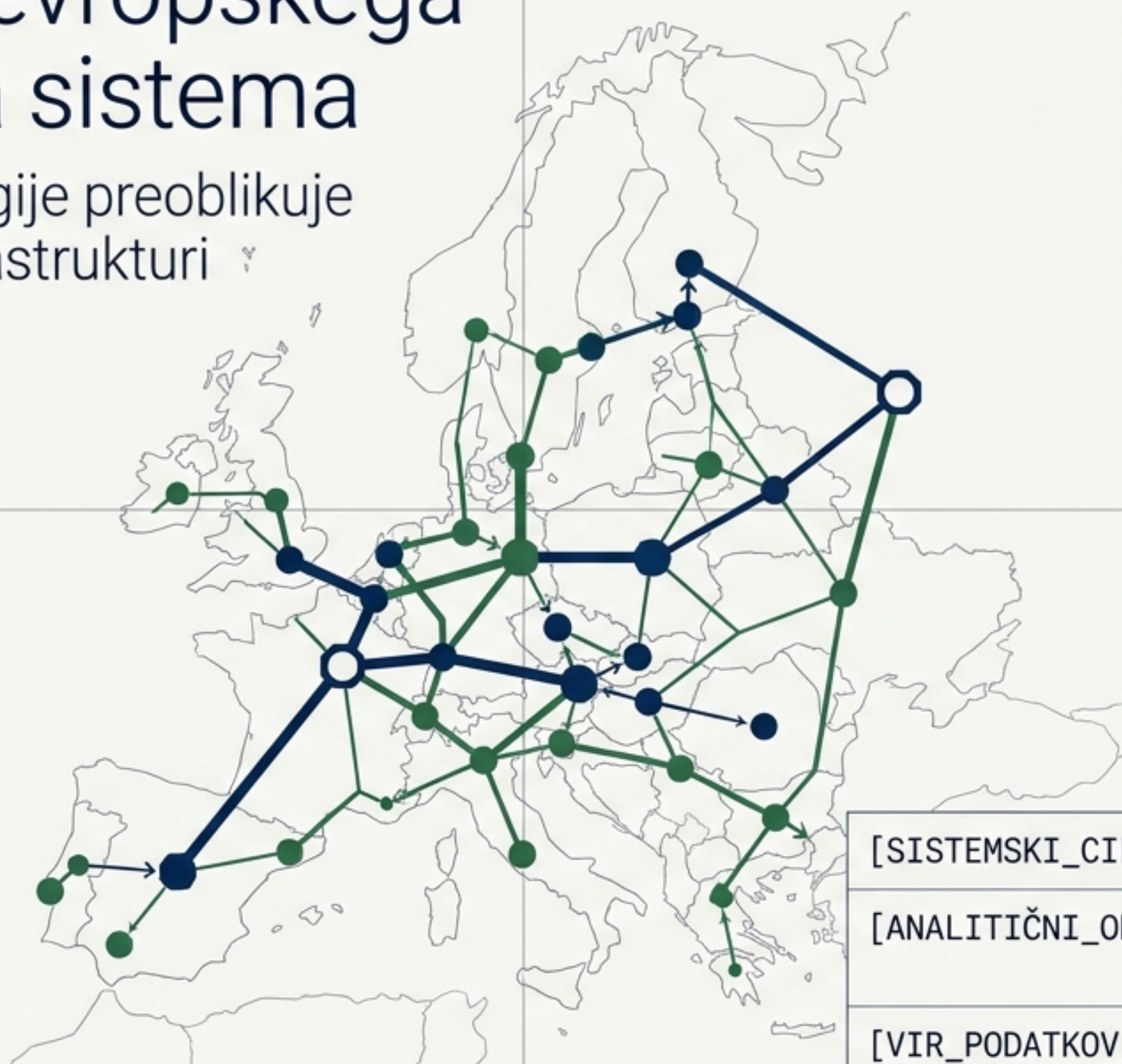


Optimizacija evropskega energetskega sistema

Kako uvoz zelene energije preoblikuje zahteve po kritični infrastrukturi



[SISTEMSKI_CILJ] : Neto ničelne emisije 2040

[ANALITIČNI_OKVIR] : TRACE → PyPSA-Eur
Sklopitev modelov

[VIR_PODATKOV] : Nature Communications
(Neumann et al., 2025)

Paradigma neto ničelnih emisij: Inženirska dilema

Doseganje ogljične nevtralnosti do leta 2050 zahteva masovno preoblikovanje energetskega sistema. Inženirski izziv ni zgolj proizvodnja, temveč optimizacija topologije celotnega sistema.



100% Samozadostnost

- Ekstremni pritisk na rabo prostora v EU.
- Potreba po masovni širitvi prenosnih omrežij in proizvodnih kapacitet.
- Visoki mejni stroški (LCOE) na sub-optimalnih lokacijah.



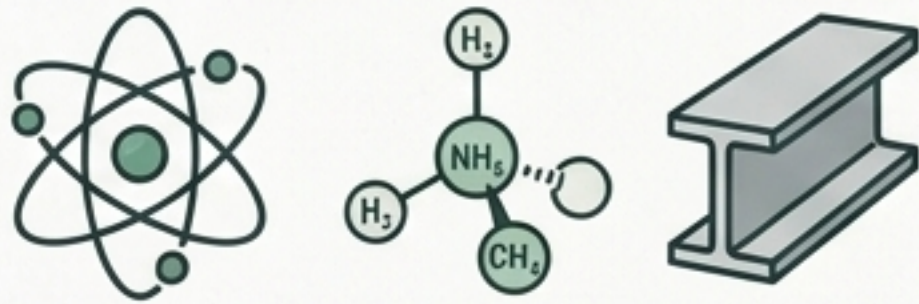
Uvoz energije

- Izkoriščanje globalno najboljših pogojev (veter/sonce).
- Manjši pritisk na domačo infrastrukturo.
- Tveganje: Nova geopolitična odvisnost in kompleksnost dobavnih verig.

Večdimenzionalni optimizacijski problem

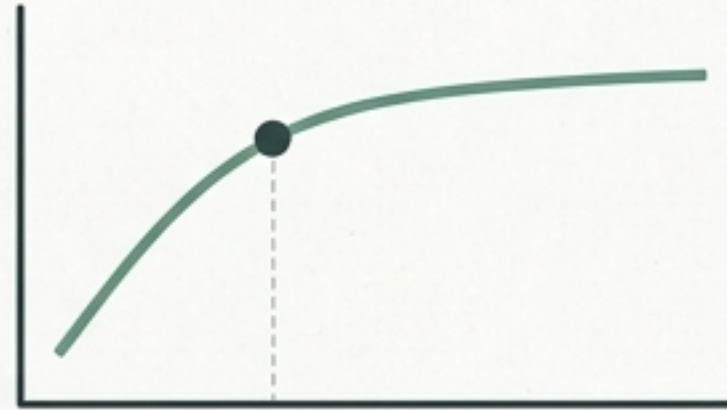
Vključitev uvoza v evropski sistem ni binarna odločitev. Rešiti moramo sistemsko enačbo s tremi ključnimi spremenljivkami:

KAJ uvoziti? (Vektor)



Elektroni (HVDC), Molekule (H₂, NH₃, CH₄) ali Materiali (Jeklo/HBI, Metanol)?

KOLIKO uvoziti? (Volumen)



Kje je točka preloma (diminishing returns) med prihranki in stroški uvoza?

OD KOD uvoziti? (Geografija)

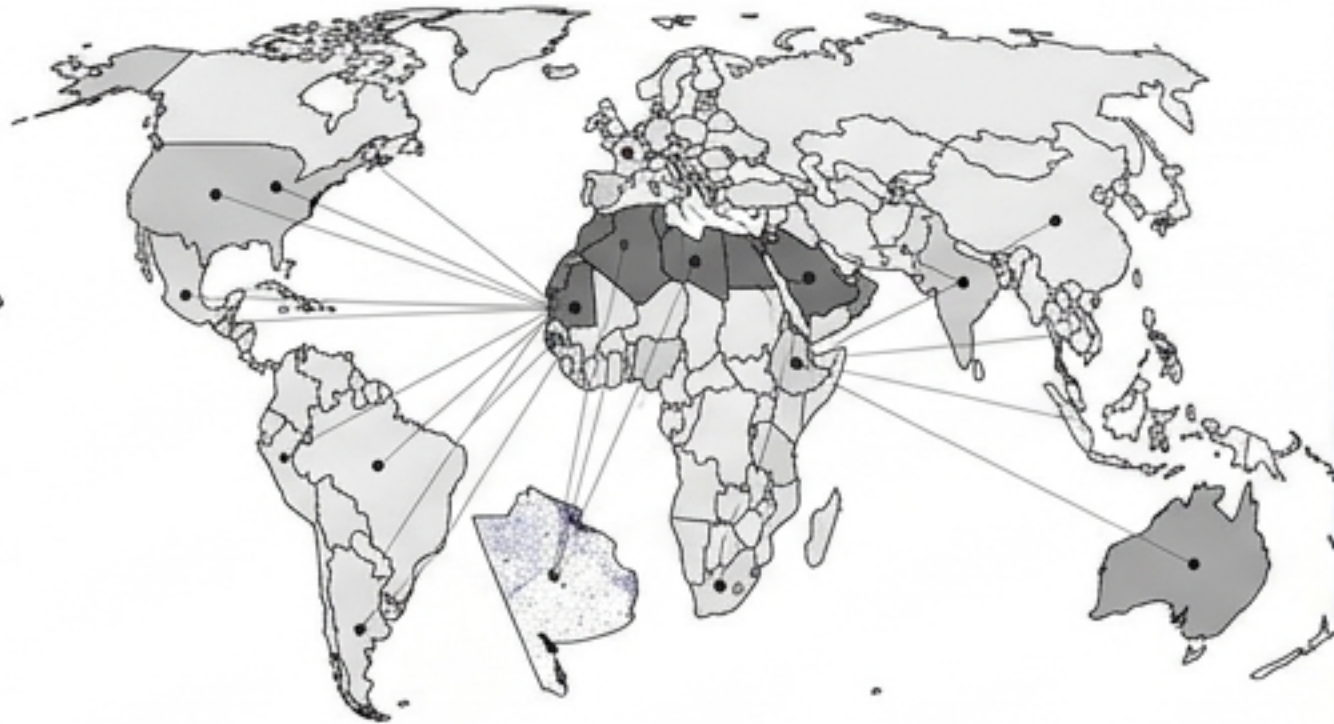


Kako oddaljenost in pogoji financiranja (WACC) vplivajo na končno ceno (LCOE)?

GLAVNA NEZNANKA: Kako sprememba teh treh spremenljivk mutira topologijo in dimenzioniranje domačega (EU) omrežja?

Arhitektura sklopitve modelov: TRACE + PyPSA-Eur

Model TRACE



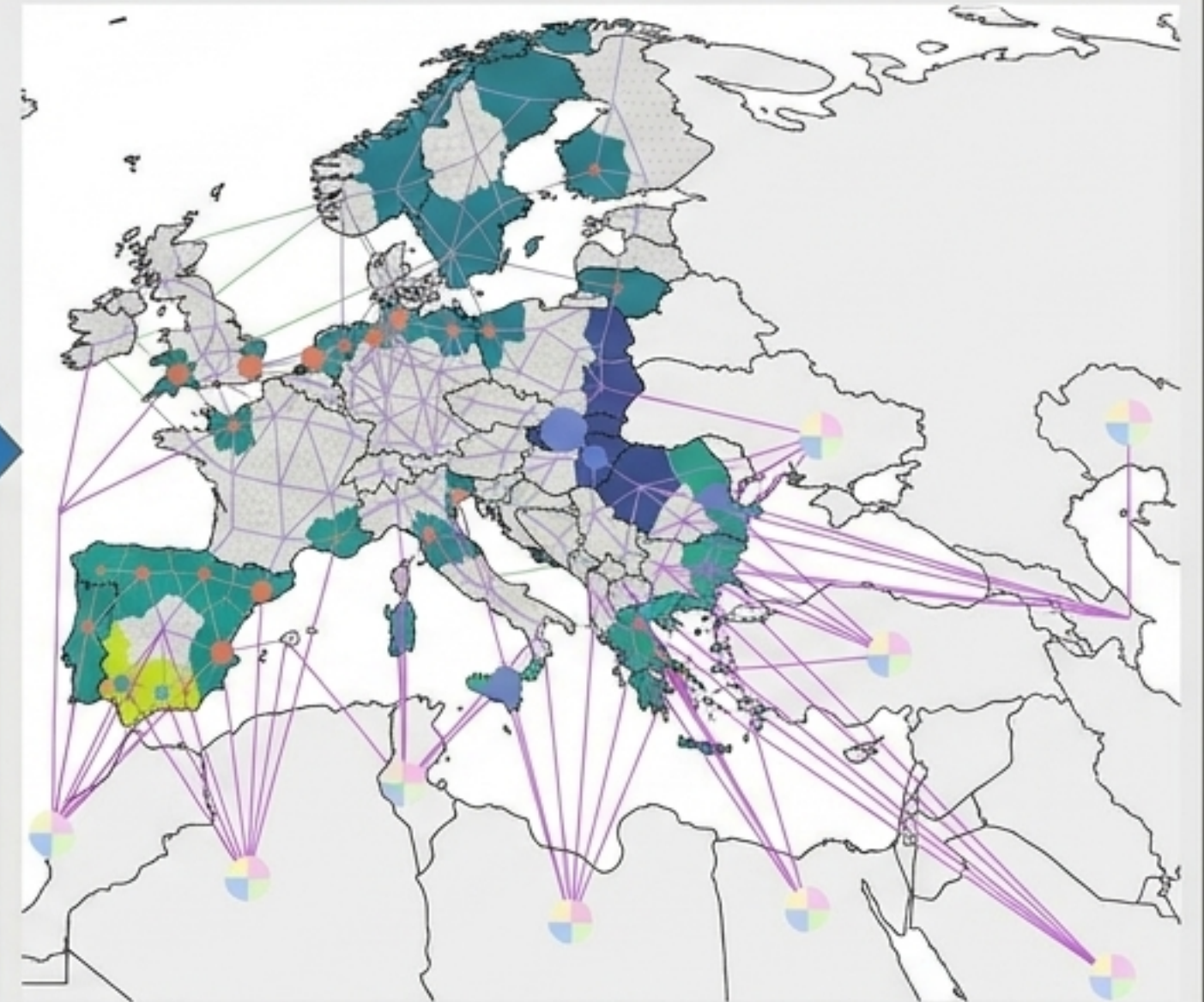
Področje: Globalne dobavne verige (53 regij zunaj EU).

Vhodi: Vreme (ERA5), raba tal, povpraševanje, transport.

Izhod: Minimalni povprečni stroški uvoza (LCOE) za vektorje.

Prenos parametrov:
500 TWh omejitev na
regijo, specifične
vstopne točke

Model PyPSA-Eur







Področje: Evropski energetski sistem (115 regij).

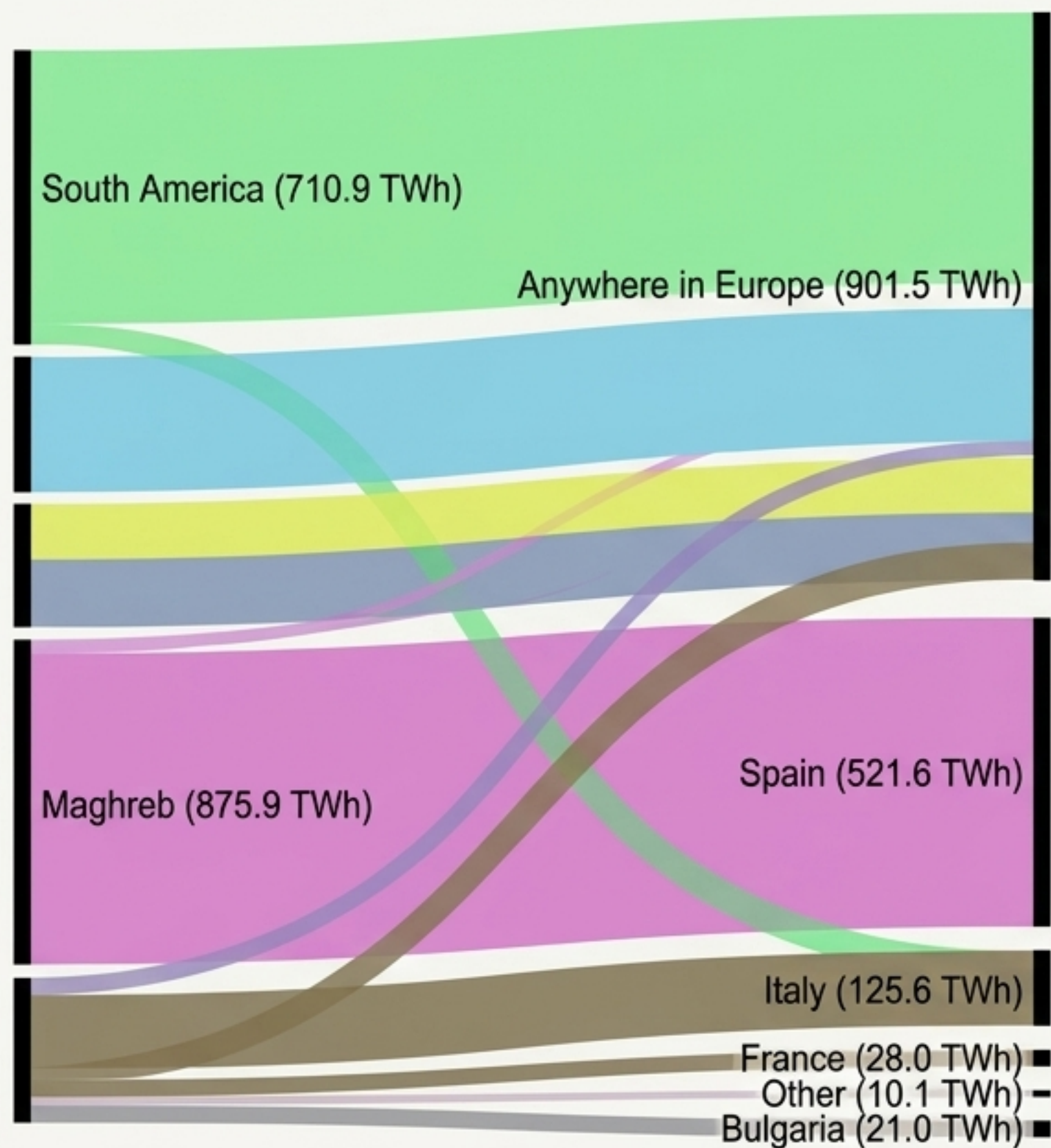
Resolucija: 4-urna urno-ekvivalentna resolucija za 1 leto.

Optimizacija: Skupno načrtovanje investicij in obratovanja (omrežja, shranjevanje, PtX).

Matrika energetskega vektorjev: Diagnostika nosilcev

Nosilec	Transport & Shranjevanje	Vir Ogljika (DAC)	Vpliv na EU Infrastrukturo
 Elektrika (HVDC)	Izziv na dolge razdalje (izgube), ni primerno za hrambo.	N/A	Zmanjša PtX, a zahteva robustno AC omrežje ob vstopu.
 Vodik H2 (Plinovod/Ladja)	Najcenejši transport iz bližnjih regij. Težje sezonsko shranjevanje.	N/A	Določa obseg hrbteničnega H2 omrežja v EU.
 Utekočinjeni derivati (NH3, MeOH, FT)	Visoka gostota energije, enostaven ladijski transport.	Za MeOH/FT nujen trajnostni CO2 (drago zajemanje iz zraka).	Drastično zmanjša potrebo po transportu H2 znotraj EU.
 Materiali (Jeklo/HBI)	Zelo poceni transport na enoto energije.	N/A	Sproži selitev težke industrije in odstrani industrijski H2 odjem.

Optimalni uvozni mikš in sistemski prihranki



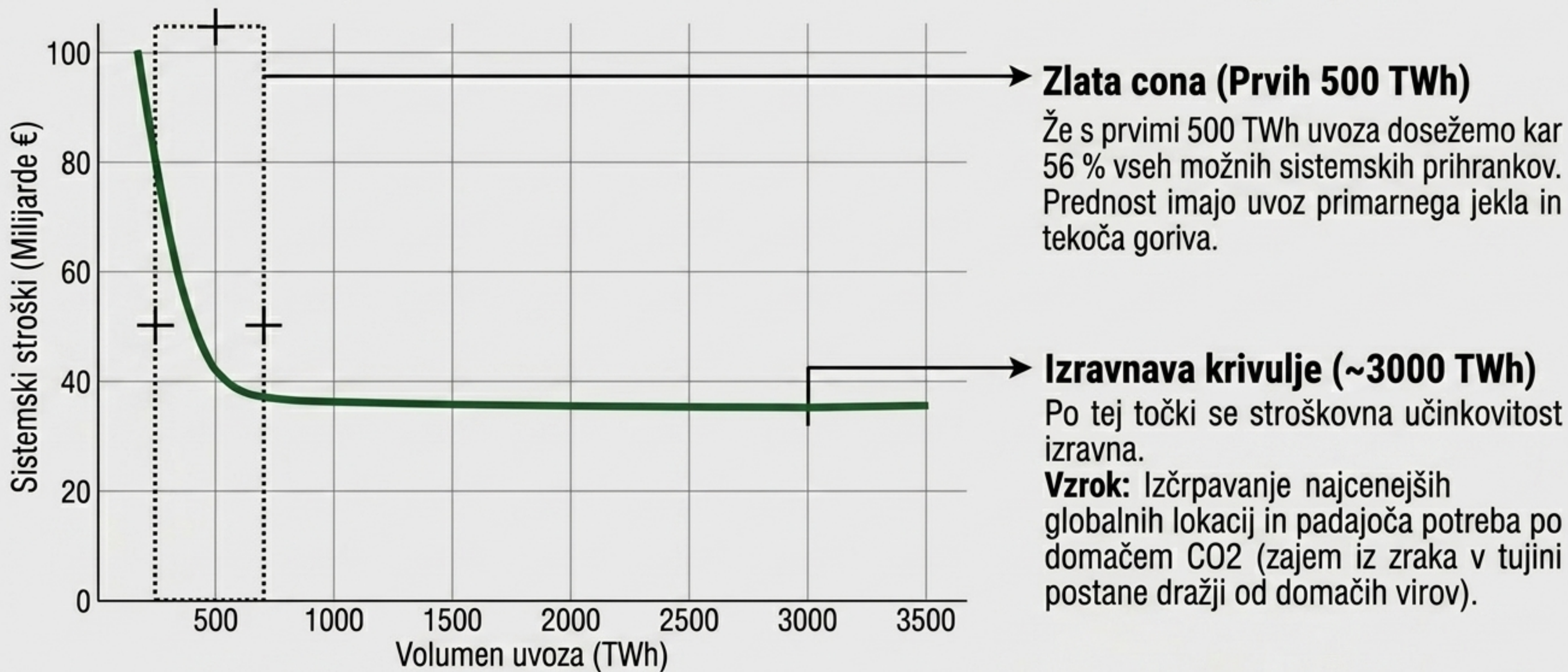
- 37.000.000.000 € / leto
(-4,4 % sistemskih stroškov)

Sankeyeva razčlenitev (Kaj uvažamo?):

- **45 %** Tekoča ogljična goriva (Fischer-Tropsch, Metanol iz Južne Amerike in od drugod).
- **35 %** Vodik (Večinoma po cevovodih iz Magreba v Španijo).
- **< 10 %** Električna (Specifične HVDC povezave, npr. Tunizija → Italija).
- **100 %** Primarno jeklo in amoniak (Popoln uvoz, nobene domače sinteze).

Opomba: Kljub dostopnemu uvozu sistem še vedno usmeri 77 % vseh stroškov v izgradnjo domače infrastrukture (ravnovesje, ne popolna odvisnost).

Zakon padajočih donosov: Točka inženirskega preloma

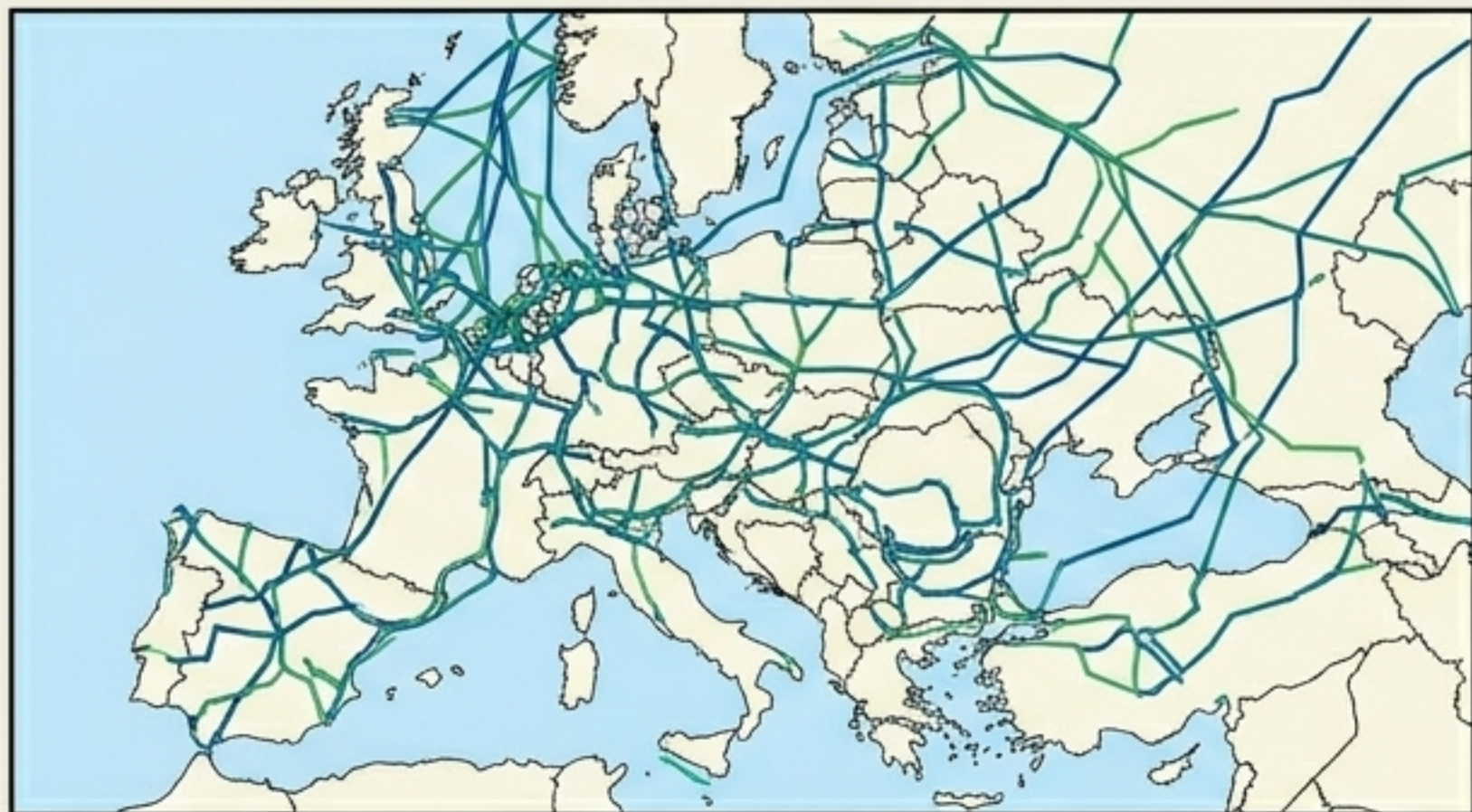


Glavna ugotovitev: Linearno povečanje uvoza NE prinaša linearne padca stroškov.

Učinek na topologijo: Kolaps potrebe po H2 hrbtenici

- 70 % zmanjšanje obsega H2 plinovodov

Brez uvoza



Obseg: 57 TWkm.
Masovni transport čistega H2 od obalnih vetrnih elektrarn do industrijskih centrov v notranjosti.

Z uvozom derivatov



Obseg: Radikalno krčenje (prihranek preko 2 mlrd €/leto).

Inženirski razlog: Uvoz derivatov (metanol, jeklo, amoniak) izniči potrebo po transportu surovega vodika. Derivati so tekoči in se distribuirajo ceneje. Domač H2 ostane le v lokalnih industrijskih grozdih.

Dinamika elektroenergetskega omrežja (AC/DC)

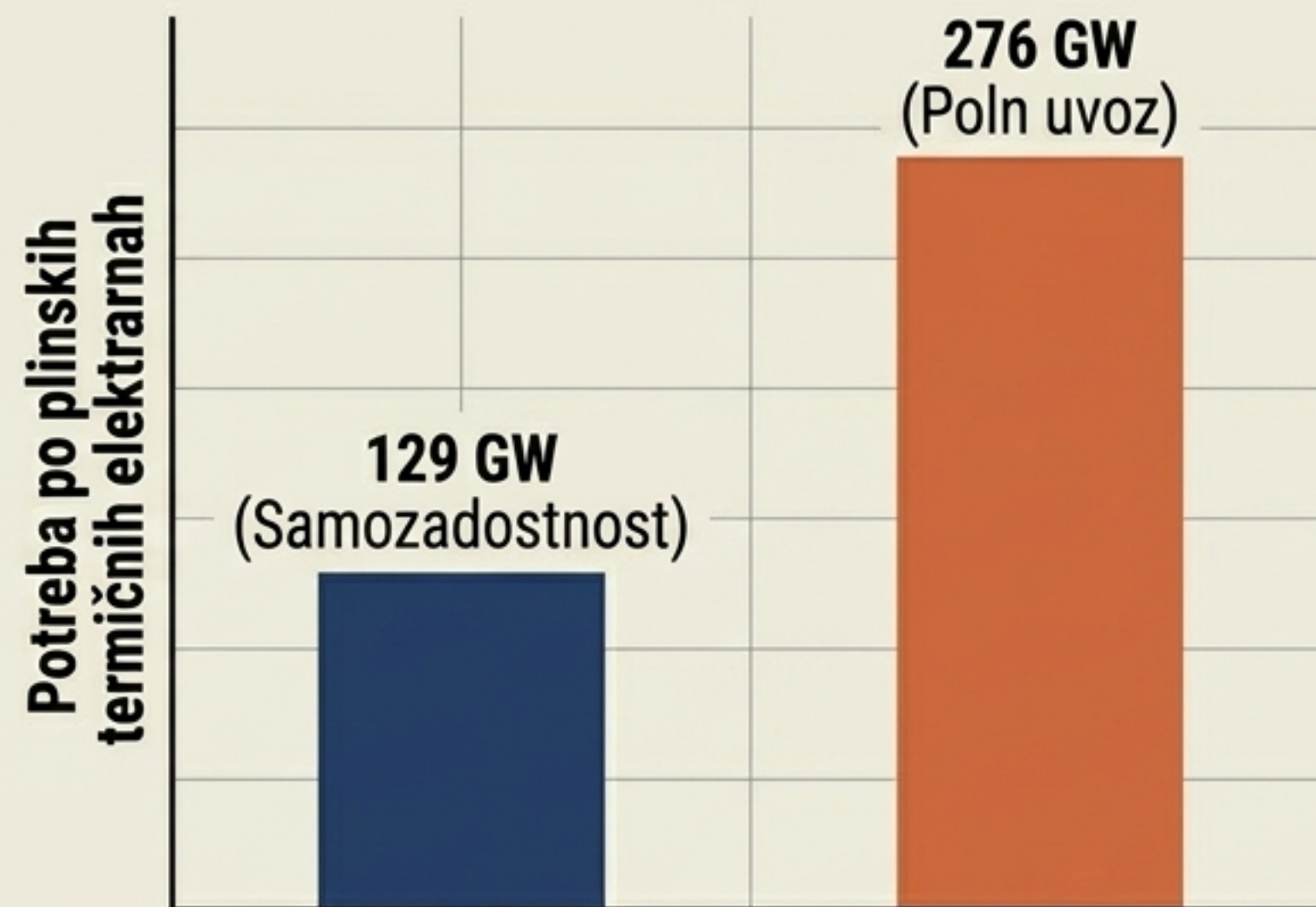
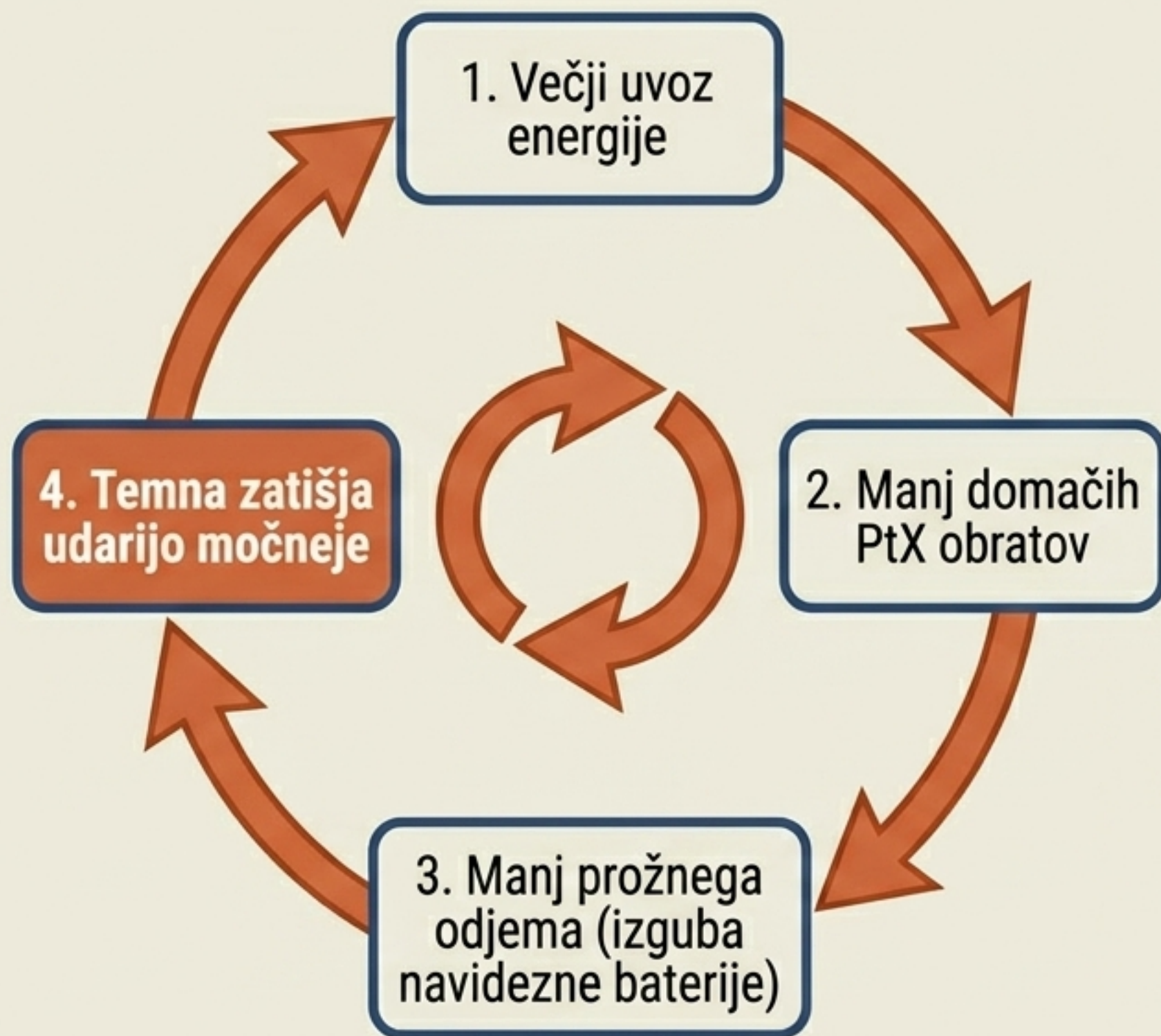


[METRIKA]: -20 %
Omrežna širitev

Glavna ugotovitev: Uvoz zelenih molekul zmanjša potrebe po širitvi domačega AC prenosnega omrežja za 20 %.

- HVDC Integracija (Elektroni):
 - Uvoz elektrike ostaja relativno majhen (<10 % uvoza) zaradi izgub in variabilnosti.
 - Strateška vozlišča: Namesto masovnega kabliranja prek Sredozemlja, model izbere ciljne vstopne točke HVDC (npr. iz Tunizije na Sicilijo), kjer AC omrežje že ima absorpcijsko zmogljivost.
- Znižanje obremenitve:
 - Uvoz goriv razbremeni severnoevropska vozlišča, kjer bi sicer morali graditi gigavatske elektrolizerje in drastično širiti omrežje.

Paradoks termičnih rezerv: Izguba sistemske fleksibilnosti

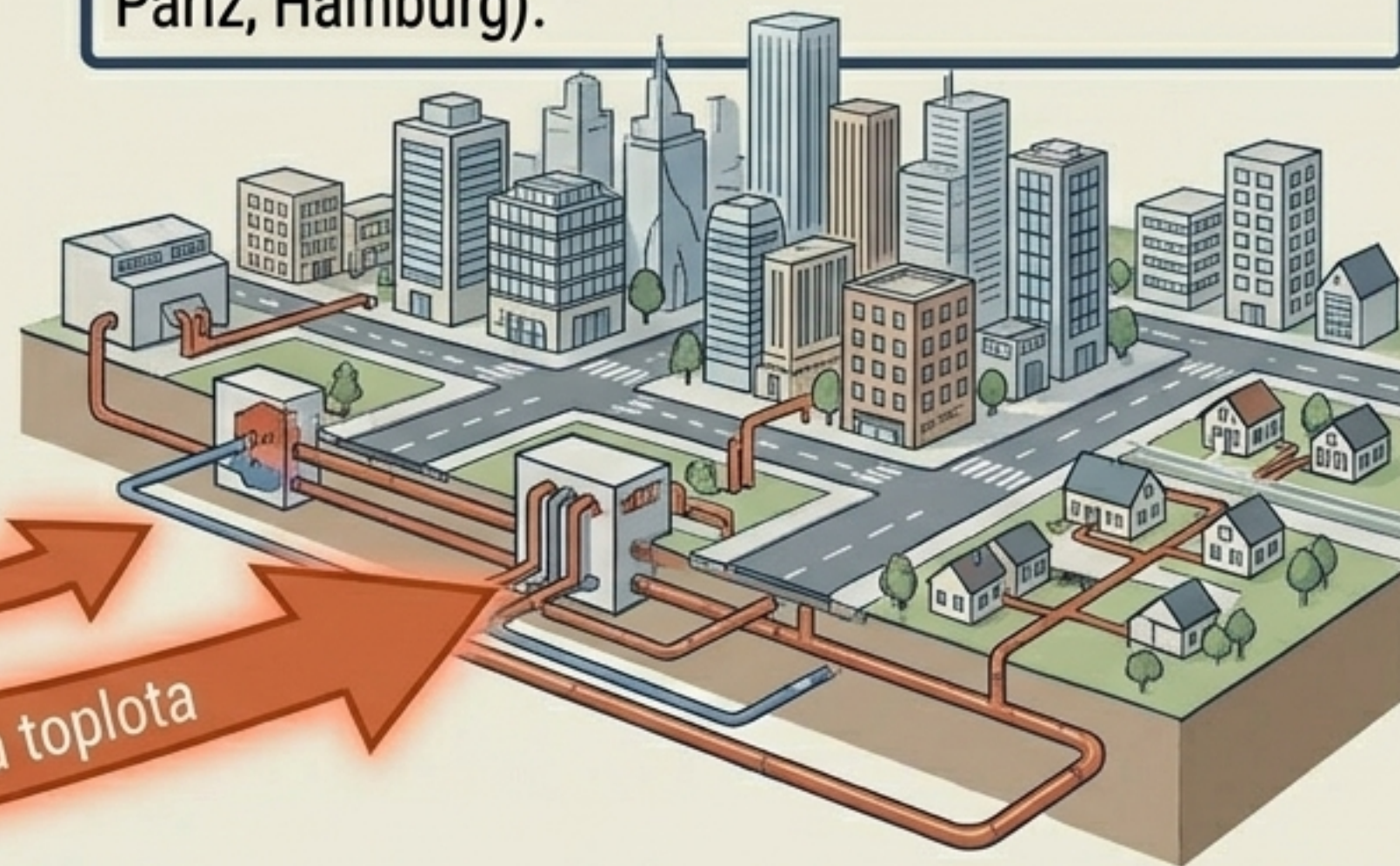
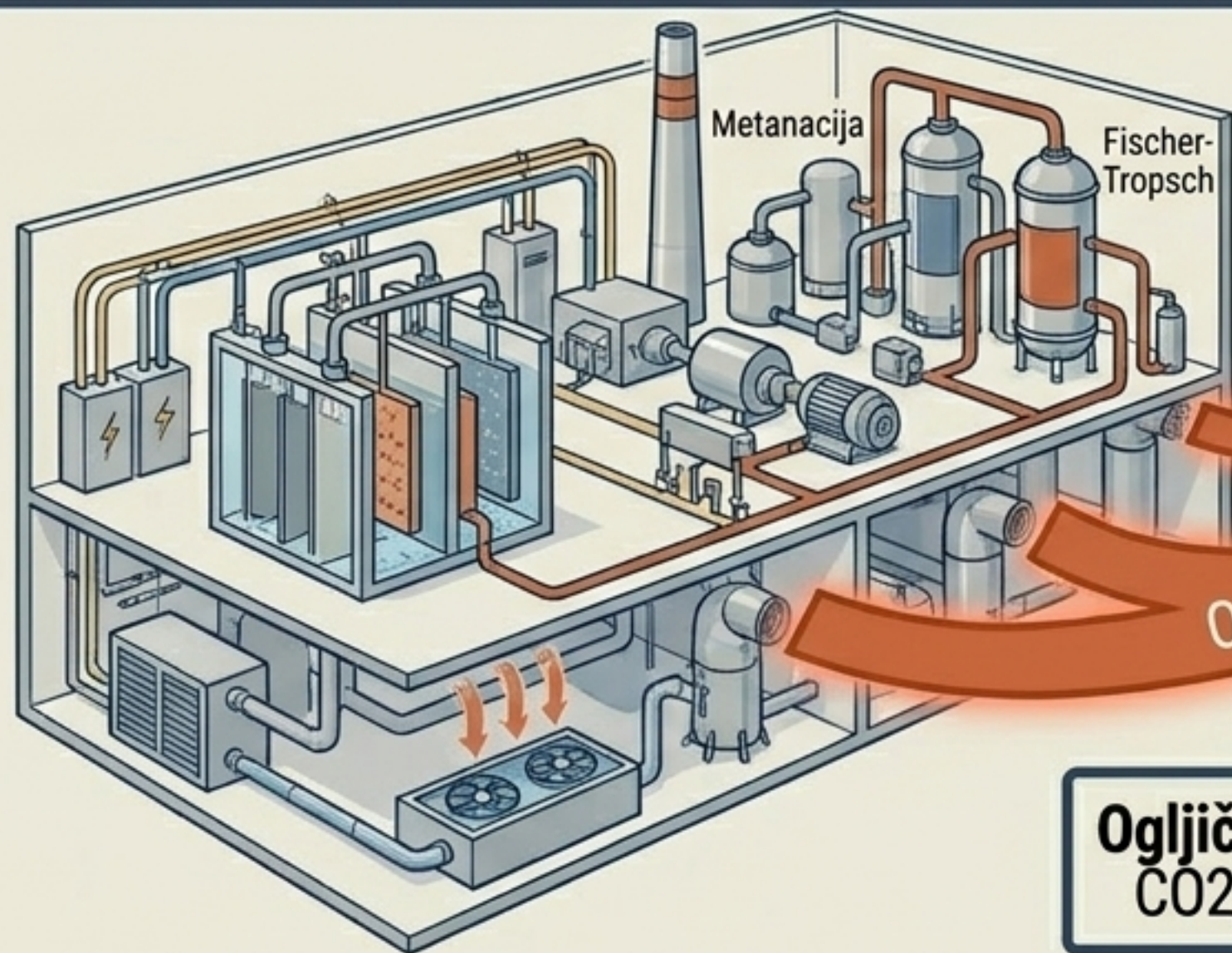


Inženirski rezultat: Za ohranitev stabilnosti (N-1 varnost, pokrivanje konic ob pomanjkanju vetra in sonca) mora Evropa zgraditi več kot dvakrat več plinskih (termičnih) rezerv. Sistemska redundanca preide z elektrolizerjev na turbine.

Termodinamika: Zakaj ohraniti del domače PtX proizvodnje?

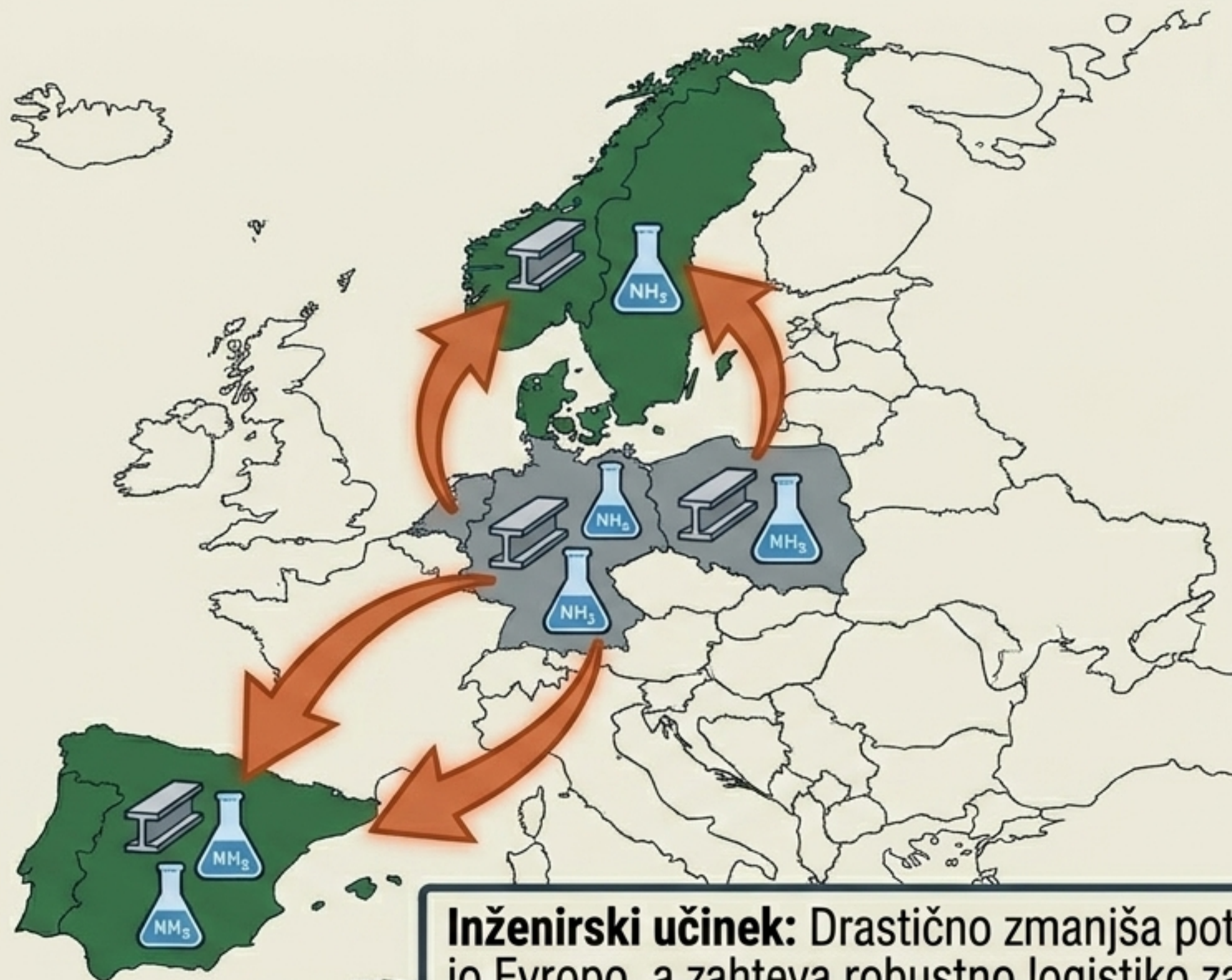
Termodinamična prednost: Procesi elektrolize in sinteze (Metanacija, Fischer-Tropsch) generirajo ogromno odpadne toplote. Če to toploto zajamemo v daljinskega ogrevanja (namesto da bi jo v puščavi sistemu prihranimo do 20 milijard € letno).

Lokacijska optimizacija: Model zato ne preseli celotne proizvodnje v tujino. Obrate locira blizu velikih toplotnih ponorov (velika mesta npr. Pariz, Hamburg).



Ogljična simbioza: Domači obrati izkoristijo obstoječe biogene vire CO₂, medtem ko tujina zahteva drago zajemanje iz zraka (DAC).

Premik težke industrije: Selitev namesto transporta



Sistemiški koncept:

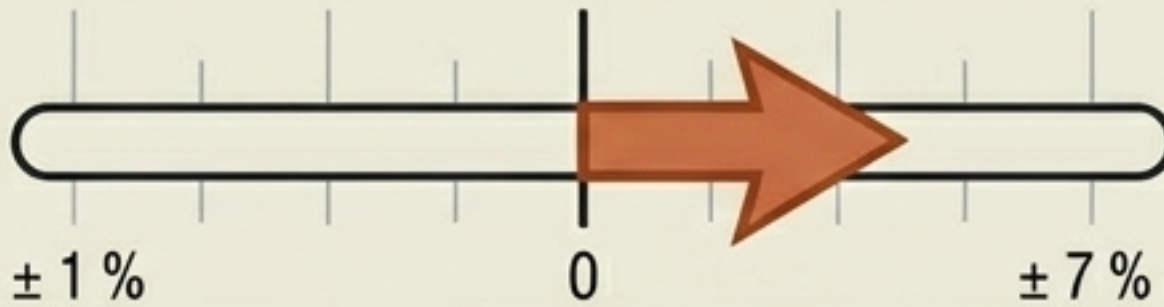
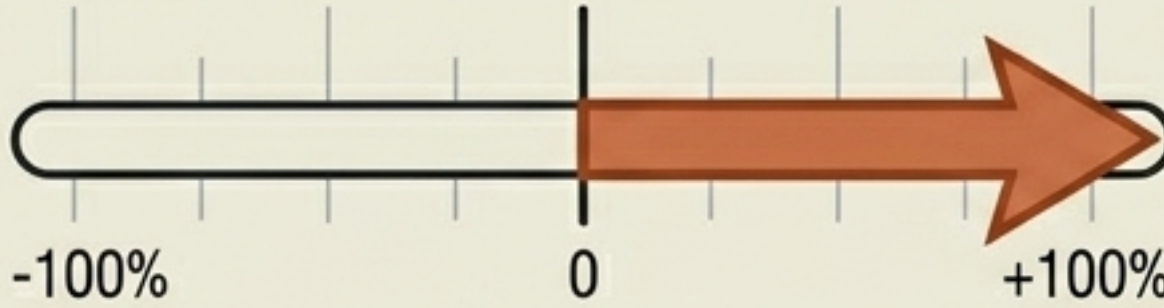

Namesto gradnje H₂ plinovodov do obstoječih tovarn jekla, model endogeno "preseli" industrijo na območja z najcenejšo energijo.

Jeklo in Amoniak (Relocation):

- Proizvodnja primarnega jekla (DRI/EAF) in amoniaka se močno lokalizira (>30 % tržni delež v posameznih regijah).
- Zmagovalci relokacije: Skandinavija in Španija postaneta nova epicentra zaradi dostopa do poceni vetra in sonca (ali uvoza na obali).

Inženirski učinek: Drastično zmanjša potrebe po transportu energentov skozi srednjo Evropo, a zahteva robustno logistiko za končne produkte (jeklene tuljave, gnojila).

Analiza občutljivosti: Inženirska robustnost modela

Δ Stroški kapitala (WACC) v tujini	 <p>± 1 % 0 ± 7 %</p>	<p>± 1 % razlika v WACC (politično tveganje) spremeni končno ceno uvoza za ± 7 %.</p>
Δ Stroški zajema ogljika (DAC)	 <p>-100% 0 +100%</p>	<p>Podvojitve stroškov DAC v tujini (+100 %) dvigne ceno tekočih goriv za 17 %. Model preklopi nazaj na direkten uvoz H₂.</p>
Δ Dostop do biogenega CO ₂	 <p>-16% 0 16%</p>	<p>Če exporting regije dobijo dostop do poceni CO₂ (50 €/t), LCOE uvoženih goriv pade za 16 %.</p>

Zaključek: Izbira vektorja je izjemno občutljiva na stroške kapitala in dostopnost vira ogljika. Kljub motnjam je model robusten pri priporočilu mešanega portfelja.

Sinteza: Ploščato dno in manevrski prostor

Sistemiški vpogled:


Optimizacijska krivulja ima "ploščato dno" (flat solution space).

Povečanje ali zmanjšanje uvoza za ± 1000 TWh okoli optimuma spremeni sistemske stroške za zanemarljiv delček.

Inženirski in politični pomen:

Ni strme ekonomske kazni za odstopanje od absolutnega matematičnega optimuma.

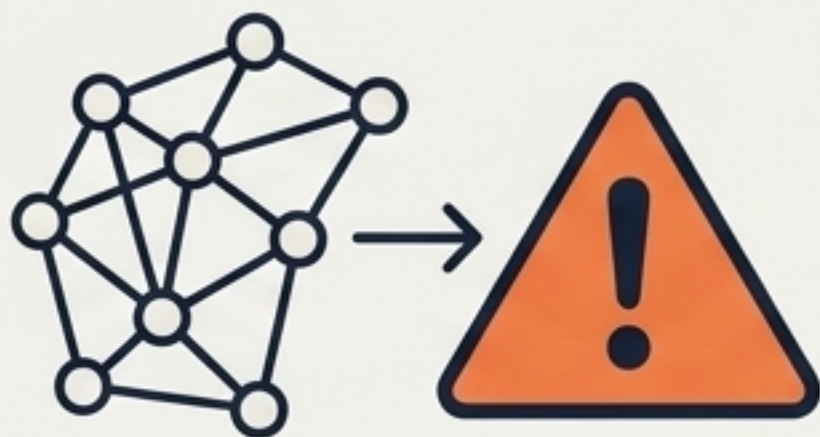
Sistem dopušča načrtovanje na podlagi netehničnih faktorjev.



[MANEVRSKI PROSTOR]

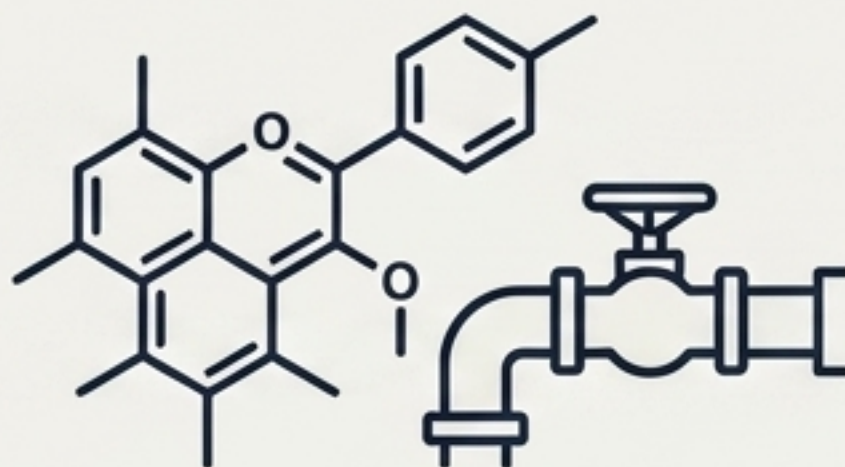
Kompromisi so varni: Evropa se lahko odloči za diverzifikacijo virov, ladijski transport ali ohranjanje lokalnih delovnih mest, ne da bi s tem finančno uničila tranzicijo. Najboljša inženirska rešitev tukaj ni najcenejša, temveč najbolj robustna.

Ključni inženirski sklepi



1. Paradoks infrastrukture

Uvoz znatno zmanjša potrebe po prenosnih omrežjih in H2 plinovodih (-70 %), a hkrati zahteva **podvojitev** plinskih termičnih rezerv (iz 129 GW na 276 GW) zaradi izgube **prožnosti** PtX obratov.



2. Nosilec določa omrežje

Kaj uvažamo, diktira topologijo. Masoven uvoz **derivatov** (metanol, amoniak) in **surovega jekla izniči** potrebo po vseevropski hrbtnici **surovega vodika**.



3. Sistemska holistika

Popolno zanašanje na uvoz ni smiselno. Ohranitev dela domače **elektrolize** je ključna zaradi izkoriščanja **biogenega CO2** in integracije **odpadne toplote** v sisteme ogrevanja.

Optimalen energetski sistem ne maksimizira ene spremenljivke, temveč uravnoteži stroške, varnost in topološko stabilnost.