/t MeOH pagal atstumą ir papildomai padauginamas iš cisterniniams kroviniams taikomo koeficiento, kuris lygus 1,15. Svarbu, kad šiame modelyje naudojama Mode A logika: TKT tarifas laikomas apimančiu visą geležinkelio vežimo paslaugą, todėl operatoriaus mokestis ir lokomotyvo dyzelio kaštai papildomai nebepridedami, kad nebūtų dvigubo skaičiavimo.

Todėl metinės transporto sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$\text{metinės transporto sąnaudos} = \text{LTG Cargo tarifas} + \text{vagonų nuoma}$$

Nuostoliai grandinėje

Modelyje daroma prielaida, kad dalis produkto prarandama terminale - 0,1% ir transportavimo metu - 0,7%. Todėl faktiškai pristatytas metanolio kiekis apskaičiuojamas taip:

$$\text{pristatytas kiekis} = \text{išsiųstas kiekis} \times (1 - 0,001) \times (1 - 0,007)$$

Būtent šis sumažintas kiekis naudojamas galutiniam LCOHT rodikliui skaičiuoti.

Perskaičiavimas iš MeOH į H₂ ekvivalentą

Kad rezultatai būtų palyginami su kitomis vandenilio tiekimo grandinėmis, metanolio kiekis perskaičiuojamas į vandenilio ekvivalentą. Modelyje naudojama prielaida, kad 1 kg H₂eq = 5,333 kg MeOH, šis santykis gaunamas iš reakcijos stoichiometrijos: $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$, kur molinių masių santykis lygus $32 / 6 = 5,333$.

Konversijos ir saugojimo kaštų skaičiavimas

Ši metodikos dalis yra analogiška metanolio transportavimo cisternomis modeliui, nes ji buvo suderinta tarp abiejų modelių, kad skirtumai tarp transportavimo geležinkeliu ir cisternomis rezultatų daugiausia atspindėtų transportavimo logiką, o ne skirtingas sintezės prielaidas.

Metanolio sintezės (gamybos bloko) CAPEX

Metanolio sintezės kapitalo kaštai apskaičiuojami naudojant trijų kategorijų modelį (A, B, C), kuris atspindi masto ekonomiją. Naudojamos trys sintezės klasės:

Klasė	Metinis pajėgumas	EkspONENTė
A	< 30 000 t/metus	0,85

⁶⁹ <https://doc.ltgcargo.lt/lt/dokumentai/kainodara/Tarifų%20knyga%20TKT-LTG%20Cargo%202025.pdf>

B	30 000–250 000 t/metus	0,75
C	> 250 000 t/metus	0,70

Kiekvienai klasei naudojami skirtingi CAPEX intensyvumai:

Klasė	CAPEX intensyvumas
A	700 €/t per metus
B	320 €/ t per metus
C	220 €/ t per metus

Galutinis CAPEX apskaičiuojamas naudojant masto funkciją:

$$CAPEX = CAPEX_{ref} \times (Q / Q_{ref})^{exp}$$

kur:

- Q – metinis metanolio kiekis
- Q_ref – referencinis pajėgumas
- exp – mastelio koeficientas

Apskaičiuotas CAPEX paverčiamas į metinius kaštus taikant WACC = 7,0 % ir sintezės tarnavimo laiką = 20 metų. Taip pat pridėdami OPEX = 4 % per metus nuo CAPEX. Svarbu pažymėti, kad vandenilio žaliavos kaina modelyje neįtraukiama.

Elektros kaštai sintezei

Modelyje priimta, kad metanolio sintezei reikia 3,33 kWh/kg H₂eq, o elektros kaina yra 0,09 €/kWh. Todėl metinės elektros sąnaudos apskaičiuojamos taip:

$$metinės\ elektros\ sąnaudos = 3,33 \times metinis\ H_2eq\ kiekis \times 0,09$$

CO₂ kaštai

Metanolio sintezei reikalingas anglies dioksidas apskaičiuojamas pagal reakcijos stoichiometriją: $CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$.

Molinių masių santykis yra $44 / 32 = 1,375$ t CO₂ per t MeOH, todėl metinės CO₂ sąnaudos apskaičiuojamos taip: $metinės\ CO_2\ sąnaudos = metinis\ MeOH\ kiekis \times 1,375 \times CO_2\ kaina$

Modelyje laikomasi prielaidos, kad CO₂ kaina = 100 €/t.

Saugojimo infrastruktūra

Saugojimo CAPEX intensyvumas modelyje laikomas 300 €/t saugojimo talpos. Skirtingai nei cisternų modelyje, šiame geležinkelio modelyje saugykla apskaičiuojama pagal krovinių logiką. Reikalinga talpa nustatoma kaip viena efektyvi siunta plius papildomas mažas buferis. Papildomas buferis priklauso nuo metinio srauto:

- A klasė (< 30 000 t/metus): 0,5 dienos,
- B klasė (30 000–250 000 t/metus): 0,3 dienos,
- C klasė (> 250 000 t/metus): 0,2 dienos.

Todėl saugykla šiame modelyje nėra fiksuota dienų atsarga, o tiesiogiai priklauso nuo pasirinkto krovinių režimo ir sistemos masto. Saugojimo CAPEX paverčiamas į metinius kaštus taikant WACC = 7,0% ir saugojimo tarnavimo laiką = 30 metų. Taip pat pridėdami 4% per metus OPEX nuo saugojimo CAPEX.

Galutinio rodiklio skaičiavimas

Paskutiniame etape sudedami metiniai transportavimo kaštai, metiniai sintezės kaštai, metinės elektros sąnaudos, metinės CO₂ sąnaudos ir metiniai saugojimo kaštai. Taip gaunami bendri metiniai diskontuoti tiekimo grandinės kaštai, kurie padalijami iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio:

$$LCOHT = \text{bendri metiniai kaštai} / \text{pristatytas kg H}_2\text{eq per metus}$$

Papildomai apskaičiuojamas ir tik transportavimo rodiklis:

$$LCOHT_{\text{transportas}} = \text{transportavimo metiniai kaštai} / \text{pristatytas kg H}_2\text{eq per metus}$$

Taigi modelis pateikia du rezultatus: pilną LCOHT ir tik transportavimo dedamąją.

Pagrindinių parametru suvestinė

Parametras	Reikšmė	Paaiškinimas
WACC	7%	Diskonto norma
Elektros kaina	0,09 €/kWh	Metanolio sintezei
Terminalo nuostoliai	0,1 %	Nuostoliai terminaluose
Transporto nuostoliai	0,7 %	Nuostoliai transportavimo metu
OPEX	4 % per metus	Nuo sintezės ir saugojimo CAPEX
Sintezės A klasės CAPEX intensyvumas	700 €/t/tpy	< 30 000 t/metus
Sintezės B klasės CAPEX intensyvumas	320 €/t/tpy	30 000–250 000 t/metus
Sintezės C klasės CAPEX intensyvumas	220 €/t/tpy	> 250 000 t/metus
Sintezės referencinis pajėgumas (A)	15 000 t/metus	CAPEX funkcijai
Sintezės referencinis pajėgumas (B)	150 000 t/metus	CAPEX funkcijai
Sintezės referencinis pajėgumas (C)	520 000 t/metus	CAPEX funkcijai
Sintezės mastelio koeficientas (A)	0,85	CAPEX mastelio funkcijai
Sintezės mastelio koeficientas (B)	0,75	CAPEX mastelio funkcijai
Sintezės mastelio koeficientas (C)	0,70	CAPEX mastelio funkcijai
Elektros poreikis sintezei	3,33 kWh/kg H ₂ eq	Metanolio sintezės procesui
CO₂ poreikis	1,375 t CO ₂ /t MeOH	Pagal reakcijos stoichiometriją
CO₂ kaina	100 €/t	Biogeninis CO ₂
Sintezės tarnavimo laikas	20 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Saugojimo tarnavimo laikas	30 metų	Kapitalo kaštų paskirstymui
Saugojimo CAPEX intensyvumas	300 €/t talpos	Terminalų infrastruktūrai
Saugojimo buferis A klasėje	0,5 dienos	Mažo masto sistemoms
Saugojimo buferis B klasėje	0,3 dienos	Vidutinio masto sistemoms
Saugojimo buferis C klasėje	0,2 dienos	Didelio masto sistemoms
Vagono tūris	90 m ³	Vieno cisterninio vagono talpa
Metanolio tankis	0,79 t/m ³	Skysto metanolio tankis
Didžiausia vagono apkrova	70 t	Praktinis apkrovos limitas
Naudingoji vagono apkrova	70 t	Apskaičiuota pagal tankį ir limitą
Maksimalus vagonų skaičius traukinyje	60	Praktinis sąstato apribojimas
Vagono nuoma	45 €/d	Vienam vagonui
Vidutinis traukinio greitis	45 km/h	Kroviniui sąstatai
Pakrovimo greitis	130 t/h	Terminale
Terminalo prastova	8 h kiekviename gale	Iš viso 16 h per ciklą

MeOH/H₂e_q santykis	5,333 kg MeOH/kg H ₂ e _q	Perskaičiavimui į H ₂ e _q
Cisterna koeficientas	1,15	Taikomas LTG Cargo tarifui
Maksimalus siuntų dažnis	1–14 per savaitę	Modelio optimizuojamas intervalas
Maksimalus atstumas	500 km	Viena kryptimi

**Rodikliai atitinka metanolio transportavimo cisternomis reikšmes*

Šis modelis pirmiausia apskaičiuoja, kiek metanolio per savaitę transportuojama pasirinktu logistikos režimu ir kokio dydžio kroviniai susidaro esant skirtingiems reisų dažniams. Tada nustatoma, kiek cisterninių vagonų tam reikia, įvertinama viso transporto ciklo trukmė, apskaičiuojamas reikalingas vagonų parkas ir jų nuomos sąnaudos bei LTG Cargo vežimo tarifas pagal transportavimo atstumą. Remiantis pasirinktu siuntų režimu taip pat apskaičiuojamas minimalus saugojimo infrastruktūros poreikis terminaluose. Galiausiai į modelį įtraukiami metanolio sintezės kapitalo kaštai, elektros sąnaudos sintezės procesui, CO₂ tiekimo kaštai ir saugojimo infrastruktūros sąnaudos. Įvertinus produkto nuostolius transportavimo ir terminalų operacijų metu, visi metiniai tiekimo grandinės kaštai padalijami iš faktiškai pristatyto vandenilio ekvivalento kiekio. Taip gaunamas vienas bendras rodiklis, parodantis, kiek kainuoja pristatyti 1 kg H₂e_q naudojant metanolio geležinkelio tiekimo grandinę. Modelis taip pat atskirai pateikia tik transportavimo dedamąją, todėl galima aiškiai įvertinti, kokią dalį bendruose kaštuose sudaro geležinkelio logistika, o kokią energijos nešiklio konversija ir infrastruktūra.