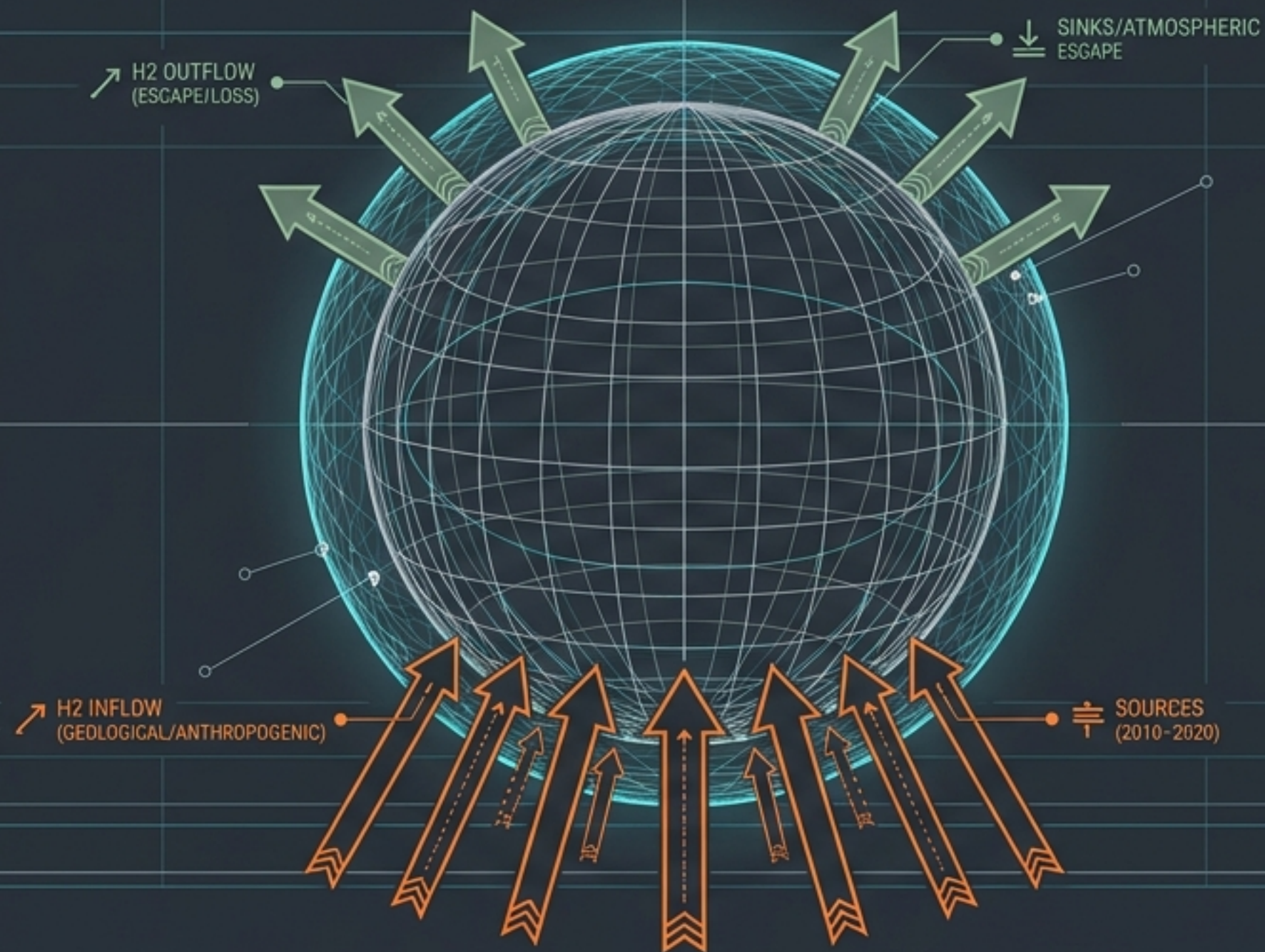
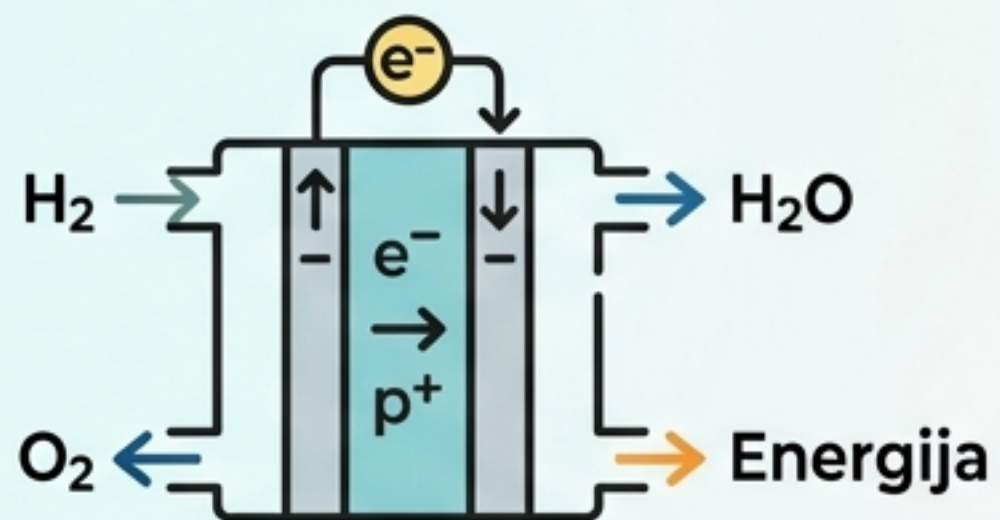


Zemeljski kontrolni volumen: Globalna bilanca vodika

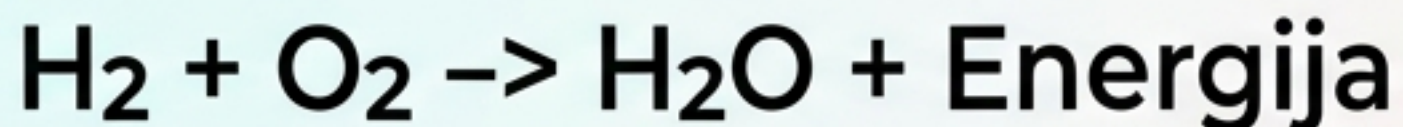
Sistemska analiza atmosferskih tokov, uhajanja in podnebnih vplivov (2010–2020)



Vizualni dokument za branje. Zasnovo na podatkih iz prve celovite globalne bilance vodika.



Teorija:
Utopija brez emisij



Direktne emisije $\text{CO}_2 = 0$



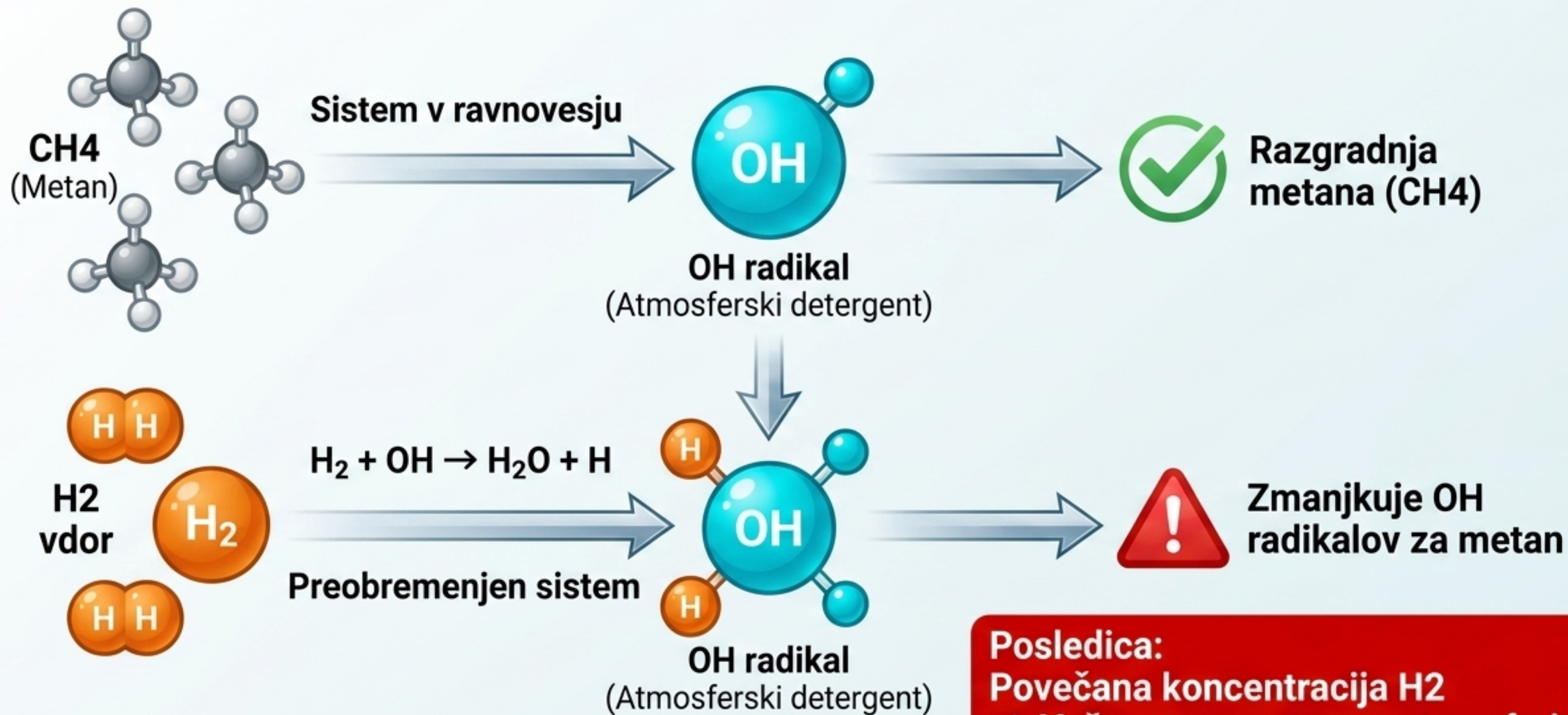
Fizikalna realnost:
Posredni toplogredni plin

$\text{GWP}_{100} = 11 \pm 4$

Življenjska doba
v atmosferi: **2.8 let**

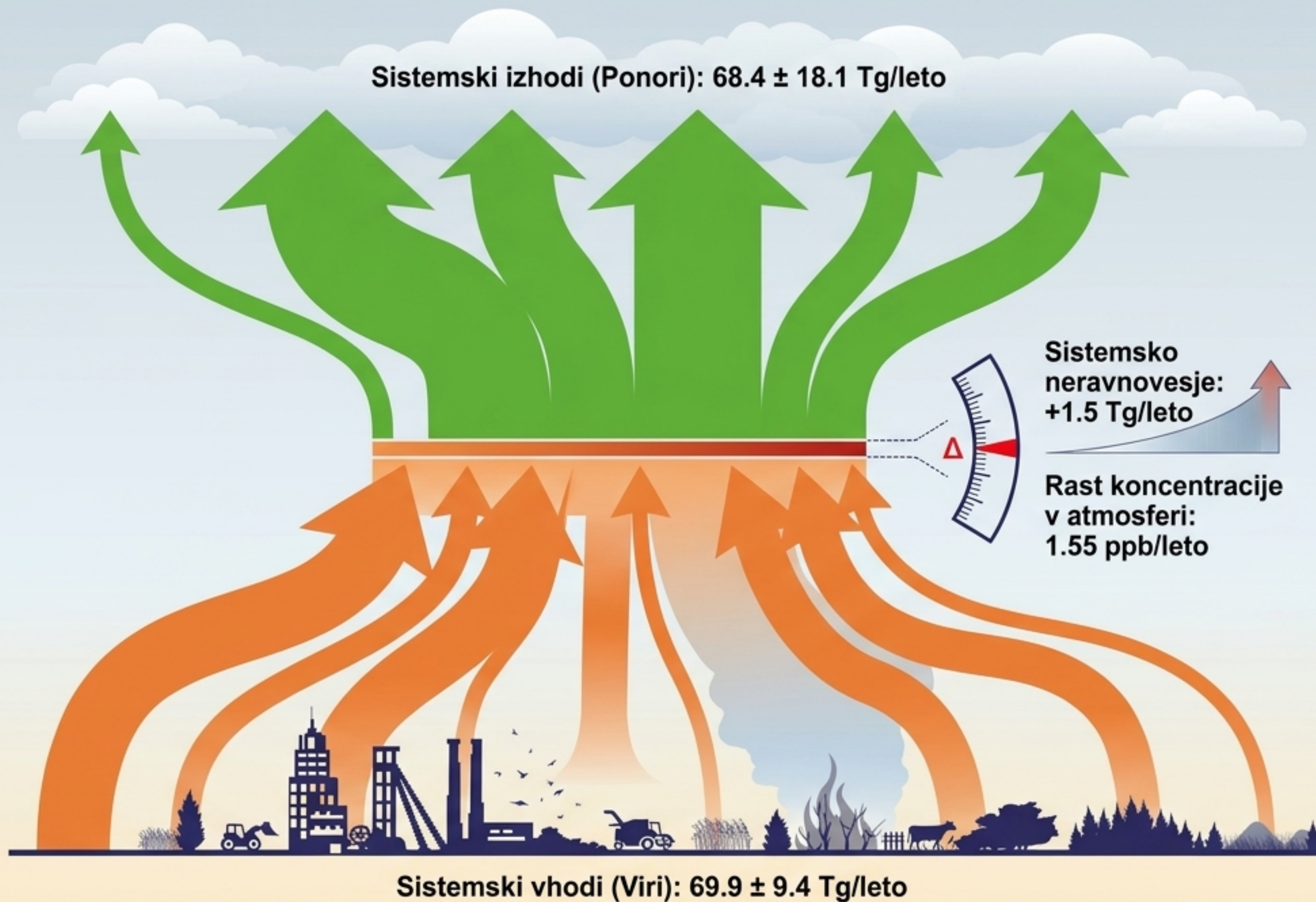
Uhajanje (leakage) iz tehnološke infrastrukture lahko izniči podnebne prednosti prehoda na vodikovo ekonomijo.

Nevidna zanka: Mehanizem posrednega segrevanja



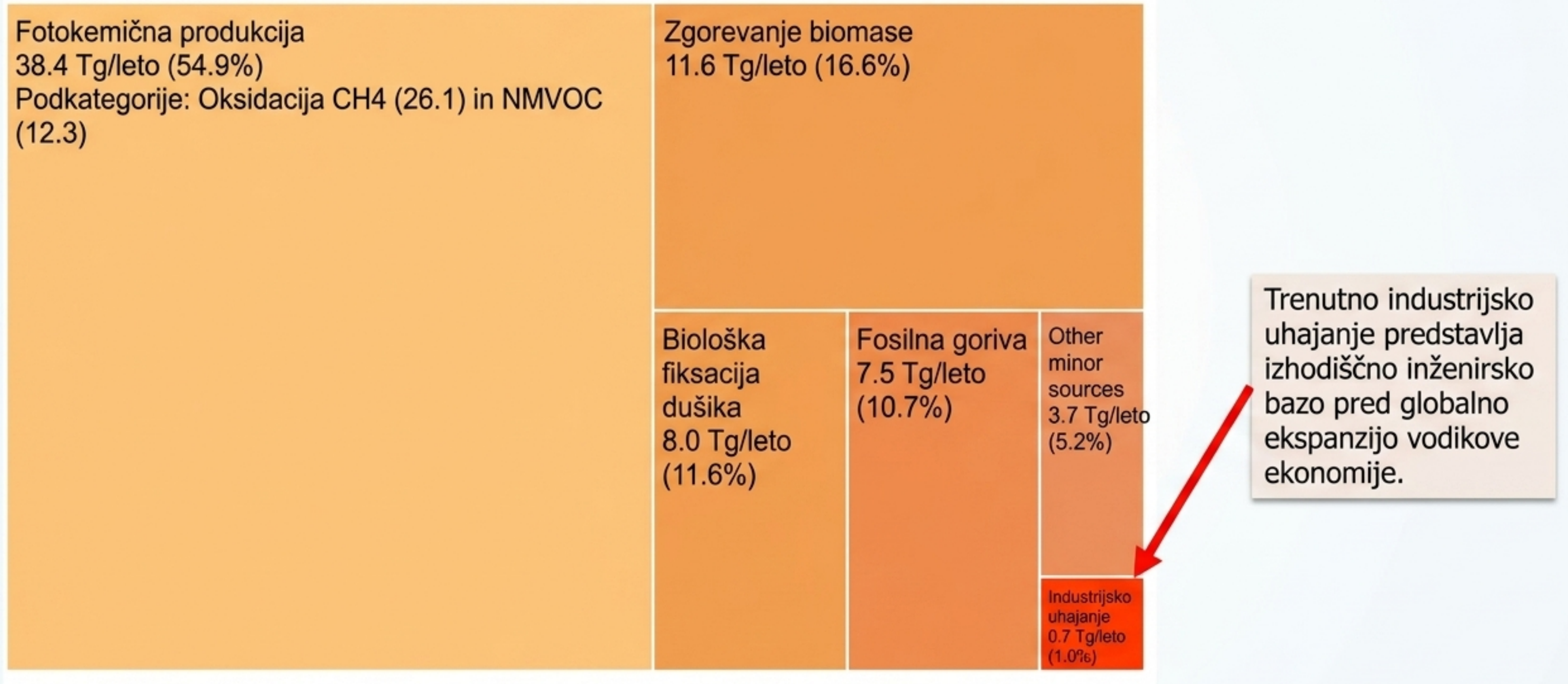
Posledica:
Povečana koncentracija H₂
→ Več metana ostane v atmosferi
→ Posredno segrevanje

Makro masna bilanca atmosfere (2010–2020)

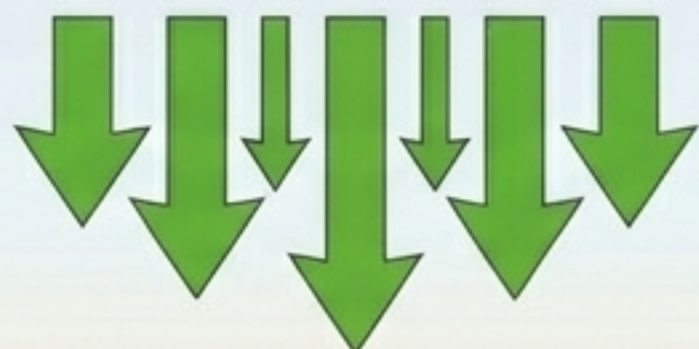


Kvantifikacija globalnih tokov razkriva, da je sistem na meji ravnovesja, kjer vsako novo antropogeno uhajanje povzroči dolgoročno akumulacijo.

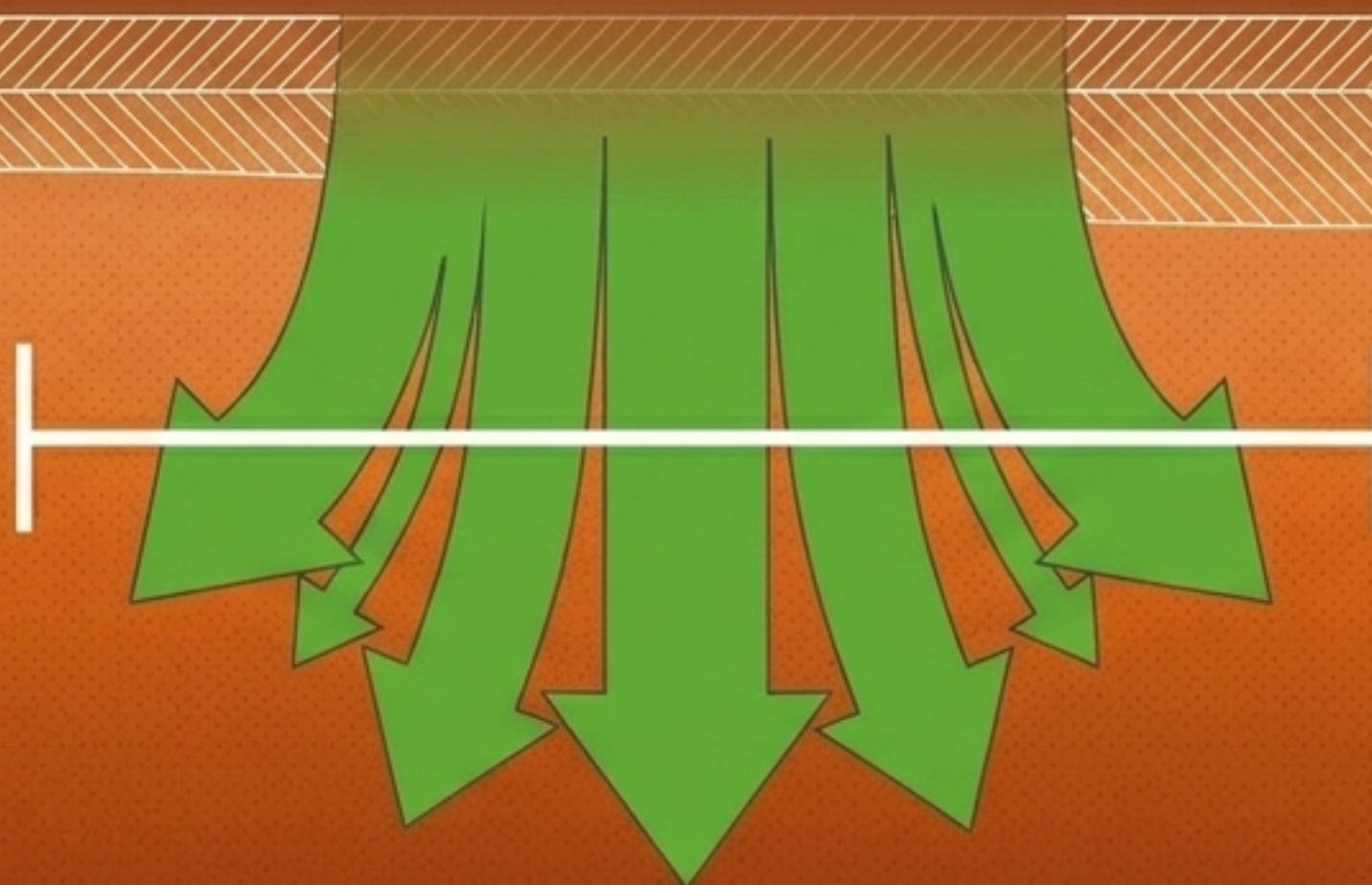
Strukturna dekonstrukcija virov vodika



Sistemski izhodi: Odvisnost od mikrobiologije



Kemična razgradnja z OH radikali
 18.4 ± 2.2 Tg/leto (27.0%)



Absorpcija v prsti
 50.0 ± 18.0 Tg/leto (73.0%)

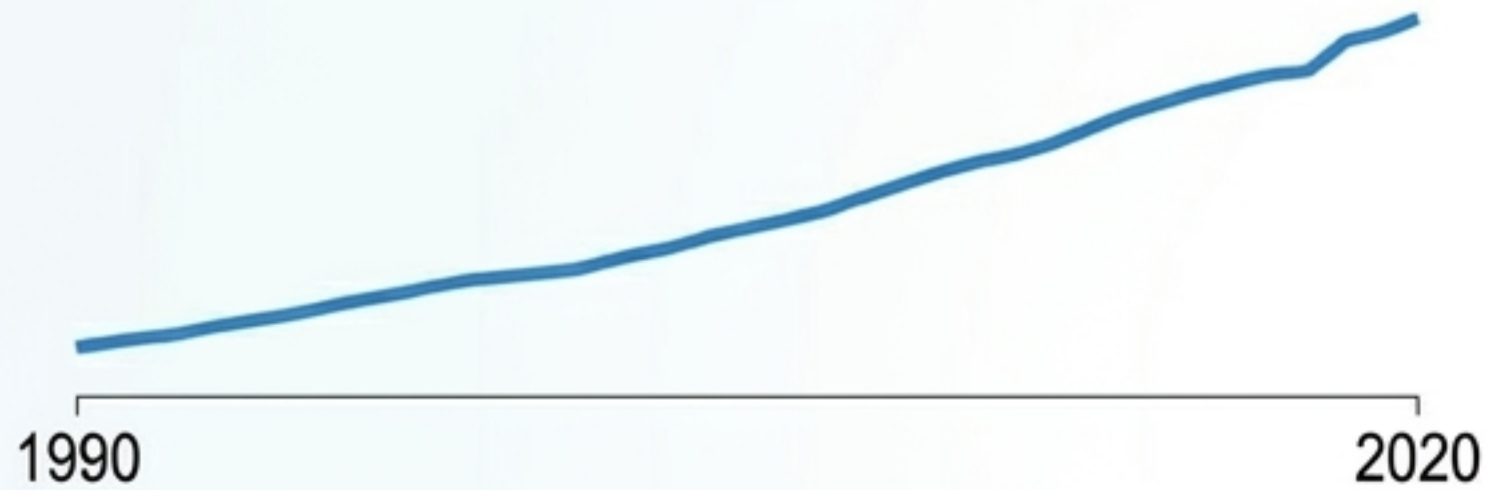
Inženirska opomba:

- Absorpcija v tla predstavlja največjo sistemsko negotovost (± 18 Tg). Parameterizacija procesnih modelov je kritično odvisna od poroznosti, vlage in temperature tal.
- Podnebne spremembe neposredno vplivajo na biološko sposobnost tal za vezavo vodika.

Sistemska dinamika: 30-letni zgodovinski trendi

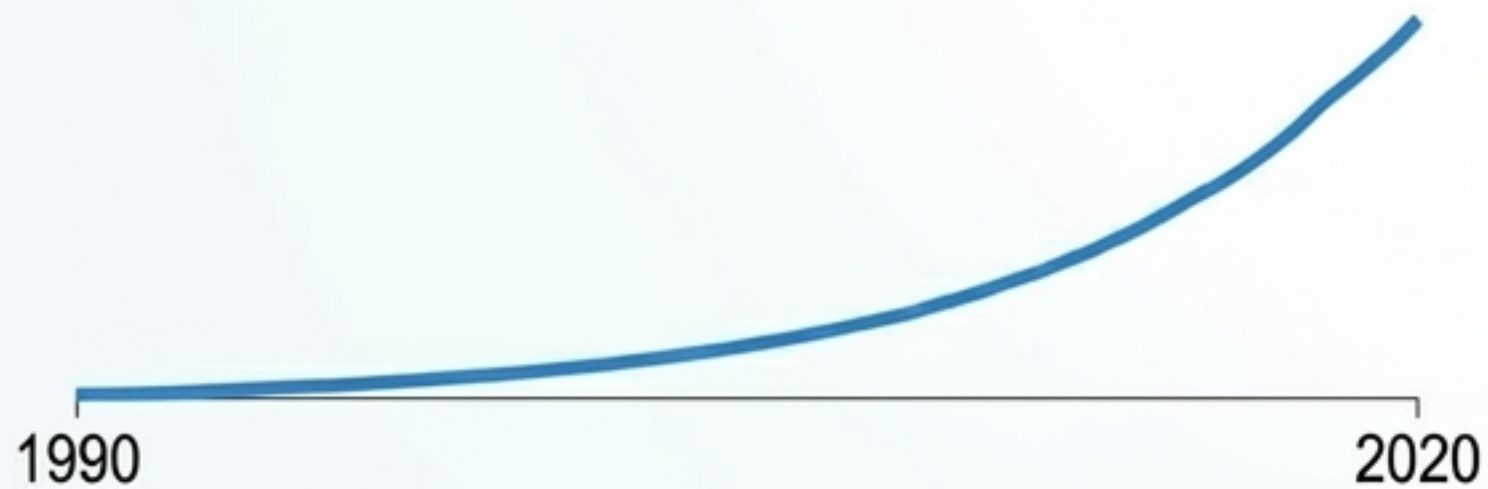
Rastoči tokovi (Povečevanje koncentracije)

Oksidacija CH₄



Strma rast zaradi povečanih globalnih emisij metana.

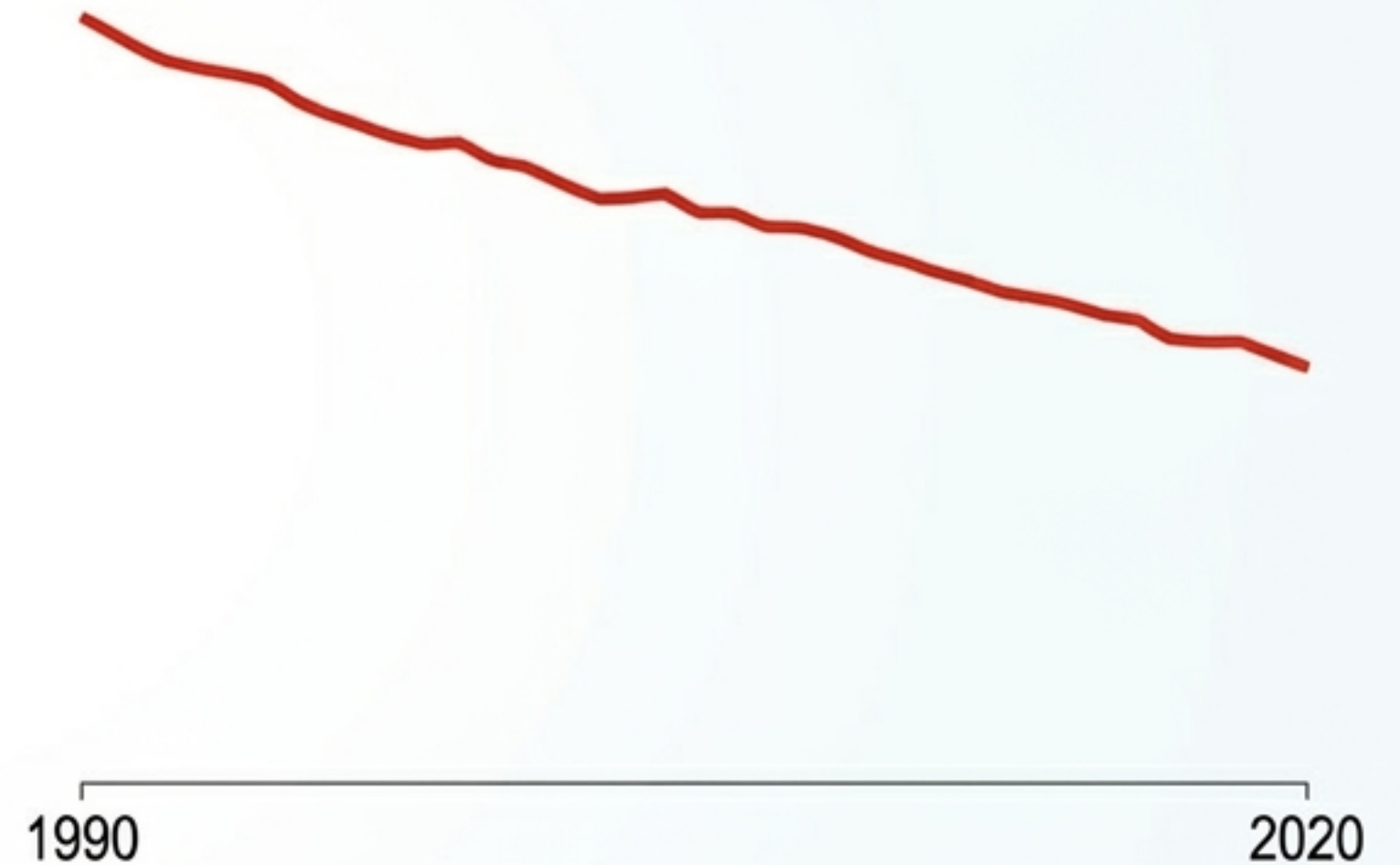
Uhajanje iz proizvodnje



EkspONENTNA rast zaradi rastoče industrijske rabe vodika.

Padajoči tokovi (Zmanjševanje emisij)

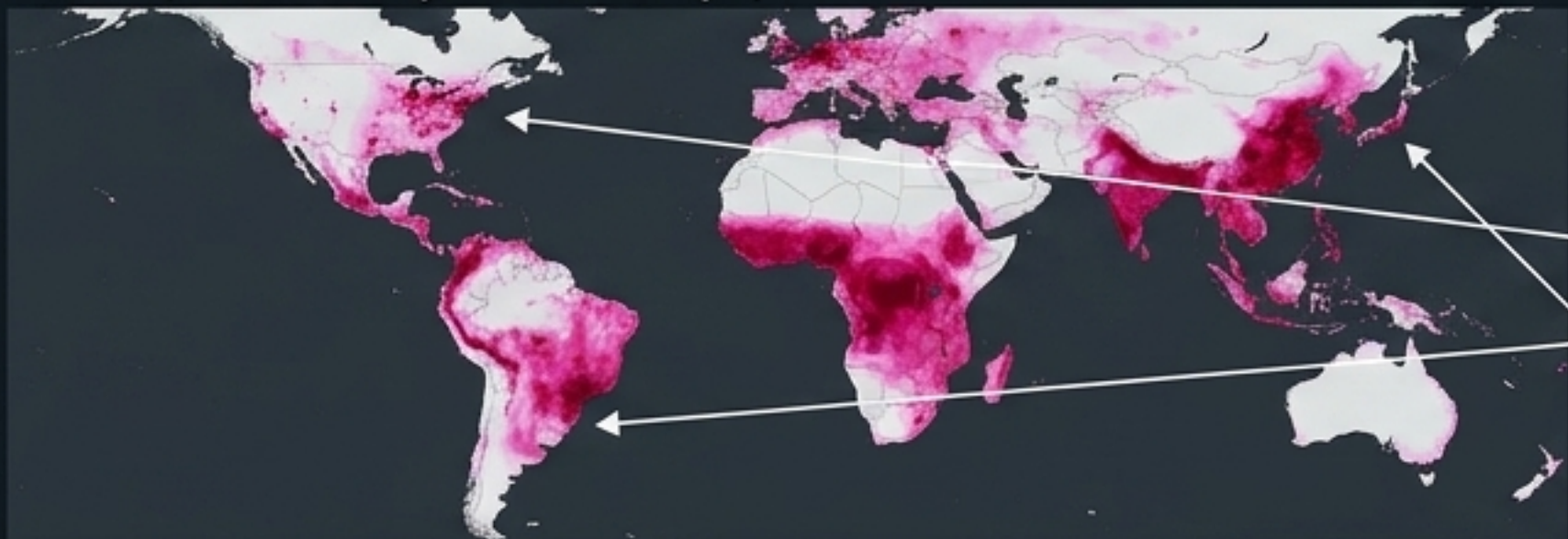
Fosilna goriva



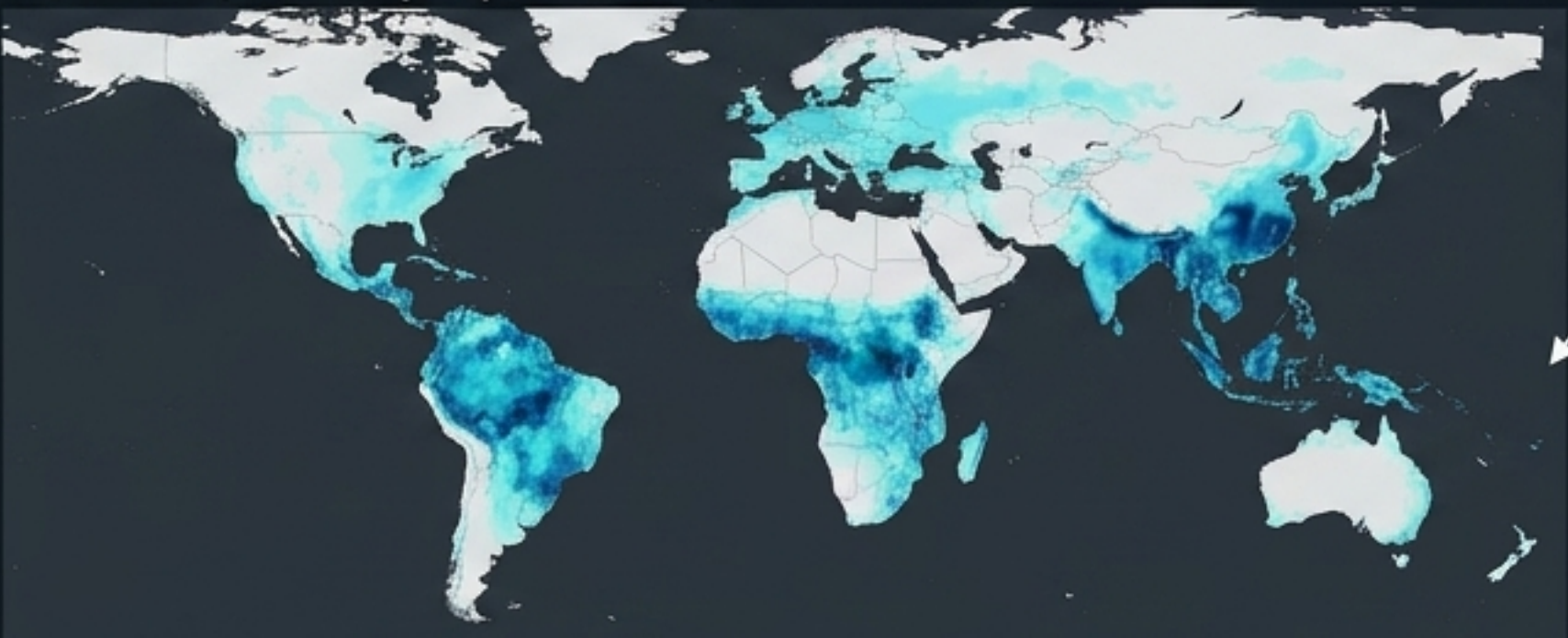
Konstanten padec (-0.1 Tg/leto) zaradi večje učinkovitosti zgorevanja v modernih motorjih.

Prostorska sinteza: Geografija atmosferskih tokov

Viri (Produkcija in emisije)



Ponori (Absorpcija v tleh)



Kritični tropi:

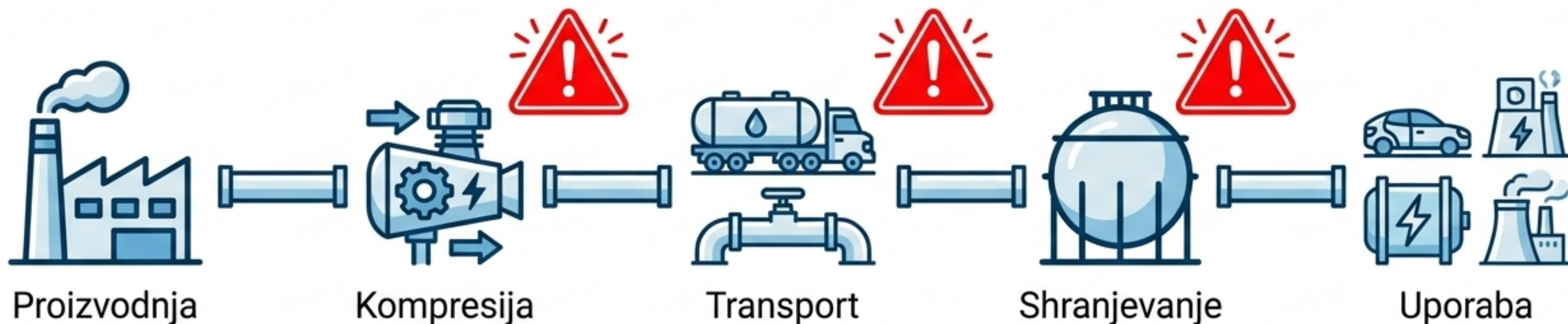
Afrika in Južna Amerika sta hkrati največja naravna vira (biomasa, NMVOC) in največja ponora (mikrobiološka absorpcija v tleh predstavlja okoli 50% globalne kapacitete).

Industrijski sever:

Severna polobla dominira predvsem pri direktnih antropogenih emisijah iz fosilnih goriv.

Zaključek: Dinamika atmosferskega vodika je globoko povezana z zdravjem tropskih ekosistemov.

Inženirski izziv: Infrastruktura in uhajanje (Leakage)



Plinasti H₂:

Uhajanje < 1%
Visok pritisk.

Utekočinjen H₂:

Uhajanje 1-10%
Ekstremen mraz, boil-off efekt.



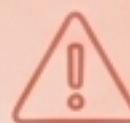


- Majhna molekula: Molekularna velikost vodika otežuje tesnjenje ventilov, spojev in kompresorjev v primerjavi z zemeljskim plinom.
- Trenutno se >99% proizvedenega H₂ porabi na mestu nastanka (1% uhajanje = 0.7 Tg/leto). Distribucijsko uhajanje šele prihaja z novo infrastrukturo.

Kvantifikacija podnebnih vplivov: Preteklost in prihodnost

Zgodovinsko dejstvo (2010–2020):

Dvig globalne temperature zaradi H2:

+0.02 ± 0.006 °C

	Nizko uhajanje (1%)	Visoko uhajanje (10%)
Visoka raba H2 (Scenarij SSP1) 	Učinek H2 segrevanja lahko upade ob hkratni hitri mitigaciji metana. 	Dodatno uhajanje izniči dobršen del koristi prehoda na čisto energijo (dodatno segrevanje 0.01–0.05 °C). 
Nizka raba H2 (Scenarij SSP5) 	Segrevanje eksponentno narašča predvsem zaradi posrednega nastanka H2 prek neomejenih emisij CH ₄ v atmosferi. 	

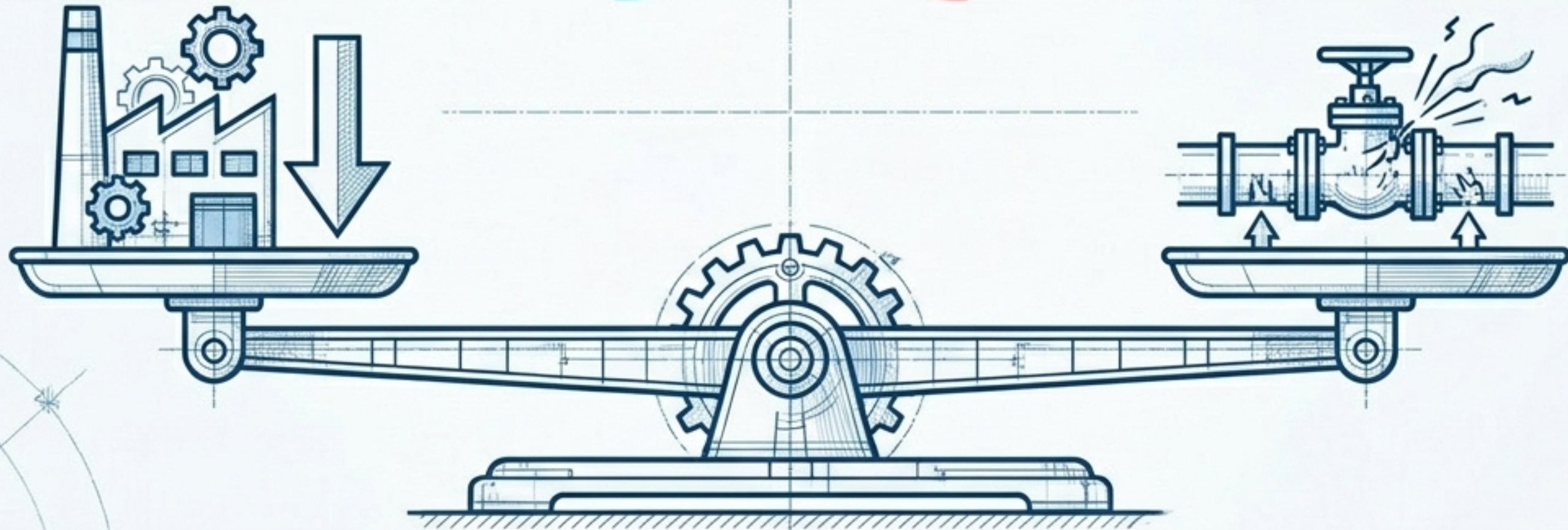
Kompenzacijski učinek: Paradoks vodikove ekonomije

Pozitiven klimatski učinek (Popravilo CH₄):

Globalni prehod zmanjša rabo fosilnih goriv
→ Manj emisij CH₄ → Zmanjšan naravni
nastanek H₂ prek fotolize metana.

Negativen klimatski učinek (Nova infrastruktura):

Visoka poraba H₂ → Povečan volumen
transporta → Neizogibno povečano
uhajanje iz omrežja v atmosfero.



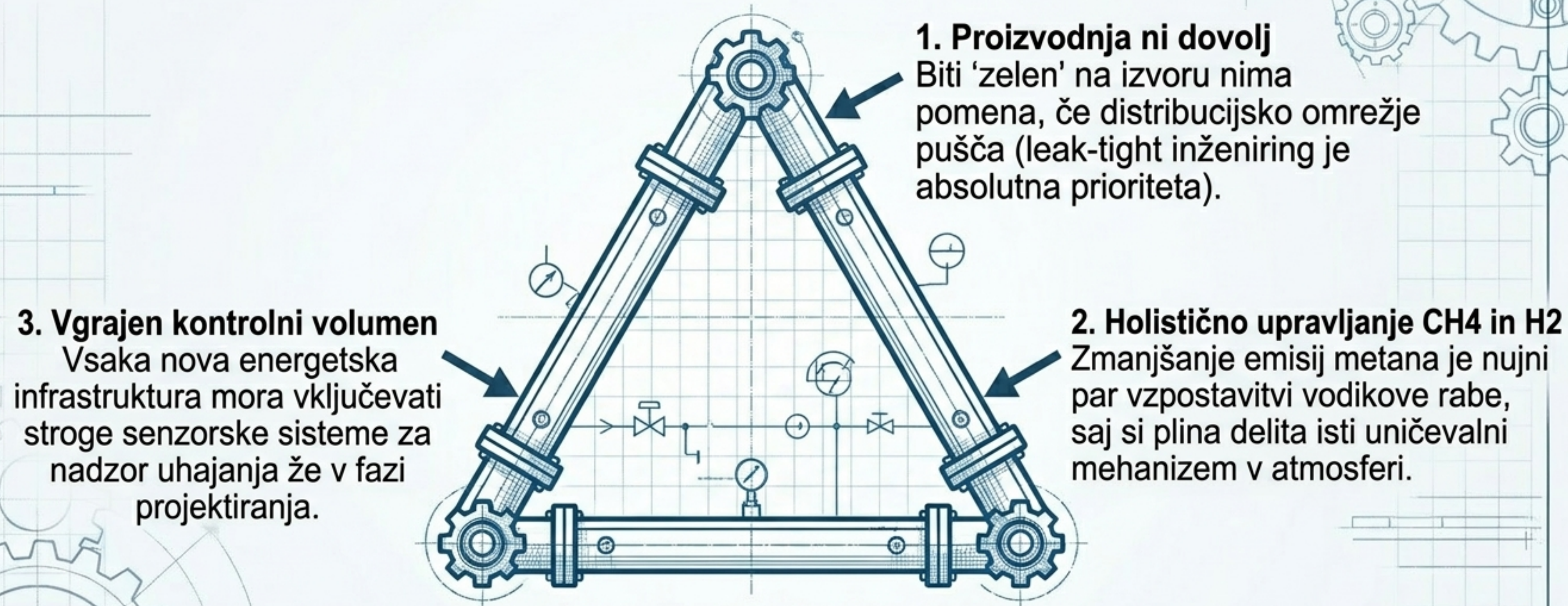
Ekološka smiselnost vodikove ekonomije je neposredno matematično odvisna od stopnje infrastrukturnega uhajanja. Visoko uhajanje prevrne tehtnico.

Sistemske neznanke in izzivi merilnega inženiringa

Slepe pege v podatkih za prihodnje meritve:

1. Instrumentacija (Kritično)	Pomanjkanje visoko natančnih, prenosnih senzorjev za merjenje terenskih emisij in uhajanja H ₂ .
2. Parametrizacija tal	Ni empiričnih laboratorijskih podatkov o maksimalnih stopnjah biološke oksidacije v različnih tipih prsti.
3. Stopnje uhajanja (Leakage rates)	Ni zanesljivih empiričnih podatkov o uhajanju iz dejanskih cevi, črpalk in končnih naprav (ocene variirajo med 1-10%).
4. Minorne emisije	Pomanjkljive meritve naravnih geoloških izpustov in vira biološke fermentacije.

Inženirski imperativ: Od izvora do molekularnega ponora



Prehod na vodik ni samo vprašanje pridobivanja energije – je imperativ striktnega upravljanja s snovnimi tokovi.