

Novinky v jaderné energetice

Vladimír Wagner

Ústav jaderné fyziky AV ČR, FJFI ČVUT Praha

- 1) Úvod
- 2) Pět výzev pro jadernou energetiku
- 3) Co nejdelší provoz stávajících bloků
- 4) Současnost – přechod k III. generaci
- 5) Jaderné zdroje v teplárenství
- 6) Malé modulární reaktory
- 7) Jak na nízkoemisní mix?
- 8) Závěr



APR1400 úspěšně funguje v Jižní Koreji i SAE



Flamanville 3 – konečně se spouští



Dokončuje se MMR ACP100 v Číně

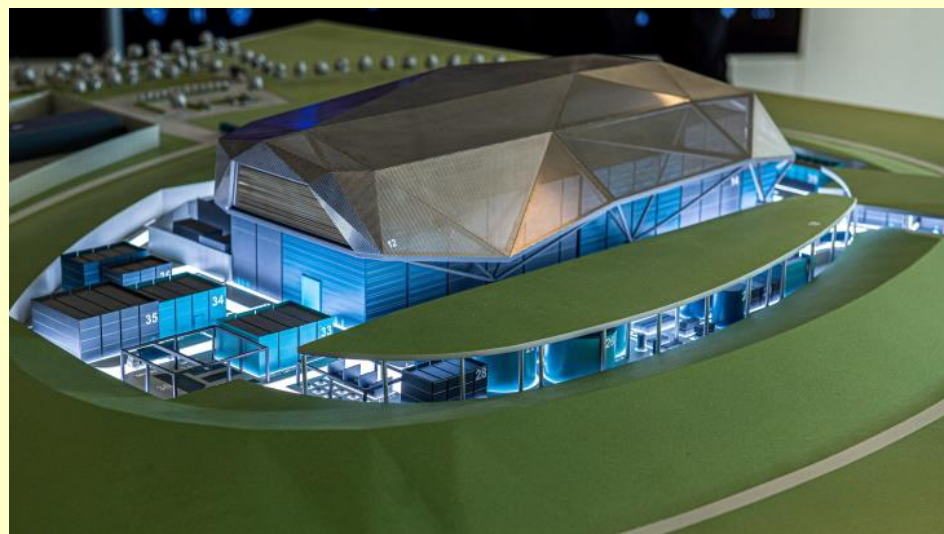
Pět základních výzev

- 1) Co nejdelší bezpečné provozování
- 2) Přejít k reaktorům III. generace
- 3) Zavedení Malých modulárních reaktorů
- 4) Teplo pro teplárny a průmysl
- 5) Vývoj reaktorů IV. generace

Renesance v Číně, stagnace v Evropě a USA
USA a Evropa – prodlužování životnosti bloků
Klíčové pro Evropu je obnovení kompetencí a realizaci renesance v Evropské unii



Malý modulární reaktor
HTR-PM v Číně



Instalace reaktorové nádoby v Hinkley Point C

ČEZ se zapojil do vývoje Rolls-Royce SMR

Co nejdelší bezpečné provozování

- 1) Většina komponent se dá vyměnit, kritický je stav reaktorové nádoby (vyžihání)
- 2) V současné době se dostaly některé bloky už do šesté desítky let provozu
- 3) Řada bloků má či žádá o licenci na 60 let a některé i na 80 let
- 4) V USA se připravují k opětovnému spuštění i již „trvale“ odstavené bloky – firma Constellation připravuje opětovné spuštění Three Miles Island (přejmenováno na Crane Clean Energy Center) – předpoklad spuštění 2027
- 5) Pro prodloužení provozování se rozhodly Švédsko, Francie, Švýcarsko, Belgie, ...
- 6) Firma ČEZ nyní předpokládá provoz Dukovan 70 let (do roku 2055) – intenzivní příprava, pečlivá údržba a vyčleněné finance – do přípravy nových Dukovan zahrnuty i práce na zajištění dostatku vody pro souběžné chlazení



Bloky v Loviisa 1 a 2 (VVER440)
běží přes 40 let, žádají o licenci na 70



Dukovany by měly běžet do roku 2055



Three Mile Islands 1 by měl běžet v 2027

Firma Holtec přechází od vyřazování k provozování a výstavbě

Elektrárna Palisades (USA) 800 MWe byla odstavena v roce 2022.

Převzal ji Holtec, aby zajistil likvidaci.

Od roku 2023 pracuje na opětném spuštění.

30. 5. 2025 NRC vydalo kladné stanovisko k dopadům na životní prostředí

Spuštění se předpokládá do konce roku 2025

V areálu postaví ještě dva SMR-300



Elektrárna Palisades by mohla být znovu spuštěna už letos



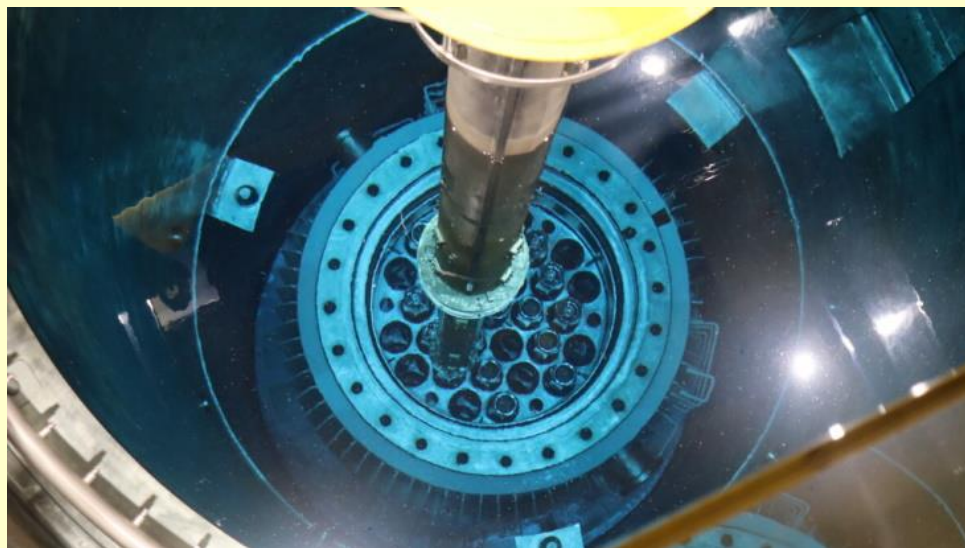
Firma Holtec má svůj projekt malého modulárního reaktoru SMR-300

Řešení dodávek východních typů paliva

Palivové soubory pro reaktory VVER1000 jsou v nabídce firmy Westinghouse dlouhodobě, dodávaly je na počátku století i do Temelína, nyní je smlouva mezi Westinghousem a Framatomem o dodávkách paliva pro Temelín (prvních 30 dodáno)

Westinghouse má nyní i palivo pro reaktory VVER440, které připravoval na přání Finska a Ukrajiny. Na začátku září 2024 vložily do reaktoru Loviisa 2 první várku paliva od Westinghouse. Toto palivo dodávali už v letech 2001 až 2007

První palivové soubory VVER440 (80 kazet) Westinghouse ze Švédska jsou přebírány firmou ČEZ v elektrárně Dukovany – první možné testovací využití podzim 2026. Zásoby ruského paliva TVEL na 2 -3 roky



Palivové soubory Westinghouse jsou v Loviisa 2 Stejné palivové soubory jsou už i v Dukovanech

Jaderné zdroje - současnost

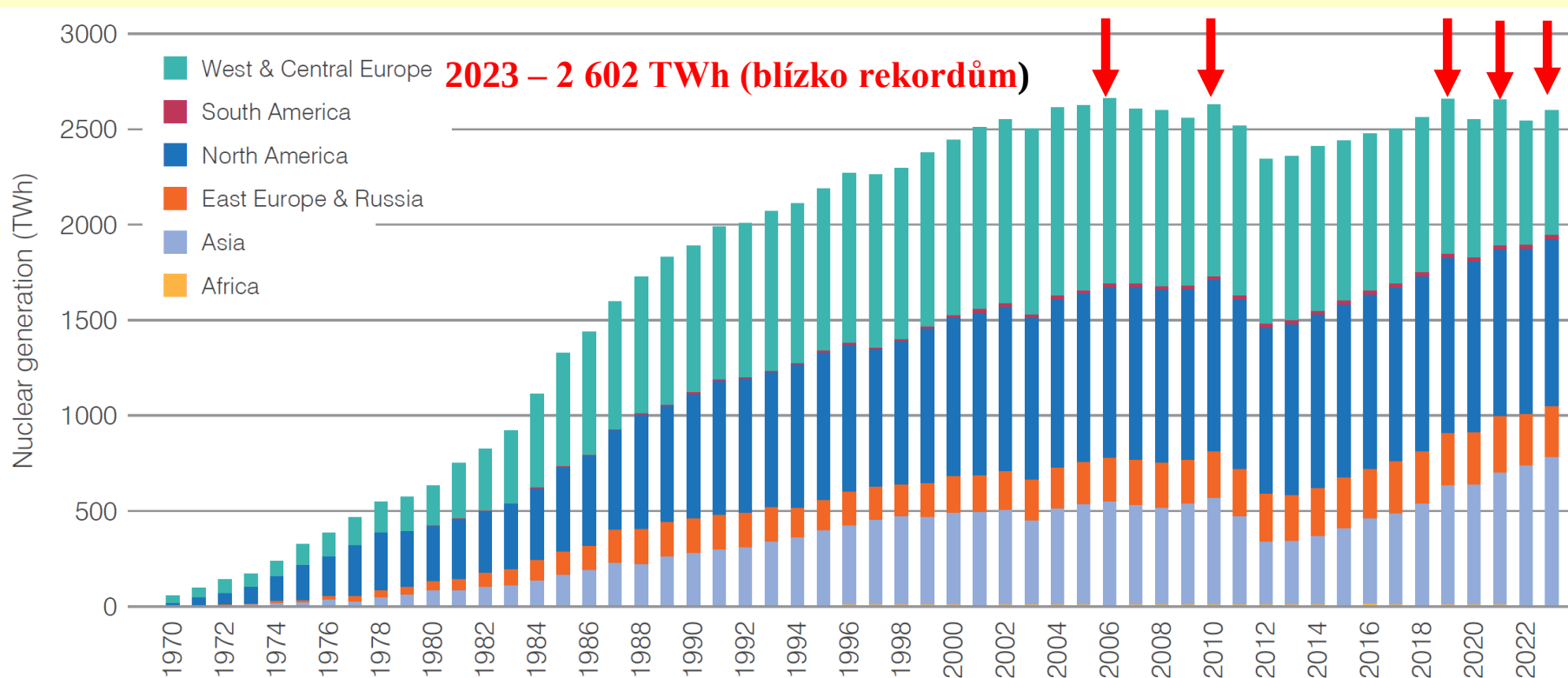
Co nejdelší bezpečný provoz stávajících bloků a přechod od II. ke III. generaci

Počet bloků: 439 Instalovaný výkon: 398 GWe (polovina června 2025)

Rozestavěno: 69 bloků s výkonem 75,6 GWe

Podíl jádra na produkci elektřiny něco přes 9 %

Budoucí vývoj závisí na obnově práce japonských bloků a dvou trendech, odstavování starých bloků a spouštění nových (Čína předběhla Francii a je na druhém místě).



Současné modely reaktorů III. generace

AP1000 (Westinghouse, USA): 4 v Číně, 2 v USA, čínské verze CAP1000 a CAP1400

APR1400 (KHNP, Jižní Korea): 4 v Jižní Koreji, 4 v SAE, 2 ve výstavbě

EPR (EDF, Francie): 2 Čína, 2 Evropa, 2 ve výstavbě

VVER1200 (Rosatom, Rusko): 4 v Rusku, 2 v Bělorusku, 14 ve výstavbě

Hualong One HPR1000 (Čína): 5 v Číně, 2 v Pákistánu, 13 ve výstavbě

ACPR1000 (Čína): 6 v Číně

ABWR (Japonsko): 4 v Japonsku, 2 ve výstavbě

Už 37 bloků v provozu, více než 30 ve výstavbě a celá řada v přípravě, začínají mít významný podíl na produkci nízkoemisní elektřiny a tepla
Čína, Rusko a Jižní Korea, které kontinuálně staví bloky, mají dobu výstavby pod 10 let – tendence je zkracující se, provozní zkušenosti (roční využití výkonu) jsou pozitivní



Jihokorejský APR1400



Čínský HPR1000



Americký AP1000

Dukovany II – významný pokrok

Červenec 2024 - rozhodnutí o vítězi tendru

Únor 2025 – MPO vydalo pravomocné územní rozhodnutí o výstavbě

Duben 2025 – vláda rozhodla o finančním modelu

Duben 2025 - ÚHOS rozhodl negativně o námitkách EdF a Westinghouse

květen 2025 – EdF zablokovala podpis smlouvy soudní námitkou

červen 2025 – nejvyšší správní soud zrušil blokaci a následoval podpis smlouvy mezi ČEZ a KHP

Vede k optimismu:

- 1) Urovnání konfliktu mezi KHNP a Westinghousem a jeho zapojení do práce na blocích v Dukovanech
- 2) Změna pohledu v EU na jadernou energetiku – zlepšení podmínek pro jednání o notifikaci
- 3) Velmi dobrý a zapálený kolektiv v čele s Petrem Závodským rychle přikročil k práci
- 4) Růst podílu a zainteresovanosti českých firem



Ředitel Dukovany II Petr Závodský



Schéma bloku APR1000

Využití tepla z JE Dukovany a JE Temelín.

- 1) Horkovod s Temelína do Českých Budějovic byl dokončen – letos první zimní sezóna s dodávkami tepla z Temelína
- 2) Intenzivní práce na projektu horkovodu z Dukovan do Brna, klíčovou podmínkou je výstavba nových bloků
- 3) V principu existuje i potenciál pro navýšení dodávek tepla



Výstavba horkovodu z Temelína



Výstavba horkovodu z Temelínu do Českých Budějovic



Čerpací stanice Obora v půlce trasy

Malé modulární reaktory jako zdroje tepla

Malé modulární reaktory spíše až střední – výkony vyšší než 100 MWe - zaměřené na náhradu kogeneračních fosilních elektráren většího výkonu

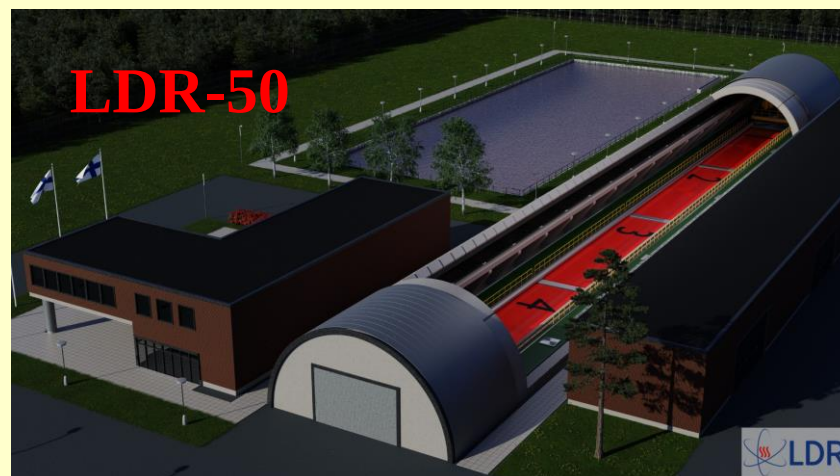
Výhoda: Není tak velká potřeba změn v licencování, ekonomika není tak odlišná od velkých reaktorů

Nevýhoda: Nejde o dramatický průnik do decentralizované oblasti energetiky a teplárenství

Malé až minireaktory určené čistě pro produkci tepla

Výhoda: Razantní proniknutí do decentralizovaného teplárenství, možnost efektivního zapojení do systému CZT

Nevýhoda: Nutnost výrazných změn v licencování odpovídajícího jejich bezpečnostním parametrům, náročnější cesta k dosažení potřebné ekonomiky



Rolls-Royce vybrán jako preferovaný pro Velkou Británii

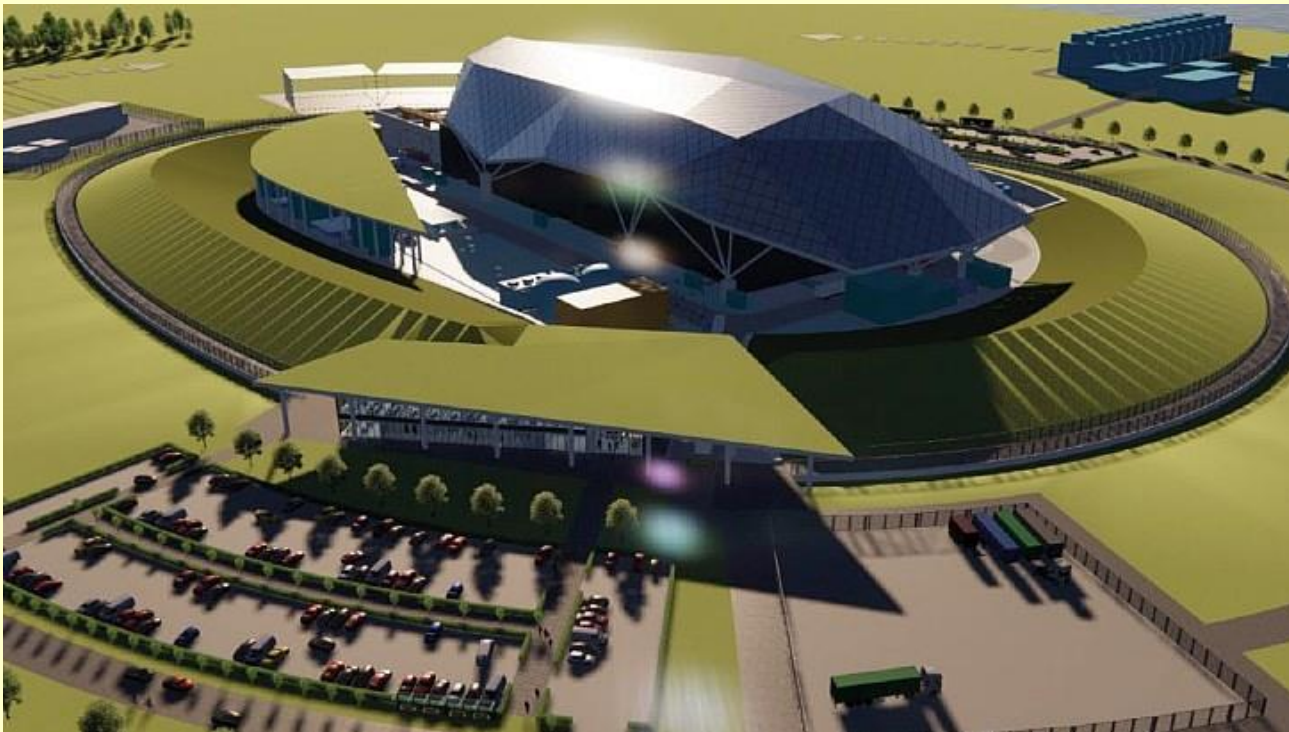
Malý modulární reaktor Rolls-Royce vybrán jako preferovaný partner. Do konce roku by měla být smlouva se státem a také vybrána první lokalita pro dva bloky

Vybíralo se po zúžení ze čtyř projektů: GE Hitachi, Holtec, Westinghouse a Rolls-Royce

Velká Británie plánuje do roku 2050 okolo 23 GWe velkých a malých bloků

Kritické rozhodnutí pro ČEZ a Českou republiku – nyní zvýší podíl na 20 %

Podílí na vývoji a přípravě licencování, příprava lokality Temelín a výběr dalších lokalit



První standardní typ - ACP-100 (Linglong One)

Tlakovodní malý modulární reaktor integrálního typu, výkon 125 MWe, pasivní způsob dochlazování, nemožnost havárie typu LOCA, flexibilní využití

Pracovní teplota 300°C, 15 MPa

Horká pára 600 t/h, > 290 °C, 4 MPa

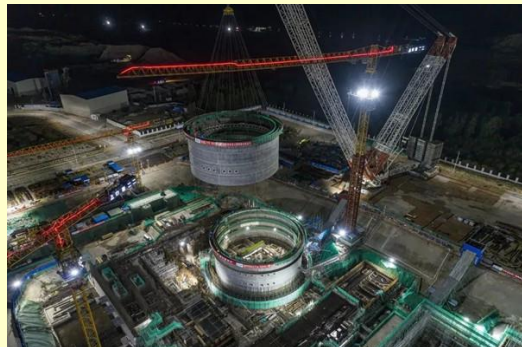
Kogenerace: 300 t/h + 62,5 MWe

Zahájení budování v roce 2021, červenec 2023 dokončena instalace centrálního modulu, srpen 2024 instalace integrované sestavy reaktorové nádoby, dokončení se plánuje v roce 2026

Možnost srovnání ekonomiky MMR a klasických velkých reaktorů



Konstrukce kontejnmentu je dokončena



Postup konstrukce, instalace integrované vnitřní části práce na turbíně

BWRX-300 – nejbliže k realizaci

Varný reaktor firmy Hitachi Ge

V elektrárně Darlington se pracuje na výstavbě celkově až čtyř reaktorů BWRX-300

V této elektrárně pracují 4 bloky CANDU a je místo s označením Darlington B pro další 4 bloky – půjde o zmíněné BWRX-300

4. dubna 2025 – kanadský úřad pro jadernou bezpečnost CNSC dal licenci pro výstavbu BWRX-300 reaktoru v lokalitě Darlington



Původní Darlington má těžkovodní reaktory CANDU



Na výstavbě je elektrárna Darlington B, která by mohla mít až 4 BWRX-300

Holtec SMR300 – v pokročilém stádiu

Kromě zmiňované elektrárny Palisades se výstavba SMR-300 připravuje i v areálu vyřazované jaderné elektrárny Oyster Creek – šlo by až o čtyři bloky SMR300

Původní varný reaktor s výkonem 619 MWe fungoval v letech 1969 až 2018

Vyřazení má být dokončeno v roce 2029



SMR300 a vyřazovaná elektrárna Oyster Creek

NuScale dostal licenci pro větší variantu modulu

29. května 2025 dostal NuScale SMR americkou licenci pro větší moduly (50 → 77 MWe)

Zatím pro čtyř a šesti modulovou sestavu, sestava s 12 moduly se ještě posuzuje

Zvětšení modulů vede ke snížení ceny na jednotku výkonu – klíčový parametr

Po zrušení projektu v Idaho z finančních důvodů se hledá nová lokalita pro první prototypový projekt.

Jeden z potenciálních zájemců je Rumunsko

Současný zájem o stabilní zdroje pro napájení datacenter a umělé inteligence by mohl vést k realizaci prvních projektů a hromadné produkce, která by vedla ke snížení ceny



Předání licence pro sestavu s výkonnějšími moduly



Schéma NuScale sestavy

Čistě teplárenské malé modulární reaktory

Malé modulární reaktory produkující čistě teplo – možné zdroje pro městské CZT

Příklad pěkného perspektivního evropského projektu:

LDR-50 finské společnosti Steady Energy

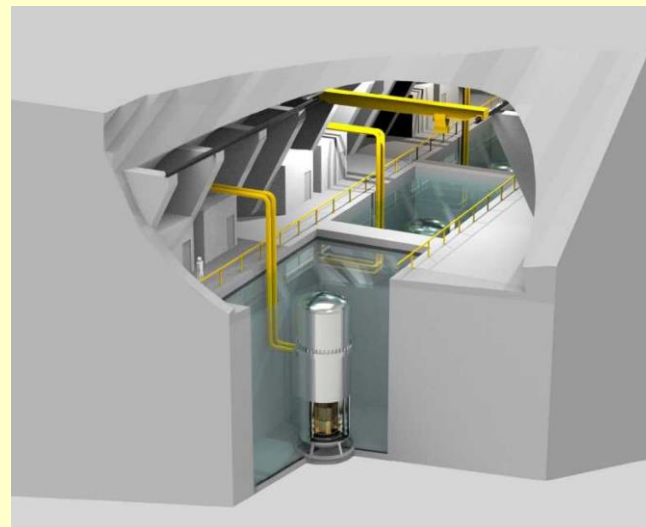
Reaktor s tepelným výkonem 50 MWt

Pracovní teplota okolo 150 °C a tlak do 1 Mpa – čistě pasivní principy chlazení

Zásadní: využití klasických technologií a standardních palivových souborů 17x17 PWR

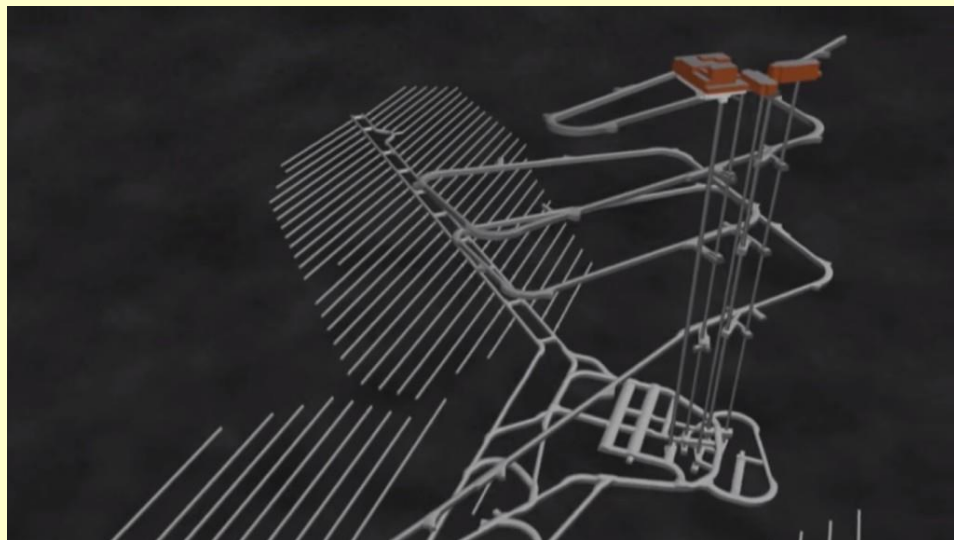
Podpora průmyslu a potenciální zákazníci v několika finských městech Helsinky, Kuopio, Espoo a Lahti

Časový plán: rok 2025 testovací nejaderný model (test tepelných vlastností), práce na licencování, v roce 2028 zahájení realizace první výtopny, 2030 – první v provozu



Zapojení do standardního systému CZT – čistě přirozená cirkulace při chlazení, pasivní

První dokončované úložiště vyhořelého paliva Onkalo



**Finsko – blízko elektrárny
Olkiluoto
Žulový masív – umístění 500
m pod povrchem
2004 – začátek ražby
2015 – licence pro výstavbu
2020 – dokončení 1.etapy
2024 – příprava ukládání
2026 – začátek ukládání
Máme fungující úložiště**

Nutnost budovat mix – udržitelnost a bezpečnost

Jak je to s udržitelností OZE a jaderných zdrojů?

Jaderné zdroje nezávisí na počasí a mohou podle potřeby zvyšovat a snižovat výkon – rotující hmotnosti zároveň umožňují udržovat stabilitu frekvence a řeší první okamžiky krizových výpadků

Rozpad jednotné elektrosoustavy ENTSO-E v Evropě – 8. 1. 2021 rozdělení sítě na přebytkovou jihovýchodní část a nedostatkovou severozápadní – vliv „Dunkelflaute“ a kaskády poruch vedení v oblasti Balkánu

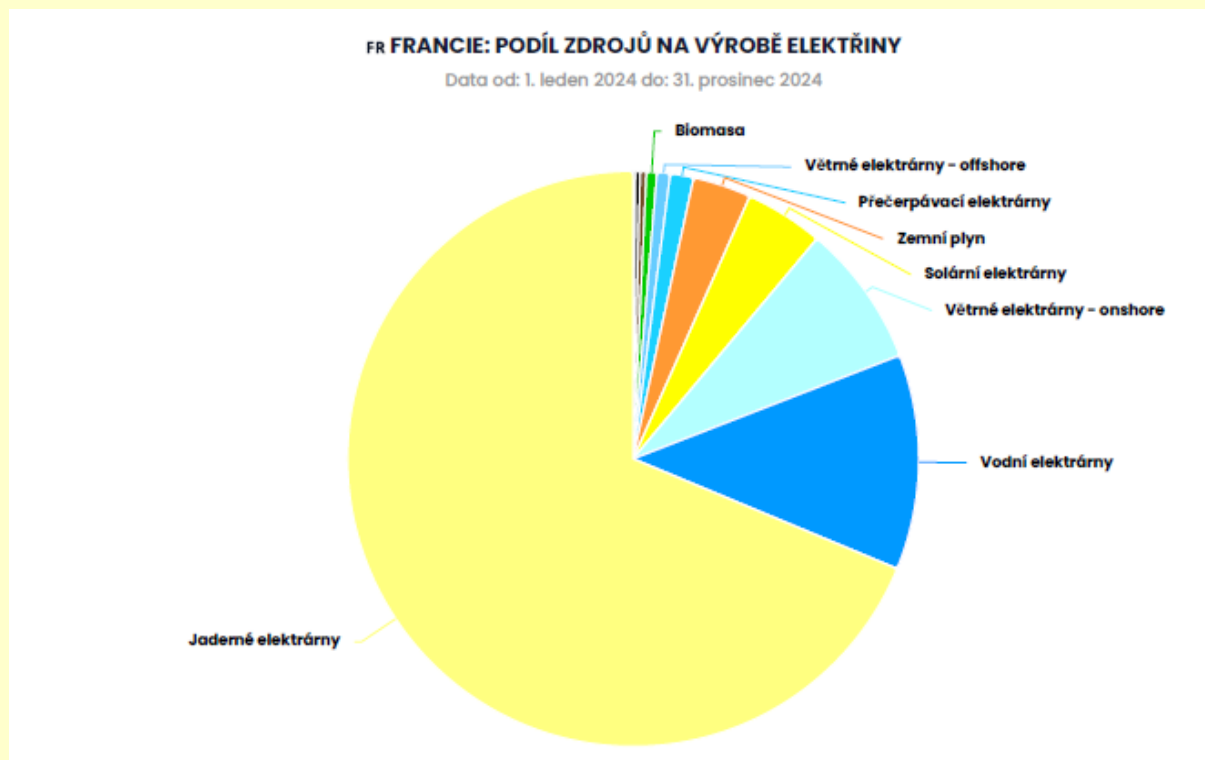
Black-out ve Španělsku a Portugalsko – zdroj spuštění události zatím znám není? je?, citlivost k výpadku a neudržení frekvence však ovlivnil nedostatek rotující hmotnosti



Rotující hmotnosti turbín stabilizují síť Noční pohled na Evropu v době black-outu ve Španělsku

Francie – rok 2024

Stejně jako Francie mají i Švédsko, Švýcarsko a Slovensko nízkoemisní elektroenergetiky



Jádro – 70,3 %

Vítr - 9,5 %

Voda - 11,4 %

Slunce - 2,1 %

Biomasa – 0,5 %

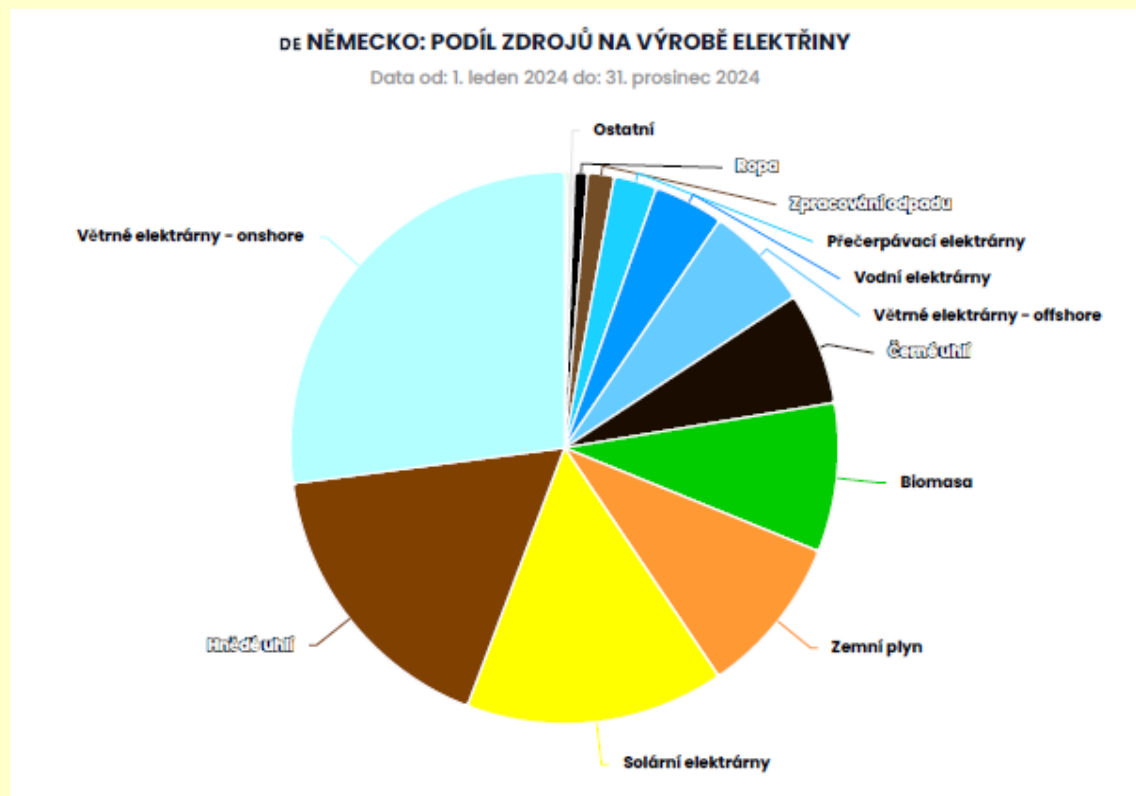
Nízkoemisní zdroje – 93,8 %

Navíc i vytápění elektřinou

<https://oenergetice.cz/>

Německo – rok 2024

Německo ukazuje, že nelze dojít k nízkoemisní elektroenergetice čistě s OZE (výjimku tvoří případy specifických geografických a geologických podmínek – Norsko a Island)



Vítr - 33,3 %

Voda - 6,6 %

Slunce - 15,3 %

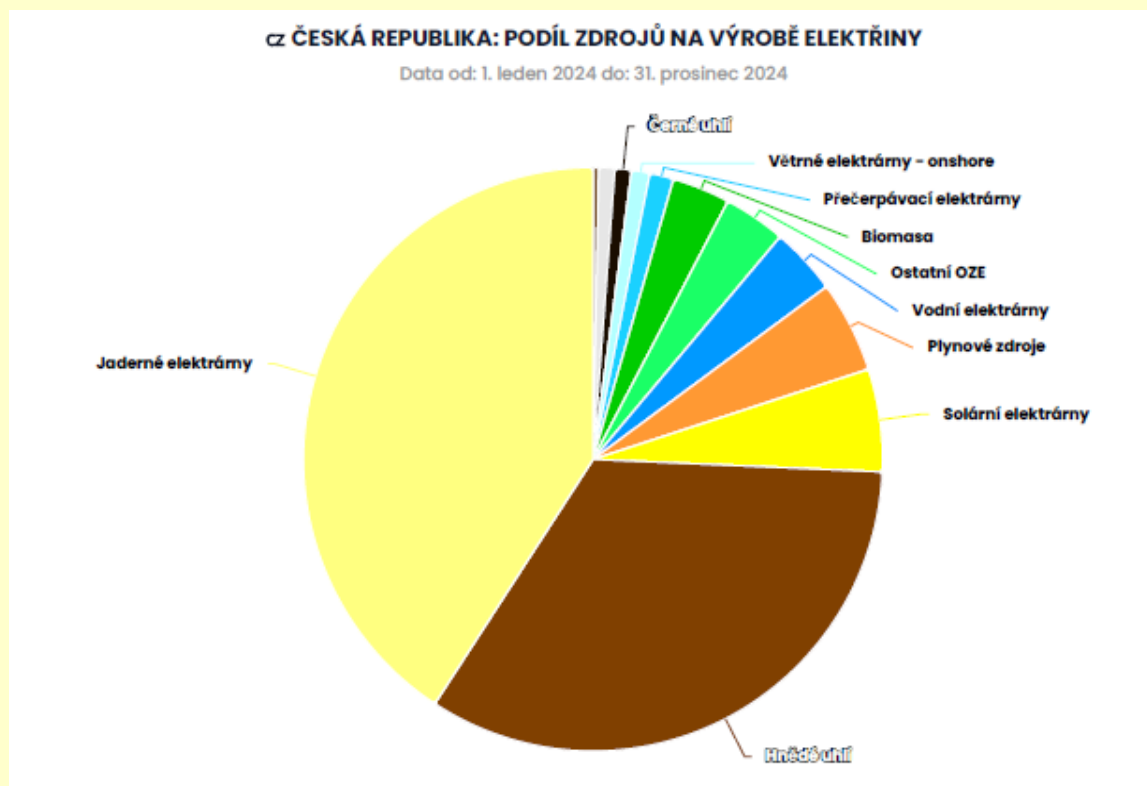
Biomasa - 8,7 %

Nízkoemisní zdroje – 63,9 %

Vytápění fosilními palivy

Čistý dovozce elektřiny, hlavně té fosilní a jaderné

Česká republika – rok 2024



Jádro – 40,8 %

Vítr - 1,0 %

Voda - 5,0 %

Slunce - 5,7 %

Biomasa – 3,2 %

Nízkoemisní zdroje – 55,7 %

Jaderné 28 TWh

Obnovitelné 10 TWh

Spotřeba 60,6 TWh

Výroba 67 TWh

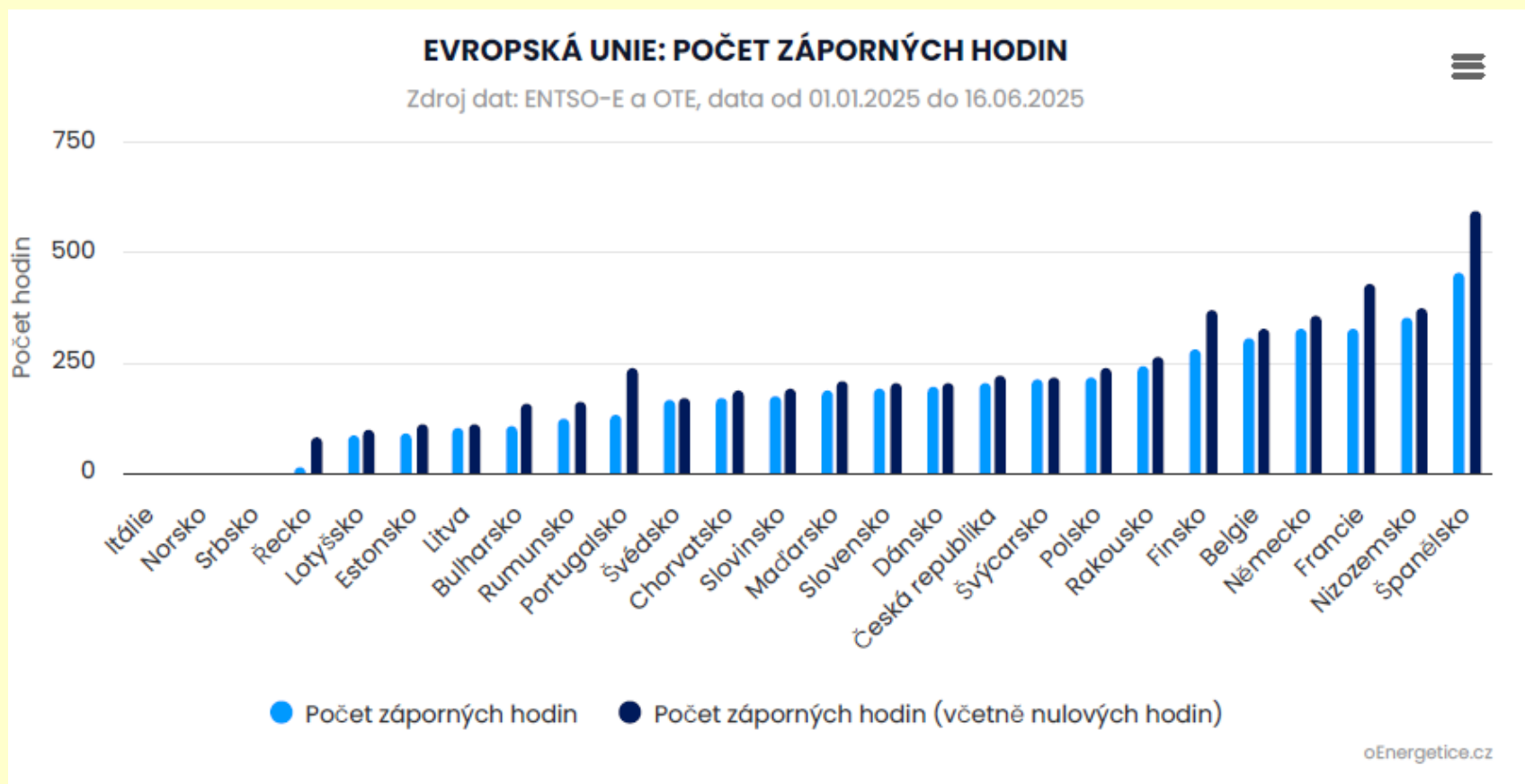
Čistý export: 6,4 TWh

Dramatický růst přebytků z dotovaných nestabilních zdrojů

Intenzivní kanibalizace nedotovaných solárních a větrných zdrojů těmi dotovanými

Dopady na ekonomiku fotovoltaiky a větrníků, bez provozních dotací se větší projekty ruší, dopady i na domácí fotovoltaiky

Stabilní jaderné zdroje neovlivňuje, mohou prodávat v dlouhodobějších kontraktech



Porovnání jaderného a OZE mixu

Více větrné elektřiny v zimě a solární v létě – jistá antikorelace funguje

Ovšem náhodné rozložení vede často i ke korelovanou produkci (inverze ...)

Program pro modelování mixu: <https://app.energy-mix.cz/> 2019

Fotovoltaika: 5 GW – **9,9 %**, 10 GW – **16,4 %**, 20 GW – **28,1 %**, 40 GW – **36,7 %**
nevyužitá v procentech využité: 18,3 % 81,8 %

Vítr: 5 GW – **16,4 %**, 10 GW – **32,7 %**, 20 GW – **55,1 %**, 40 GW – **75,6 %**
nevyužitá v procentech využité: 17,7 % 73,7 %

Jádro: 8 GW – 83,9 %
2,9 %

Jádro + OZE: 8 GW jádro, 2 GW Solar, 0,6 GW vítr, 4 GW (20 GWh) baterie,
2,9 GW plyn: 4,3 TWh přebytek

Čistě OZE: 0 GW jádro, 20 GW Solar, 10 GW vítr, 9,4 GW (40 GWh) baterie,
9 GW plyn: 1,7 TWh přebytek

Závěr

- 1) V současné době lze v oblasti jaderné energetiky vidět významný pokrok, a to ve všech pěti zásadních výzev, které před ní stojí
- 2) Stále více provozovatelů chce provozovat reaktory 60 až 80 let, v USA se připravuje opětné spuštění již odstavených bloků
- 3) Původní Dukovany se připravují na 70 let provozu, souběžně s novými Dukovany
- 4) Spouštějí se nové reaktory III. generace, významný posun na cestě k zahájení výstavby nových Dukovan
- 5) První malý modulární se dokončuje, u dalších se výstavba zahajuje, nebo připravuje
- 6) Preferovaným malým modulárním reaktorem ve Velké Británii bude Rolls-Royce, ČEZ připravuje výstavbu tohoto reaktoru v Temelíně, Tušimicích i jinde
- 7) Kombinace jaderných a obnovitelných umožňuje vytvoření nízkoemisního mixu a stabilní a bezpečné energetické sítě
- 8) Žádné řešení není ideální – vždy jde o určitý kompromis

