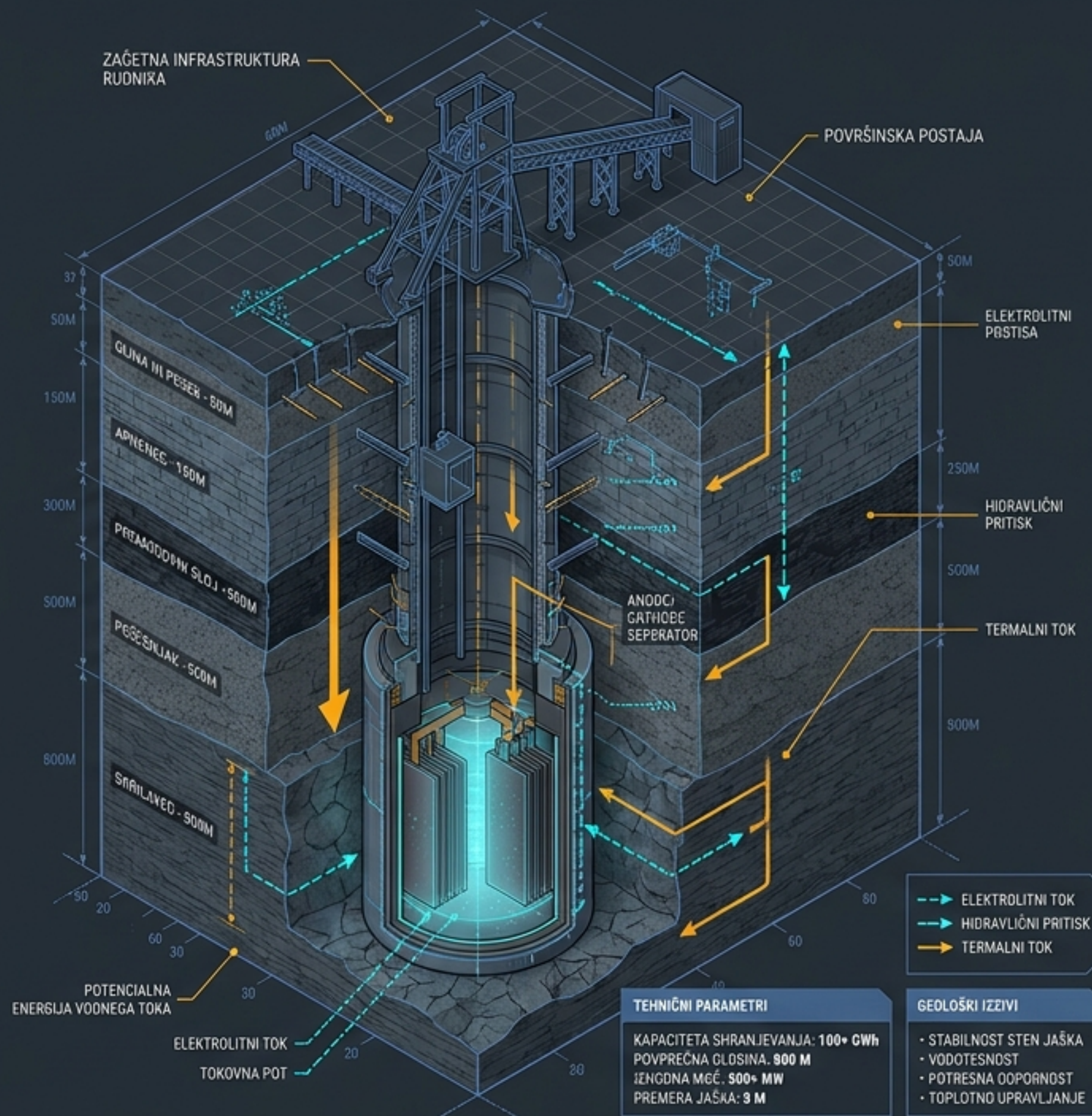
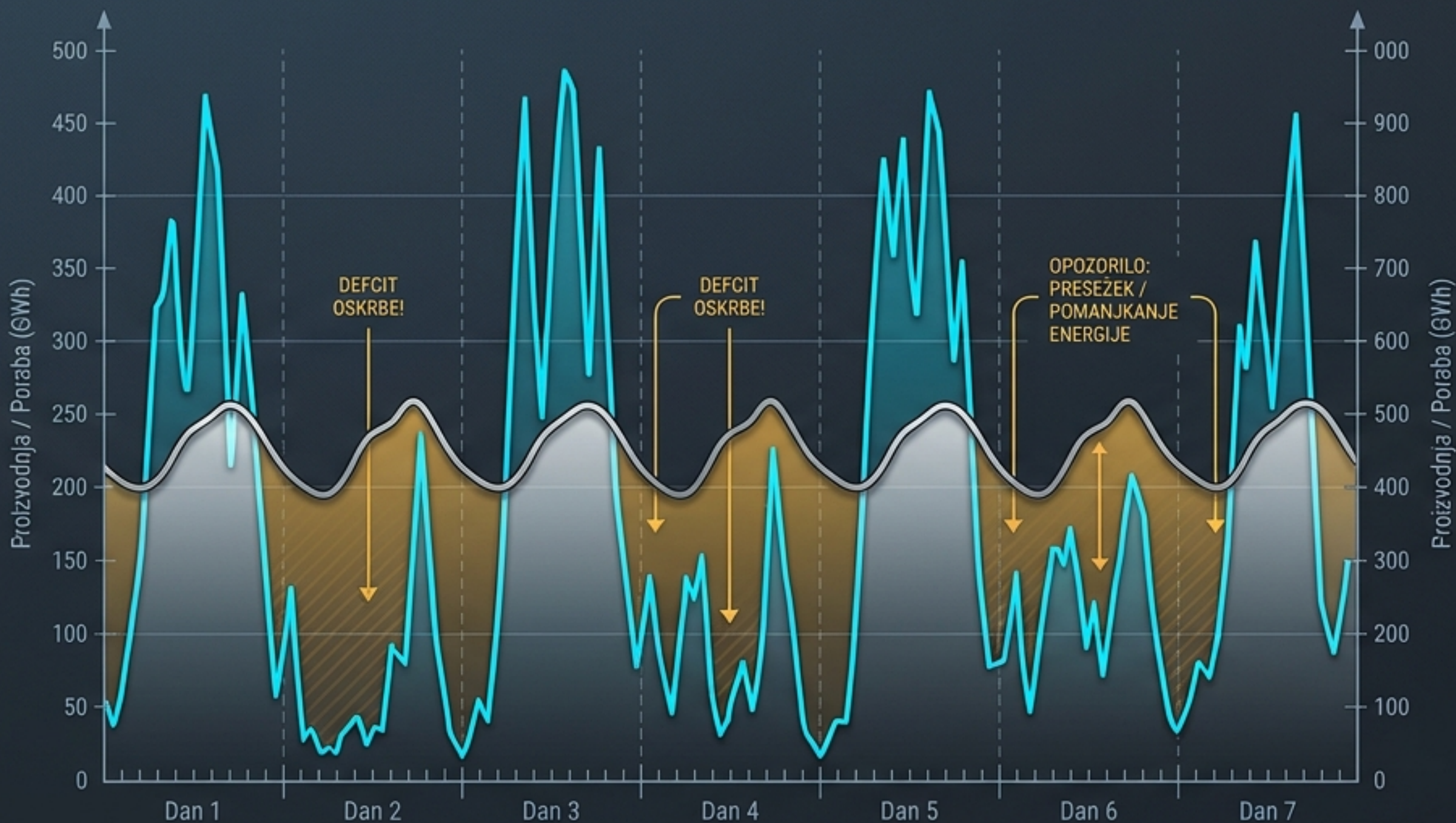


Odsluženi premogovniki kot gigantske podzemne baterije

Fizika je preprosta, geologija je težka:
Inženirska analiza izvedljivosti



Sistemska nuja po dolgotrajni hrambi energije (LDES)



Generacija Vetra/Sonca
(Spremenljiva)

Omrežna Potreba
(Stabilna)

Problem

Prehod na obnovljive vire
premakne potrebo po
uravnoteženju omrežja iz ur na
dneve in tedne.



Omejitev

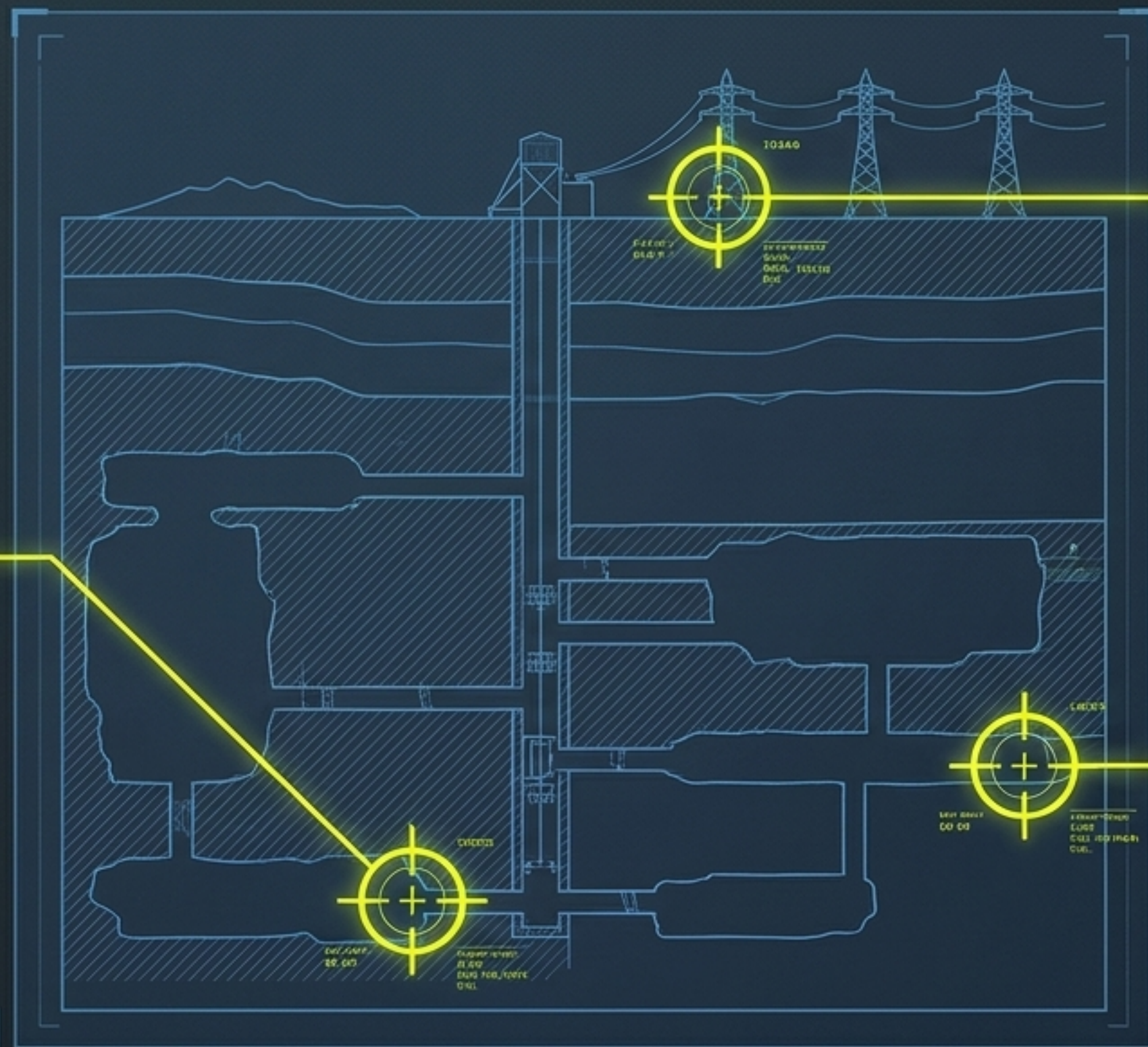
Kemijske baterije (Li-ion) so
neprimerne za večdnevno hrambo
zaradi previsokih stroškov
skaliranja in samopraznjenja.



Repozicioniranje opuščenega industrijskega premoženja

Obstoječa infrastruktura

Vertikalni jaški in ogromne podzemne praznine. Zmanjšana potreba po dragih zemeljskih delih.



Omrežna integracija

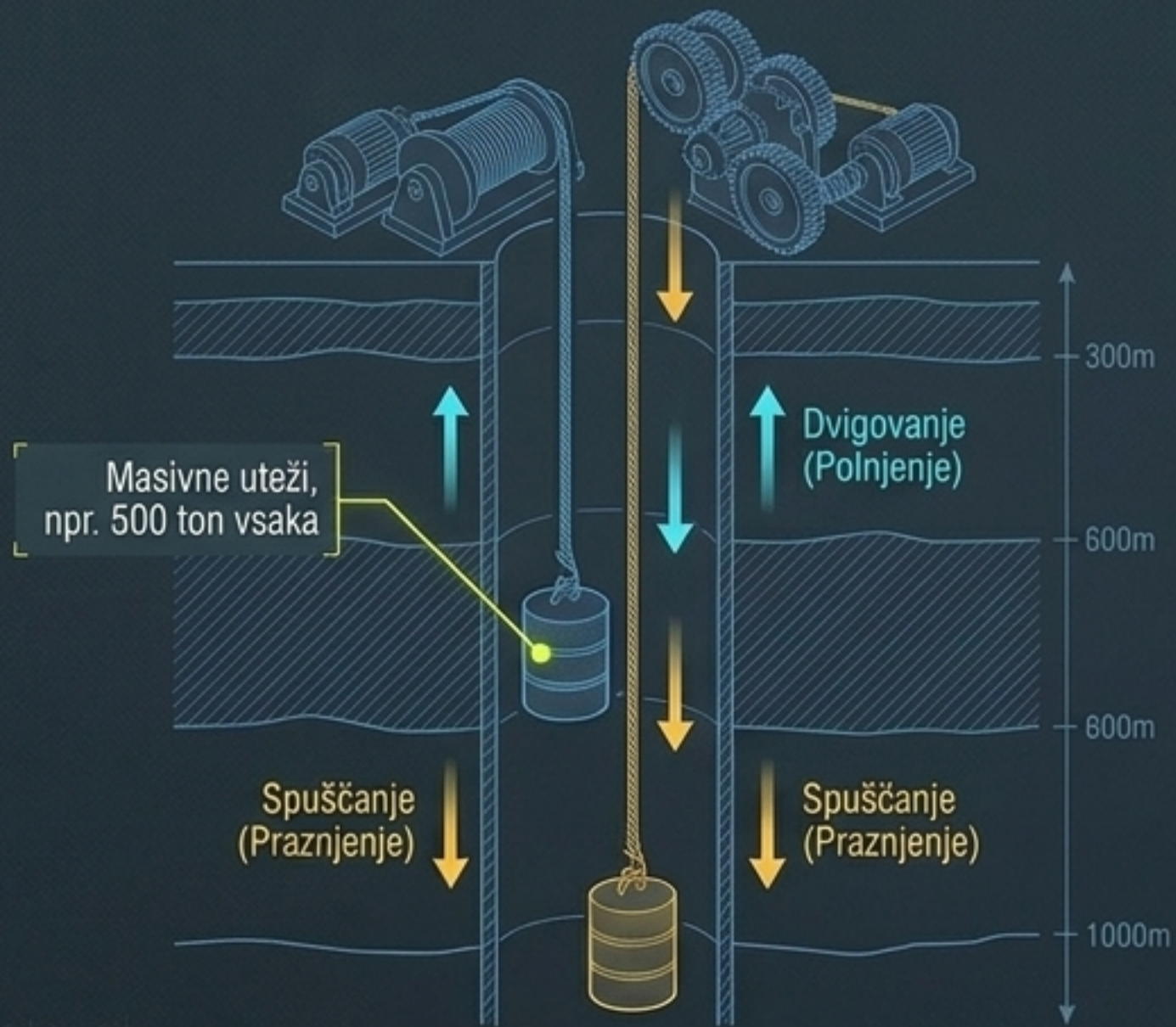
Lokacije so praviloma že priključene na visokonapetostno prenosno omrežje.

Kapaciteta

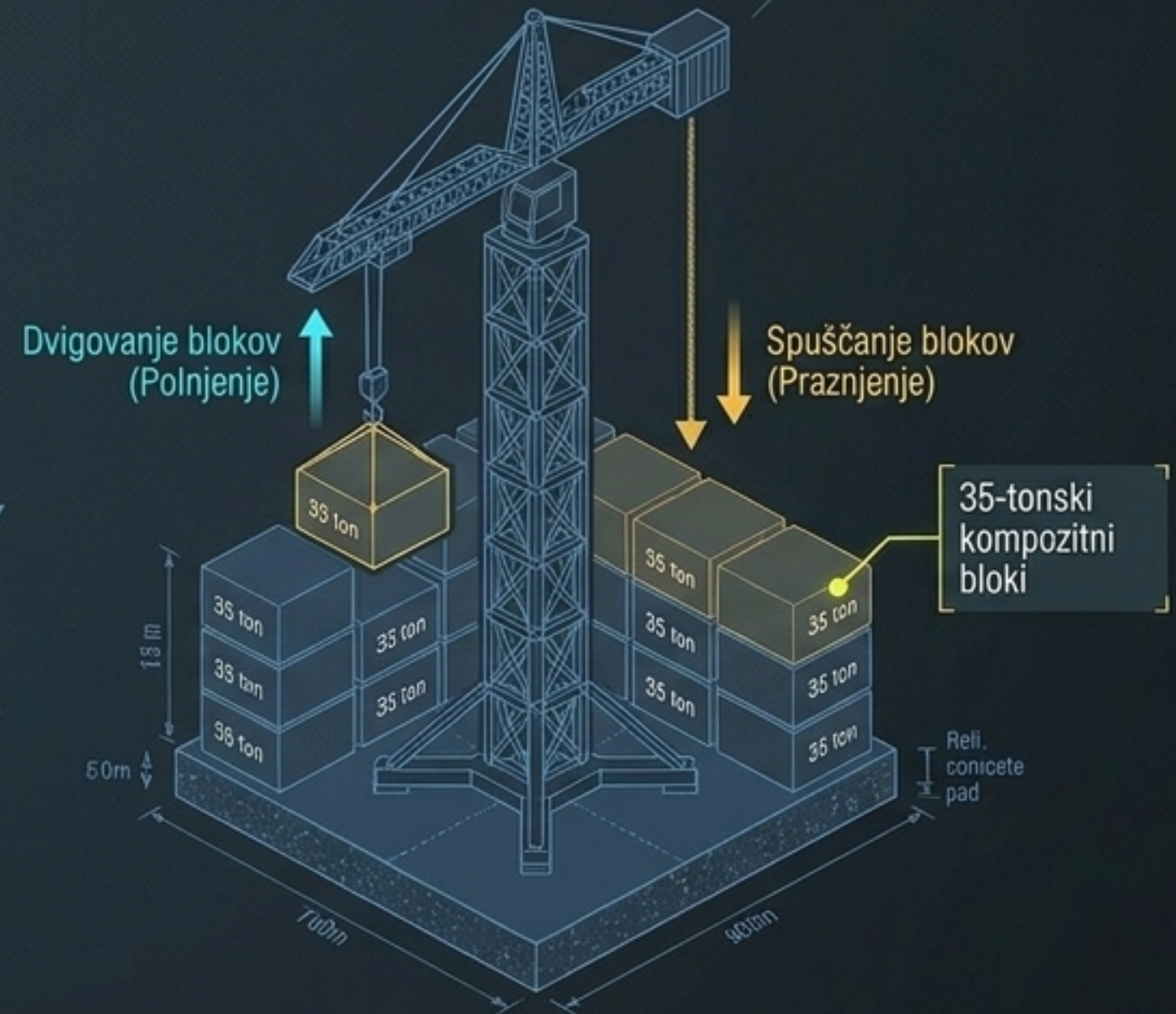
Več kot 500.000 potencialnih lokacij samo v ZDA; milijoni globalno.



Iteracija 1: Kinetika trdnih teles ($E = mgh$)



Gravitricity Koncept (Podzemno)



Energy Vault Koncept (Površinsko)

1 Princip

Dvig mase v času presežkov energije; spuščanje preko generatorjev v času vršne porabe.

2 Prednosti

Nično samopraznjenje (Zero self-discharge), ekstremna življenjska doba.

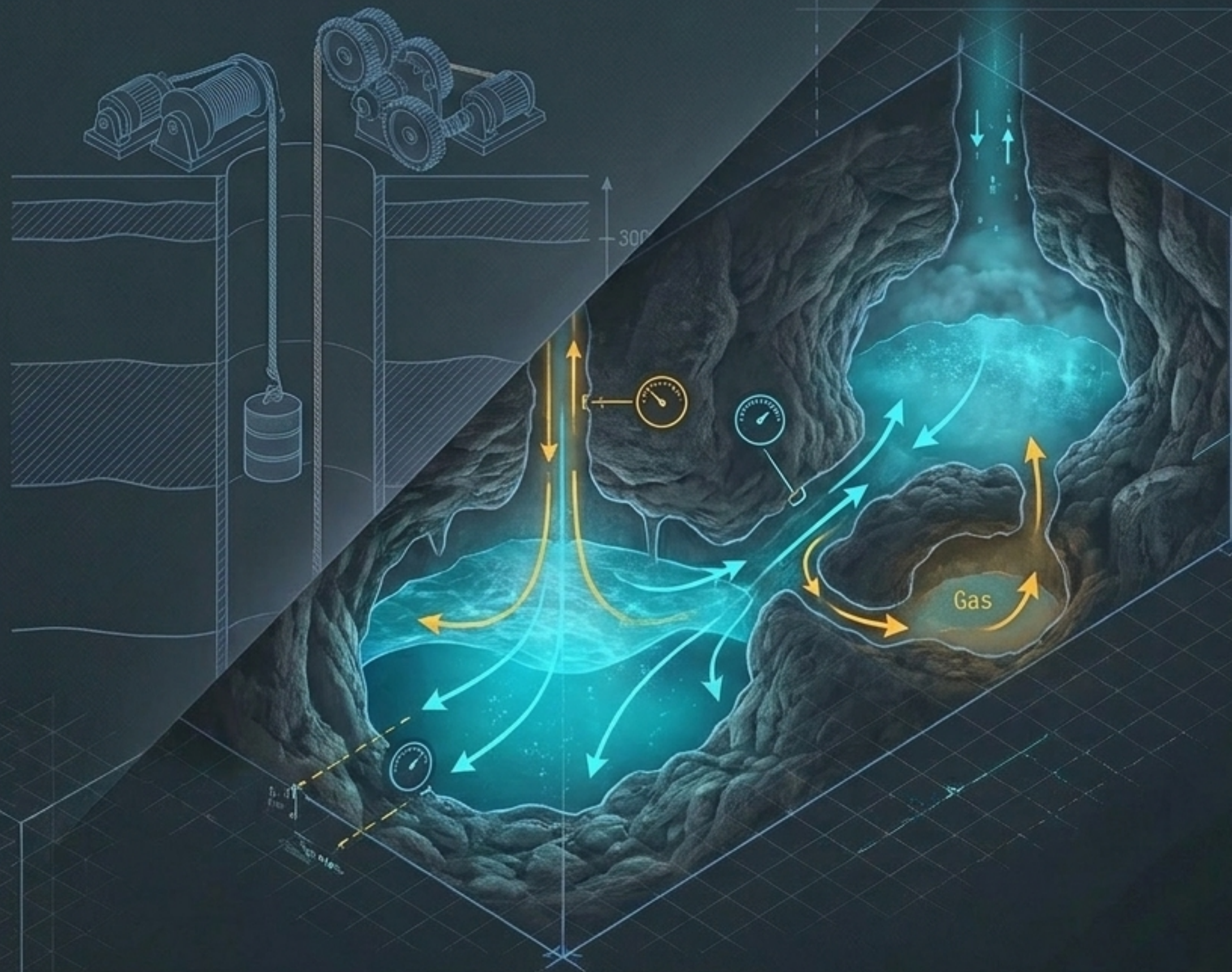
3 Teoretični potencial

Ocenjena globalna kapaciteta hrambe med 7 in 70 TWh.

Analiza odpovedi: Ko mehanska kompleksnost premaga vrednost



Nova paradigma: Prehod s trdnih mas na fluide



Oak Ridge National
Laboratory (ORNL)
Smernice

Metrics
1.801

Metric
8.56

Rudnika ne obravnavamo več
kot prazne cevi za dvigovanje
uteži, temveč kot tlačni
podzemni rezervoar za sisteme
na osnovi fluidov in plinov.

Keperetrics
9.99791

Metrics
33.206

VAwko

Kotetaaed

EI = 90 and po uiol

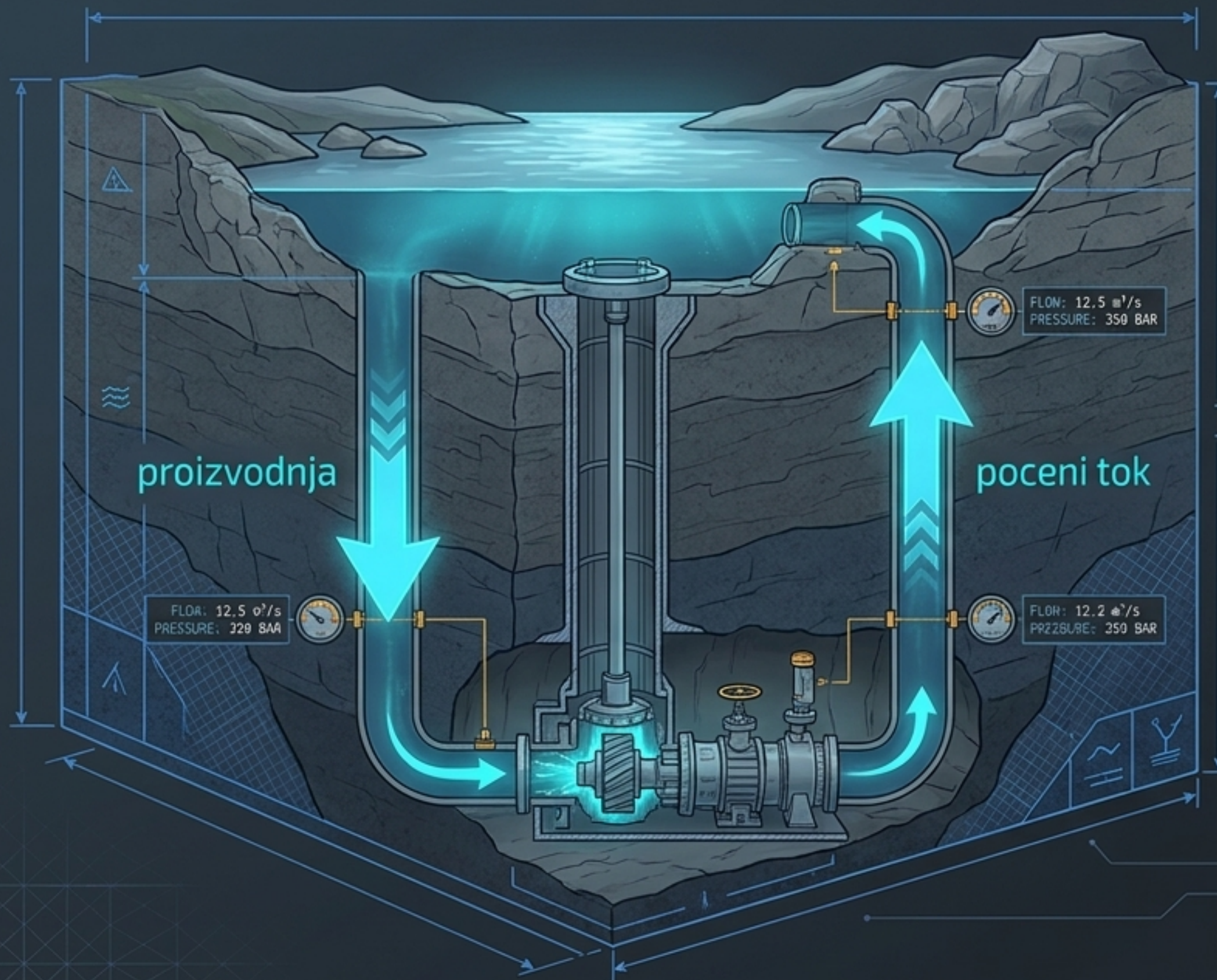
= 2(11.12 + 3lak = (-mgh)

Positive

7.60367e

9.73RB

Iteracija 2: Podzemne črpalne hidroelektrarne



Princip

Replikacija najpogostejše oblike LDES na svetu (ki že danes prevladuje).

Birokratski obvod

Odpravlja potrebo po gradnji novih masivnih površinskih jezov in dolgotrajnih okoljskih presojah.

- EFFICIENCY: >80%
- DEPTH: 800M
- CAPACITY: 5 GWh

Geološke in hidravlične omejitve: Zakaj je podzemlje nevarno

1. Puščanje vode

Izguba medija skozi razpokane kamninske plasti.

PRESSURE: VARIABLE MPa

2. Kemijska korozija

Reakcije med staro rudniško vodo, minerali in novimi turbinskimi lopaticami

FLOW RATE: UNPREDICTABLE

3. Strukturna nestabilnost

Nevarnost porušitve starih predorov pod vplivom cikličnega hidravličnega tlaka.

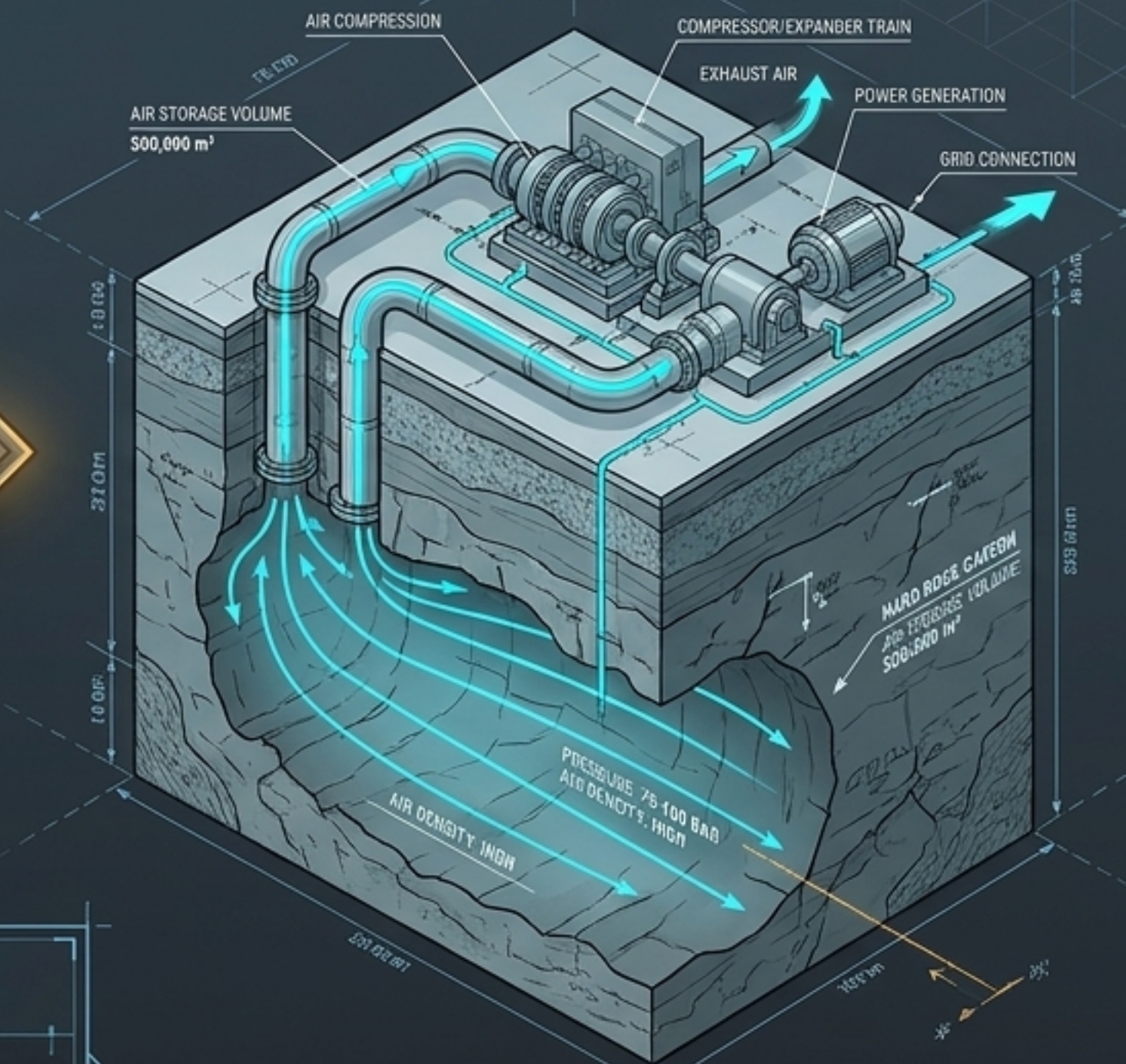
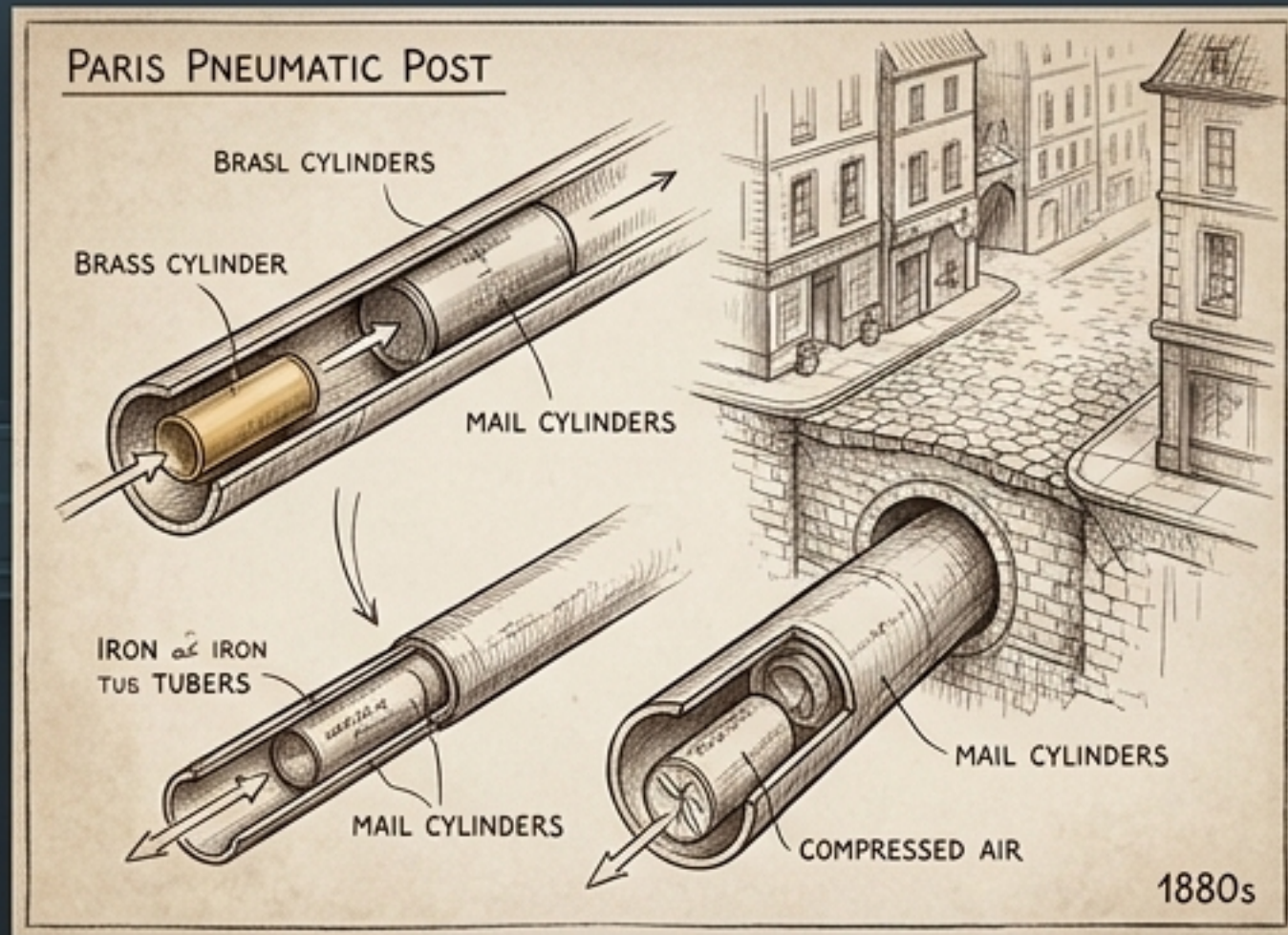
STRESS: CRITICAL LIMITS

4. Fluidna dinamika

Nepredvidljivo obnašanje vode v močno nepravilnih in asimetričnih votlinah (v primerjavi s čistimi površinskimi rezervoarji).

STRESS: CRITICAL LIMITS

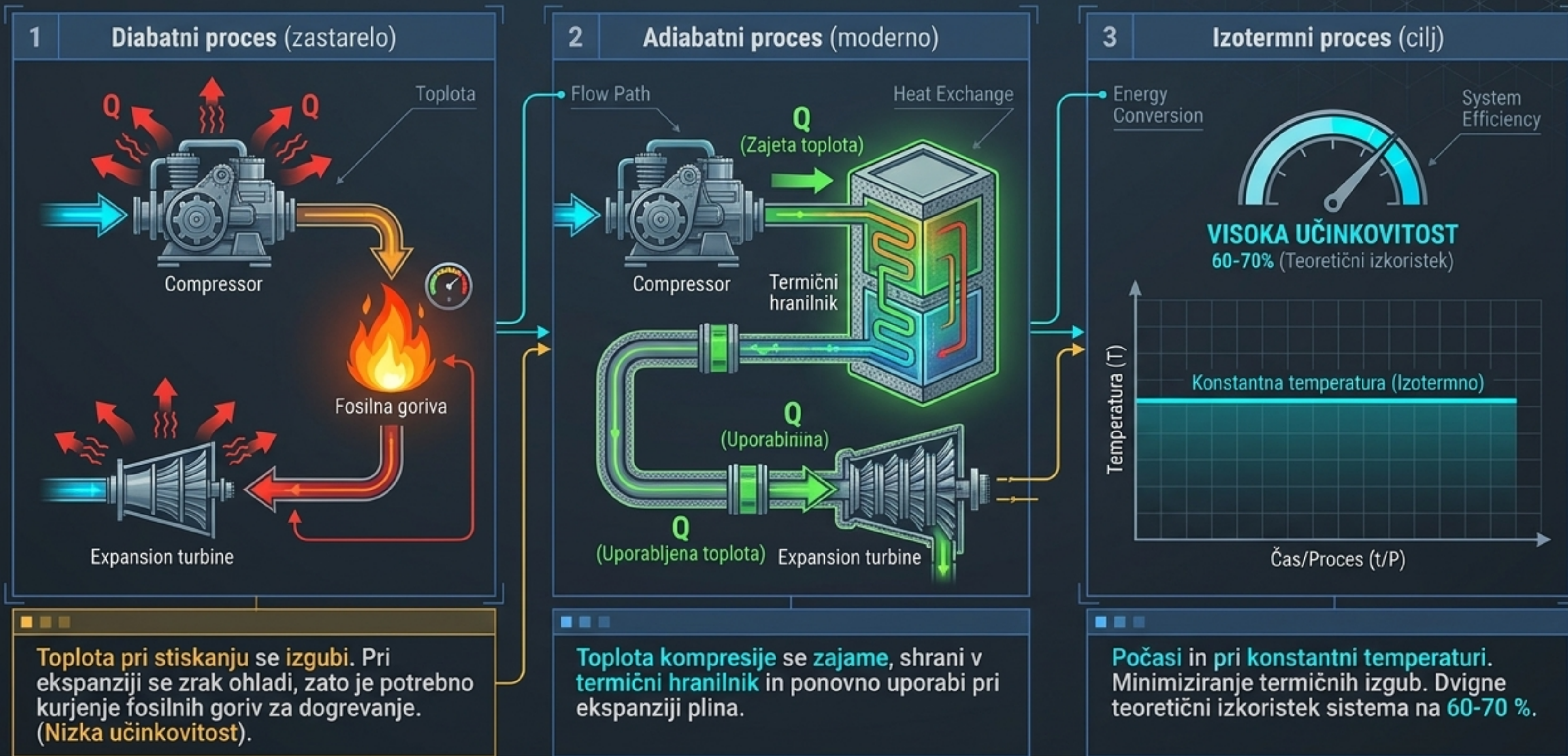
Iteracija 3: Hramba energije s stisnjenim zrakom (CAES)



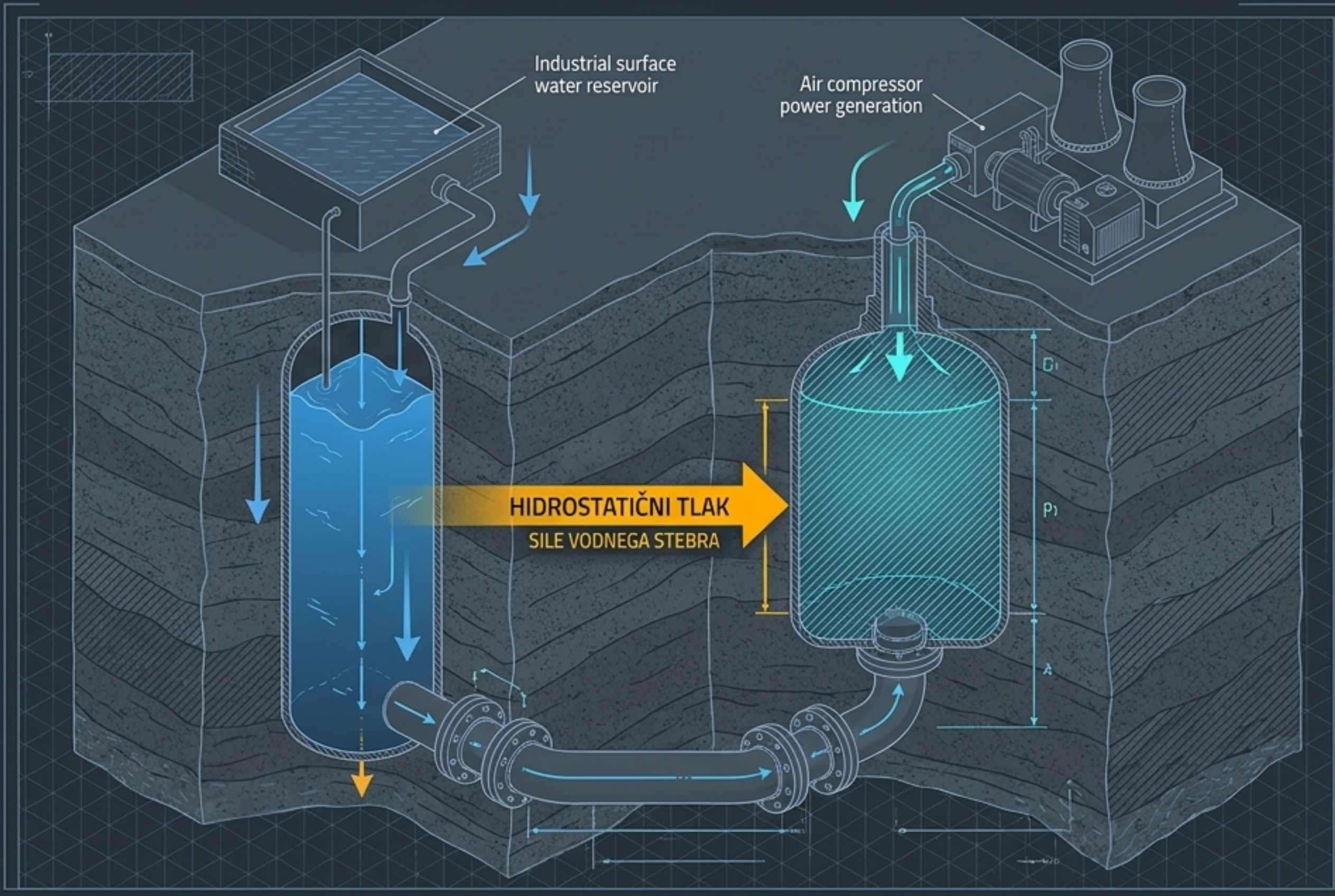
Konceptni premik

Geologija kot ultimativna (in poceni) tlačna posoda. Namesto gradnje dragih jeklenih rezervoarjev na površju se uporabi obstoječe podzemne votline, jame v trdi kamnini in opuščene rudnike za hrambo visokotlačnega zraka.

Termodinamični izziv kompresije in ekspanzije



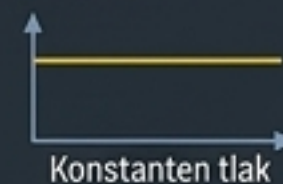
Študija primera: Hidrostatična kompenzacija (Hydrostor)



Mehanizem



Uporaba vodnega stebra preprečuje nevarne oscilacije tlaka in strukturne poškodbe kaverne.



$$\Delta P \approx 0$$



Stabilnost: Visoka

Izkoristek



Približno 66 % povratni izkoristek (Roundtrip efficiency).



66 %



Povprečna učinkovitost

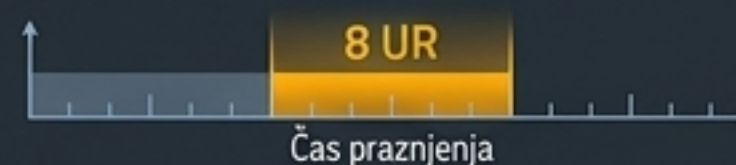
$$\eta_{RT} = -66 \%$$

Energetska bilanca: Sprejemljiva

Kapaciteta



Zmožnost do 8 ur neprekinjenega praznjenja. Konkurenčna življenjska doba, čeprav z nižjim izkoristkom od litij-ionskih sistemov.



8 UR

Čas praznjenja

$$T_{\text{discharge}} \leq 8 \text{ h}$$

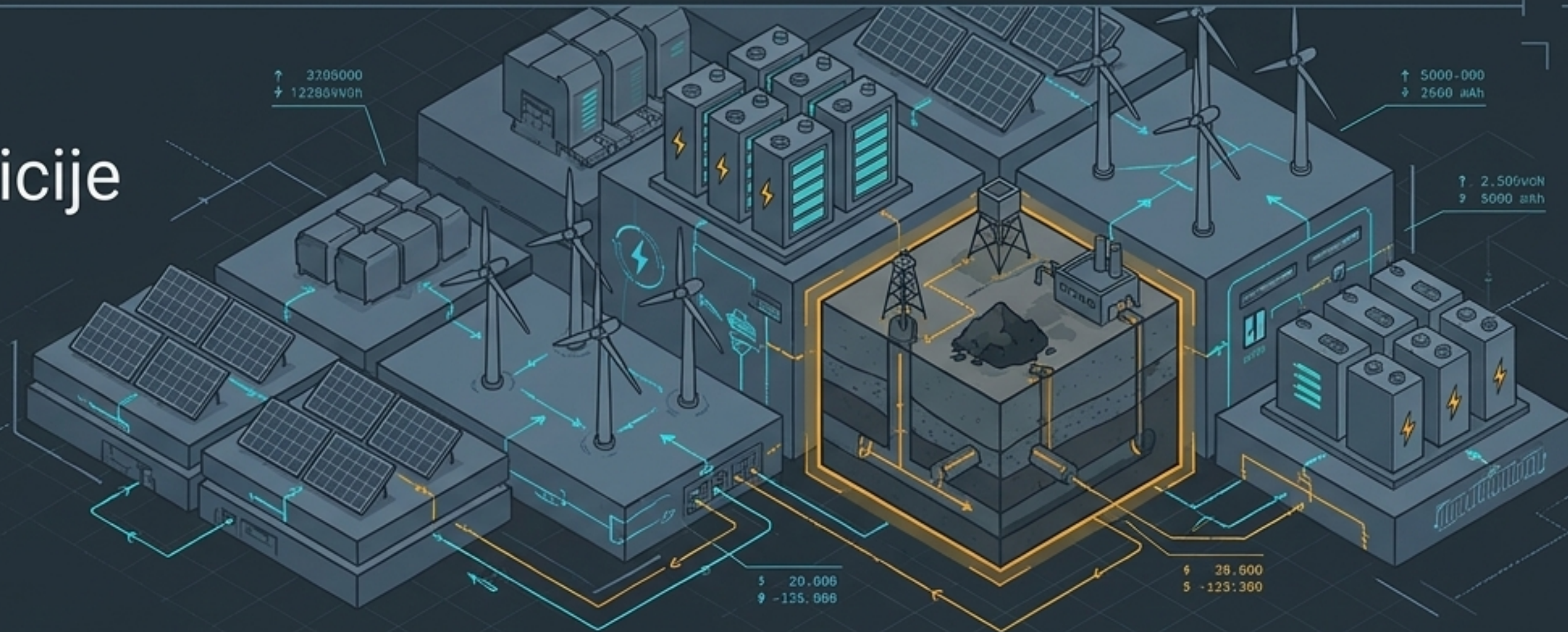
Življenjska doba: >20 let

* Toemiana terralela sht olendajne troestati berelet. Hidrostatičijion kompenzacijs.
** Elgipupota noimebeo nlesidvo ar innerbocito aeredes.

Inženirska sinteza: Primerjalna matrika tehnologij

Parameter	Gravitacijska hramba	Črpalna hidro	Stisnjen zrak (CAES)
Povratni izkoristek (%)	● Visok	● Visok, 70-80%	● Srednji, ~66%
Geološko tveganje	● Nizko	● Zelo visoko - puščanje	● Srednje
Termodinamične izgube	● Nične	● Nizke	● Visoke - zahteva adiabatni proces
Stopnja tehnološke pripravljenosti (TRL)	● Nizek - mehanske težave	● Srednji za podzemlje	● Visok - obstoječe implementacije

Kompleksnost energetske tranzicije



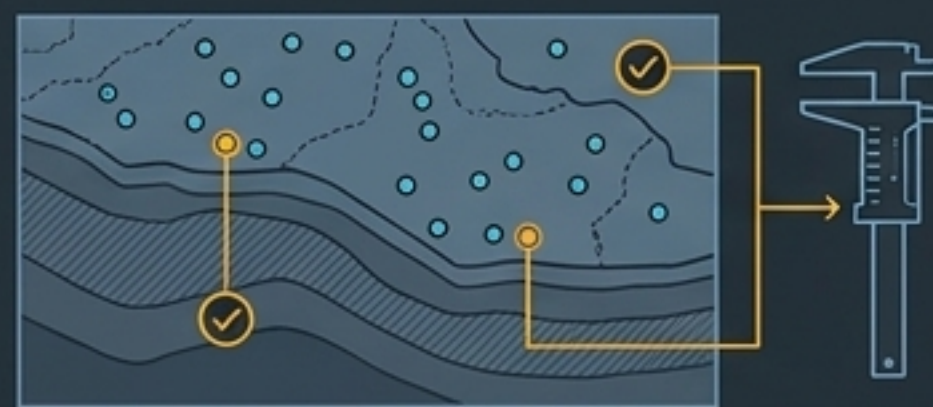
Ni čudežne rešitve (Silver bullet)

Energetska tranzicija bo tehnološko neurejena in mešana.



Stroga selekcija

Od 500.000 potencialnih lokacij jih bo le del geološko in ekonomsko ustreznih.



Končni izziv

Prava inženirska vrednost ni v prvotni teoretični ideji, temveč v sposobnosti obvladovanja specifičnih geoloških in ekonomskih omejitev za doseg komercialne realnosti.

