

"Jak si zkrátíme čekání na jadernou fúzi"?

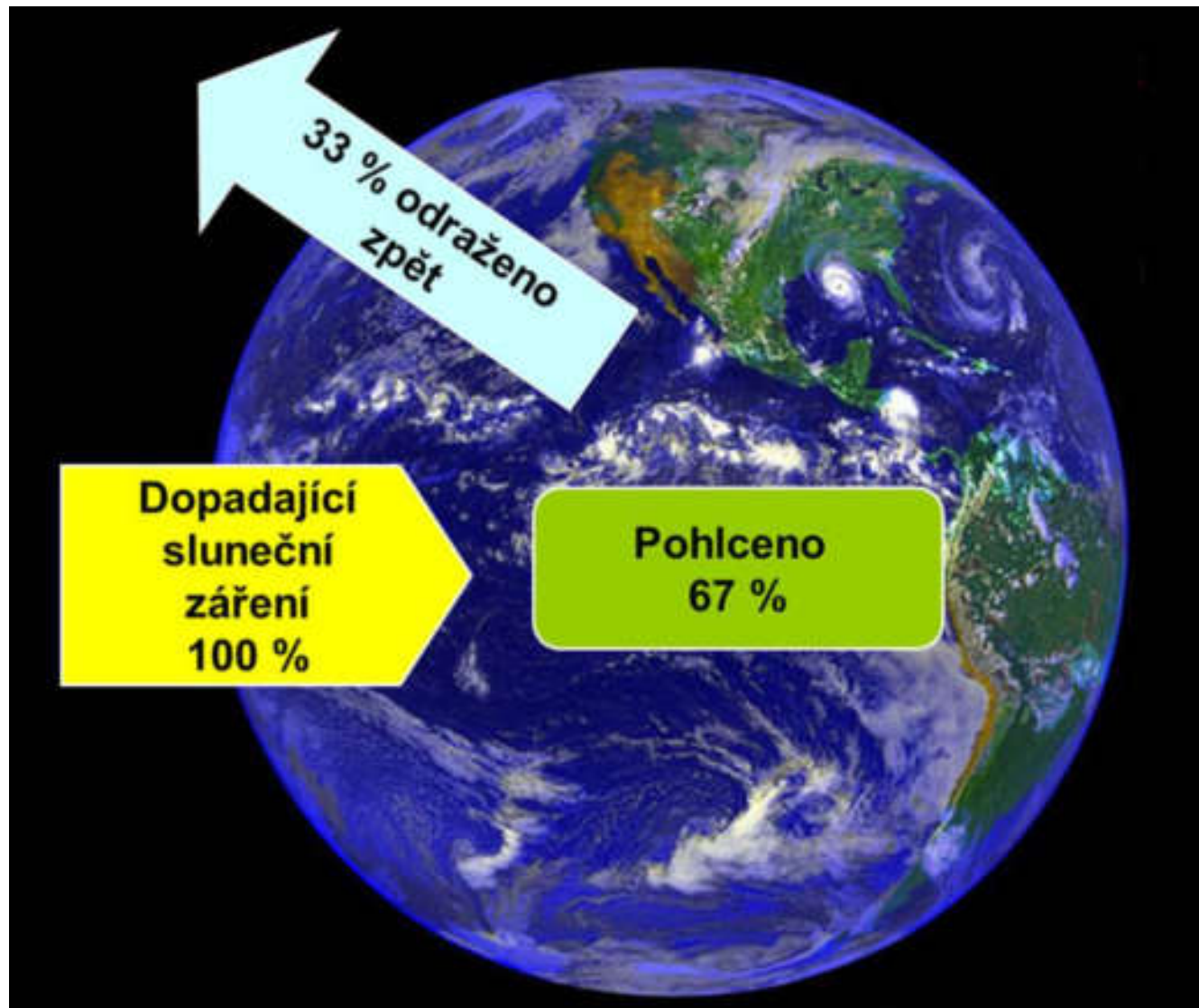
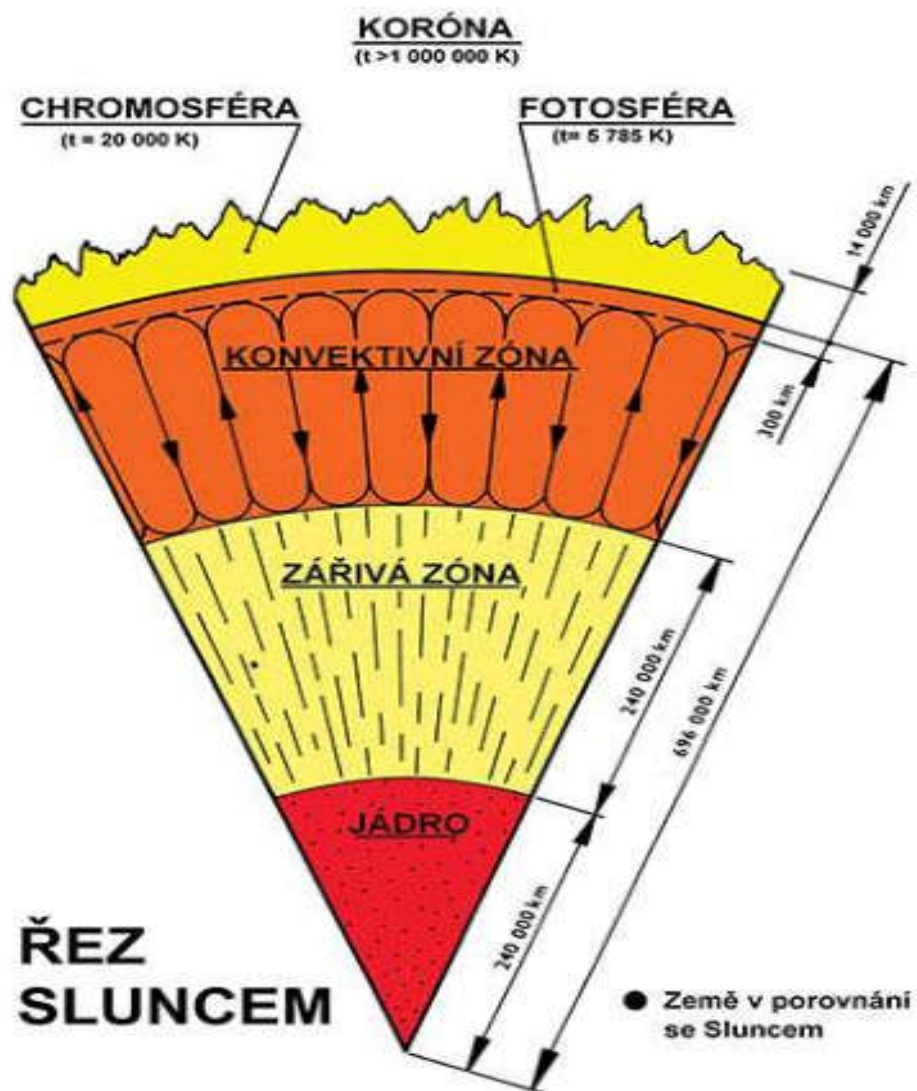
TOP EXPO 2023

František HRDLIČKA



***Czech Technical University in Prague, Czech Republic
Faculty of Mechanical Engineering***

SLUNEČNÍ ENERGIE



Solární konstanta ($1348,3 \text{ W/m}^2$) je energie od Slunce, za jednotku času, dopadající na jednotku plochy kolmou ke směru šíření záření, při průměrné vzdálenosti Slunce od Země ($149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$), mimo zemskou atmosféru. Na Zemský povrch dopadne maximálně 1100 W/m^2

Energie vyzařována z povrchu Slunce se uvolňuje v jeho jádru, ve kterém probíhá za vysokého tlaku a teploty jaderná syntéza vodíku, respektive jeho izotopů deuteria a tritia, za vzniku jader helia. Energie se při takové syntéze neuvolňuje jen ve formě kinetické energie vzniklých částic, ale především v podobě velmi krátkovlnného záření gamma.

KLIMATICKO ENERGETICKÝ PLÁN ČR

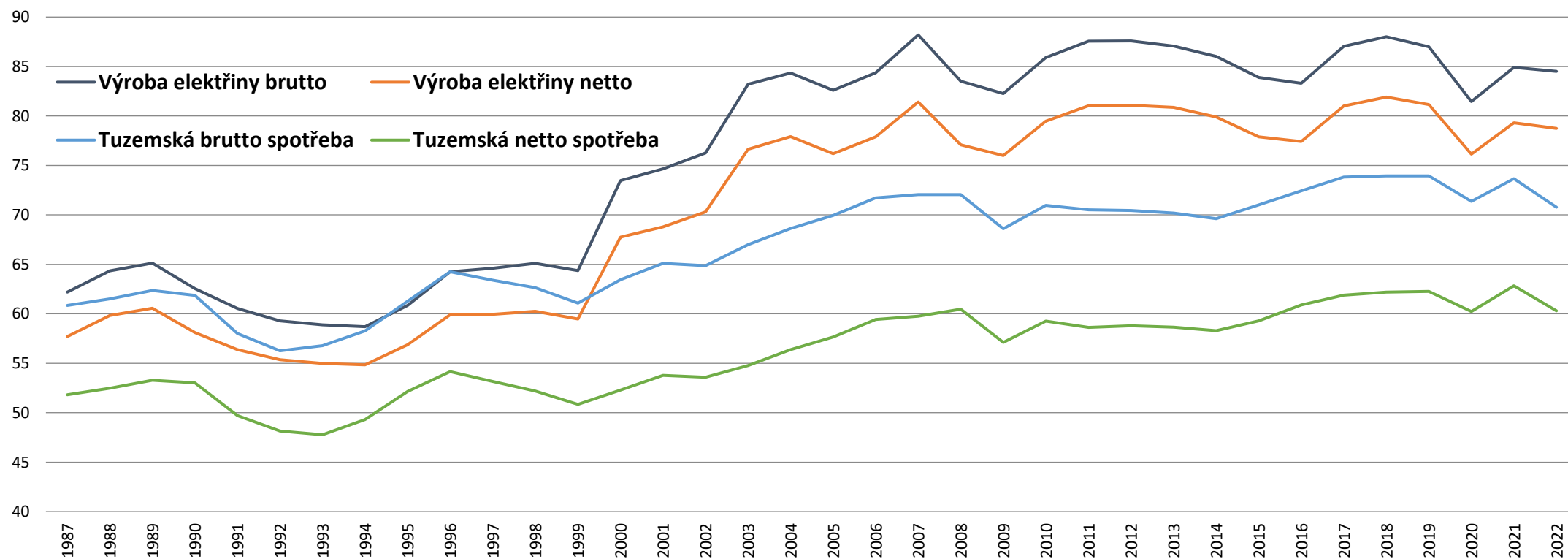
SEEPIA model 2022: **81,49 – 13,53 = 67,96 TWh !!**

Scénář	Hlavní zdroj energie	Jednotka	2022			2030			2050		
			inst. výkon v GW	koef. využití	výroba v TWh	inst. výkon v GW	koef. využití	výroba v TWh	inst. výkon v GW	koef. využití	výroba v TWh
WAM3	Jaderné	GWe	4,3	0,83	31,14	4,3	0,83	31,14	5,9	0,83	42,72
WAM3	Solární	GWe	2,1	0,13	2,30	10,1	0,13	11,08	26,1	0,13	28,64
WAM3	Větrná	GWe	0,3	0,23	0,61	1,5	0,23	3,05	5,5	0,23	11,18
WAM3	Zemní plyn / Vodík	GWe	2,4	0,31	6,45	3,2	0,31	8,60	4,0	0,31	10,74
WAM3	Uhlí	GWe	9,4	0,50	40,99	3,0	0,50	13,08	0	0,50	0,00
			18,5		81,49	22,1		66,95	41,5		93,29

VÝVOJ PRODUKCE ELEKTŘINY V ČR

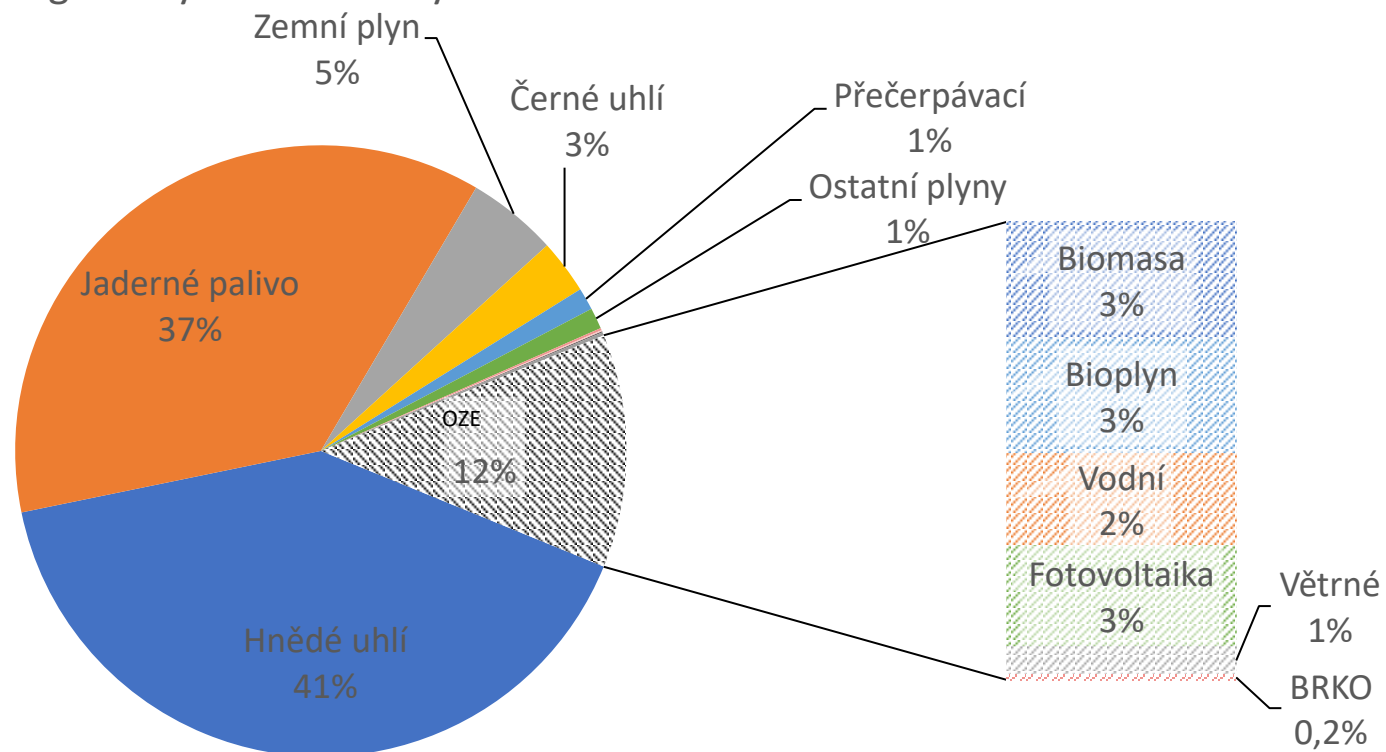
NETTO VÝROBA 78,75 TWh, NETTO SPOTŘEBA CZ 60,2 TWh
SPOTŘEBA NA VÝROBU TEPLA 0,99 TWh, ZTRÁTY 5,3 TWh
MINIMÁLNÍ POTŘEBA PRODUKCE PRO ČR 66,5 TWh

Dlouhodobý vývoj výroby a spotřeby elektřiny (TWh)



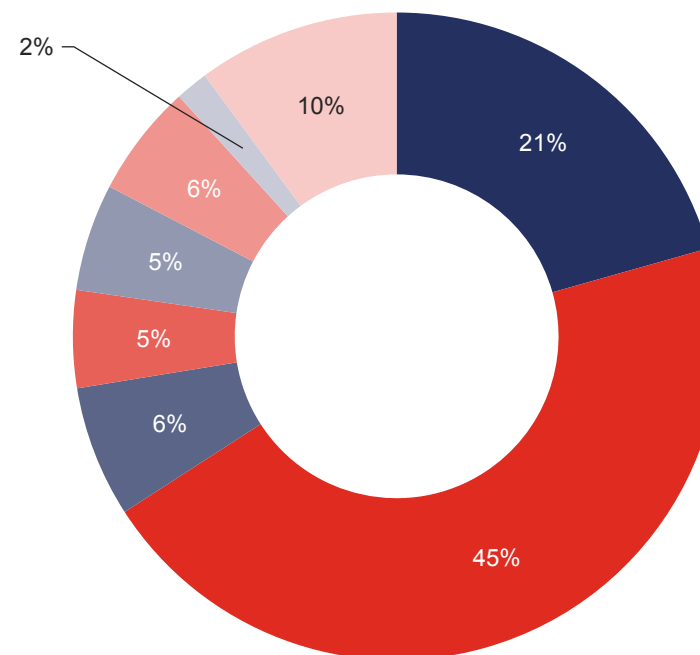
ČESKÁ ENERGETIKA V ROCE 2022

Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto – 2022



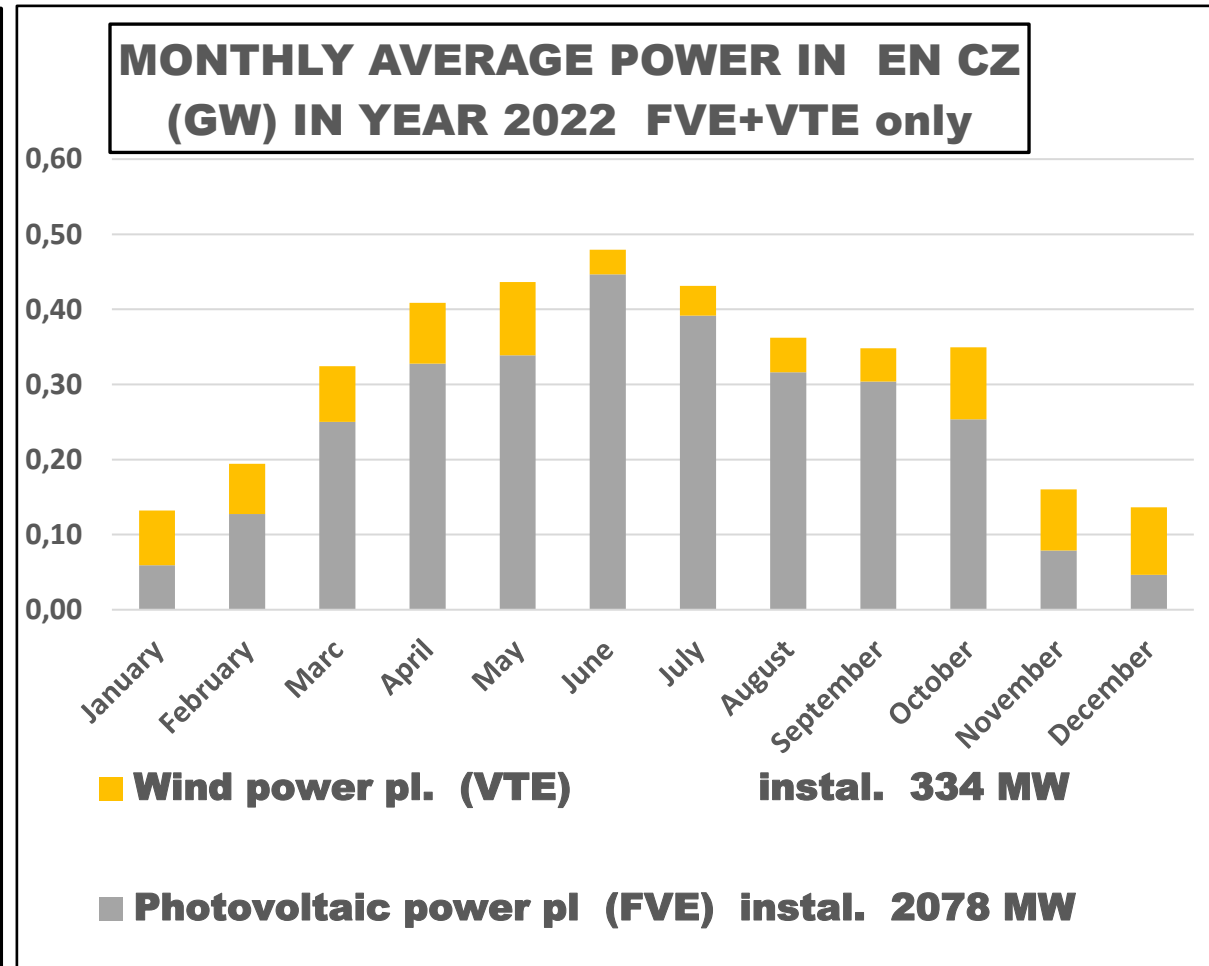
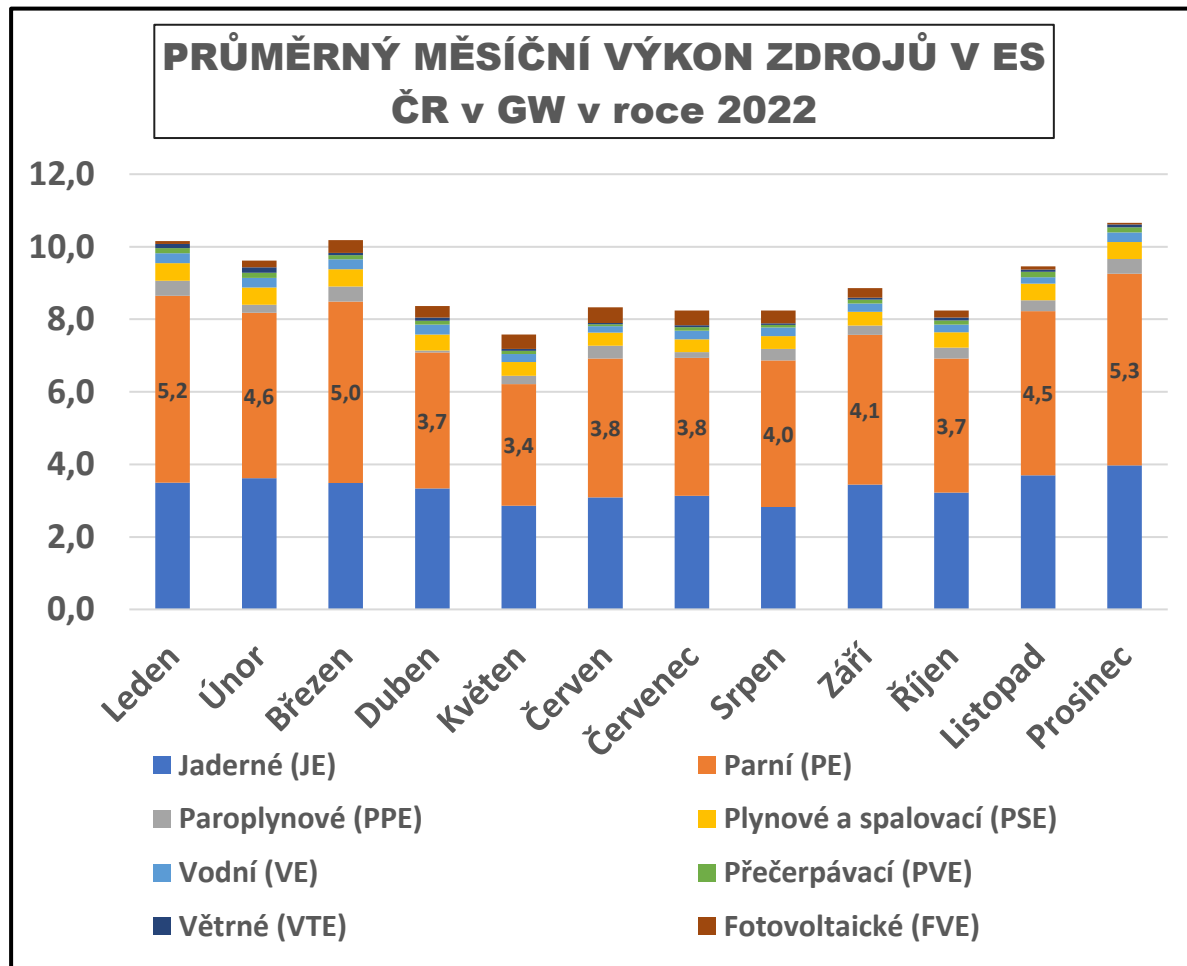
■ Jaderné (JE)
■ Parní (PE)
■ Paroplynové (PPE)
■ Plynové a spalovací (PSE)
■ Vodní (VE)
■ Přečerpávací (PVE)
■ Větrné (VTE)
■ Fotovoltaické (FVE)

Podíl instalovaného výkonu v ES ČR – 2022

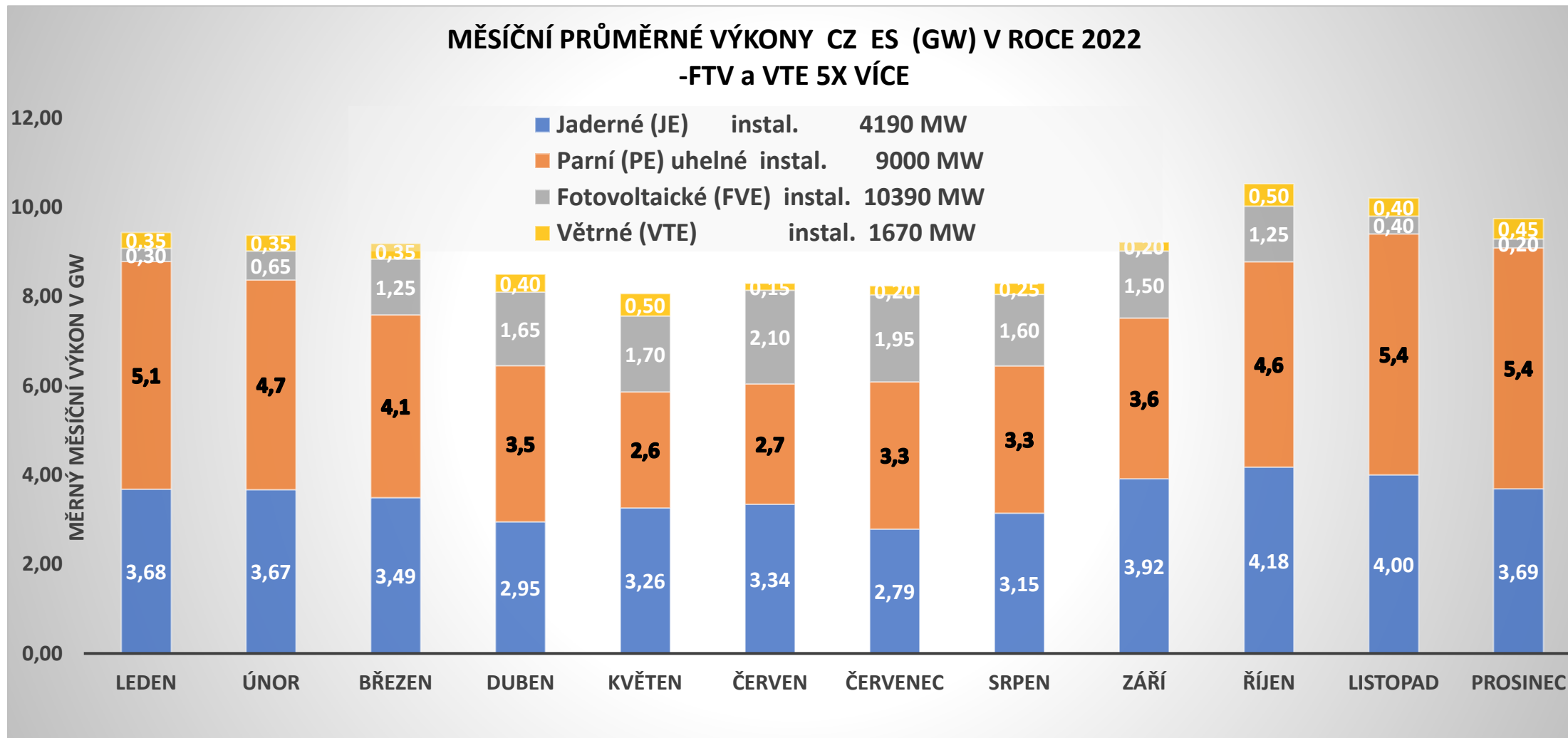


ROK 2022	INSTAL. VÝKON (MW)	PRŮM. VÝKON (MW)	%
Jaderné (JE)	4290	3340	77,86
Parní uhelné (PE)	9427	4190	44,45
Parní biomasa (PE)	305	290	95,08
Paroplynové (PPE)	1364	285	20,89
Plynové a spalovací (PSE)	1010	420	41,58
Vodní (VE)	1113	237	21,29
Přečerpávací (PVE)	1172	112	9,56
Větrné (VTE)	339	72	21,24
Fotovoltaické (FVE)	2092	260	12,43
CELKEM	21112		

PODÍL ZDROJŮ NA KRYTÍ VÝKONU – DLE ERŮ 2023

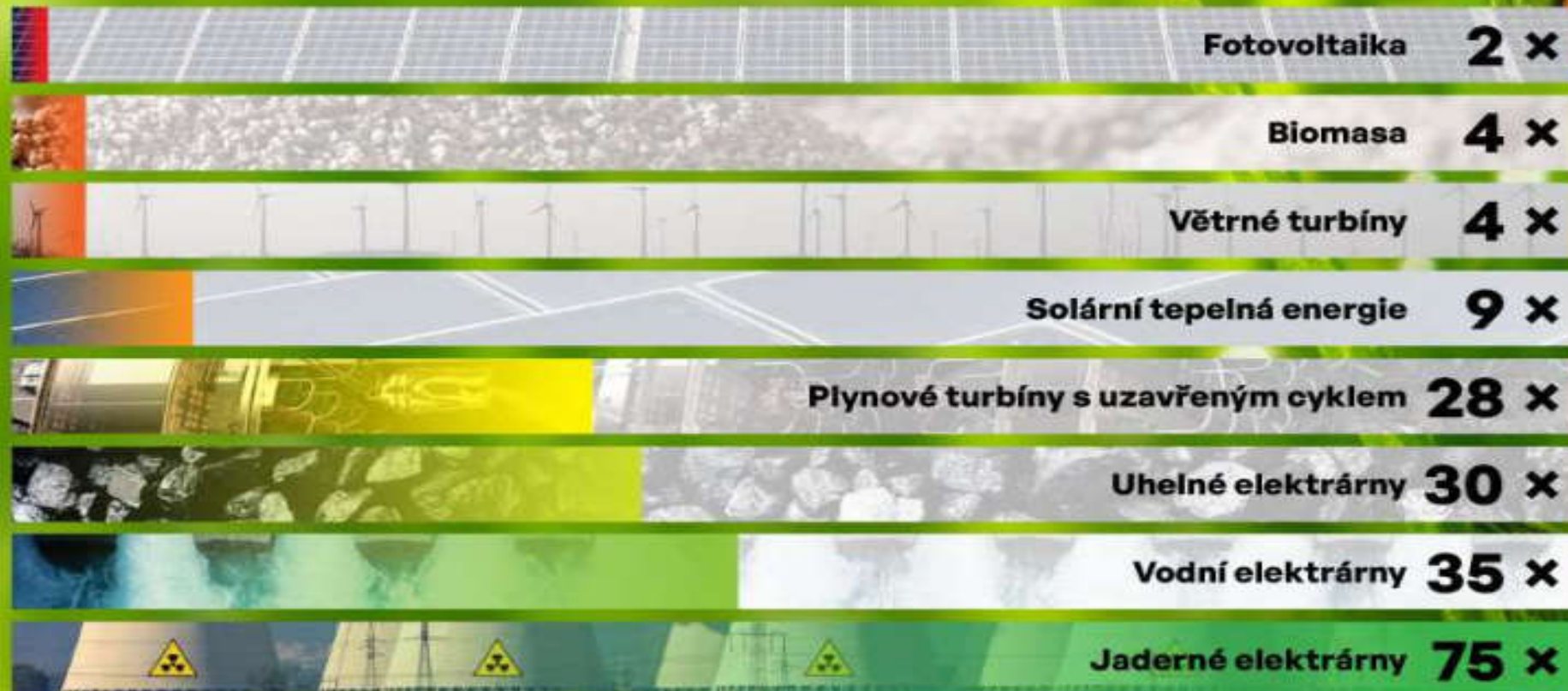










NÁHRADA VÝKONU Z UHLÍ 5 NÁSOBKEM INSTAL. VÝKONU FV a VĚTRNÝCH TURBÍN



JAK POROVNÁVAT ENERGETICKÉ ZDROJE

Nové kritérium EROI: násobek energie získané za dobu životnosti zdroje
vzhledem k energii vynaložené na pořízení daného zdroje energie



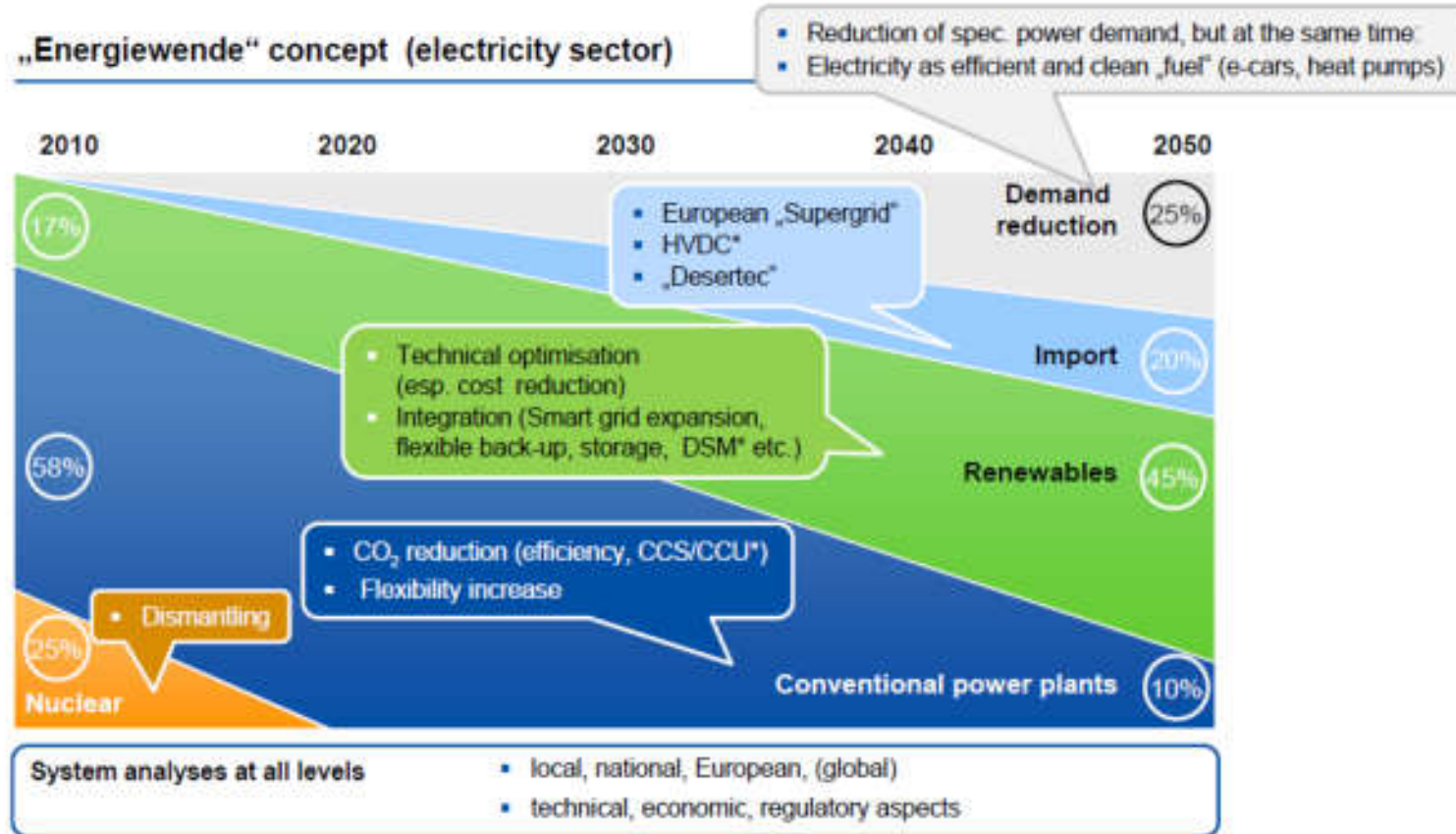
	Fotovoltaika	2 ×
	Biomasa	4 ×
	Větrné turbíny	4 ×
	Solární tepelná energie	9 ×
	Plynové turbíny s uzavřeným cyklem	28 ×
	Uhelné elektrárny	30 ×
	Vodní elektrárny	35 ×
	Jaderné elektrárny	75 ×

Nové kritérium: Materiálová náročnosť zdroje energie na získaní 1 TWh elektrickej energie

Materiál [t/TWh]	Uhlí	Plyn	Jádro	Voda	Vítr	Fotovoltaika
Beton a cement	870	400	760	14 000	8 000	4 050
Železo/ocel	310	170	165	67	1 920	7 900
Měď	1	0	3	1	23	850
Hliník	3	1	0	0	35	680
Sklo	0	0	0	0	92	2 700
Křemík	0	0	0	0	0	57

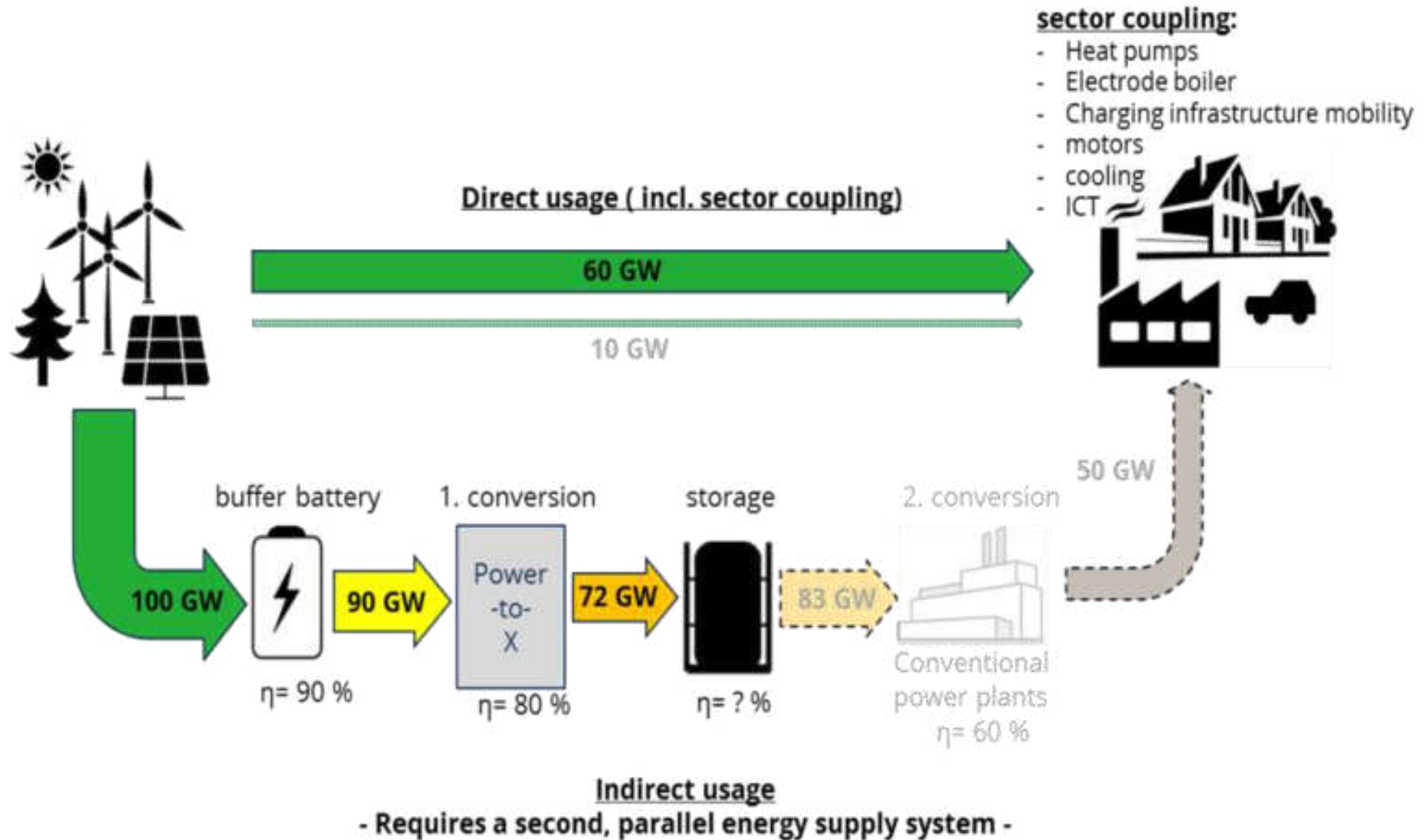
KONCEPCE „ENERGIEWENDE“ – 20 % IMPORT ???

Focus areas for R&D can be deduced from the building blocks of the „Energiewende“



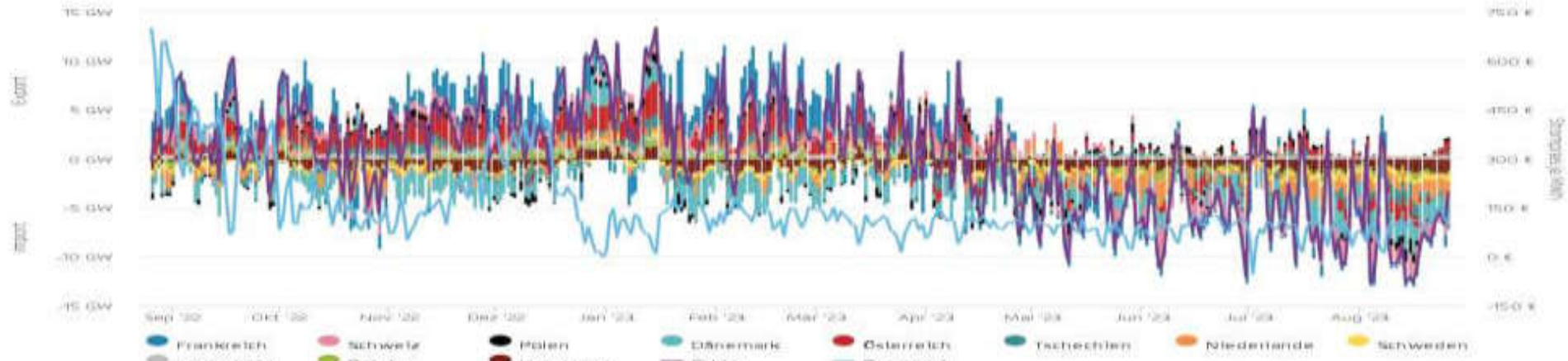
*: HVDC: High Voltage Direct Current grids, DSM: Demand Side Management; CCS/CCU: CO₂ Capture and Storage/Usage

NĚMECKO 2018

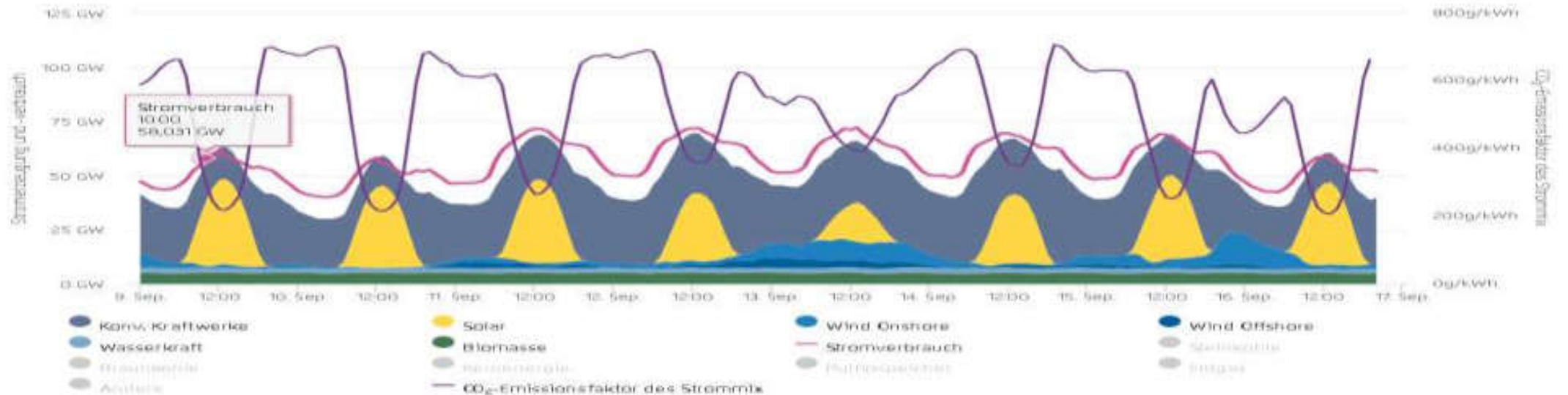


NĚMECKO před a po odstavení jaderných elektráren a když nefouká, ale svítí

Strom-Import/Export

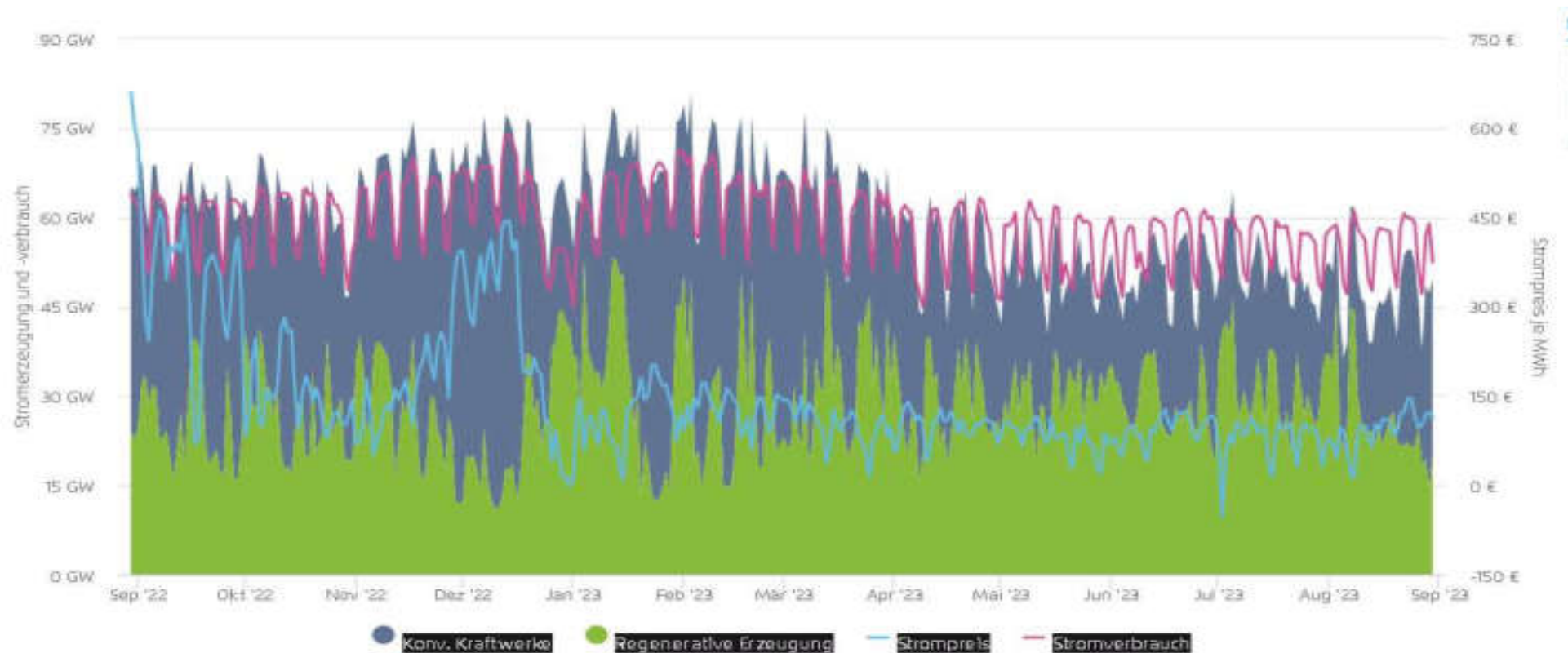


Stromerzeugung und Stromverbrauch



1 ROK NĚMECKÉ ENERGETIKY S INSTALACÍ CCA 130 GW OZE

Strompreis, Stromerzeugung und Stromverbrauch

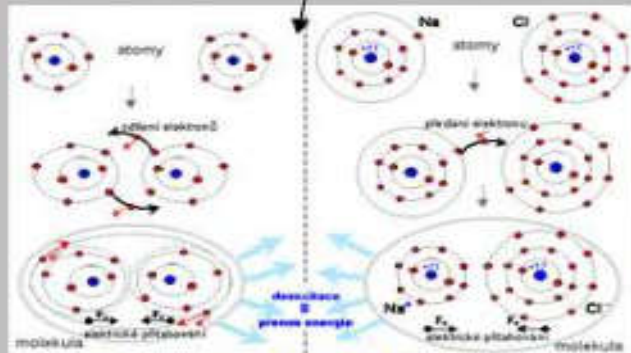


MOŽNOSTI ZÍSKÁVÁNÍ ENERGIE Z HMOTY

← realita sci-fi →

chemické reakce (hoření)	štěpení těžkých jader	syntéza lehkých jader	gravitace (rotující černá díra)	anihilace elektronů a pozitronů
Účinnost: 0,000 000 01 %	0,1 %	1 %	max. 42 %	100 %

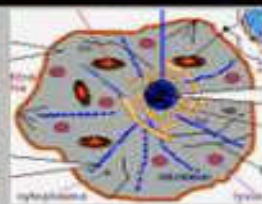
$E = mc^2$



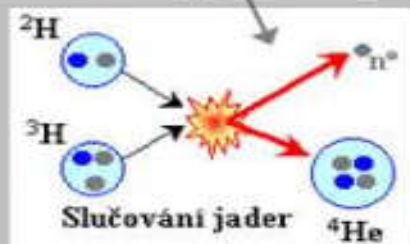
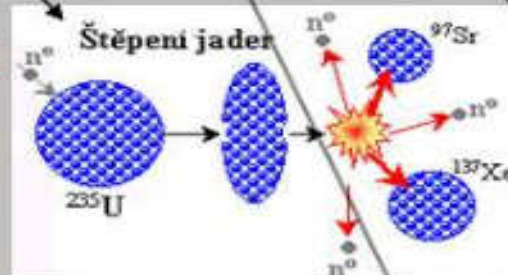
Chemické reakce :
uvolňování části **elektrické vazbové energie** obalových elektronů v atomech



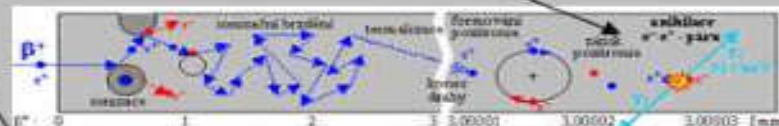
energie pro průmysl



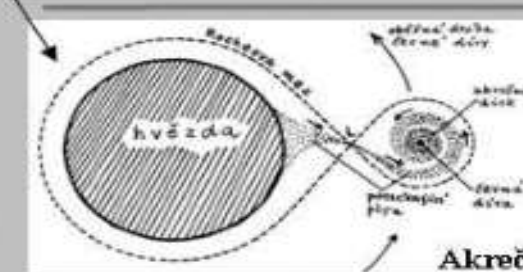
energie života



Jaderné reakce :
uvolňování části **vazbové energie silné interakce** nukleonů v jádrech

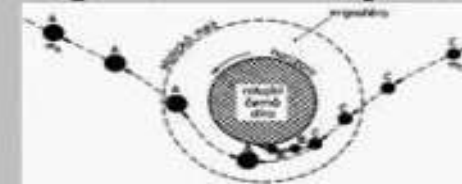


Není přímo využitelná!



Akreční disk

Ergosféra - Penroseův proces



Gravitace :

uvolňování části **gravitační vazbové energie** hmoty v poli kompaktního objektu (černé díry)



Kvasar



ITER velký TOKAMAK, Strategie AV21

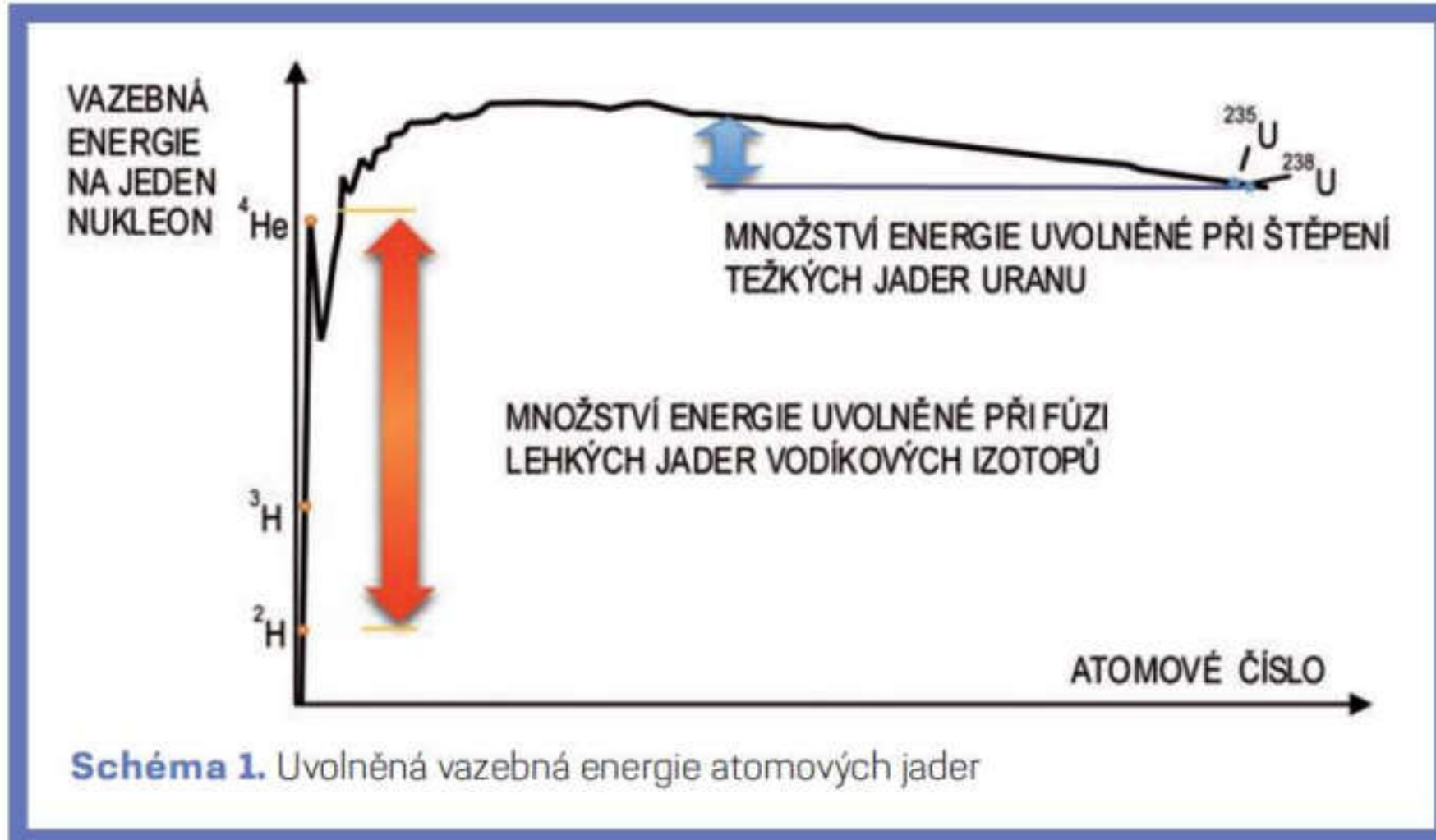
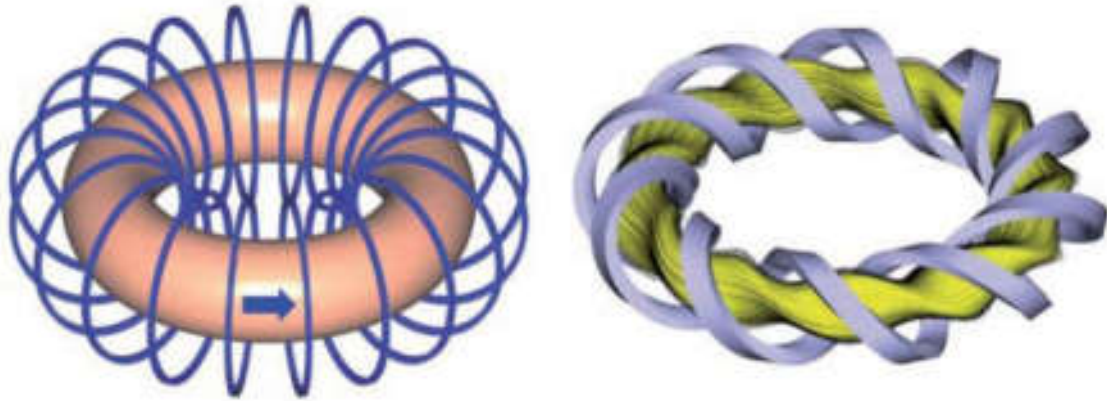


Schéma 1. Uvolněná vazebná energie atomových jader

ITER velký TOKAMAK, Strategie AV21



Obr. 6a, 6b. Magnetické udržení plazmatu v zařízeních tokamak (vlevo) a stellarátor (vpravo). Modré kruhy a šedé šroubovice znázorňují magnetické cívky. Modrá šipka znázorňuje elektrický proud v plazmatu

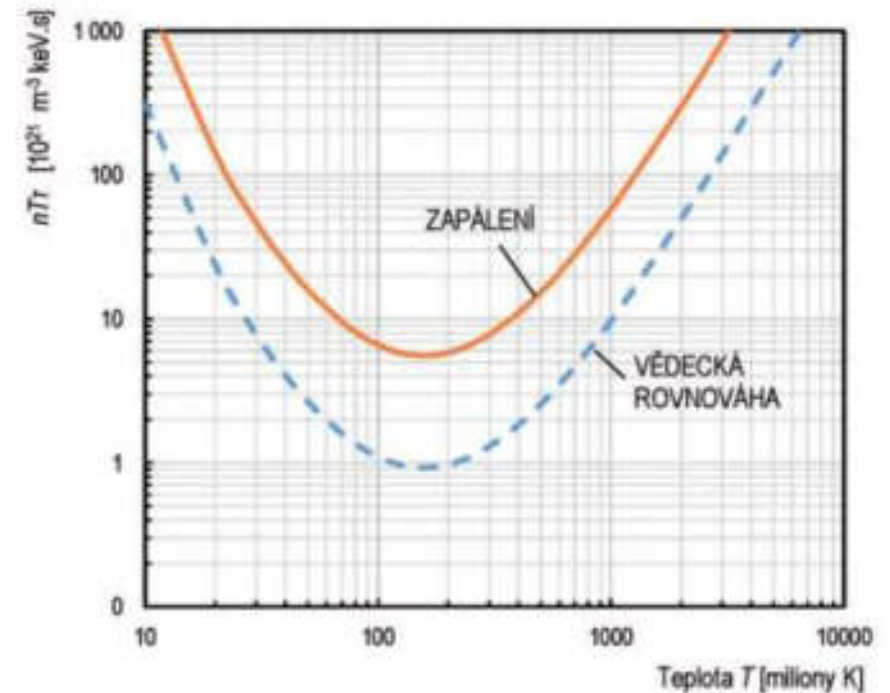
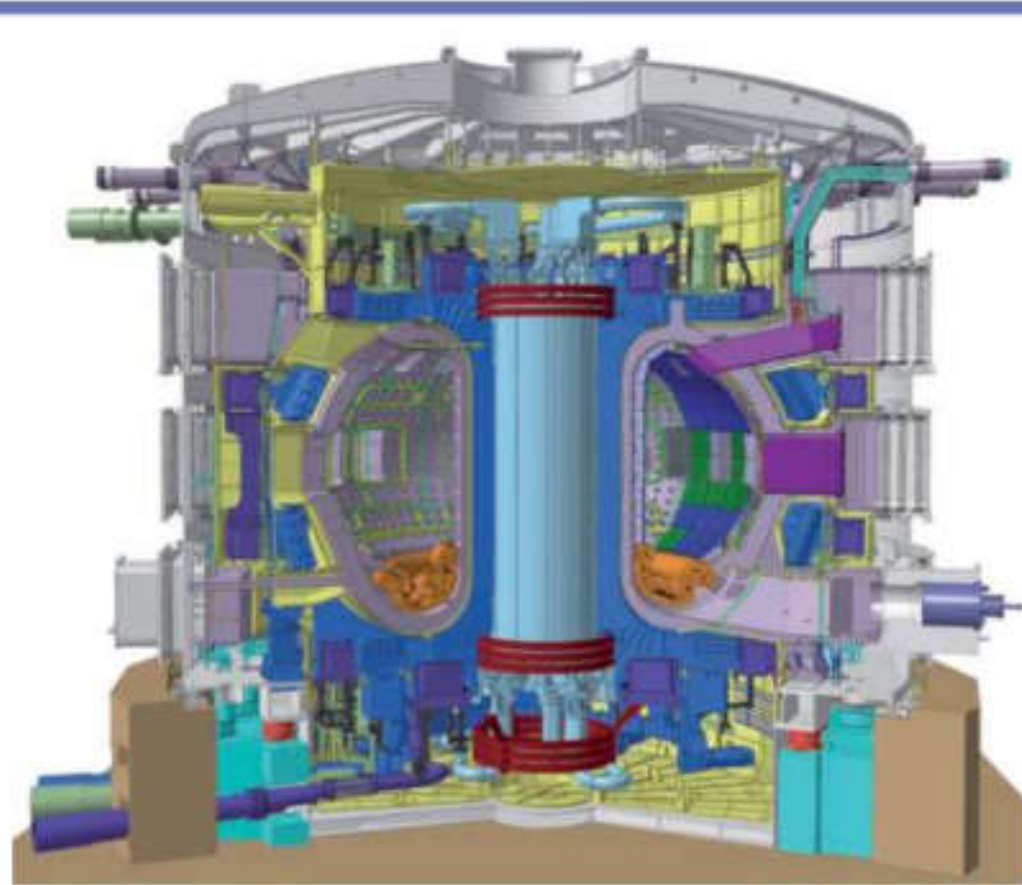


Schéma 2. Lawsonova kritéria pro DT reakci při magnetickém udržení. Kritéria jsou nejnáze splnitelná při teplotě 163 mil. K.

ITER velký TOKAMAK, Strategie AV21



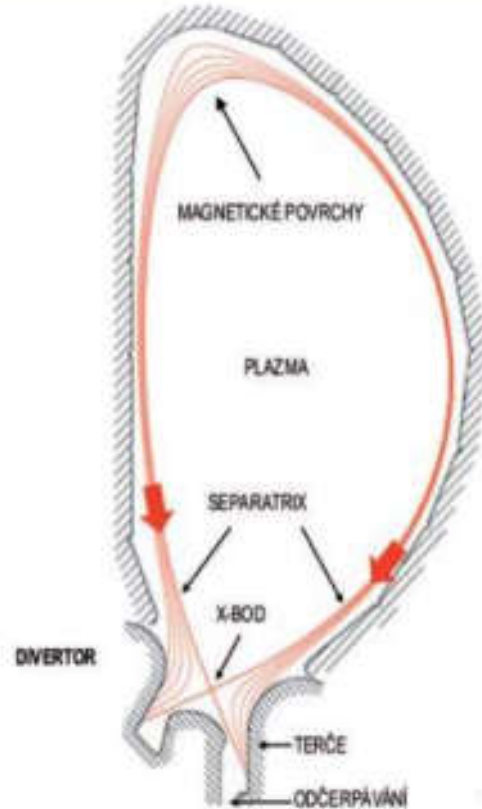
Obr. 2. Tokamak ITER bude 30 m vysoký, 30 m široký a bude vážit 23 tisíc tun. Fúzní výkon reaktoru bude 500 MW. Reaktor se staví v jihofrancouzské Provinci a spuštěn má být v roce 2025. Na projektu se podílí 7 partnerů, kteří reprezentují více než polovinu lidstva a produkují více než 80 % světového HDP [1]

ITER velký TOKAMAK, Strategie AV21

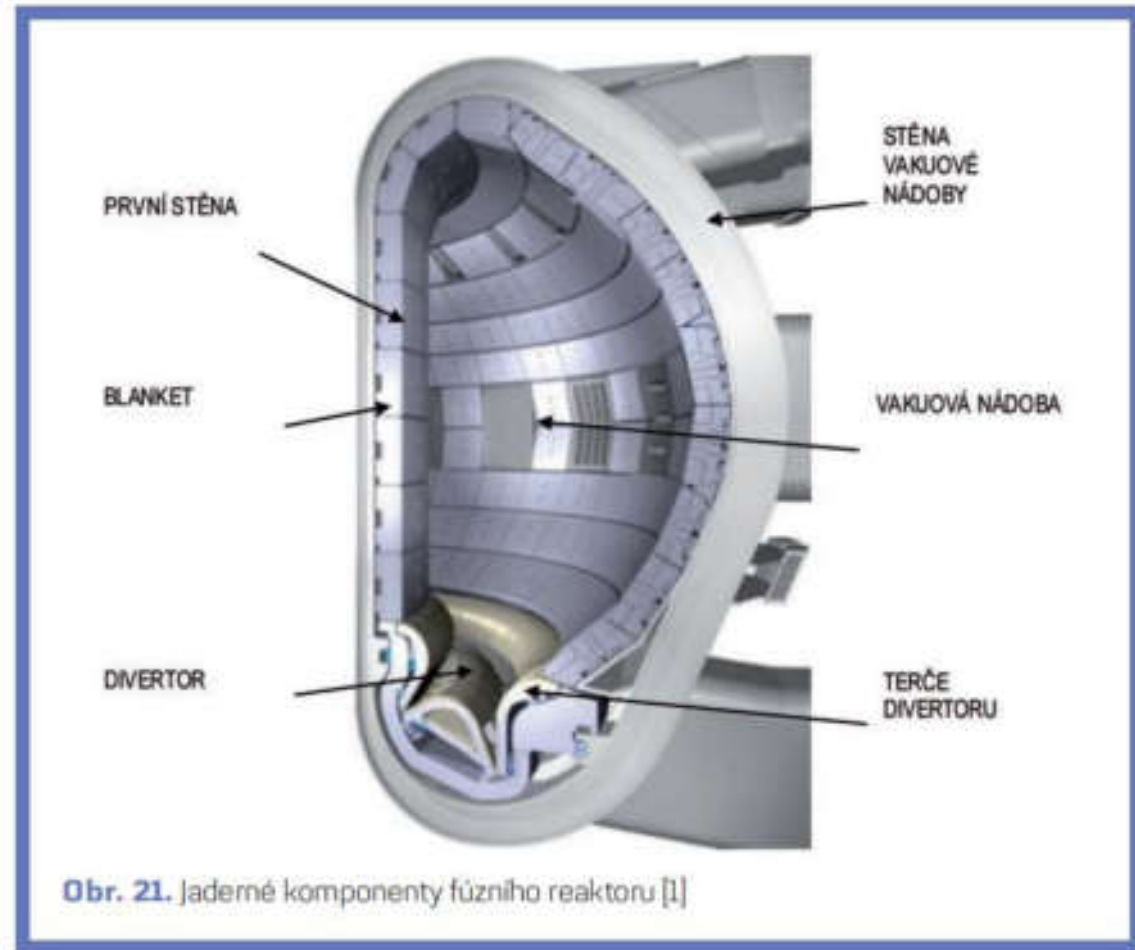
Stěna reaktoru tepelný tok 0,5, místně až 7 MW/m²

(první stěna – beryllium, prvky odvádějící teplo – nerezová ocel a vysokopevnostní měď)

Divertor až 150 MW/m² – chlazený wolframový terč (chlazení vodou do 160oC)



Obr. 15. Divertor směřuje povrchovou vrstvu plazmatu na své terče, kde je ochlazována a odčerpávána ven z reaktoru



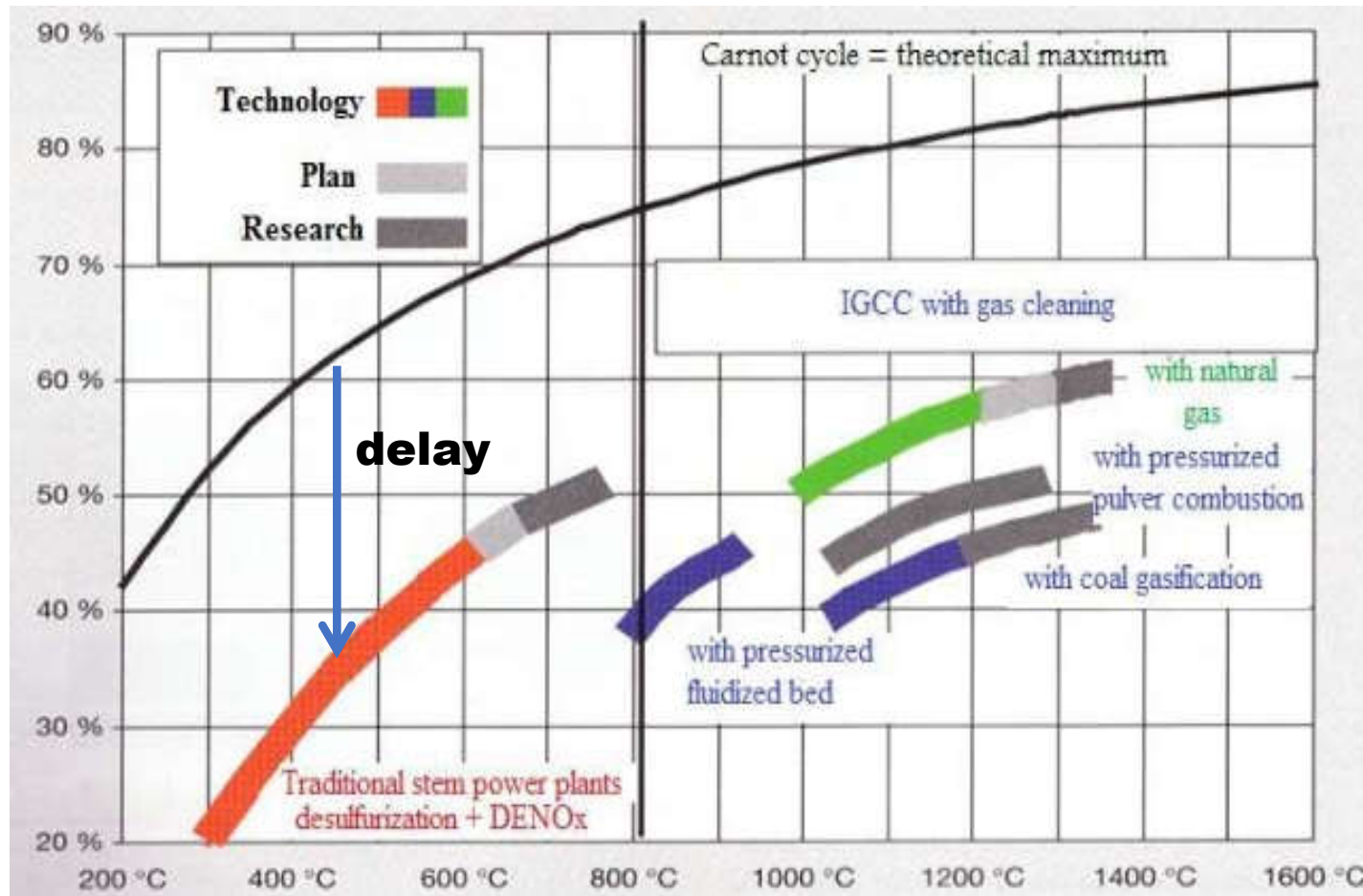
Obr. 21. Jaderné komponenty fúzního reaktoru [1]

EFFICIENCY OF VARIOUS TECHNOLOGIES AND THE PROPOSED DEVELOPMENT

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1$$

T1 AVERAGE TEMPERATURE OF PROCESS MATTER (FOR EXAMPLE STEAM)

T2 SURROUNDING TEMPERATURE



Comprehensive comparison of various working media and corresponding power cycle layouts for the helium-cooled DEMO reactor

Jan Stepanek^{a, b, *}, Slavomir Entler^b, Jan Syblik^a, Ladislav Vesely^{a, c}, Vaclav Dostal^a, Pavel Zacha^a

J. Stepanek et al.

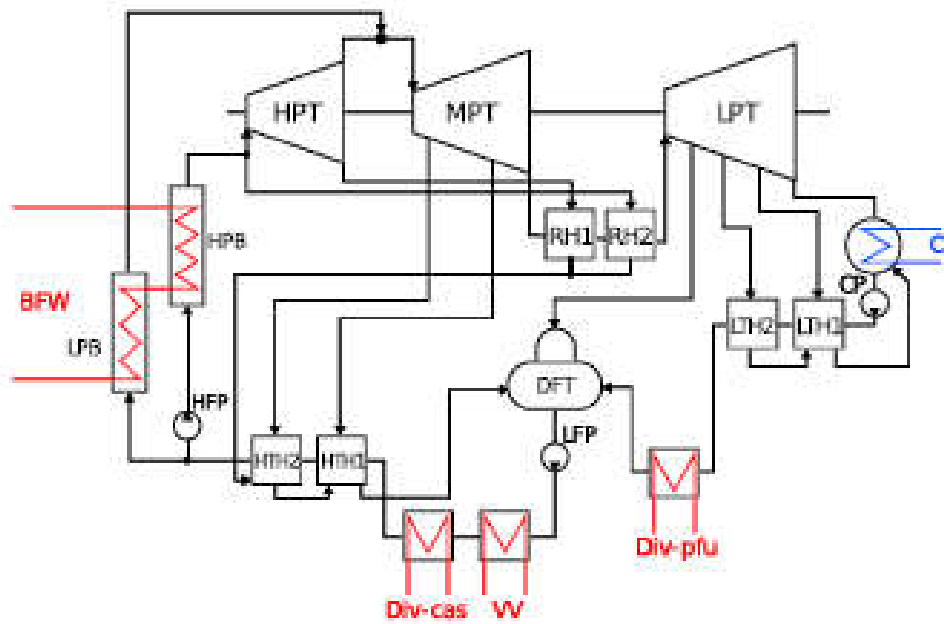


Fig. 3. Optimized Rankine cycle layout.

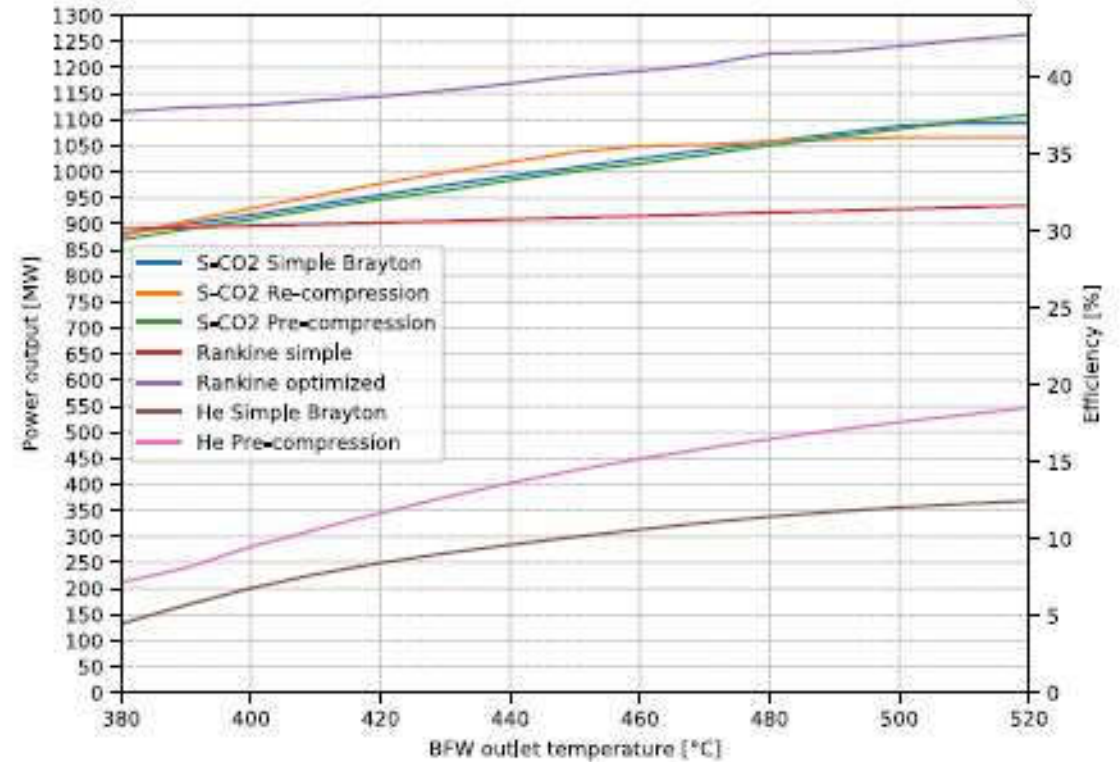
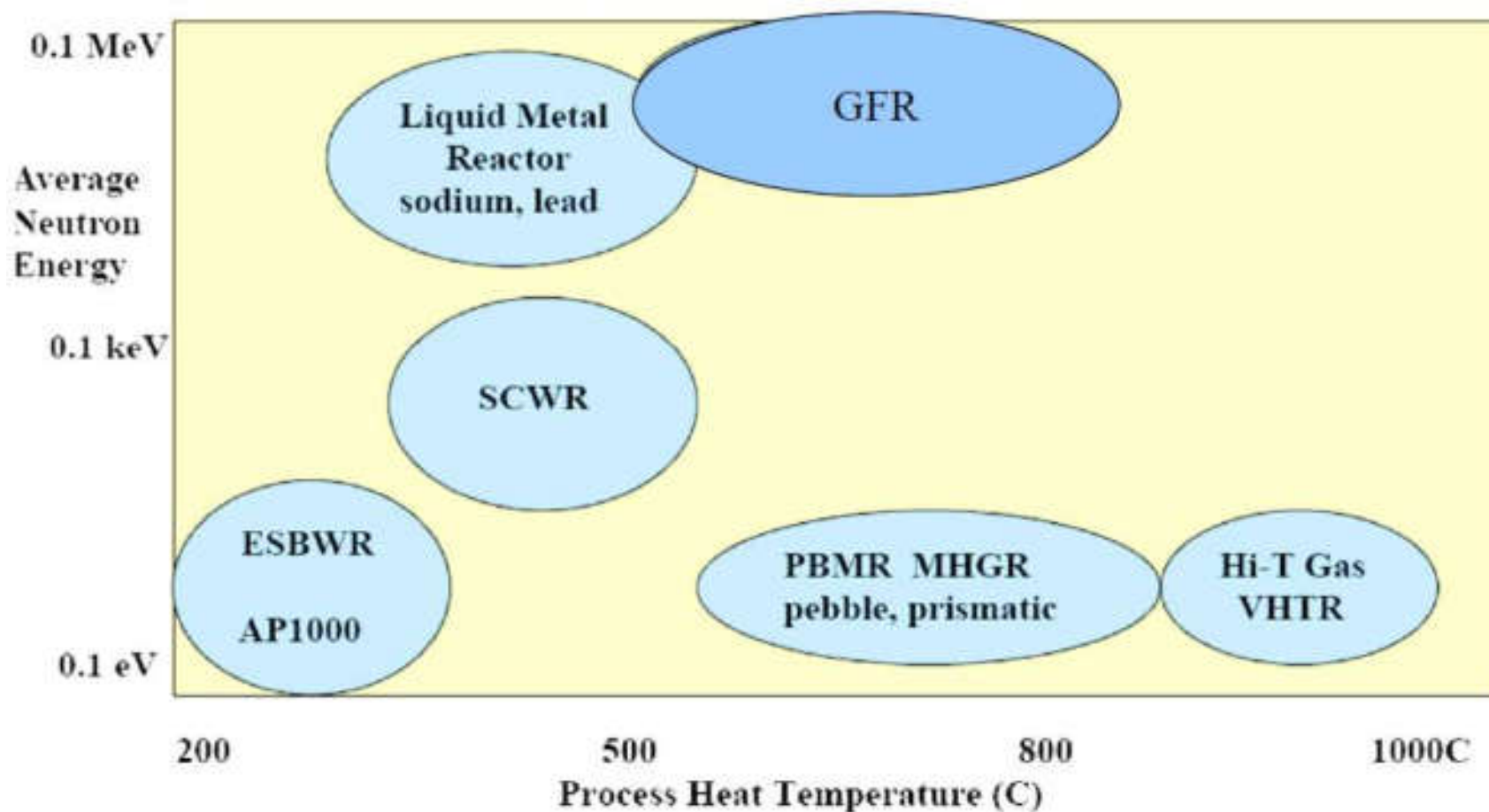


Fig. 7. Power output and cycle efficiency on BFW outlet temperature.



Mapa režimů reaktorů 4. generace

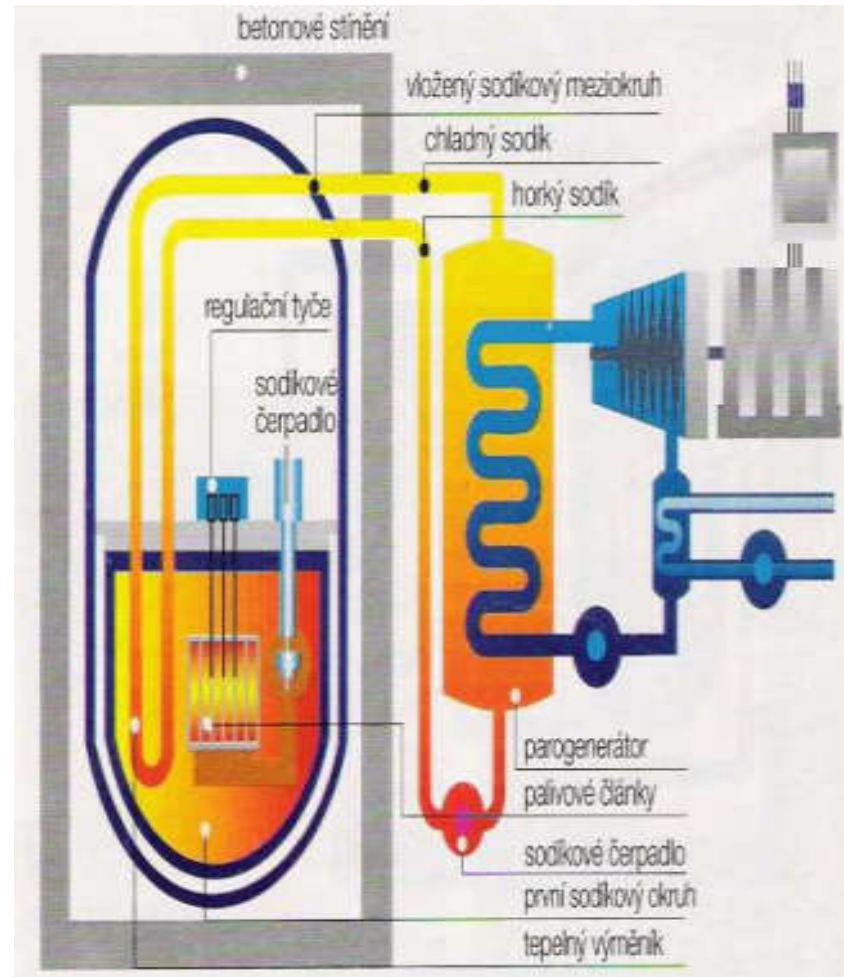
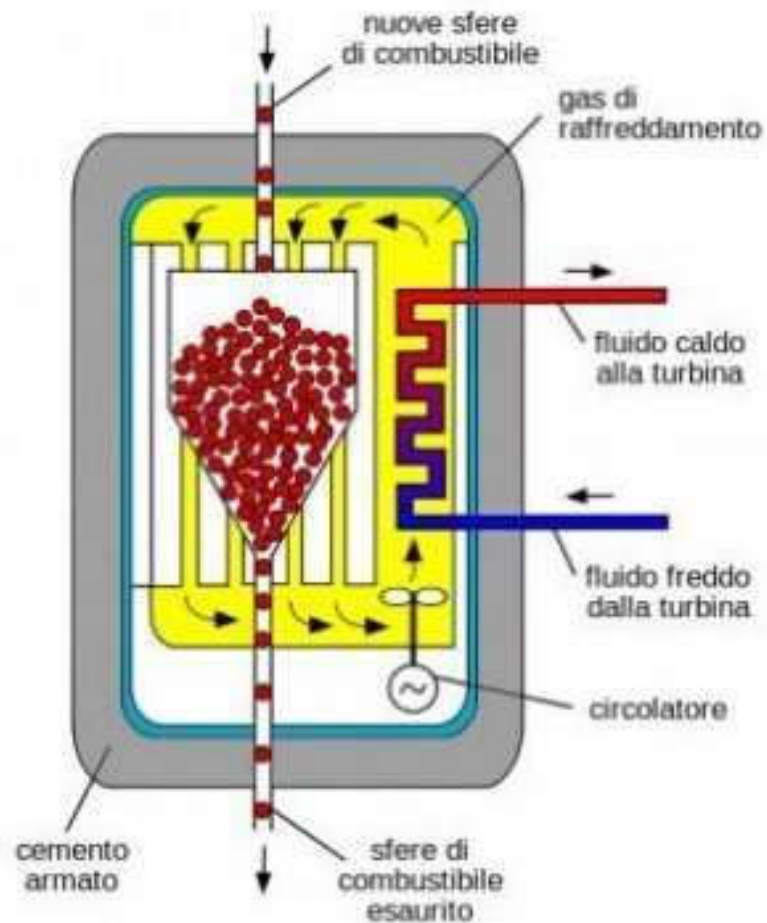
Čím vyšší teplota a vyšší energie neutronů, tím obtížnější vývoj materiálů



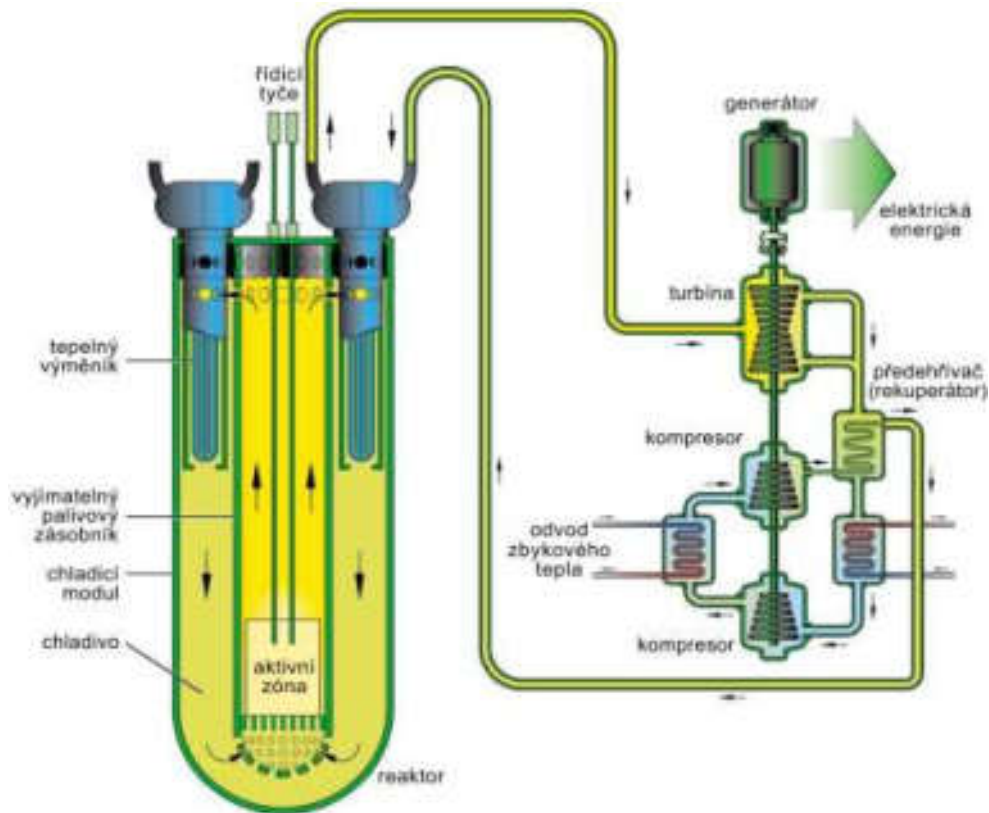
Pebble Bed Modular Reactore

Modulární množivý reaktor 3 okruhy (Bill Gates) LMR-Na (Pb)

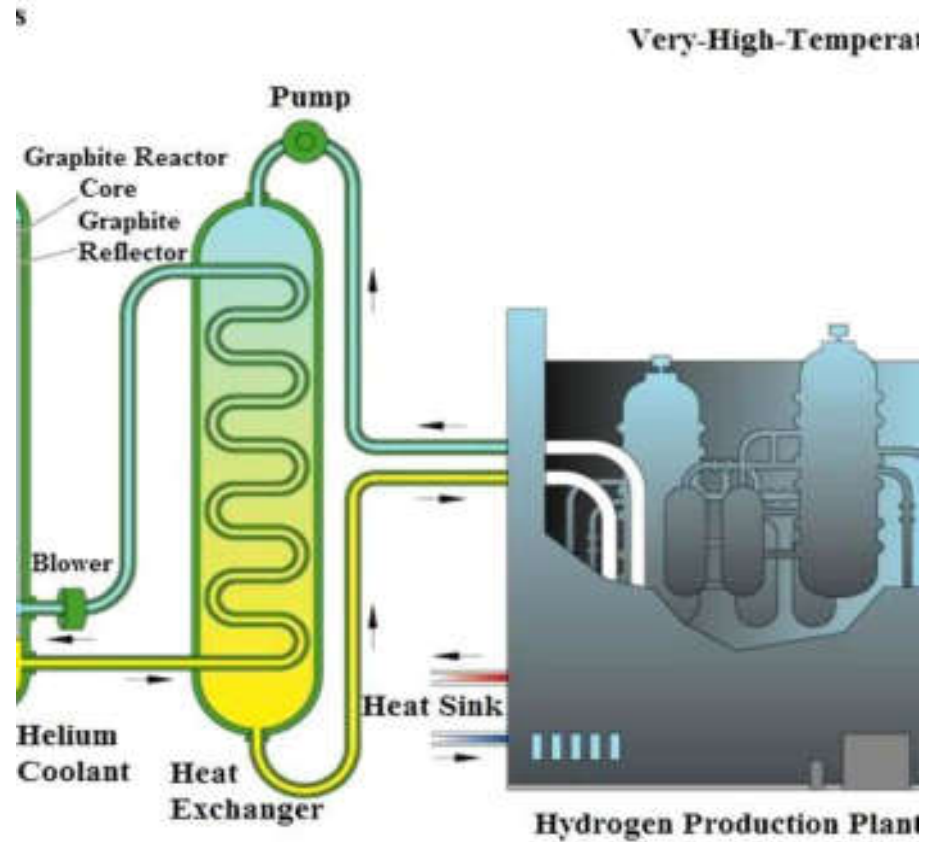
schema di reattore "pebble bed"



GFR (Gas cooled reactor)



VHTR very high temperature react.



SMR – modulární reaktor jako stavební prvek jaderné elektrárny



Nové palivo pro reaktory 3 a 3+ REMIX a MOX

DOKONČENÍ PRVNÍCH ZKOUŠEK RECYKLOVANÉHO PALIVA

REMIX = PŘEPRACOVANÉ STARÉ PALIVO S POUŽITÍM NOVÉHO PALIVA

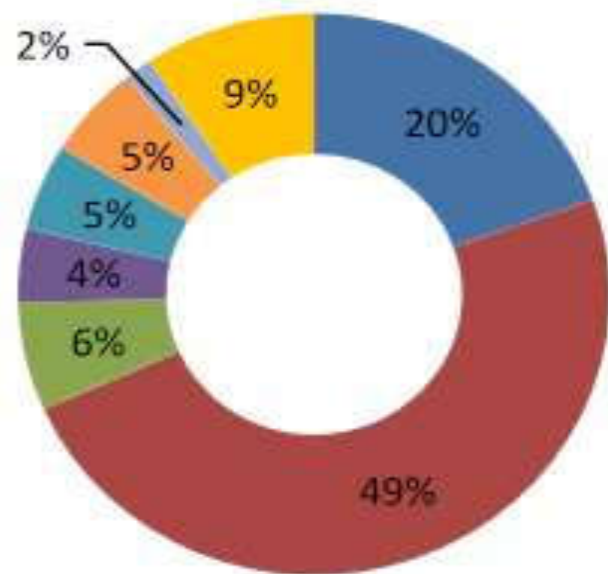
MOX = PŘEPRACOVANÉ PALIVO S VYUŽITÍM POUZE URANU A PLUTONIA



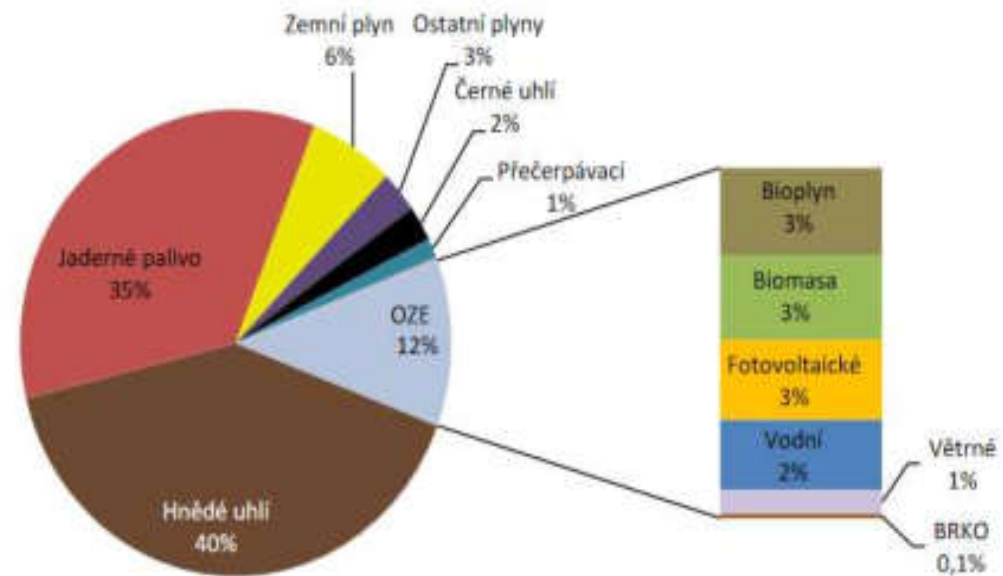


Děkuji za pozornost

Podíl instalovaného výkonu v ES ČR - 2019



Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto - 2019



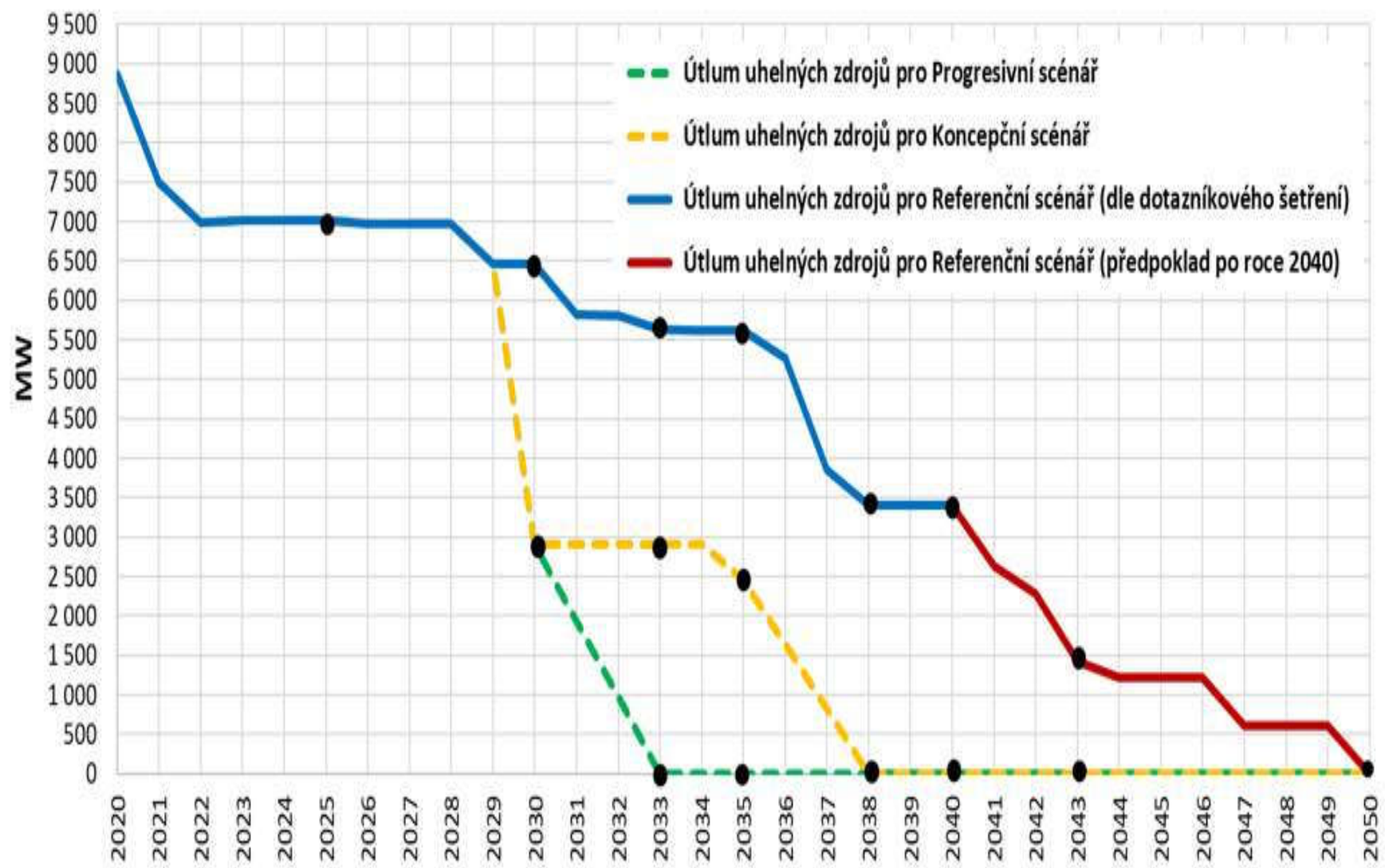
Podíl zdrojů na výrobě elektřiny v roce 2021

Podíl		%
uhlí	39,80	
hnědé uhlí	35,15	

Česká republika: Celková výroba elektřiny				
Category	Generated GWh			
Ostatní	119			
Zpracování odpadů	185			
Větrné elektrárny	611			
Přečerpávací elektrárny	1205			
Solární elektrárny	2191			
Ostatní OZE	2352			
Vodní elektrárny	2456			
Biomasa	2490			
Černé uhlí	2555			
Plynové zdroje	8279			
Hnědé uhlí	27899			
Jaderné elektrárny	29036			

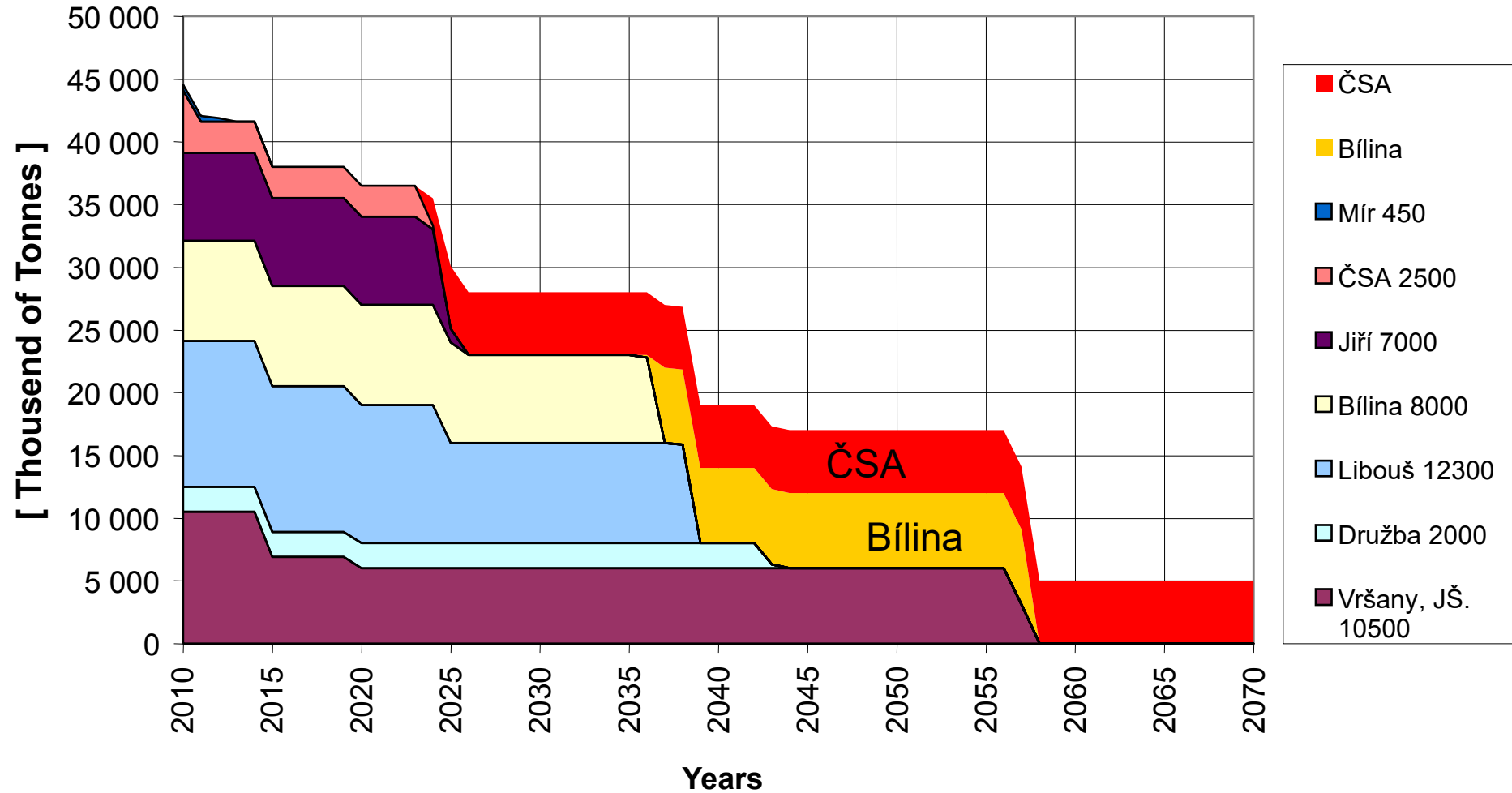
STABILNÍ A VOLATILNÍ ZDROJE

ZDROJ	INSTALVÝKON MW	PRODUKCE ZA ROK TWh
FOTOVOLT.	1000	1
VÍTR	1000	2,1
UHLÍ, PLYN	1000	4 až 5
JÁDRO	1000	6

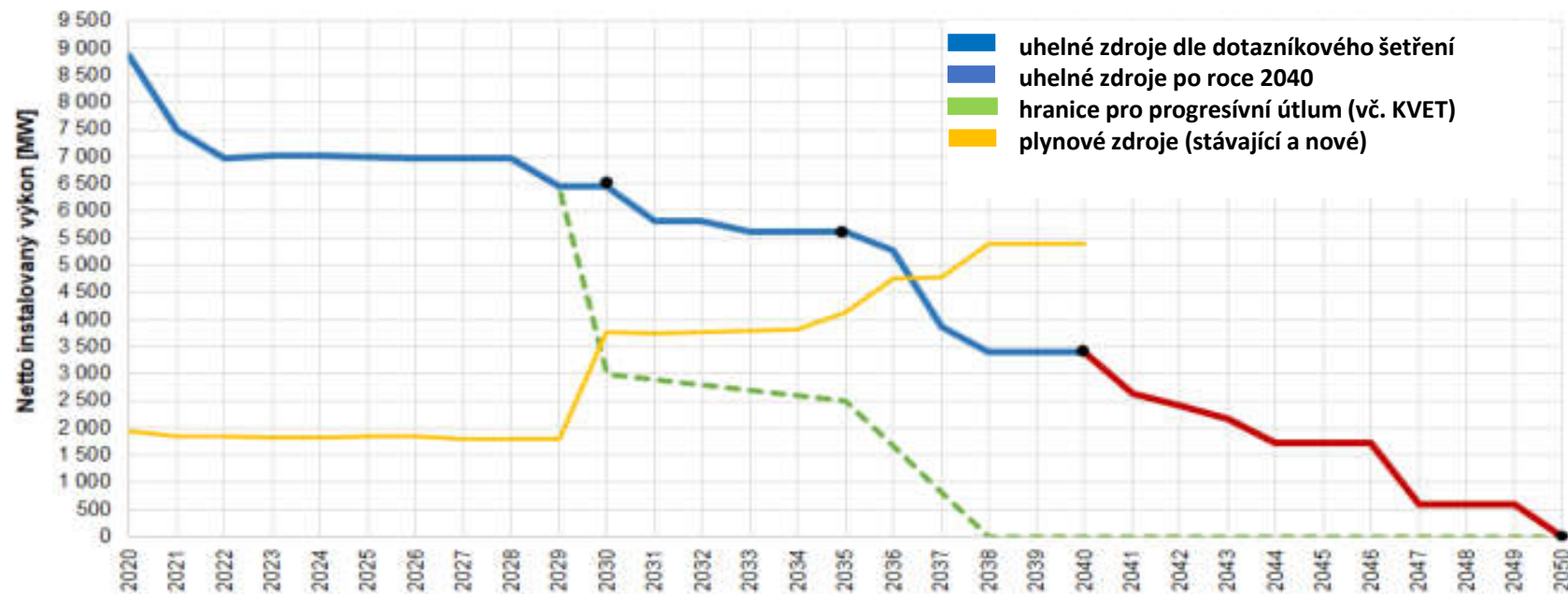


Zásoby a těžba hnědého uhlí v ČR NEK v roce 2009

Outlook for final lignite coal production with blocked resources and their re-evaluation

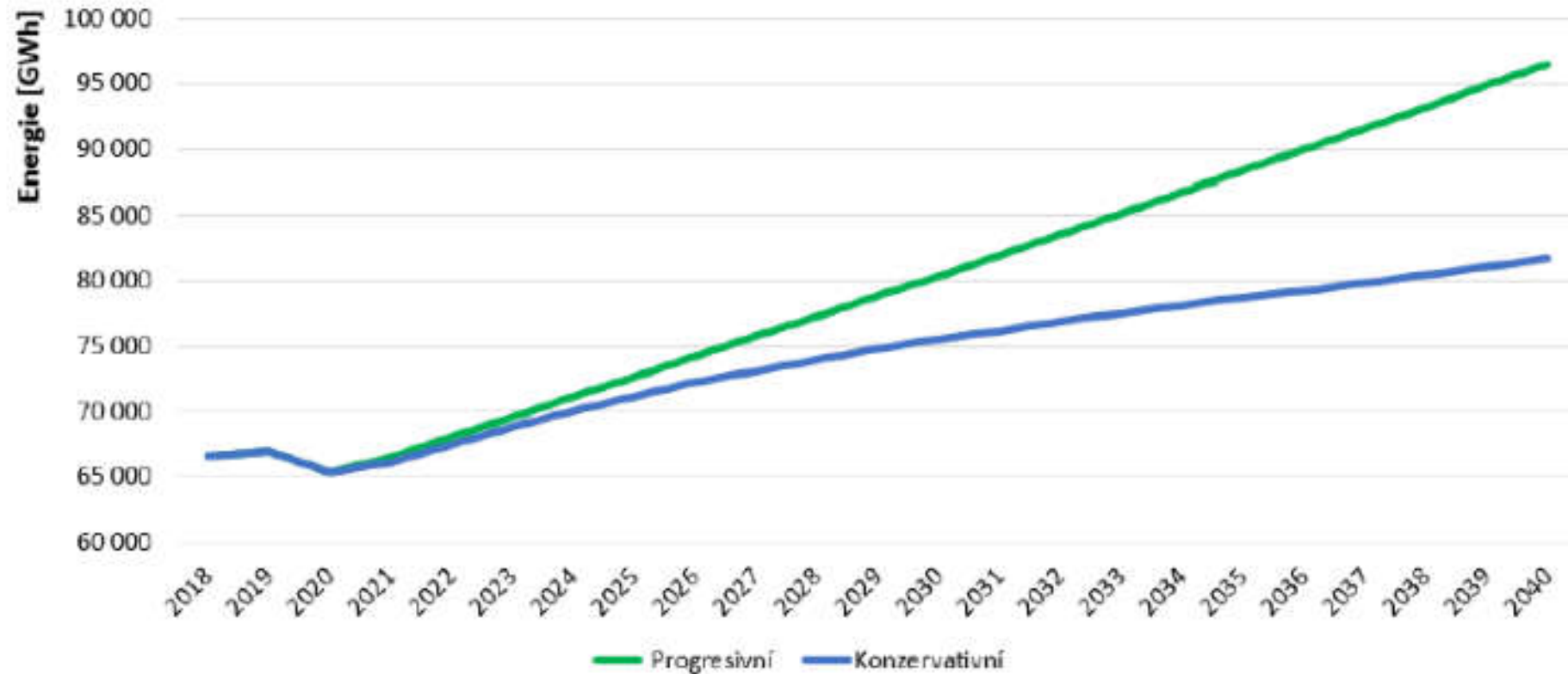


Vývoj instalovaného výkonu fosilních zdrojů (paroplyny EPOČ 838, Vřesová 400, Alpique 110 MWel) - nárůst spotřeby v roce 2050 pouze na 90 TWh (Konceptní scénář)



SCÉNÁŘE SPOTŘEBY PODLE ČEPS 2022

Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040



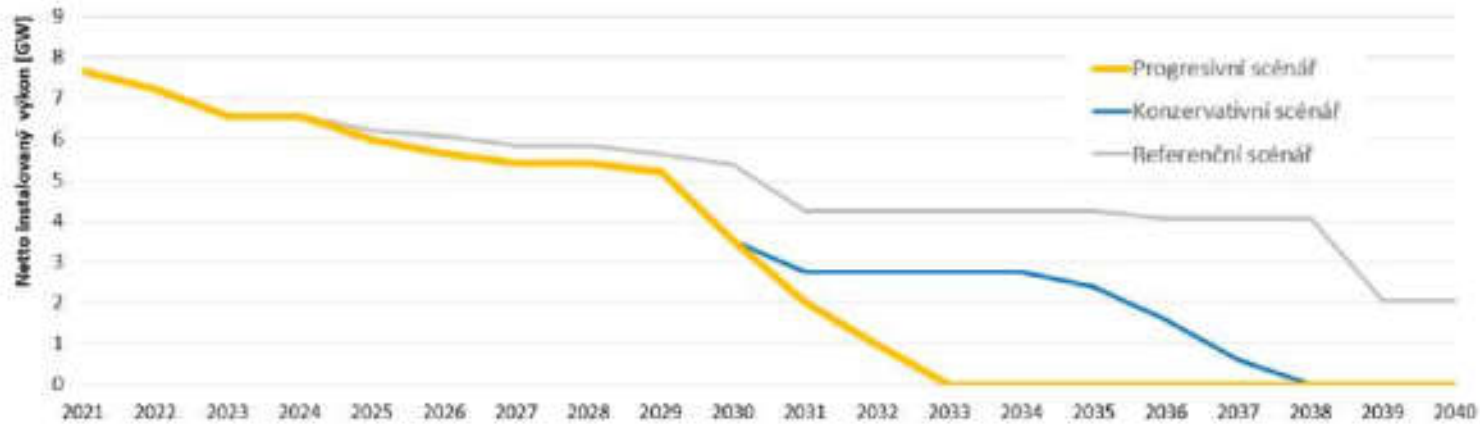
Obr. 5.1 Scénáře spotřeby ČR

SCÉNÁŘE MODELOVÁNÍ PODLE ČEPS

	Progresivní	Konzervativní	Referenční
Útlum uhelných zdrojů	Do roku 2033	Do roku 2038	Dle provozovatelů
Teplárenství	Transformace na plyn do roku 2030 (včetně)	Transformace na plyn do roku 2030 (včetně)	Dle provozovatelů (částečná transformace na plyn)
Jádro	Předpokládané zprovoznění NJZ v roce 2036		
OZE	Progresivní predikce	Realistická predikce	Realistická predikce
Spotřeba	Progresivní scénář (vyšší elektrifikace)	Konzervativní scénář (střední elektrifikace)	Stejná jako v Konzervativním scénáři (střední elektrifikace)

ÚTLUM UHELNÝCH ZDROJŮ A PLYNOVÉ ELEKTRÁRNY

DLE ANALÝZY ČEPS

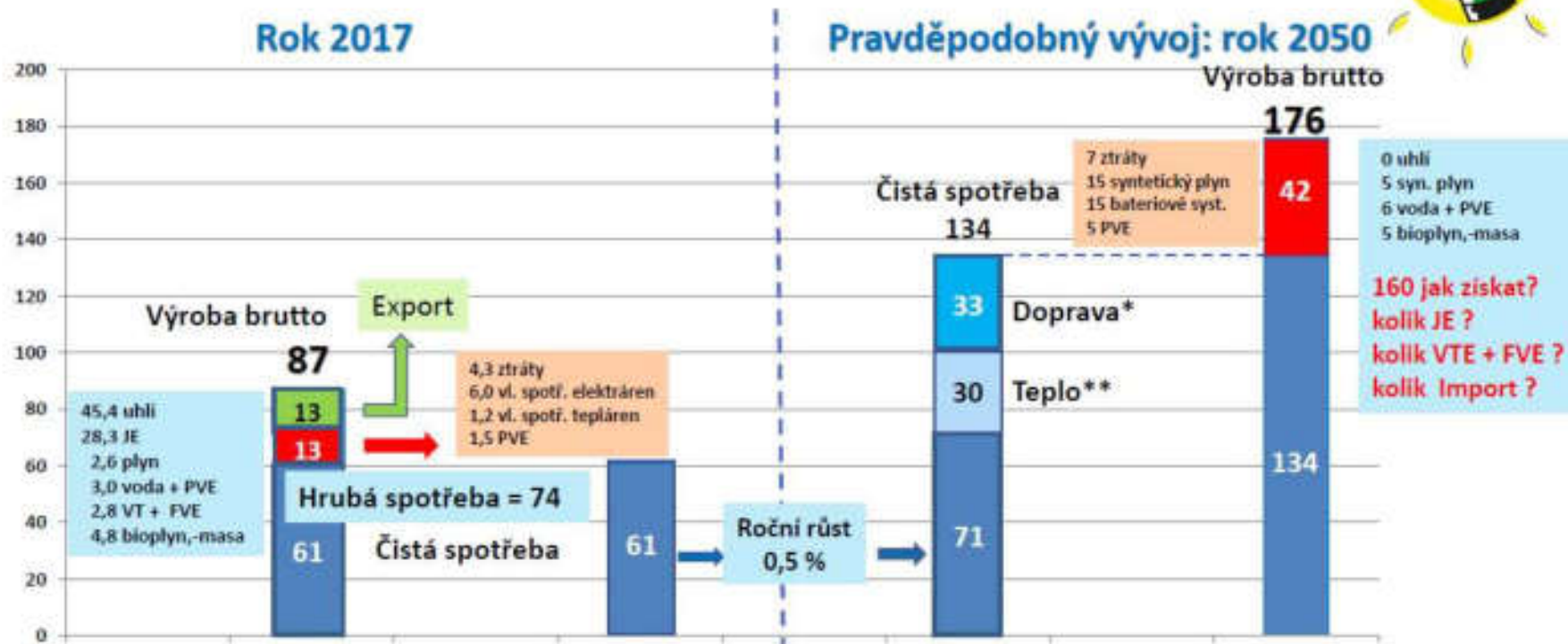


Obr. 6.21 Výhled útlumu uhlí (instalovaný výkon netto) dle Progresivního, Konzervativního a Referenčního scénáře

Scénář	2025	2030	2035	2040
Progresivní	-	-	2658 MW	1932 MW
Konzervativní	-	-	-	479 MW
Referenční	-	-	-	-

Tab. 6.4 Přehled dodatečného potřebného instalovaného výkonu napříč všemi scénáři [MW]

Spotřeba elektrické energie v ČR (TWh)



Zdroj dat: MPO, Eurostat, ERU

* přechod na elektromobilitu (28), rozšíření železnice a MHD (5)

** po zateplení přechod na tepel. čerpadla (5) a přímotopy (25)

Nepokrytí potřeb soustavy (LOLE = lost of load expectation) a nepokrytí spotřeby (EENS = expected energy not service)

Scénář	2025	2030	2035	2040
Progresivní	-	-	23 h	119 h
Konzervativní	-	-	-	22 h
Referenční	-	-	-	5 h

Tab. 6.2 Hodnoty LOLE pro jednotlivé scénáře v jednotlivých letech

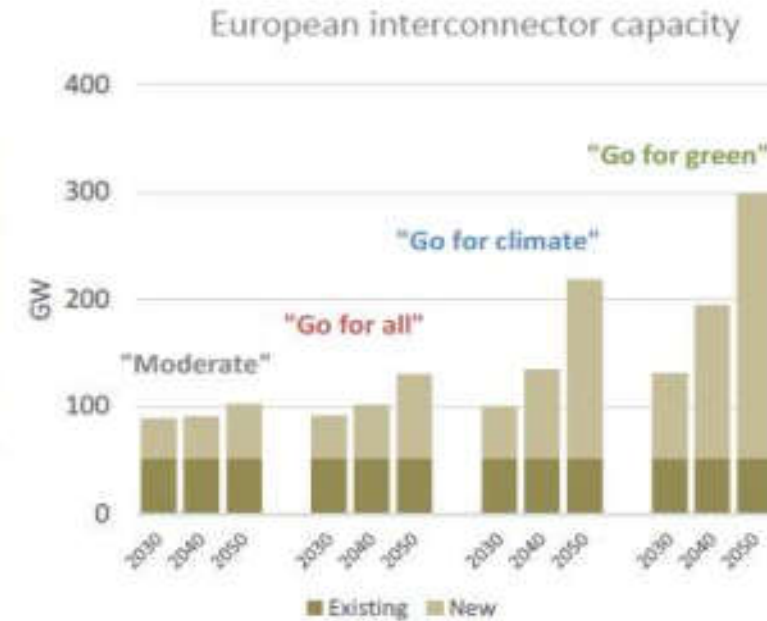
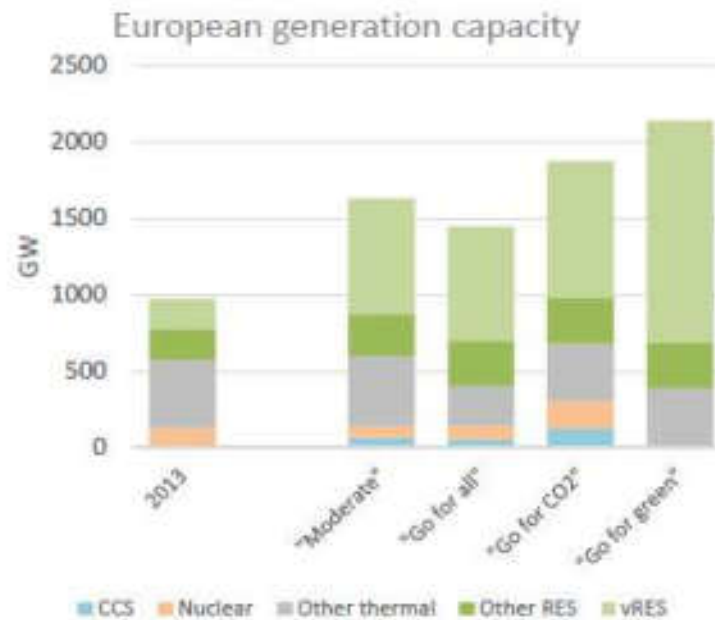
Scénář	2025	2030	2035	2040
Progresivní	-	-	15,0 GWh	122,8 GWh
Konzervativní	-	-	-	18,0 GWh
Referenční	-	-	-	2,0 GWh

Tab. 6.3 Hodnoty EENS pro jednotlivé scénáře v jednotlivých letech

DECENTRALIZOVANÁ ENERGETIKA NENÍ ZADARMO

The importance of capacity

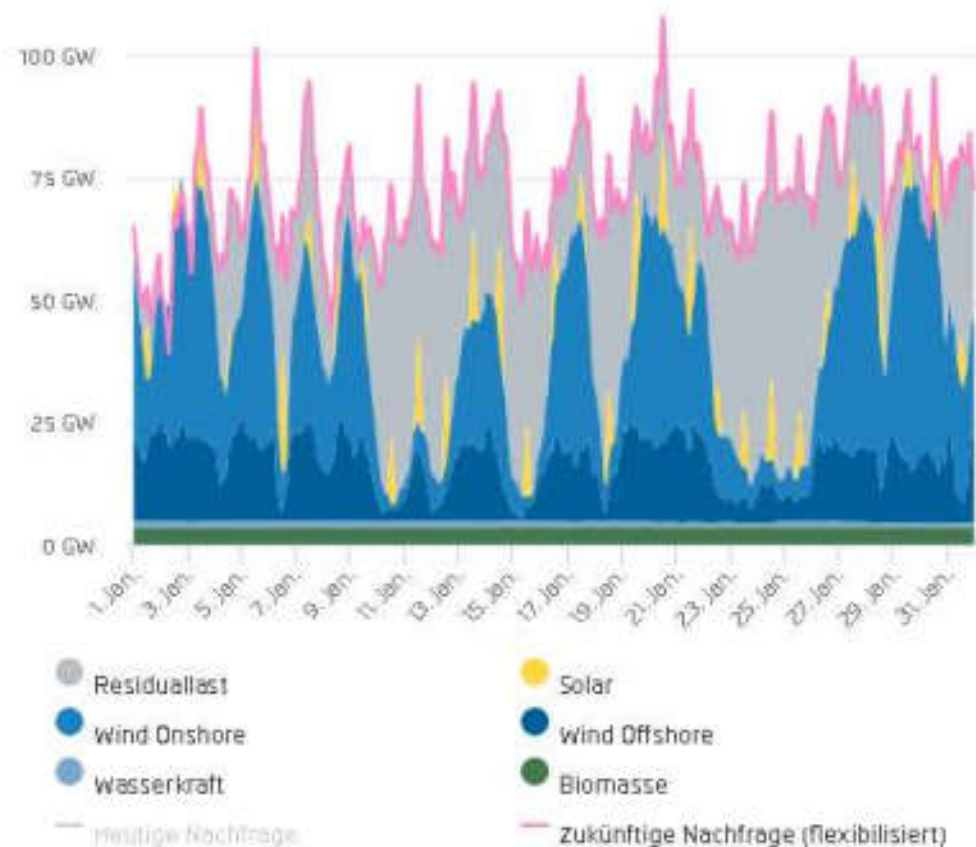
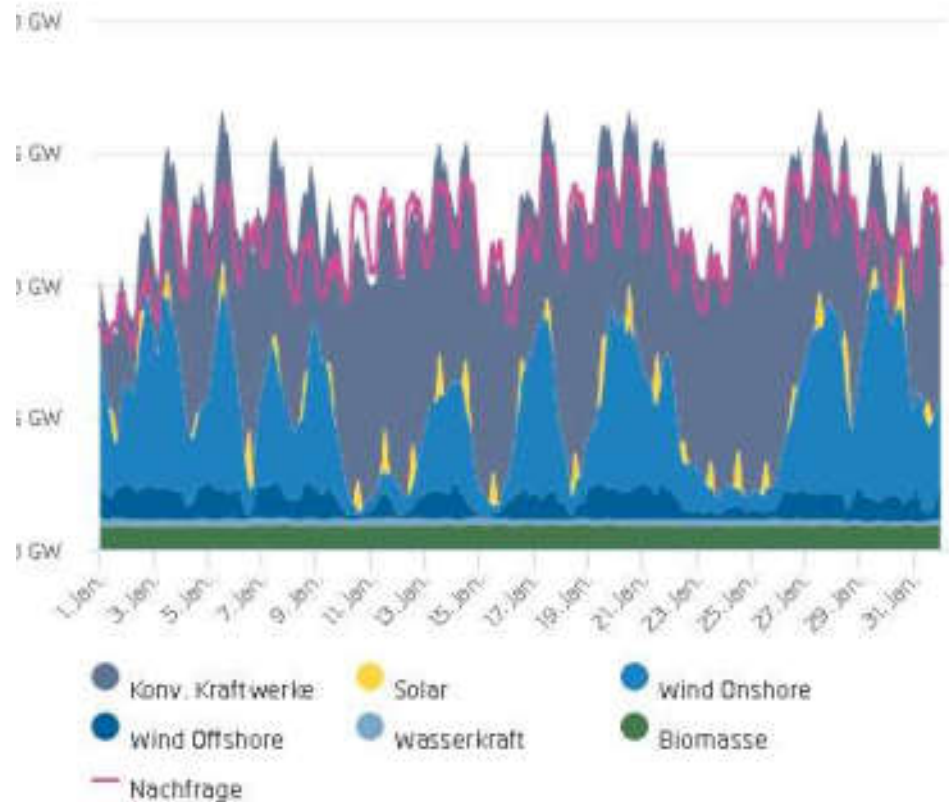
The estimated production increase of 0-40% will require 50%-100% more generation capacity by 2050



1500-2200 GW corresponds to the estimates made in EC, Roadmap 2011

VODÍK –PALIVO BUDOUCNOSTI ?

Německo v roce 2022 a v roce 2032



1) **Jaký je váš názor na vodíkovou revoluci, kterou nejspíš nejnějněji vystihuje vize německé energetiky: v létě +/- 100% pokrytí spotřeby pomocí OZE, z přebytků se vyrobí zelený vodík, který se bude pálit v plynových elektrárnách v zimě, čímž se dosáhne jak snížení emisí, tak závislosti na dovozu z východu. Je to technicky a ekonomicky realizovatelné?**

Z obrázku pro rok 2030 můžete učinit dva relevantní závěry:

- a) s malou nepřesností můžete vidět, že vodík by měl krýt zhruba polovinu měsíční spotřeby Německa
- b) špičkový výkon vodíkových elektráren by musel být cca 80 GW – to je neuvěřitelně vysoká hodnota a je to „jenom přílepek“ k obrovskému budování nových zdrojů větrných a fotovoltaických elektráren. Možná by cca 10 % mohla zvládnout špičkovací komunální energetika, ale to moc nepomůže.

Nyní zpět k bodu a). Hrubým odhadem potřebuje Německo, dle jejich vlastní predikce, trvalý výkon 80 GW. To odpovídá netto měsíční výrobě elektřiny cca 60 TWh. Z toho polovina by měla být z vodíku. Protože ani konverze vodík – vodík skladování – elektřina není bez účinností, tak se dostaneme i se skladováním na účinnost cca 50 %. Když to dopočtu, tak Německo bude potřebovat na **leden 2030 1,8 milionů tun zeleného vodíku**, aby pokrylo jenom předpokládanou spotřebu elektřiny. A ty neoptimističtější **světové predikce** hovoří o sumární produkci **6,7 milionu tun ročně** (globální vodíkové investice 300 miliard dolarů a není v nich ani dolar na skladování, dopravu a investice do vodíkových elektráren). Lednových 1,8 mil. t vodíku spotřebuje přebytkovou produkci cca **99 TWh**, což je **roční produkce instalovaných 30 GW větrných elektráren na moři. Žádné přebytky a pokryli jsme pouhý leden roku 2030 v elektřině.**

I kdybych pracoval s tím, že v roce 2030 se ještě může používat zemní plyn, ale s **30 % vodíku**, Tak na 3 zimní

Velké vodíkové projekty

- **K projektu americké fy Air Products, která plánuje v Saudské Arábii výstavbu 4GW solárních a větrných elektráren k napájení údajně největšího elektrolyzeru na světě: má vyrábět 650 tun zeleného vodíku denně, určeného pro globální trh.**
- **Vodík se bude transportovat z praktických důvodů ve formě amoniaku**
- **Pro 4 GW ve FV a VTE zřejmě počítají s load faktorem 0,33 a účinnost elektrolyzéro při nestálém výkonu 0,75. Z toho vychází denní produkce vodíku cca 18 GWh tzn 668 t. Již tady se mi zdá load faktor přehnaně nadnesený a chybí mi spotřeba energie na odsolení mořské vody (nevím, kde by ji tam vzali...)**
- **Pak máte vysokoteplotní a tlakové zpracování na jedovatý amoniak, který se bude převážet do Evropy. Tam je nutno zpětné získání vodíku a jeho vyčištění pro palivové články (mají největší konverzní účinnost). Takže výsledná účinnost by mohla být 0,4 až 0,45. Výroba dodá za rok 227 500 t vodíku. A z něho získám 3,2 až 2,9 TWh elektrické energie. Jinými slovy, když by to takto ideálně fungovalo, tak pokryji 4,5 % naší hrubé potřeby elektřiny**

Prosím o vysvětlení: kdyby se hypoteticky všechno toto vyrobené množství H2 využilo pro výrobu elektřiny v Evropě, jaký potenciál by to představovalo? Tj. kolik elektřiny by se takto dalo vyrobit ve srovnání např, s tuzemskou roční spotřebou cca 70 TWh ročně?

2. Dále prosím o vysvětlení, jaký potenciál má pro výrobu elektřiny výstavba 6 GW vodíkových elektrolyzérů (výroba z OZE) v Evropě, což je aktuálně dle Air Products plán evropských zemí do 2024 (ještě jsem neověřovala, jestli to číslo sedí). Má to produkovat až 1 mil tun zeleného H2 ročně. Pokud je to reálný předpoklad, kolik elektřiny by z toho bylo možné vyrobit, jaký význam pro evropskou spotřebu to může mít?

Předchozí případ byl 227 500 t vodíku. Tedy až 1 milion tun je snad až 13 možná 15 TWh - také se nějak bude přepravovat a nevíme kde a jak skladovat.