Moguća uloga nuklearne energije u proizvodnji električne energije u RH

D. Grgić, FER ZVNE Zagreb

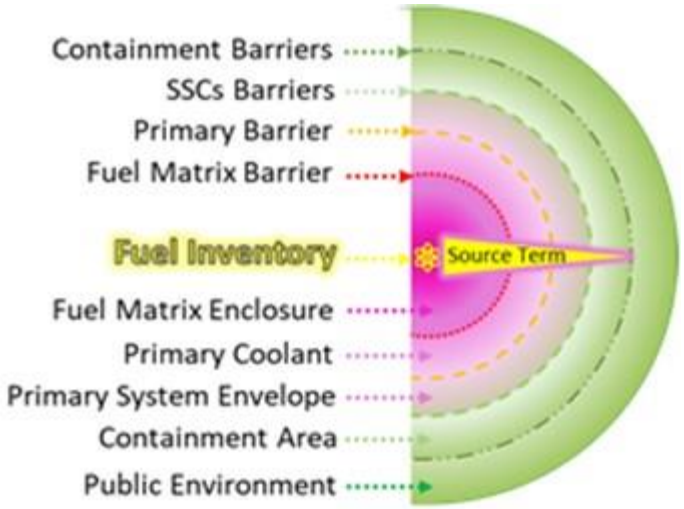
Okrugli stol:

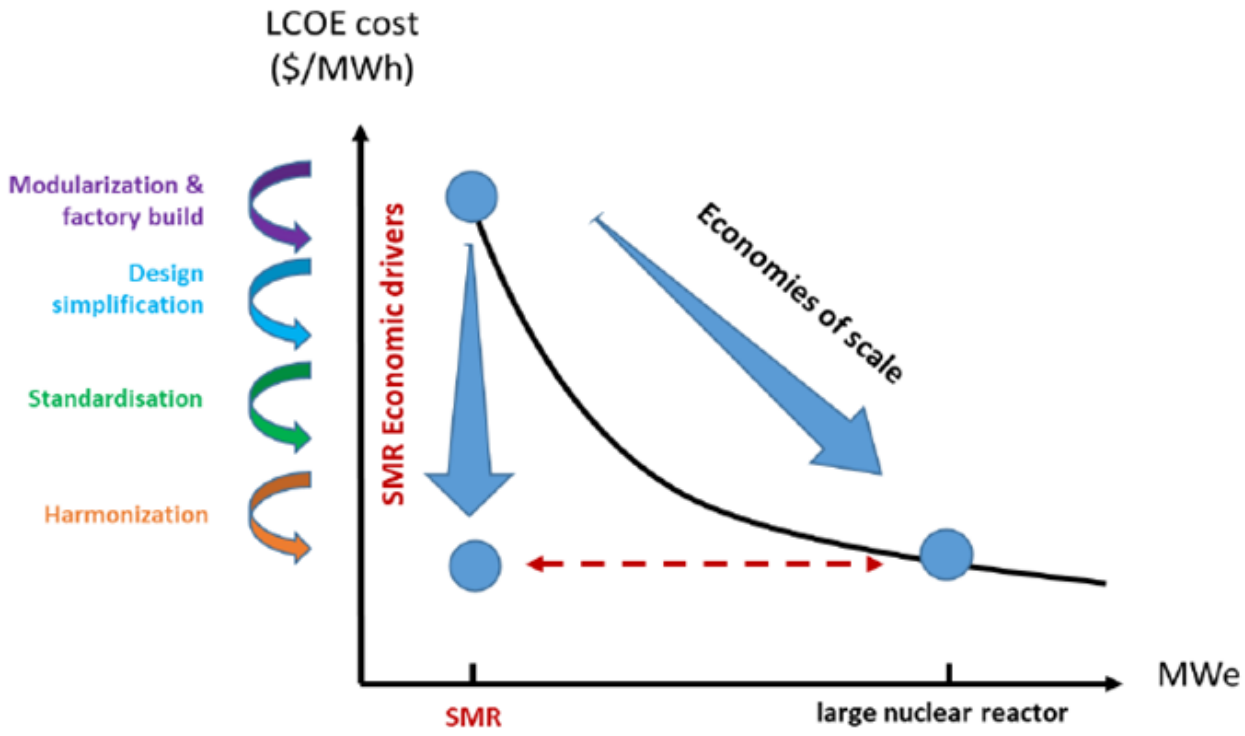
„Energetska tranzicija i dekarbonizacija“

HATZ, Zagreb, 17.03.2026

Sadržaj

- Dekarbonizacija i sigurnost opskrbe - energy mix i diverzitet
- Komplementarnost nuklearne energije i OIE
- Ideja SMR-a i relacija na velike NE
- Implementacija i lokacije
- Realno ili ne



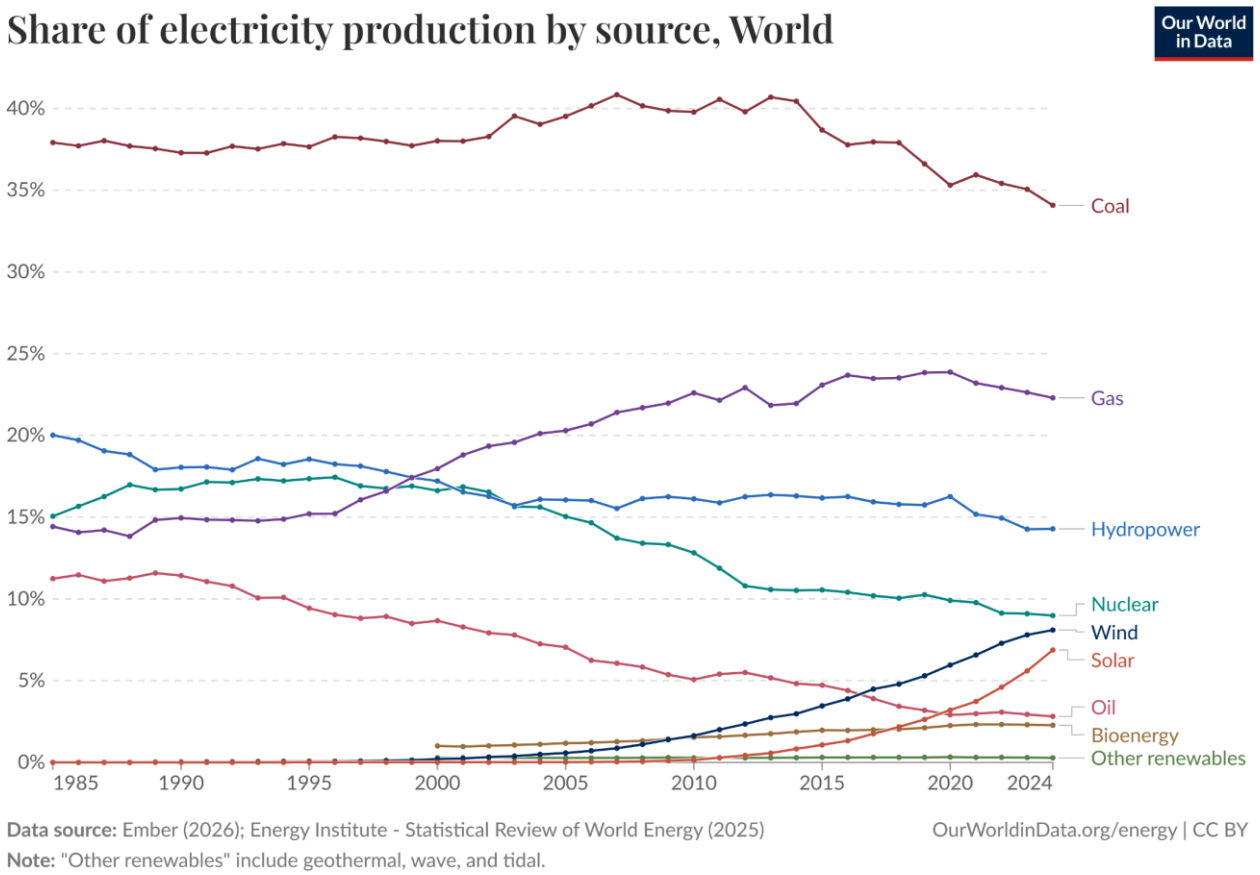


Uvod

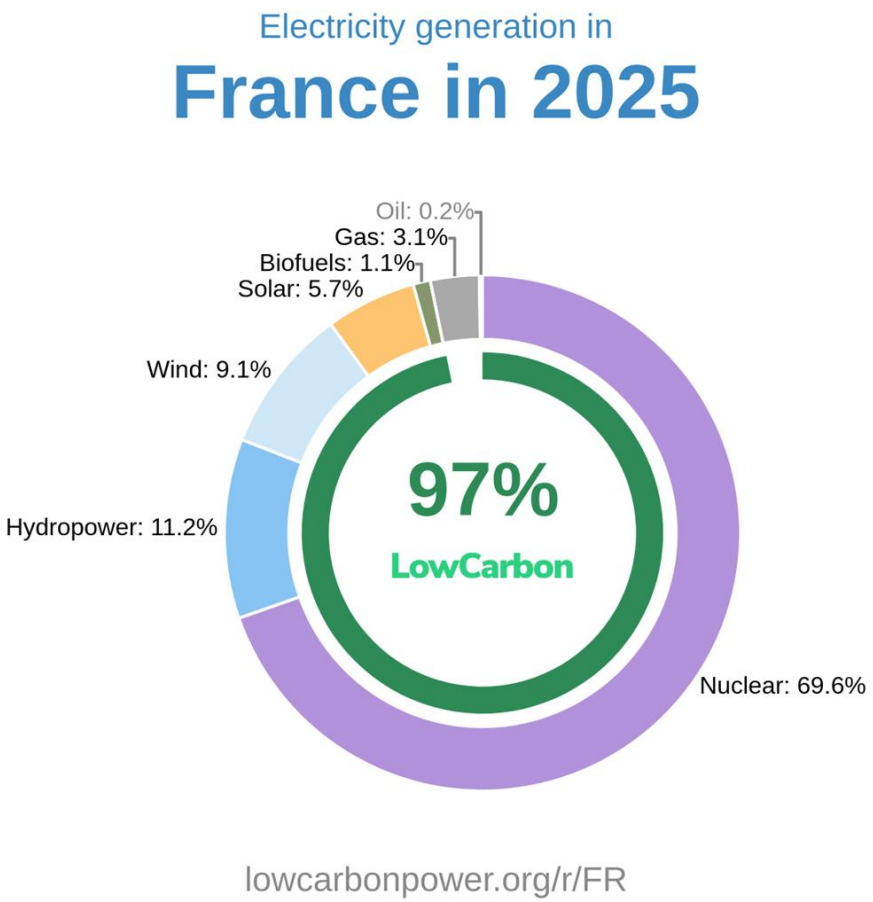
- Dekarbonizacija je nužna zbog klimatskih promjena
- Energetska neovisnost i sigurnost opskrbe su važne u uvjetima političkih nestabilnosti, energetska neovisnost ne znači nisku cijenu energije
- OIE su očit i dominantan izbor
- Vjetar i sunce kao energent su diverzitetni po izboru energenta ali ne i po prirodi proizvodnje koja im je dijelom nepredvidljiva i često promjenjiva
- U manjoj mjeri je to slučaj i s HE
- Skladištenje električne energije u EES (BESS, RHE) je nužno zbog regulacije pogonskih uvjeta ali i da bude komplementarno OIE proizvodnji
- Dio izvora električne energije trebao bi biti on demand tipa i nuklearna energija je takav izvor s ugljičnim otiskom koji je komparabilan OIE
- Energy mix je stvar izbora svake zemlje i obično ima regionalna obilježja

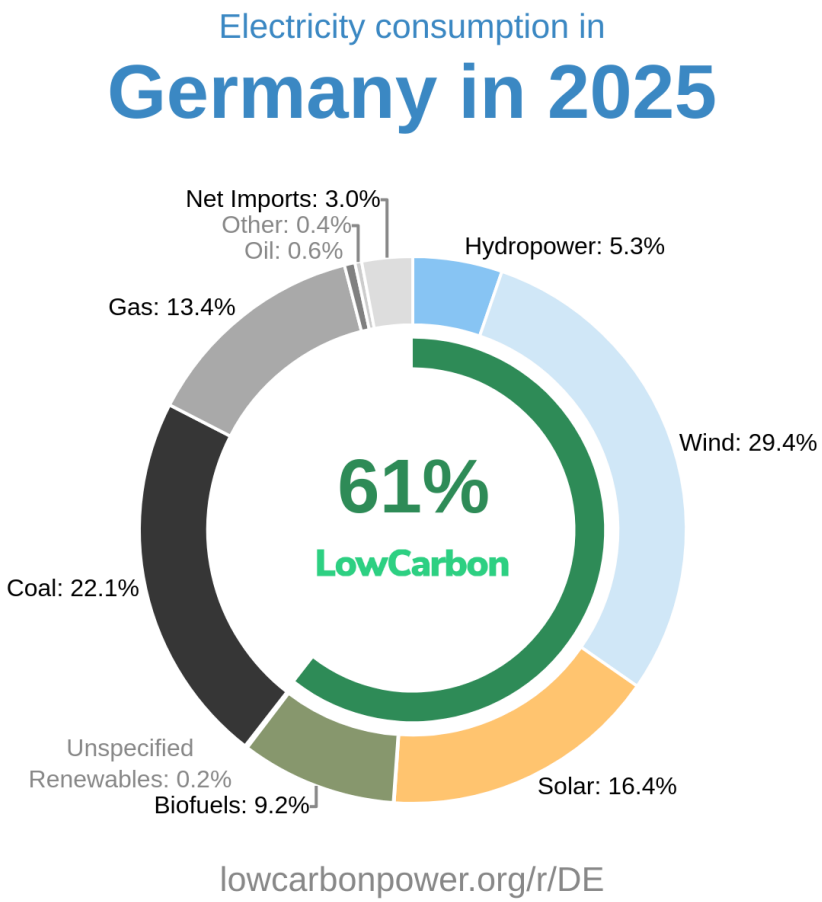
Svjetski energy mix u 2025. godini

Svijet: ugljen 33%, plin 23%, nafta 3 %, OIE (sunce i vjetar) 15%, HE 14%, NE 9%, biomasa 2.5% .
Oko 40% proizvodnje je s niskim udjelom CO2.



Udjeli u proizvodnji električne energije u Francuskoj (570 TWh) i Njemačkoj (510 TWh)

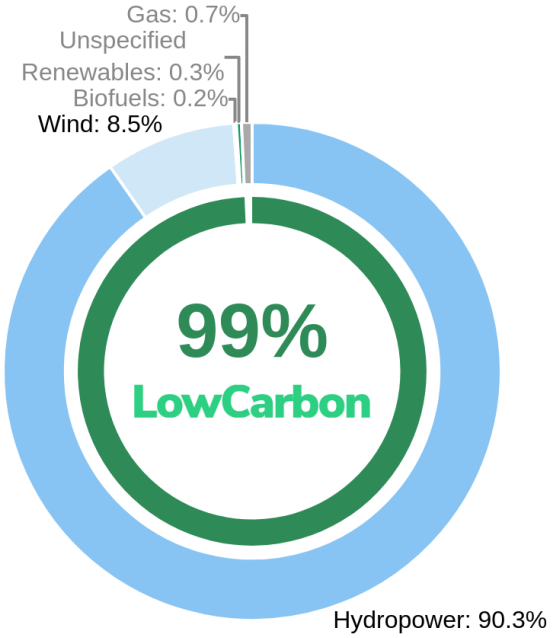




Udjeli u proizvodnji električne energije u Norveškoj i Danskoj

Electricity generation in

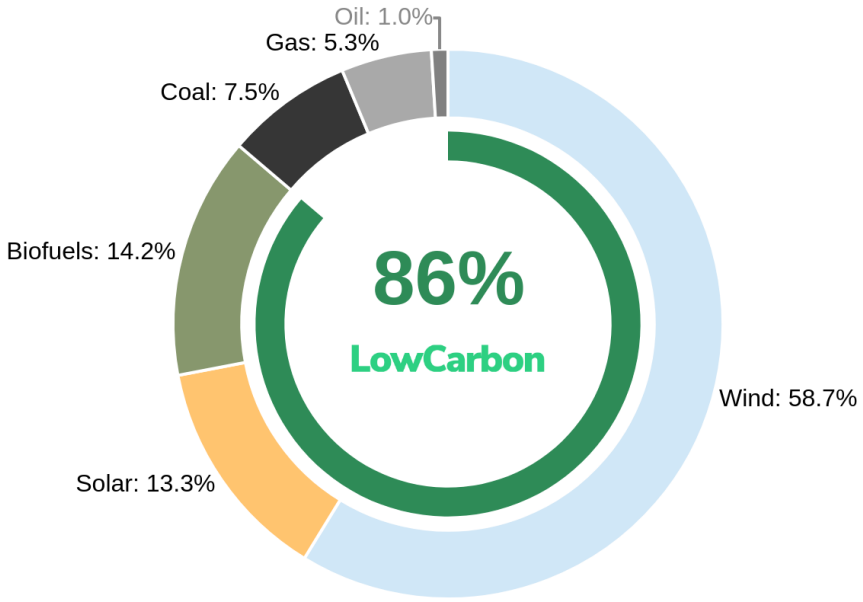
Norway in 2025



lowcarbonpower.org/r/NO

Electricity generation in

Denmark in 2025

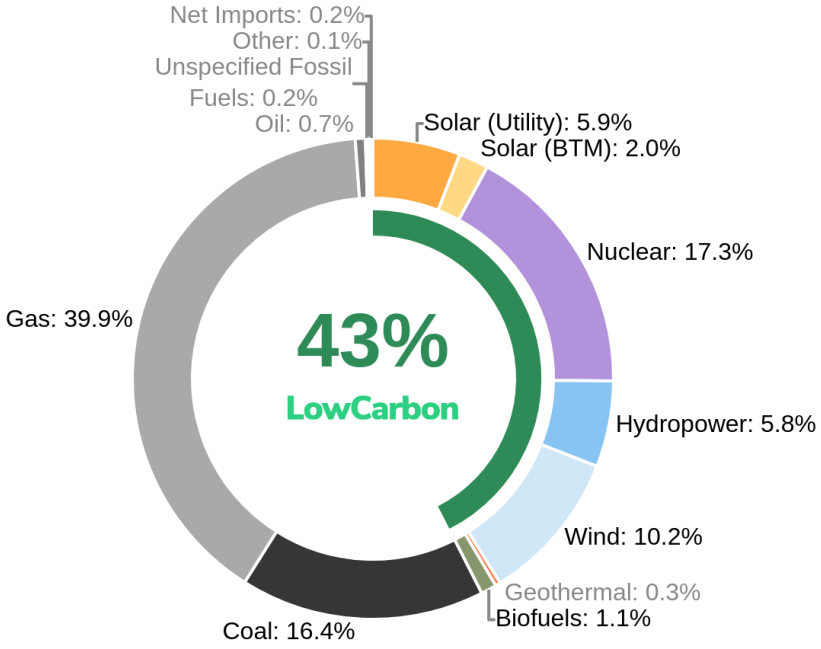


lowcarbonpower.org/r/DK

Udjeli u proizvodnji električne energije u SAD (4600 TWh) i Kini (10000 TWh)

Electricity consumption in

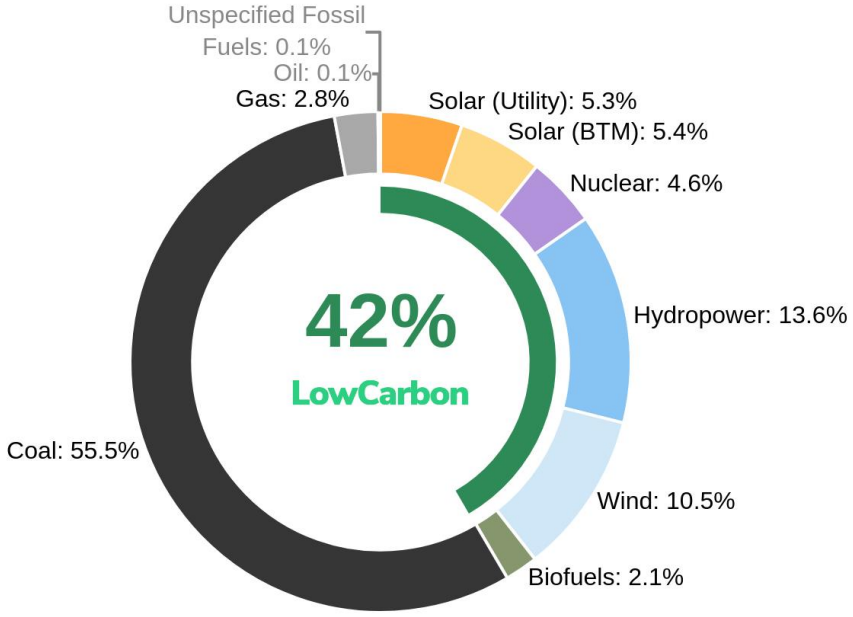
United States in 2025



lowcarbonpower.org/r/US

Electricity generation in

People's Republic of China in 2025

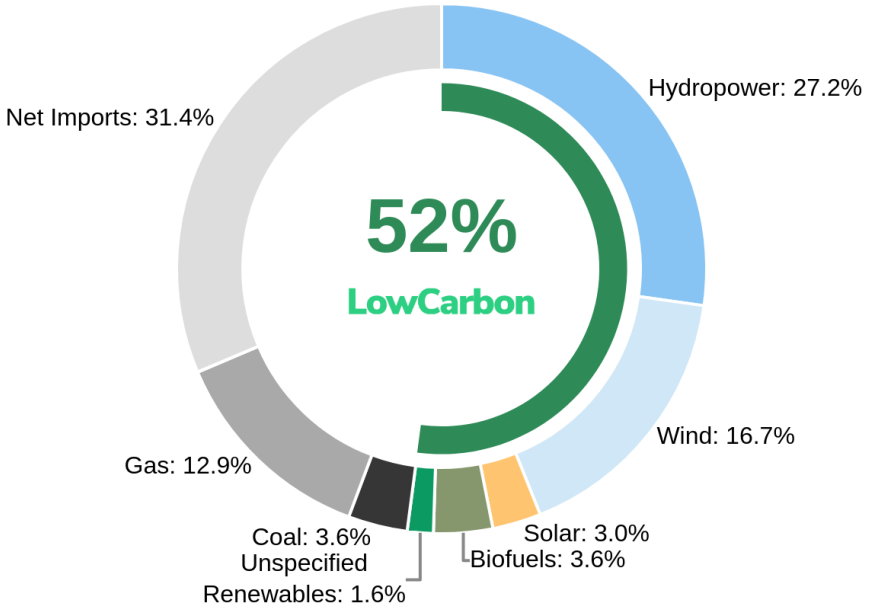


lowcarbonpower.org/r/CN

Udjeli u proizvodnji električne energije u Hrvatskoj (17.5 TWh) i Sloveniji (17 TWh)

Electricity consumption in

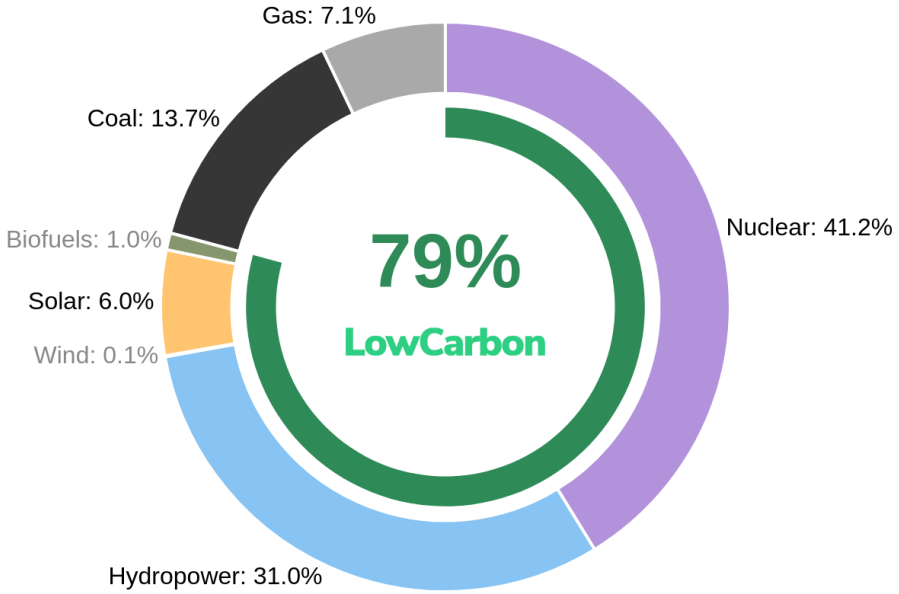
Croatia in 2025



lowcarbonpower.org/r/HR

Electricity generation in

Slovenia in 2025



lowcarbonpower.org/r/SI

Nuklearna energija i OIE izvori

- **Nuklearne elektrane proizvode energiju neovisno o varijabilnosti vremenskih uvjeta kad i koliko želimo, duže se grade i imaju veće investicijske troškove**
- **Faktor opterećenja im je tipično tri puta veći od fotonaponskih i elektrana koje koriste vjetar**
- **NE zauzimaju manje mjesta u okolišu i pogodnije su za opskrbu industrijskih potrošača i velikih gradova**
- **NE ovise o dobavnim lancima goriva osim približno jednom u 18 mjeseci**
- **CO2 otisak u okolišu im je sličan kao za OIE ali imaju problem s radioaktivnim otpadom i nuklearnim nesrećama male vjerojatnosti**
- **Kritične sirovine za nuklearne i OIE tehnologije se razlikuju**
- **NE pozitivno djeluju na stabilnost EES, OIE traže dodatna ulaganja**

How Do SMRs Compare to Renewable Energy Sources?

Technology	Capacity Factor	Lifespan	Land Requirements
Small Modular Reactors	90%+	60+ years	0.004 km2/MW 1 km2 for 1000 MW
Solar Photovoltaic	25-30%	25-30 years	0.04 km2/MW 40 km2 for 1000 MW
Onshore Wind	35-45%	20-25 years	0.25 km2/MW 250 km2 for 1000 MW

Preliminarni rezultati od interesa za energy mix

Analiza identificiranja zagušenja u postojećoj prijenosnoj mreži Republike Hrvatske te ***određivanje optimalnih lokacija i potrebnih snaga baterijskih sustava*** *za ublažavanje ili potpuno uklanjanje identificiranih zagušenja*

Scenarij 1 – Početno stanje

•Potrebna instalirana snaga BESS: **≈ 1300–1400 MW**

•BESS u ovom scenariju:

- rješavaju **strukturna i trajna zagušenja**
- djeluju kao supstitut mrežnim investicijama

Scenarij 2 – NECP 2030 (razvijena mreža)

•Potrebna instalirana snaga BESS: **≈ 350 MW (smanjenje na 30%)**

•Posljedica realizacije planiranih mrežnih investicija

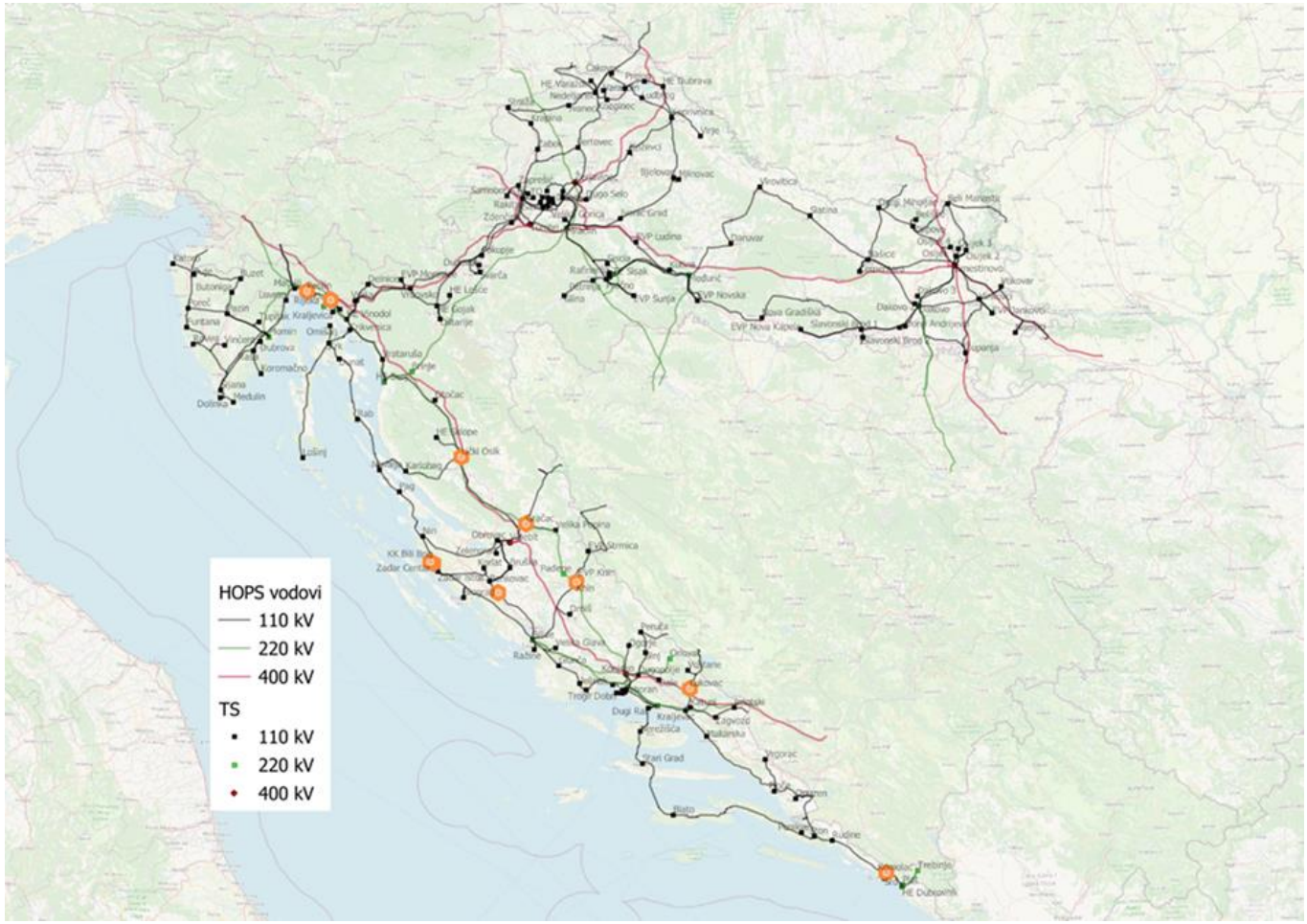
•Promjena uloge BESS:

- više ne rješavaju trajna zagušenja
- ciljano saniraju **specifične N-1 situacije**

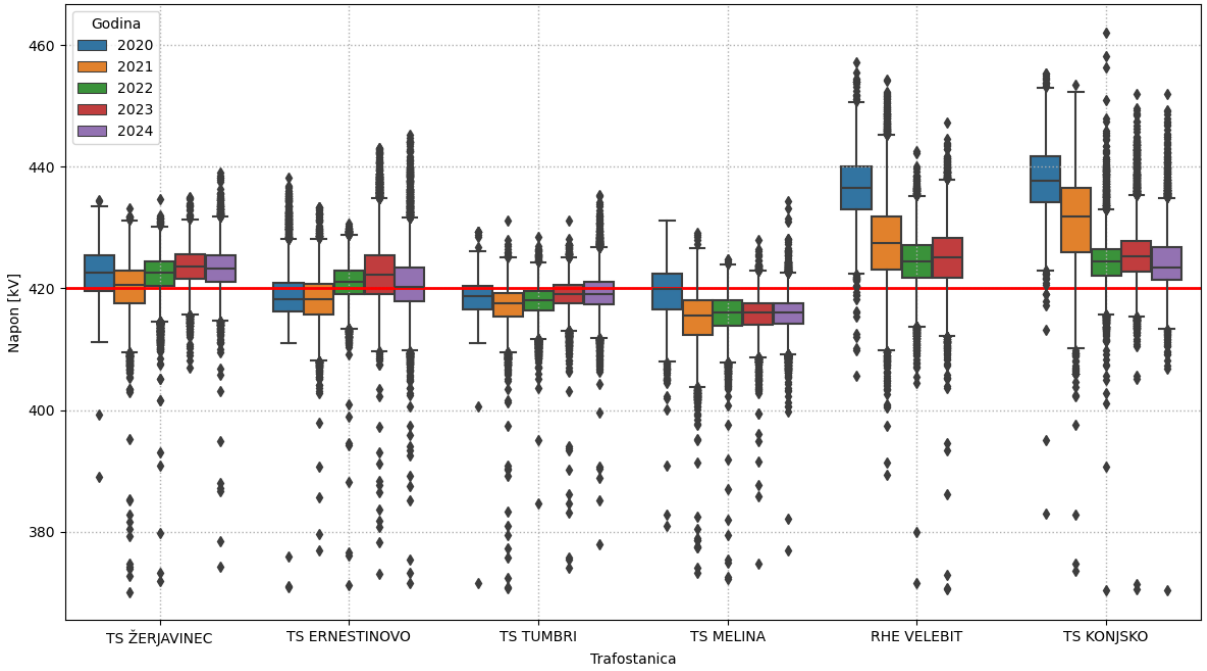
1. **Baterijski sustavi mogu učinkovito ublažiti lokalna zagušenja i povećati fleksibilnost sustava**, ali zbog kraćeg životnog vijeka, veće operativne složenosti i ograničenog prijenosnog kapaciteta **ne predstavljaju dugoročnu zamjenu za ključnu prijenosnu infrastrukturu**, poput 400 kV voda sjever–jug.
2. **Optimalna strategija razvoja elektroenergetskog sustava uključuje komplementarnu izgradnju mreže i baterijskih spremnika**, pri čemu baterije mogu ubrzati integraciju OIE i premostiti razdoblje do realizacije mrežnih pojačanja.

Rezultati – NECP scenarij

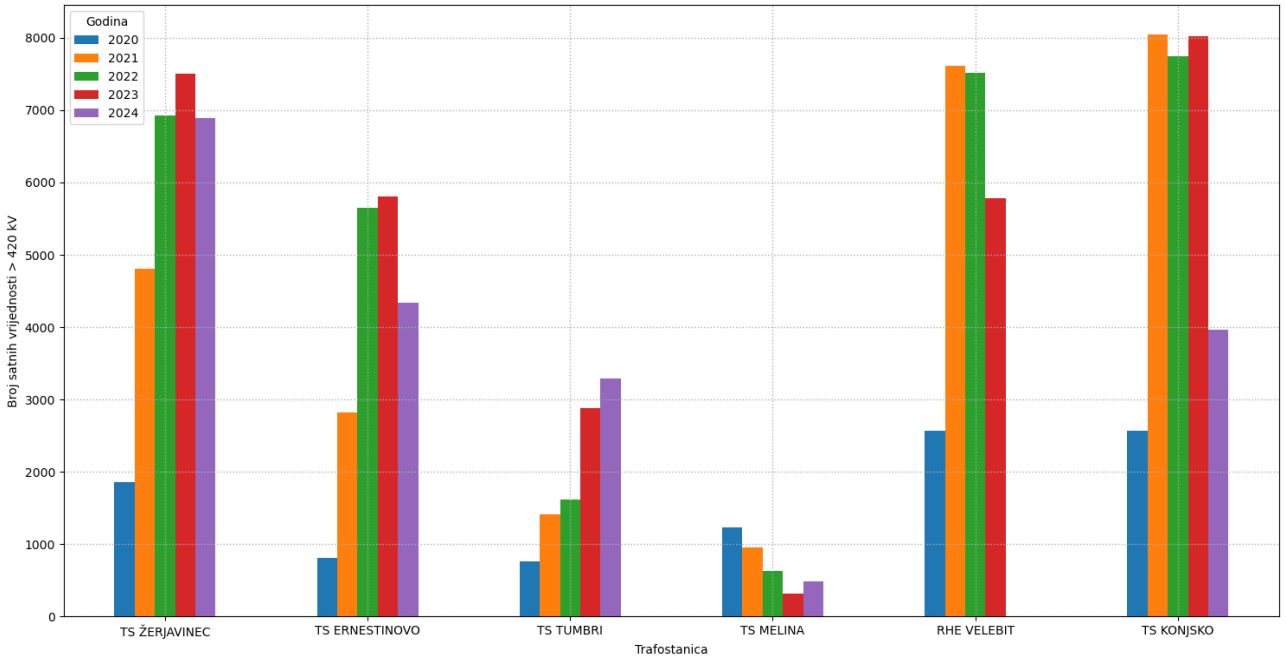
	Lokacija	Snaga [MW]	Mapiranje modeli 2025.
1	60067 HMELIN21 (Melina 220 kV)	30	Rješavanje specifičnog problema u 220 kV mreži vidljivog i u trenutnoj topologiji
2	60090 HPEHLI21 (Pehlin 220 kV)	40	Rješavanje specifičnog problema u 220 kV mreži vidljivog i u trenutnoj topologiji
3	60035 HGRACA51 (Gračac)	30	Slična lokacija i uloga kao 60087 HOTOCA51
4	60047 HKNIN 51 (Knin)	40	Rješavanje specifičnog problema u 110 kV mreži
5	60048 HKOMOL51 (Komolac)	50	Rješavanje specifičnog problema u 110 kV mreži
6	60143 HZADAR51 (Zadar)	70	Ista lokacija kao u modelima 2025.
7	60144 HZADCE51 (Zadar centar)	30	Ista lokacija kao u modelima 2025
8	60159 HLIOSI51 (Lički Osik)	20	Slična lokacija i uloga kao i 60087 HOTOCA51
9	80006 HKOLAR51 (Kolarina)	20	Slična lokacija i uloga kao i 60001 HBENKO51
10	60210 HVELUK51 (Lukavac)	20	Rješavanje specifičnog problema u 110 kV mreži
	UKUPNO	**350 MW**	



Trenutno stanje s povišenjem napona u prijenosnom sustavu RH



Distribucija vrijednosti napona za 400 kV TS po godinama

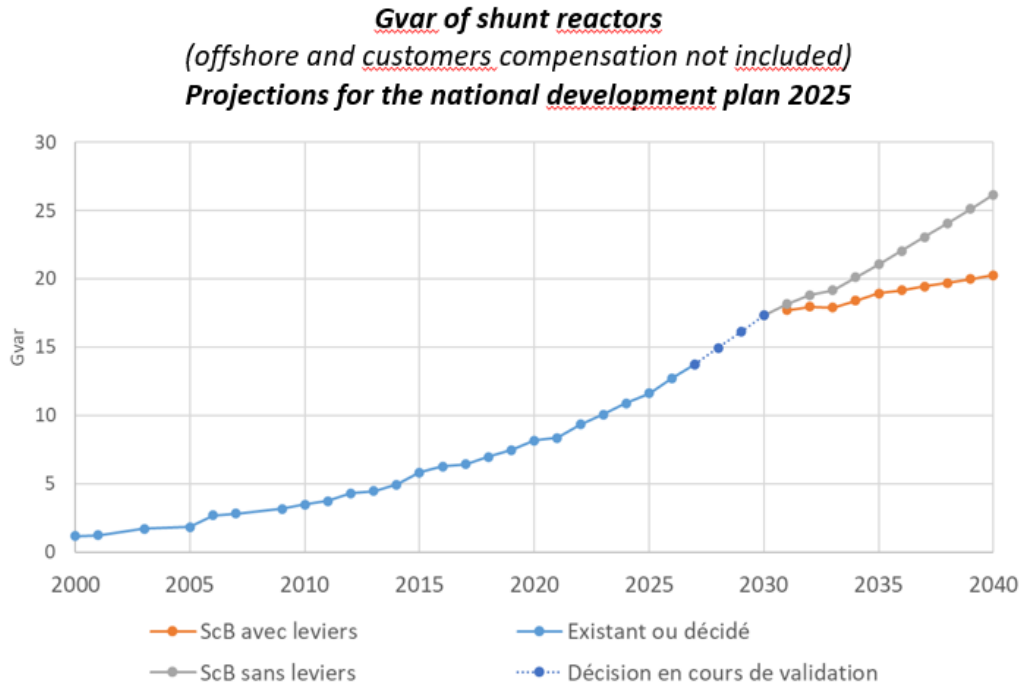


Broj satnih vrijednosti napona > 420 kV po godinama za sve 400 kV TS

Budući koraci u prijenosu

- Izgradnja novih kompenzacijskih uređaja u prijenosnoj mreži

- Kapaciteti instalirane snage uvelike će ovisiti o uključivanju proizvodnih jedinica u kompenzaciji jalove snage na distribucijskoj razini
- Koordinirana regulacija napona TSO-TSO (*Voltage control in Southeast Europe*)



- Uključenje **svih** subjekata na **prijenosnoj** i **distribucijskoj** razini u regulaciju jalove snage
  - za sada OIE na prijenosnoj mreži (cosφ = +/- 0,95)
  - postepeno uključenje konvencionalnih elektrana u regulaciju napona

SMR definicije

- **Small Modular Reactor (SMR) (Mali Modularni Reaktor (MMR)):** <500 MWe max, obično između 50 i 300 MWe, bazirani uglavnom na tehnologiji GEN-III/ GEN-III+ NE (PWR, BWR, rjeđe HTR), raspoloživost 2030-35, FOAK
- **Advanced Modular Reactor (AMR) (Napredni Modularni Reaktor (NMR)):** SMR po snazi ali GEN-IV tipa (rastaljena sol, Na, Pb, Pb-Bi, He, superkritična voda), veće obogaćenje (HALEU), duži ciklus, transmutacija, raspoloživost 2035-40, FOAK+
- **Micro Modular Reactor (MMR):** proizvodnja topline i električne energije u području 1 do 20 MWe, specijalne aplikacije van mreže, bez posebnih zahtjeva za pogon i održavanje, nuklearna baterija, raspoloživost ovisno o tipu 2030-40

SMR karakteristike u odnosu na velike NE

- **Manja snaga ista tehnologija, inovacije, standardizacija**
- **Skuplji po jedinici instalirane snage**
- **Manja inicijalna ulaganja i brža gradnja (2-4 godine vs 5-8 godina)**
- **Economy of Scale vs Economy of number => moduli na nivou pogona (više reaktora) i izgradnje (proizvodnja u tvornici i slaganje na lokaciji)**
- **Jednostavniji projekt za manju jediničnu snagu reaktora => lakše implementirati pasivne karakteristike, poboljšana sigurnost, EPZ redukcija, lakše licenciranje i manji zahtjevi na lokaciju (sigurnost i hlađenje)**
- **Learning curve i serijska proizvodnja => standardizacija i brža redukcija cijene gradnje u odnosu na FOAK, harmonizacija u licenciranju**
- **Povećana fleksibilnost u pogonu i integracija/suživot s OIE, moguća zamjena za TE**
- **Diverzitet u primjeni moguć i u velikim i u malim zemljama/sustavima => električna energija, grijanje, procesna toplina, vodik, ciljano napajanje podatkovnih centara (PPA)**

SMR Driving factors

Cost Affordability

Small Power, Innovation, Standardization

Short Construction Span

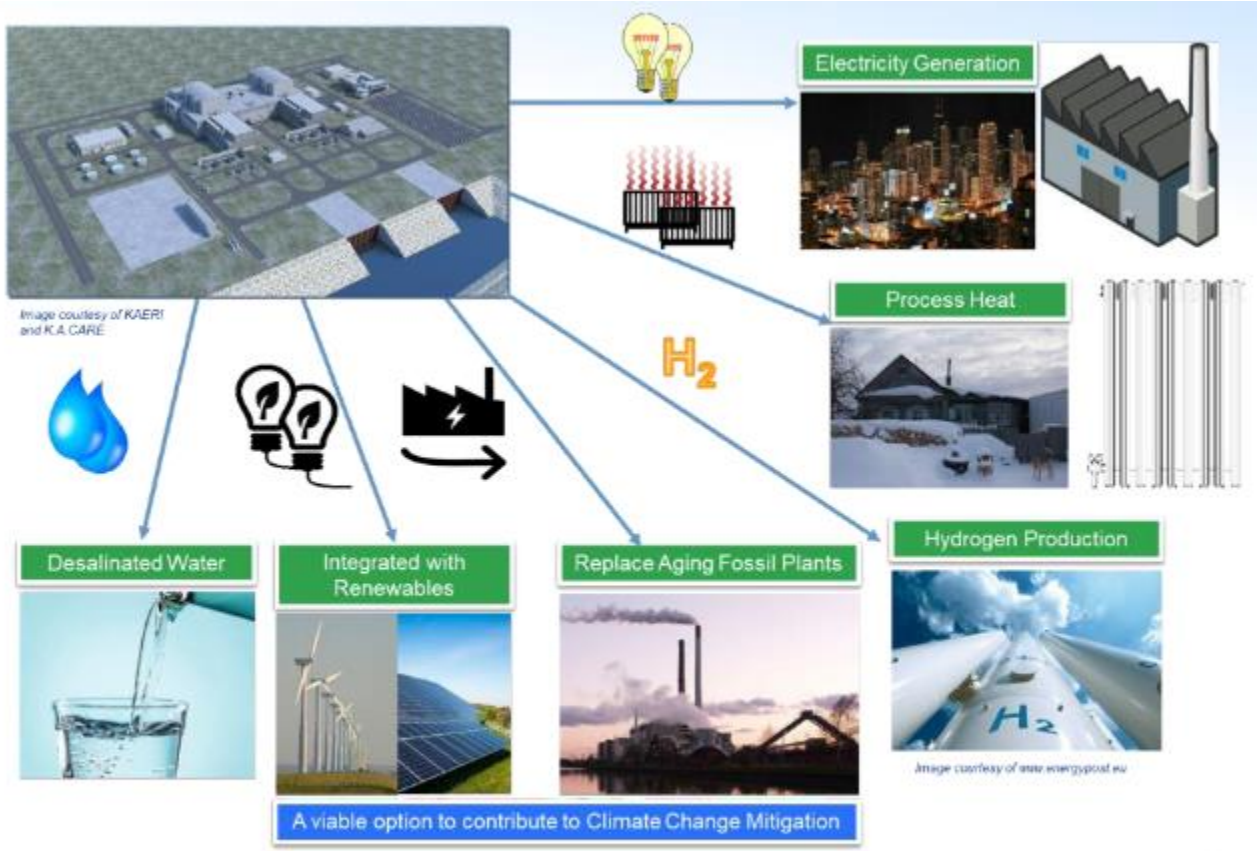
Design Simplification, Modularization

Energy Resilience

Flexibility and ensured energy supply

Energy Sustainability

Hybrid with Renewables, Replace Retiring Fossil Plants



Typically up to 300 MWe, High Degree of Modularity, Option to Energy Supply in Countries with Smaller Grids; Contribute to Climate Change Mitigation

SMR Key Attributes and Driving Factors

Cost Affordability

- Small power
- Lower upfront capital cost
- Economy of serial production

Shorter Construction Span

- Design simplification
- Modularization
- Standardization
- Multi-module
- Smaller footprint

Energy Resilience

- Flexibility
- Ensured energy supply
- Smaller grids
- Remote regions

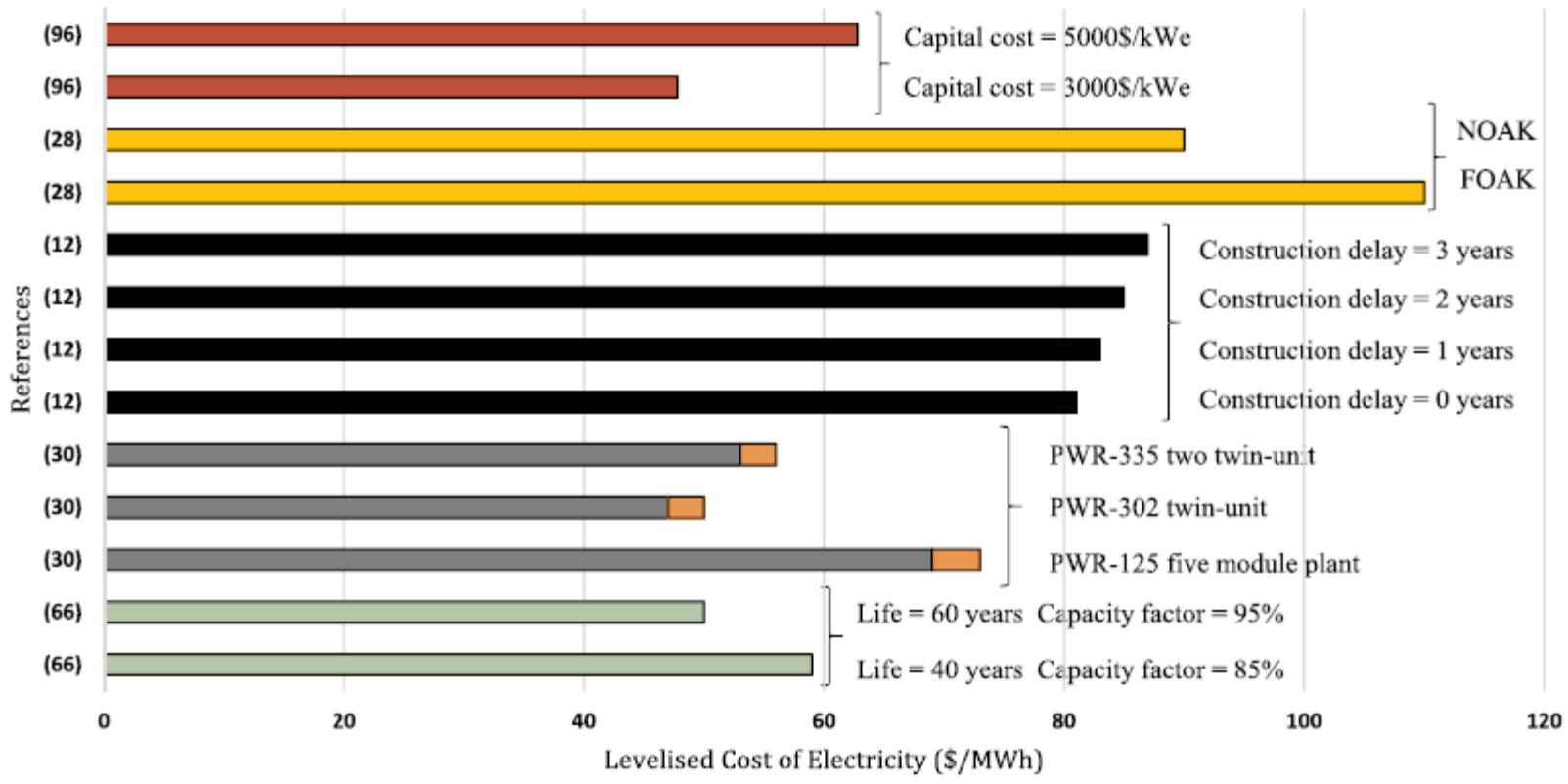
Reduced CO_2 Production

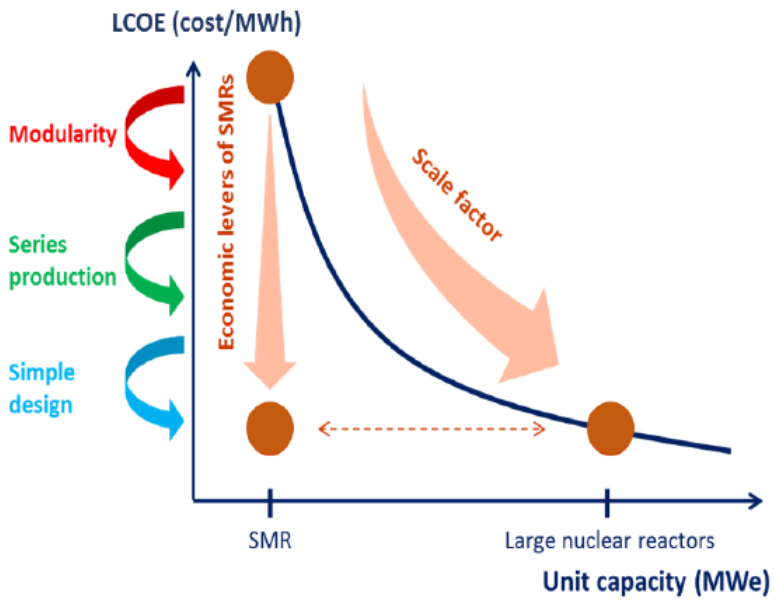
- Replacement of aging fossil-fired plants
- Almost zero emissions

Energy Sustainability

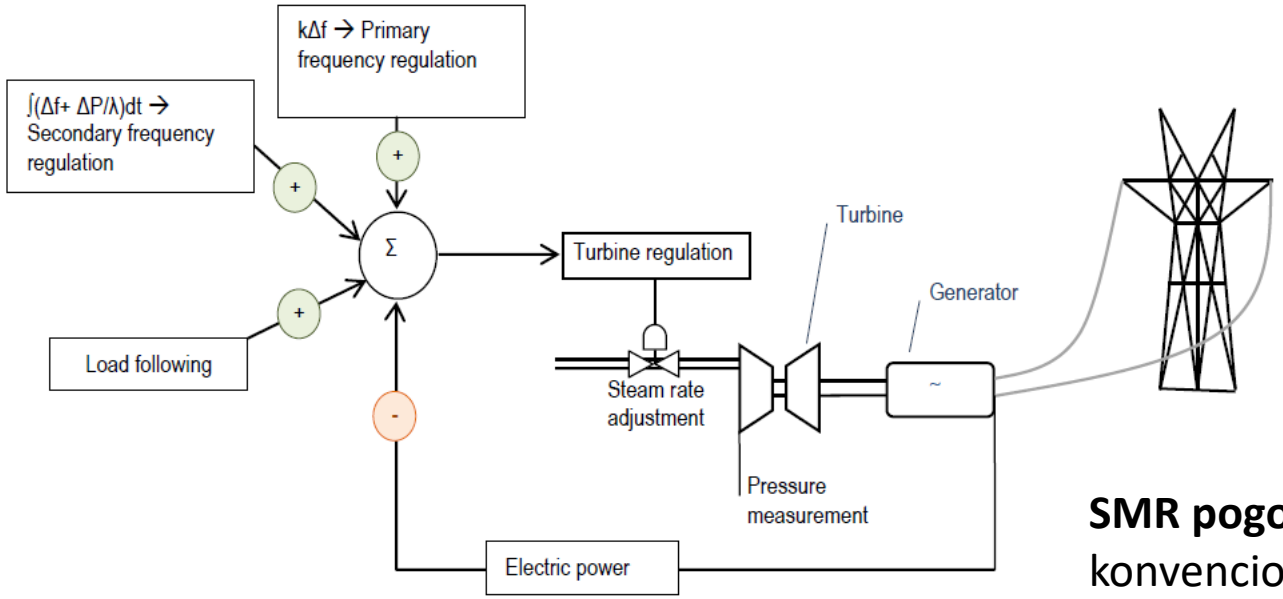
- Cogeneration
- Hydrogen production
- Integration with Renewable to form Hybrid Energy Systems

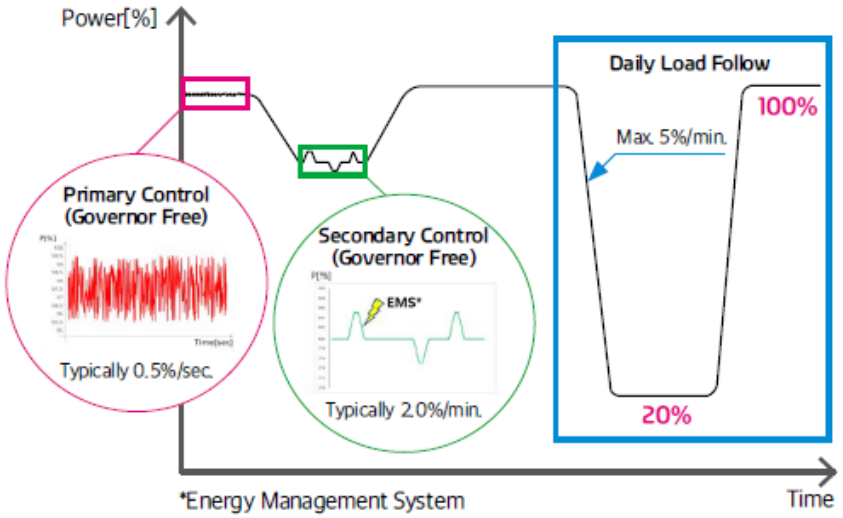
SMR LCOE procjene
(bitno ovisi o snazi reaktora, optimum oko 300 MWe)





Dodatna fleksibilnost pogona SMR-a





SMR pogonska fleksibilnost unaprijeđena u odnosu na konvencionalnu NE, promjena projekta i manja snaga

Otočni pogon (raspad mreže i napajanje dijela potrošača), mogućnost stabilnog rada u režimu vlastite potrošnje

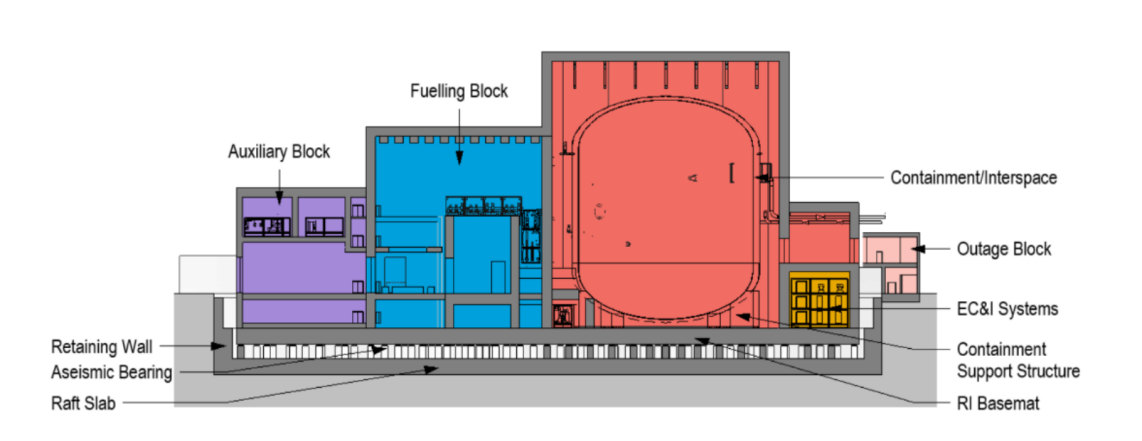
Black-Start (start bez mreže), lakše za manju snagu i primjereno za mikro reaktore, EDG i/ili black-start izvor (električni projekt i dodatni izvori)

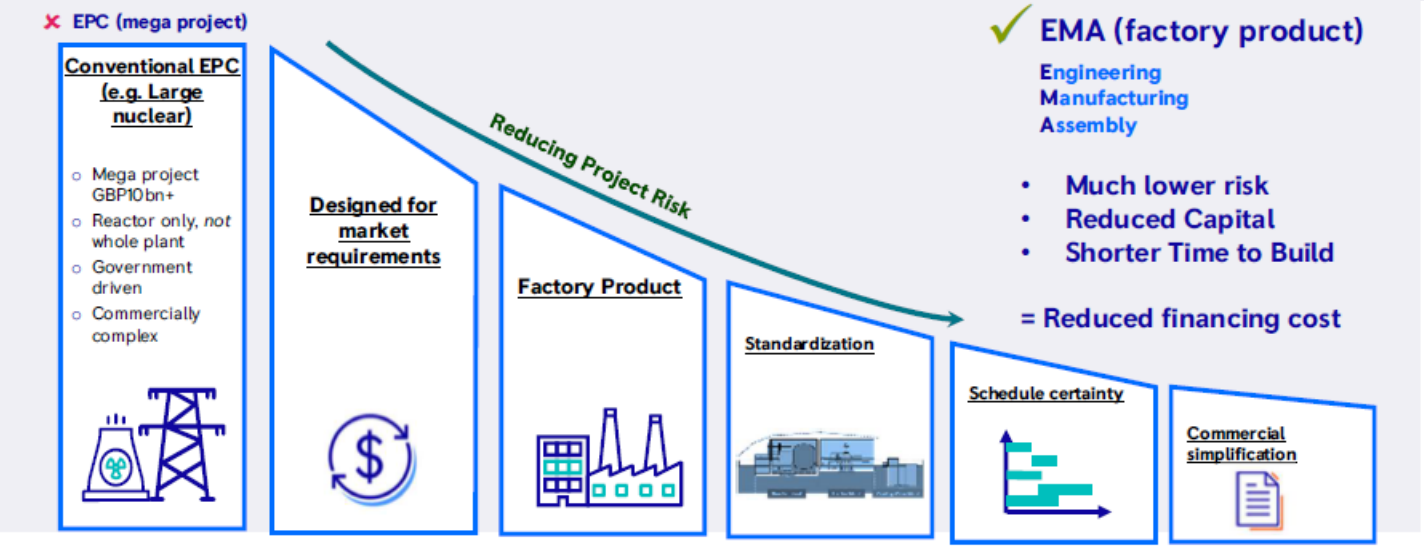
Load Following sposobnost (prilagoditi snagu cikličkom opterećenju mreže), kontrola reaktivnosti, BOP izvedba i karakteristike turbine i kondenzatora

Hibridni način konstantna snaga i spremanje energije (toplinska, baterije i H2)

The Rolls-Royce SMR Nuclear Power Plant

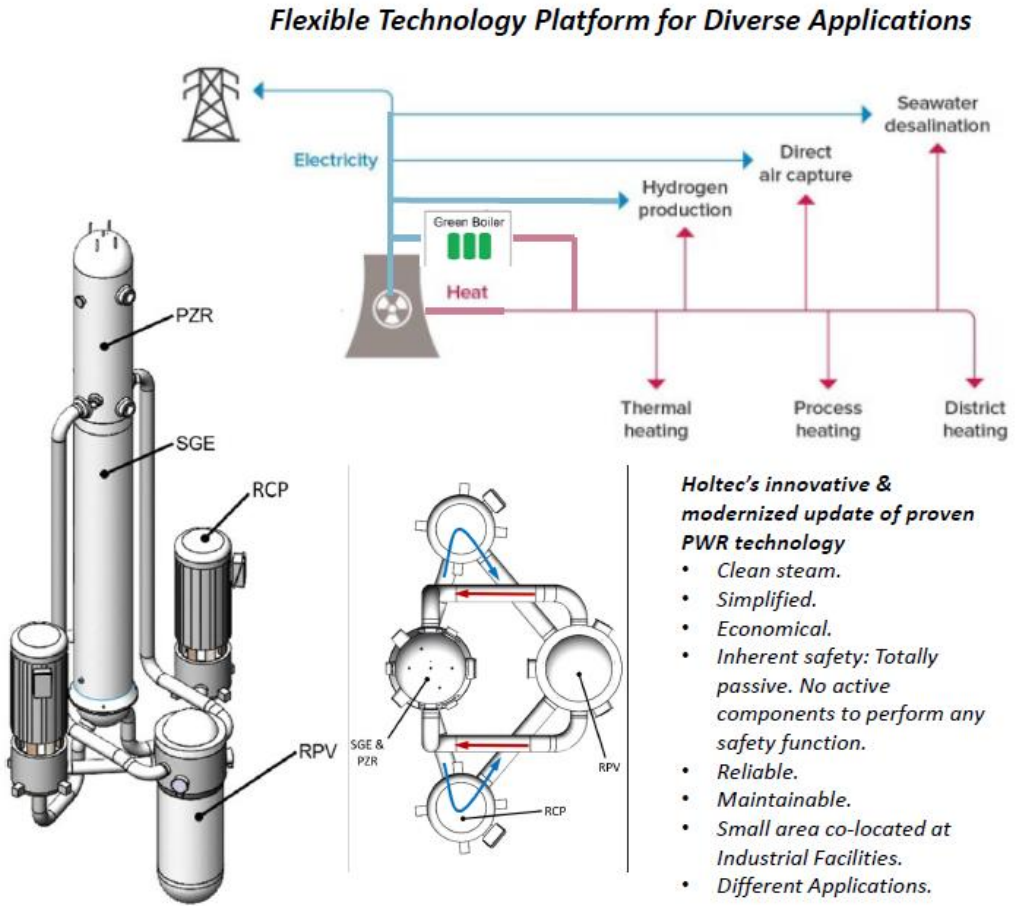
- 470MWe (1358MWth) output
- 18 to 24 month fuel cycle
- <18 days outage for refuelling.
- Entire Reactor Island sits on Seismic Isolation Bearings.
- Primary Plant area: 0.049km^2, 3000MW/km^2
- 1600 modules (all road transportable)





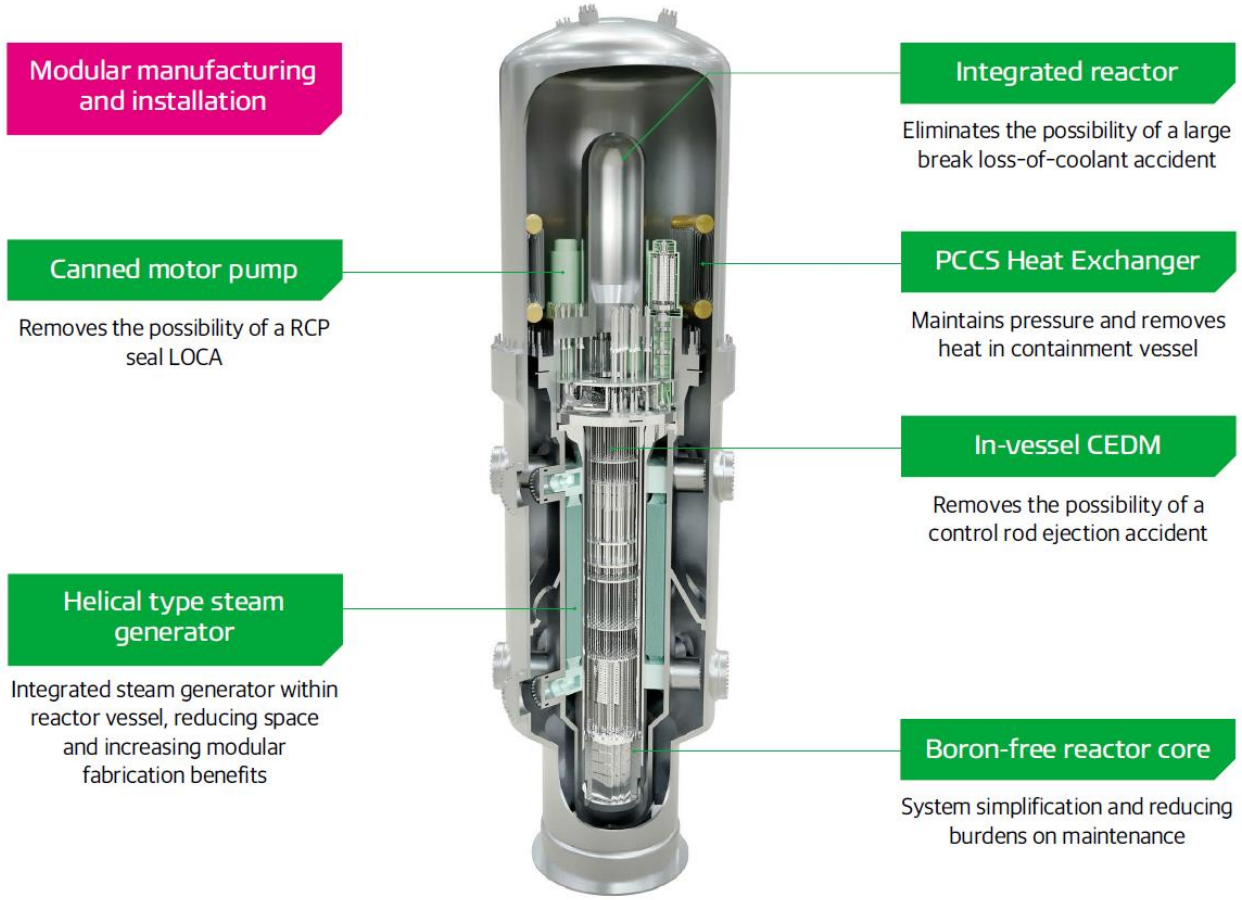
Holtec's SMR-300 (Walk-away safe. 300 MWe)

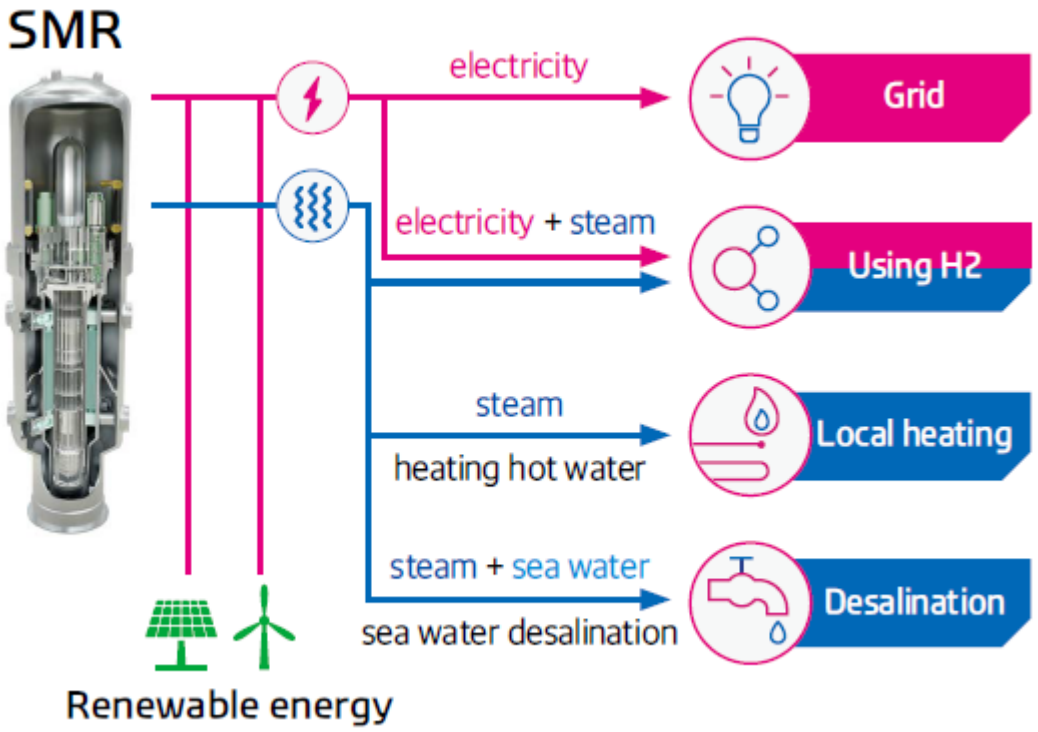
2x SMR-300 Palisades site early 2030s



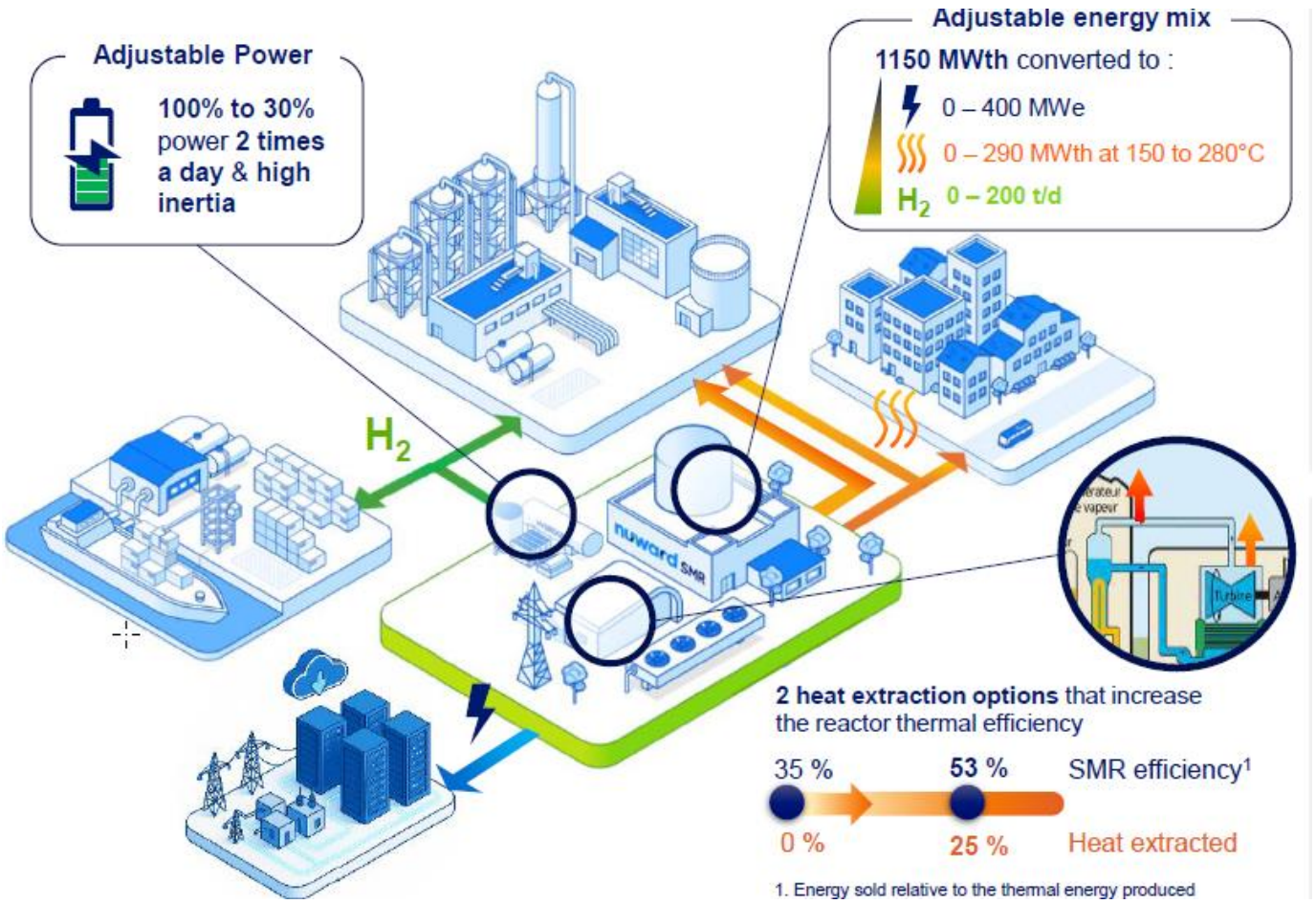
i-SMR (KHNP) Integral Reactor (170 MWe)

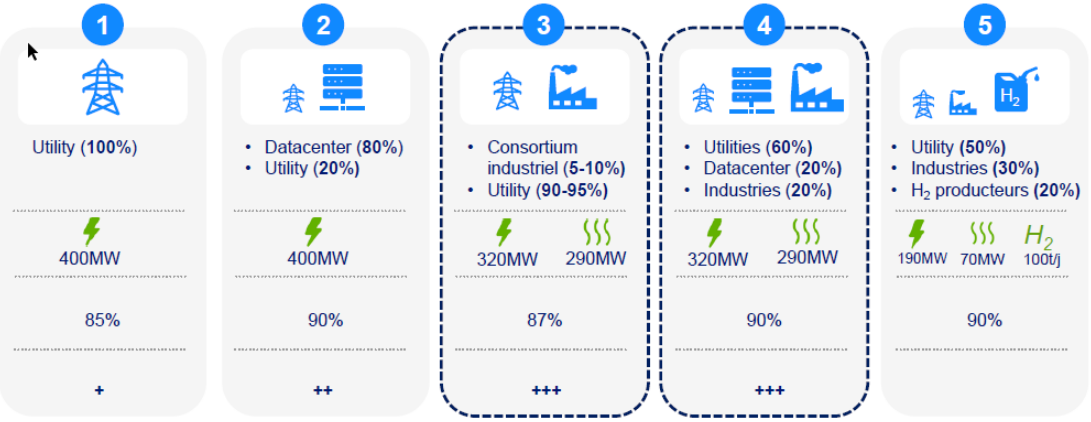
Design approval in 2028, 4 modules operation till 2035





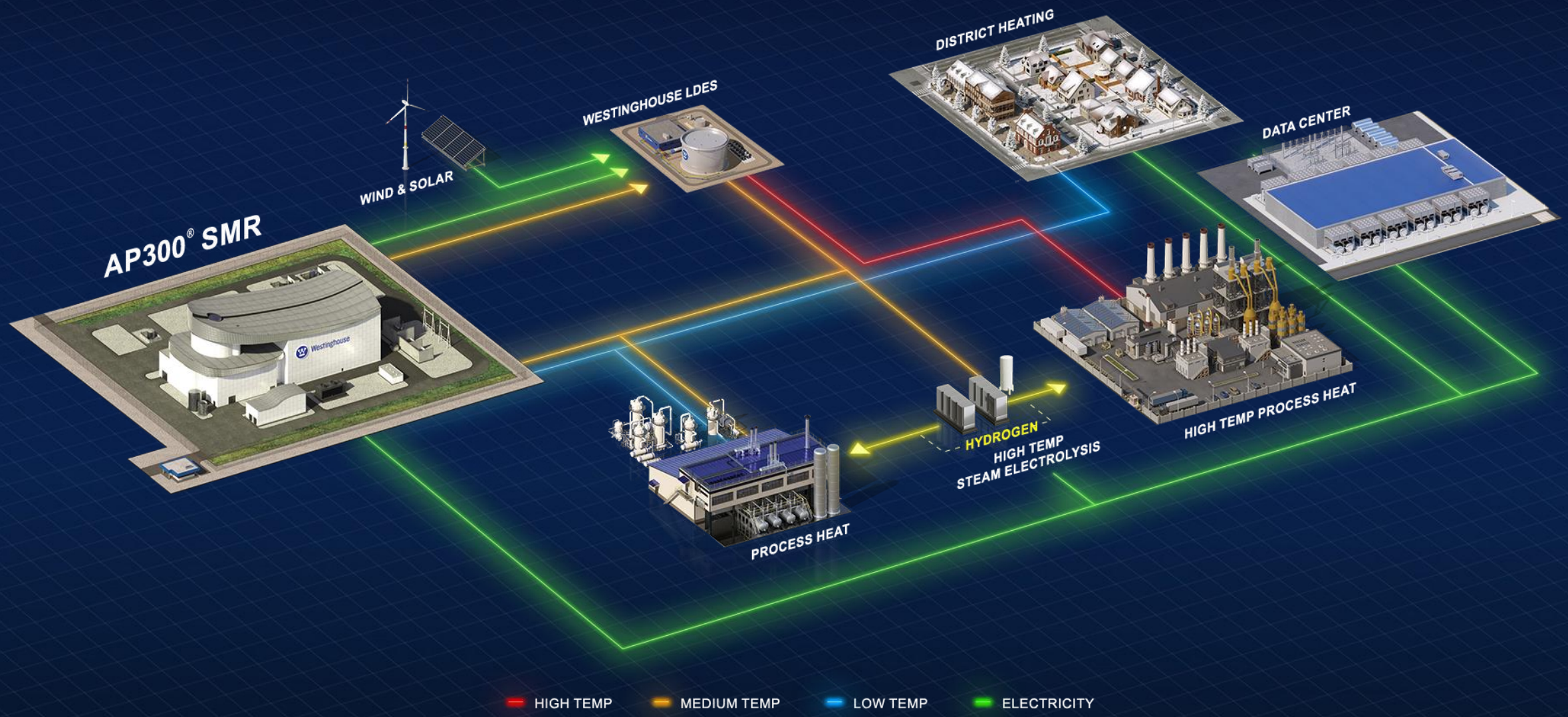
NUWARD SMR (EDF)





Versatility of Application

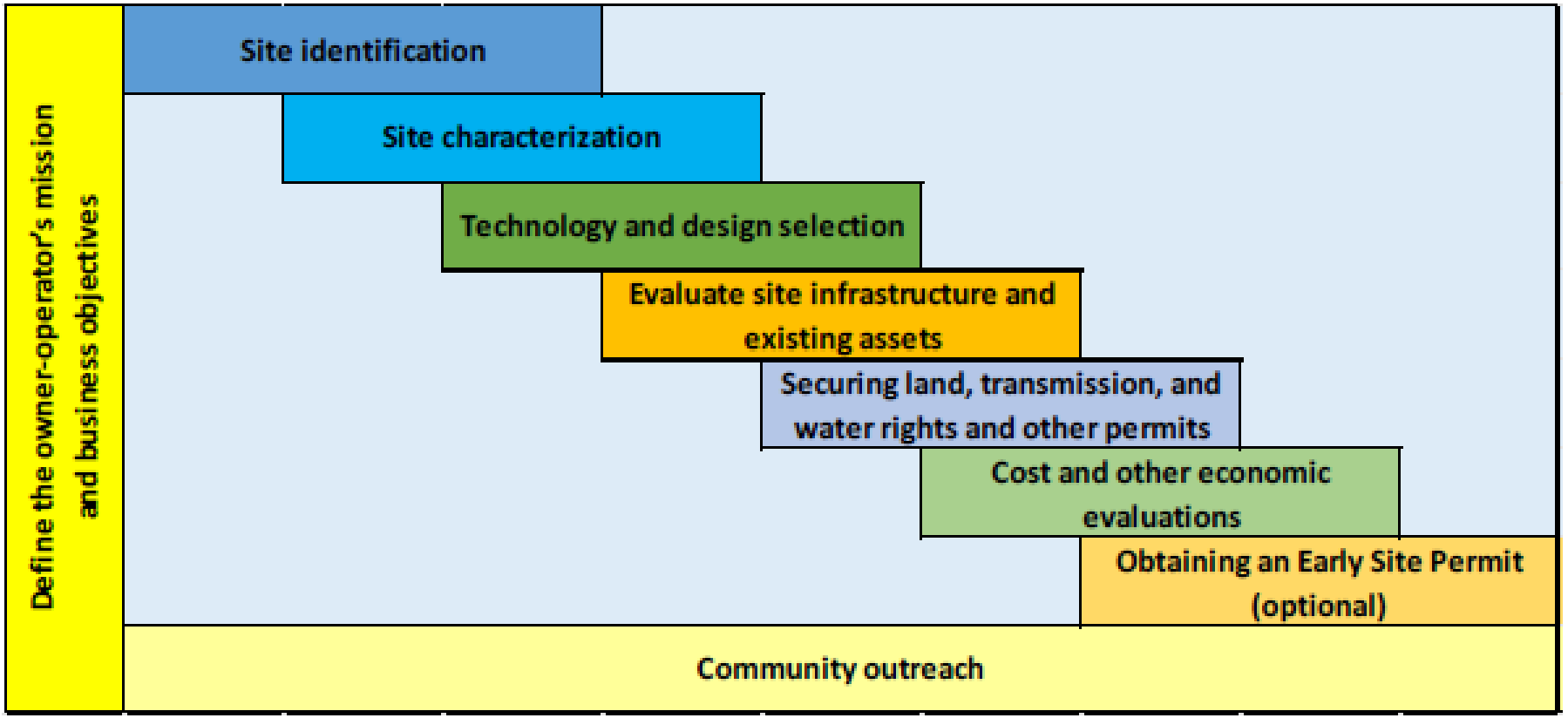
AP300 SMR is the backbone of a community clean energy system



© 2025 Westinghouse Electric Company LLC. All Rights Reserved.

Izbor lokacije nuklearne elektrane

(imati spremnu lokaciju bitno ubrzava gradnju a jednom određena lokacija obično zadržava atribute koje je čine lokacijom duže vrijeme)



Kriteriji za izbor lokacije 1/2

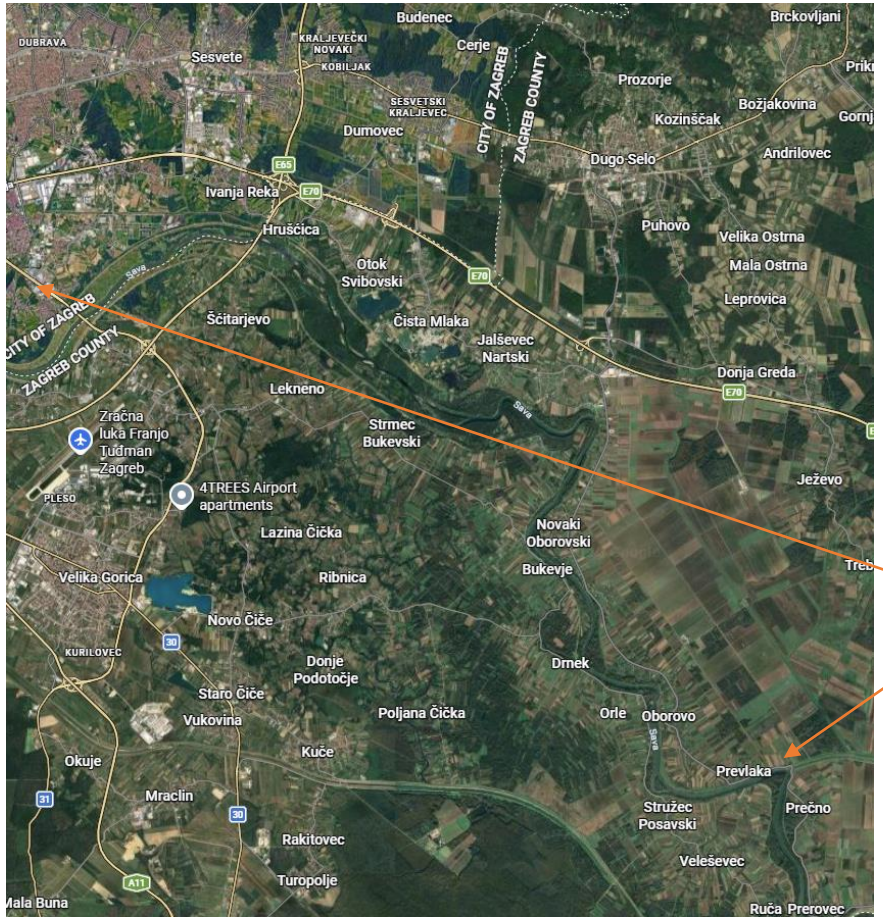
- *Geologija/Seismologija* – Odgovarajuća nosivost i stabilnost terena i niska seizmika bez aktivnih rasjeda (e.g. SSE 0.3 pga). Kriterij je eliminatoran. Visoke seizmičke zahtjeve je lakše ispuniti za male elektrane. Kriterij ne ovisi bitno o vremenu kad je istraživanje izvršeno.
- *Raspoloživost vode za hlađenje* – kriterij utječe na izbor tehnologije za hlađenje elektrane i ima direktni utjecaj na ultimate heat sink. Utječe na cijenu gradnje i/ili pogonske troškove. SMR obično imaju manje potrebe za hlađenjem a mogu se izvesti i s hlađenjem zrakom. Kriterij obično nema izraženu vremensku ovisnost.
- *Blizina vanjskih opasnih aktivnosti* – Kriterij je eliminatoran i može se promijeniti od trenutka kad je lokacija evaluirana (aerodromi, vojni objekti, skladišta goriva).
- *Populacija* – Obično se za lokaciju biraju područja niže naseljenosti (EAB, LPZ, EPZ) udaljenija od populacijskih centara. Za velike reaktore je kriterij eliminatoran. Mali reaktori s niskim CDF/LERF se mogu locirati bliže naseljima a raspolažu i s manjim radioaktivnim inventarom. Populacija je podložna promjeni u vremenu, u odnosu na trenutak evaluacije.

Kriteriji za izbor lokacije 2/2

- *Posebna namjena zemljišta* – Područja koja imaju ranije određenu namjenu se obično isključuju (zaštićena područja, kulturna baština, rekreacijska područja).
- Pristupne cesti i komunikacije (bitno za gradnju i sigurnost)
- Bitna pouzdanost mreže i udaljenost do centara potrošnje
- Prisustvo ekstremnih vremenskih uvjeta: kriterij povratnog perioda pojave. Uzevši u obzir klimatske promjene obično je potrebna reevaluacija i kontinuirano praćenje. (maksimalna i minimalna temperatura, brzina vjetra, plimni valovi)
- Plavljenje/Hidrologija: maksimalna poplavna razina bitna u izboru lokacije i projektiranju karakteristika zaštite, kriterij je povratni period. Potrebno kontinuirano praćenje i reevaluacija u uvjetima klimatskih promjena.
- Atmosferska disperzija: karakteristike disperzije ispuštenog materijala i mehanizmi i smjerovi širenja.
- Karakteristike podzemnih voda i potencijal transporta radionuklida.
- Eliminirati mogućnost za narušavanje zaštićenih vrsta i habitata – vodeni i kopneni

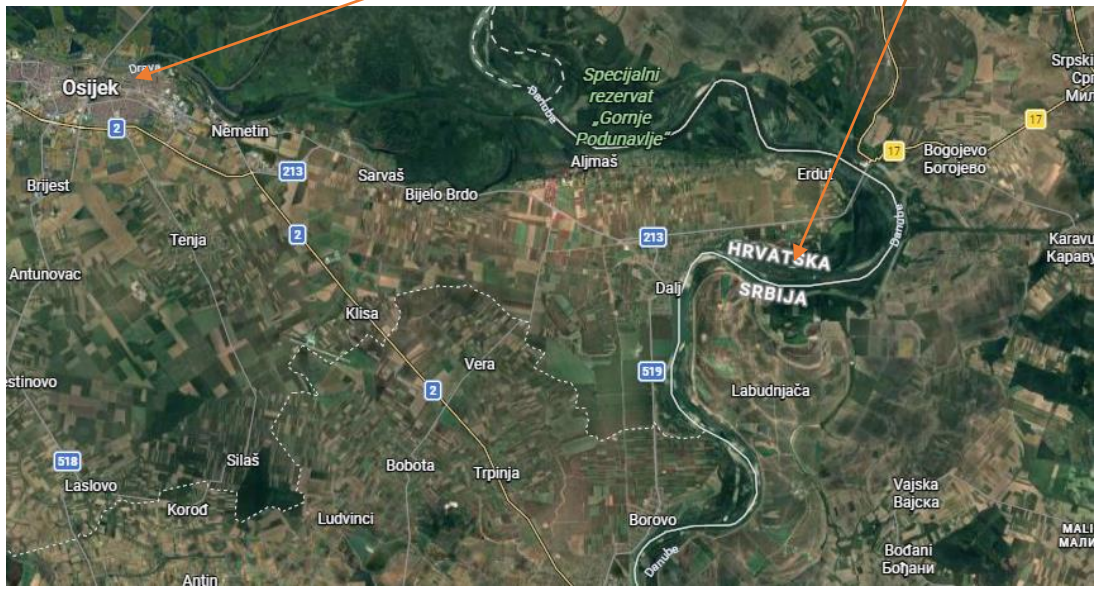
Istražene lokacije - lokacija Prevlaka

centralni položaj, povoljan priključak na EES, blizina konzuma

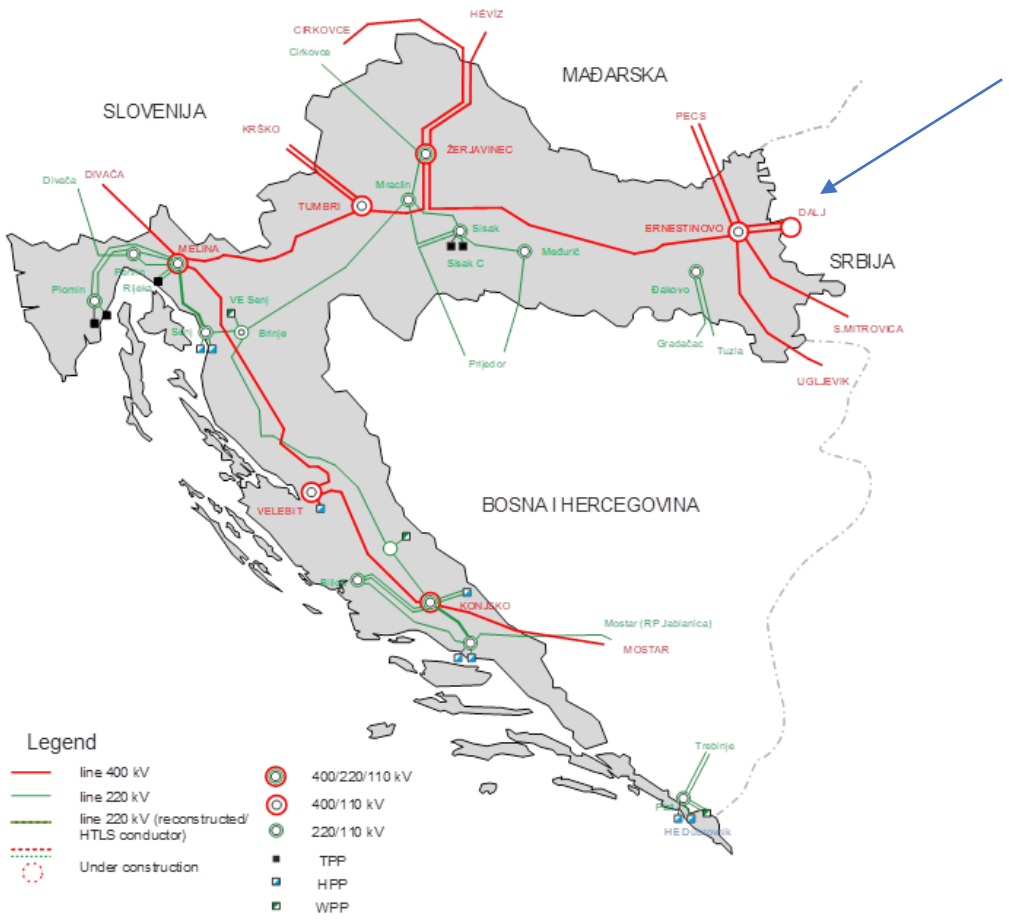


Istražene lokacije - lokacija Dalj/Tanja

problematičan prekogranični utjecaj, ograničen priključak na EES, ograničen konzum



Stanje 400 kV mreže 2030+, konfiguracije za NE Prevlaka i NE Dalj



Instalirana proizvodnja na nivou ODS (brzi rast PV) i podaci o min/max opterećenju u prijenosu

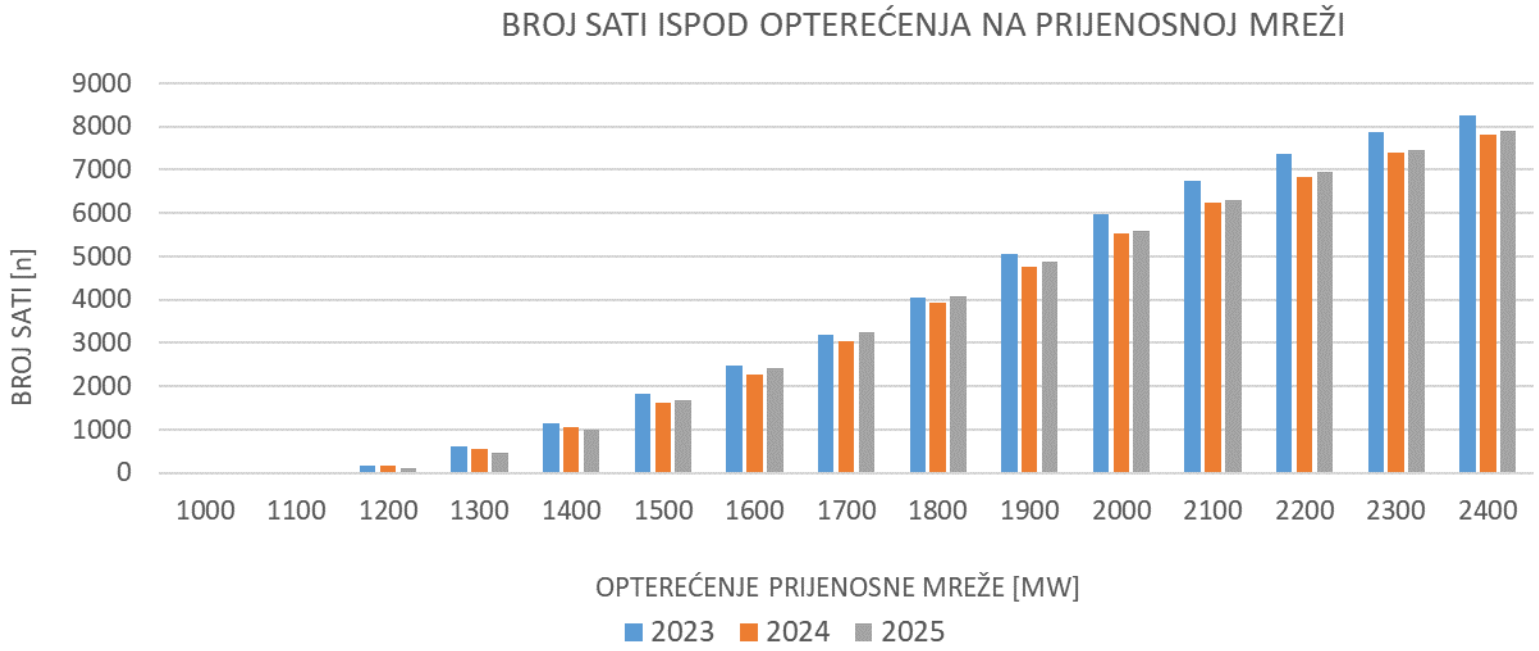
2025	kW
Sunce	1,157,488
Vjetar	95850
Biomasa	101483
Voda	76303
Geotermalna	10000
Ostalo	99150
Ukupno	1,540,274

2023	kW
Sunce	441,167
Vjetar	95850
Biomasa	100032
Voda	76303
Geotermalna	10000
Ostalo	95358
Ukupno	818,710
2024	kW
Sunce	776,033
Vjetar	91250
Biomasa	101912
Voda	76303
Geotermalna	10000
Ostalo	97542
Ukupno	1,153,040

Direktni utjecaj na max jediničnu snagu NE i faktor opterećenja

Godina	Min opterećenje (MW) HOPS	Max opterećenje (MW) HOPS
2023	1023	3031
2024	993	3148
2025	1026	2944

Broj sati proveden ispod nekog opterećenja na prijenosnoj mreži za 3 sukcesivne godine, min i max opterećenje prijenosa



	BROJ SATI ISPOD X-LOAD OPTEREĆENJA PRIJENOSNE MREŽE 2025 (MW)														
X	1000,00	1100,00	1200,00	1300,00	1400,00	1500,00	1600,00	1700,00	1800,00	1900,00	2000,00	2100,00	2200,00	2300,00	2400,00
n	0	8	117	472	1013	1677	2414	3251	4076	4873	5593	6306	6943	7455	7908

Ukupna potrošnja na prijenosnoj mreži i udjel po PrP-ovima, (energy mix 2022-25)

	UKUPNO (kWh)
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_2025	16,330,089,916
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_OS	1,622,158,226
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_RI	3,499,374,308
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_ST	4,007,723,153
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_ZG	7,200,834,228
Hidroelektrane	4,827,015,972
Termoelektrane	3,040,418,453
Proizvodnja VE	2,882,996,639
Proizvodnja SE	167,503,265
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_2024	16,546,104,618
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_OS	1,731,531,204
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_RI	3,456,676,678
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_ST	4,068,773,380
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_ZG	7,289,123,355
Hidroelektrane	5,847,099,027
Termoelektrane	3,612,110,722
Proizvodnja VE	2,419,220,436
Proizvodnja SE	45,704,805

	UKUPNO (kWh)
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_2023	16,036,964,642
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_OS	1,749,784,256
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_RI	3,305,049,654
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_ST	3,843,055,816
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_ZG	7,139,074,917
Hidroelektrane	7,219,459,762
Termoelektrane	4,722,040,296
Proizvodnja VE	2,319,952,305
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_2022	16,255,783,634
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_OS	1,781,114,144
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_RI	3,333,669,540
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_ST	3,918,686,359
POTROŠNJA NA MREŽI PRIJENOSA_ZG	7,222,313,592
Hidroelektrane	4,712,513,010
Termoelektrane	4,628,625,969
Proizvodnja VE	2,100,593,583

Broj sati opterećenja PrP Osijek/Zagreb ispod instalirane snage SMR NE (350, 700, 1000 i 1200 MW), sadašnje stanje

Godina	Datum	Opterećenje HOPS	Opterećenje PrP_OS	Opterećenje PrP_ZG	Opterećenje PrP_OS	Opterećenje PrP_ZG
		[MW]	[MW]	[MW]	[%]	[%]
2023	01.05.2023. 04:00	1038	104	483	10%	47%
	05.11.2023. 04:00	1035	121	522	12%	50%
2024	01.04.2024. 04:00	992	106	462	11%	47%
	30.9.2024. 4:00:00	1120	133	545	12%	49%
2024	27.04.2025. 04:00	1129	120	495	11%	44%
	29.09.2025. 04:00	1159	120	495	10%	43%

Osijek	350 MW	700 MW	1000 MW	1200 MW
2023	8751	8760	8760	8760
2024	8690	8784	8784	8784
2025	8758	8760	8760	8760

Zagreb	350 MW	700 MW	1000 MW	1200 MW
2023	0	1147	5979	8252
2024	0	1069	5547	7827
2025	0	1013	5593	7908

U Prp Zagreb blok od 350 MW u potpunosti napaja lokalni konzum dok bi izgradnjom 2 bloka od 350 MW tek neznatno bila povećana potreba za evakuacijom u okolna prijenosna područja ili susjednu prijenosnu mrežu (gubici).

Ukupni gubici u prijenosu za dvije lokacije i različit broj SMR modula (3 modula = velika NE)

		NECP	oko 2030		
	TS Veleševec	TS Veleševec	Dalj	Dalj	
	Ploss		Ploss		%
ScA_NECP_V350	162.2769	1225.71	175.25	1326.81	8.00
ScA_NECP_V700	162.7397	1230.76	191.81	1460.24	17.86
ScA_NECP_V1050	164.4932	1248.19	209.21	1602.85	27.19
ScB_NECP_N_V350	132.3162	1013.31	146.41	1120.77	10.65
ScB_NECP_N_V700	132.3833	1015.65	163.32	1256.29	23.37
ScB_NECP_N_V1050	133.7409	1030.36	181.06	1400.84	35.38
ScC_NECP_N_V350	97.60043	711.16	108.24	793.31	10.90
ScC_NECP_N_V700	97.95459	716.47	122.05	905.80	24.59
ScC_NECP_N_V1050	99.57413	733.72	136.80	1028.24	37.38

Pretpostavke preliminarne analize

Scenarij	Bilanca	HR
A	Proizvodnja [MW]	3674,96
	Potrošnja [MW]	2294,22
B	Proizvodnja [MW]	3189,43
	Potrošnja [MW]	2741,43
C	Proizvodnja [MW]	2638,82
	Potrošnja [MW]	2052,74

miks scenarija NECP 2030. godine										
	NE	**HE**	**GAS**	**OIL**	**COAL**	**BIOMASS**	**BIOGAS**	**GE**	**VE**	**SE**
NECP RH Pinst ukupno modeli [MW]	348	2284	992	0	199	102	62	30	2284	2835

Tablica 1 - Karakteristični scenariji i faktori istodobnosti proizvodnje elektrana

Scenarij	Hidro elektrane	Vjetro elektrane	Fotonaponske elektrane	Geotermalne elektrane	Spremnici energije	Max. vanjska temperatura [°C]	Očekivano godišnje trajanje
A	0,65	0,70	0,75	1,00	0,00	25	1 %
B	0,60	0,55	0,60	1,00	0,50	15	4 %
C	0,45	0,50	0,55	1,00	0,00	35	5 %

Kako dalje?

- Potvrda zakona o mirnodopskom korištenju nuklearne energije u Saboru
- Realizacija plana i programa aktivnosti predviđenih zakonom da se utvrde potrebe za energijom i odluči kad, gdje, koliko i kakve energije trebamo
- **Uz LCOE u odlučivanju koristiti i kriterij ukupnih ulaganja (Levelized Full System Cost Of Electricity - LFSCOE) u EES i sigurnost opskrbe**
- **Potrebno jasno opredjeljenje potvrđeno u Saboru** i **uključenost HEP-a** da bi se planovi proveli
- **Funkcionalno regulatorno tijelo**
- Osvježavanje podataka potrebnih za izbor preferentne lokacije i istražni radovi su prioritet
- Izbor tehnologije i strateškog partnera i uključivanje domaće industrije bitno skraćuje proces
- Paralelna ulaganja u edukaciju novih i okupljanje postojećih kadrova

Zahvala

- Zahvala kolegama s ZVNE za korištenje prezentacije ‘Identificiranje zagušenja u elektroenergetskoj mreži Hrvatske i definiranje najpovoljnijih snaga i lokacija baterijskih spremnika u cilju otklanjanja zagušenja’ i za preliminarne PSS E proračune gubitaka u mreži za slučaj spajanja SMR modula na lokaciji Prevlaka i lokaciji Dalj
- Zahvala kolegama iz HOPS-a za dvije stranice iz njihove prezentacije ‘Izazovi u regulaciji napona prijenosne mreže HOPS-a’ i za podatke vezane za opterećenja u prijenosnoj mreži RH i za podatke o proizvodnim kapacitetima spojenim na prijenosnu mrežu