

Česká zemědělská univerzita v Praze

Provozně ekonomická fakulta

Katedra ekonomiky



Diplomová práce

Data science energetického mixu České republiky

Aleksandr Ali

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Aleksandr Ali

Informatika

Název práce

Data science energetického mixu České republiky

Název anglicky

Data science of energy mix of the Czech Republic

Cíle práce

Hlavním cílem této práce je vytvořit IT model, který bude hodnotit ekonomické dopady politik mitigace klimatické změny v České republice a prozkoumat vliv různých scénářů a politických opatření na energetický systém země, ekonomický výkon a emise skleníkových plynů.

Vedlejší cíle zahrnují modelování potenciálního dopadu mechanismů omezení emisí včetně emisních povolenek, analýzu roli dotací pro obnovitelnou energii při podpoře udržitelného rozvoje energetiky a poskytnutí doporučení pro politická opatření na zlepšení strategií České republiky pro mitigaci klimatických změn.

Metodika

1. Revize literatury

Provedení revize literatury na téma ekonomiky klimatických změn včetně dokumentace modelovacího rámce MESSAGEix, který bude použit k simulaci energetického systému a ekonomiky České republiky.

2. Sběr dat

Aktuální a relevantní data o spotřebě a výrobě energie, ekonomických ukazatelích a emisích skleníkových plynů v České republice budou sloužit základem pro modelování.

3. Vývoj modelu

Po stanovení výchozích parametrů a předpokladů pro energetický a ekonomický systém České republiky bude proveden výpočet modelu a její validace na základě porovnání výsledků oproti historickým datům.

4. Analýza opatření

Každý scénář politiky bude implementován v MESSAGEix a model bude spuštěn pro generování výsledků navazujících na příslušné scénáře a bude provedena analýza těchto ekonomických, energetických a environmentálních výsledků.

5. Interpretace výsledků a doporučení

Na základě analýzy scénářů a jejich implikací budou zformulovány závěry ohledně účinnosti různých opatření v rámci zkoumaných politik mitigace klimatických změn v České republice a doporučení pro politické aktéry a zainteresované strany v energetickém a environmentálním sektoru.



Doporučený rozsah práce

60 stran

Klíčová slova

messageix, změna klimatu, Česká republika

Doporučené zdroje informací

- Brinkerink, M. (30. October 2020). Assessing 1.5-2°C scenarios of integrated assessment models from a power system perspective – Linkage with a detailed hourly global electricity model. IIASA. doi:oai:pure.iiasa.ac.at:16957
- D. Huppmann, M. G. (1. February 2019). The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp). Elsevier. doi:DOI: 10.1016/J.ENVSOF.2018.11.012
- Edward Byers, V. K. (November 2022). AR6 Scenarios Database hosted by IIASA. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.5886911
- Eurostat. (2022). Eurostat Database. Načteno z <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>
- H.-O. Pörtner, D. R. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Načteno z https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- International Energy Agency. (2023). International Energy Agency Database. Načteno z <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/>
- International Monetary Fund. (2022). International Financial Statistics. International Monetary Fund. Načteno z <https://www.imf.org>
- MESSAGEix-GLOBIOM Documentation – 2020 release. (March 2020). Austria, Laxenburg: IIASA. doi:10.22022/IACC/03-2021.17115
- World Bank. (2022). World Bank Database. Načteno z <https://data.worldbank.org/>
- W. Zhou, D. M. (1. January 2020). Decarbonization pathways and energy investment needs for developing Asia in line with 'well below' 2 °C. Taylor & Francis. doi:DOI: 10.1080/14693062.2020.1722606
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – PEF

Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Procházka, MSc, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra ekonomiky

Elektronicky schváleno dne 11. 3. 2024

prof. Ing. Lukáš Čechura, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2024

doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Data science energetického mixu České republiky" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.03.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Petrovi Procházkovi, MSc., Ph.D. za ochotné přijetí a vedení mého vlastního tématu diplomové práce, za cenné rady a jeho čas věnovaný vedení této práce. Svě partnerce, svým příbuzným a kamarádům za podporu v období mého studia.

Data science energetického mixu České republiky

Abstrakt

Cílem této práce je vyvinout data science model za účelem hodnocení dopadů vybraných politik mitigace změny klimatu v České republice a prozkoumat vliv různých scénářů a politických opatření na energetický systém země a emise skleníkových plynů. Mezi vedlejší cíle patří modelování možného dopadu mechanismů snižování emisí, jako je emisní povolenky a dotace obnovitelných zdrojů energie při podpoře udržitelného rozvoje energetiky, a rovněž generace doporučení pro zlepšení strategií ČR pro mitigaci klimatických změn. Součástí metodiky je rešerše literatury o modelování energetických systémů a dokumentace modelovacího rámce MESSAGEix, použitého k simulaci energetického systému ČR v rámci ekonomických předpokladů. Sběr údajů bude zahrnovat aktuální a relevantní údaje o technoekonomických parametrech energetických systémů, primární produkci a primárních zdrojů České republiky a emisích skleníkových plynů. Vývoj modelu bude vyžadovat stanovení inicializačních parametrů a předpokladů pro reprezentaci energetického systému země v rámci vybraných scénářů pro příslušná opatření, následované výpočtem modelu a analýzou výsledků. Interpretace výsledků povede k závěrům ohledně účinnosti různých opatření v rámci zkoumaných politik mitigace změny klimatu v ČR spolu s doporučeními pro tvůrce politik a zainteresované strany v energetice.

Klíčová slova: Česká republika, messageix, změna klimatu, energetický mix, data science, modelování, emisní povolenky, dotace obnovitelných zdrojů, python, model obecné rovnováhy, simulace

Data science of energy mix of Czech Republic

Abstract

This thesis aims to develop a data science model to assess the impacts of climate change mitigation policies in the Czech Republic and explore the influence of various scenarios and policy measures on the country's energy system and greenhouse gas emissions. The secondary objectives include modeling the potential impact of emission reduction mechanisms, such as carbon tax, role of subsidies for renewable energy in promoting sustainable energy development, and providing recommendations for improving the Czech Republic's strategies for climate change mitigation. The methodology involves a literature review on the energy system modeling and the documentation of the MESSAGEix modeling framework used to simulate the energy system of the Czech Republic within economic assumptions. Data collection will comprise current and relevant data on energy systems' technoeconomic parameters, primary production, total energy supply by energy source and greenhouse gas emissions. The model development will entail setting initial parameters and assumptions for the country's representation of the energy system within the selected scenarios for the respective measures, followed by model computation and analysis of the results. The interpretation of results will lead to conclusions regarding the effectiveness of different measures within the examined climate change mitigation policies in the Czech Republic, along with recommendations for policymakers and stakeholders in the energy sector.

Keywords: Czech Republic, messageix, climate change, energy mix, data science, modeling, carbon tax, subsidies for renewables, python, computable general equilibrium model, simulation.

Obsah

1	Úvod	11
2	Cíl práce a metodika	12
2.1	Cíl práce	12
2.2	Metodika	12
2.2.1	Revize literatury	12
2.2.2	Sběr dat	12
2.2.3	Vývoj modelu	13
2.2.4	Analýza opatření	13
2.2.5	Interpretace výsledků a doporučení	13
2.2.6	Omezení výzkumu	13
2.2.7	Formulace MESSAGE	13
2.2.7.1	Cílová funkce	13
2.2.7.2	Množiny	14
2.2.7.3	Rozhodovací proměnné	16
2.2.7.4	Pomocné proměnné	17
2.2.8	Schéma referenčního energetického systému	18
3	Teoretická východiska	19
3.1	Přístupy modelování energetického mixu	19
3.1.1	Dle úrovně detailů a hierarchie	19
3.1.2	Dle matematických algoritmů	21
3.1.3	Dle časových a prostorových hranic systému	21
3.1.4	Další způsoby klasifikace	22
3.2	Energetické modelování v ČR	22
3.2.1	Přehled modelů	22
3.2.2	TIMES-CZ	23
3.3	MESSAGEix	24
3.4	Koncepční rámec	27
4	Vlastní práce	29
4.1	Analýza dat energetického mixu – neobnovitelné zdroje	29
4.1.1	Uhlí	29
4.1.2	Ropa	32
4.1.3	Plyn	38
4.1.4	Uran	44
4.2	Analýza dat energetického mixu – obnovitelné zdroje	46
4.2.1	Pevná biomasa	50

4.2.2	Bioplyn	53
4.2.3	Metylestery řepkového oleje (MEŘO)	54
4.2.4	Energie prostředí (tepelná čerpadla).....	56
4.2.5	Solární energie	57
4.2.6	Větrná energie	60
4.2.7	Vodní energie	61
5	Výsledky a diskuse.....	63
5.1	Základní scénář	63
5.2	Dotace obnovitelných zdrojů	65
5.3	Emisní povolenky a dotace	68
5.4	Validace modelu (Emisní povolenky a dotace)	71
6	Závěr	74
7	Seznam použitých zdrojů.....	75
8	Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk	78
8.1	Seznam obrázků	78
8.2	Seznam tabulek	78
8.3	Seznam grafů.....	78
8.4	Seznam použitých zkratk.....	80
	Přílohy	81

1 Úvod

Energetické systémy produkují, transformují, dodávají a spotřebují energií, která pokud není použita napřímo, dál slouží jedním z nejdůležitějších prvků v ekonomice a používá se k transformaci vstupů podniků do produktů a služeb. Energetické systémy jsou extrémně komplikované, s desítkami využívaných technologií na každé fázi životního cyklu produkce energie. Rozvoj energetických systémů je dalším faktorem, přispívajícím k složitosti reprezentace energetických systémů, zvláště v čase. Nakonec, i když energetický systém lze rozdělit dle technologií, kvůli hluboké vzájemné provázanosti tržním prostředím, kde energetický systém působí, celek nebude se rovnat jakékoli sumě částí.

Okolí, se kterým energetické systémy interagují, ne vždy, na rozdíl od zákazníků, je ovlivněno pozitivně. Navíc, kvůli komplikovanosti energetických systémů plný soubor důsledků jejich provozu není jednoduché předvídat předem, ale z důvodu vážných dopadů na životní prostředí a následně na kvalitu života je nezbytností pro provedení změn.

Česká republika je významným hráčem na energetickém trhu, zejména v rámci Evropské Unie, čímž vyvolává zvláštní zájem ze strany partnerů a obyvatelstva o vlivu svého energetického systému na okolí, což zvyšuje důležitost úkolu jeho užitečné reprezentace.

Data science je oborem, který používá kvantitativní modely k odhalení skrytých souvislostí v datech, a proto je široce využíván všude, kde je dostatek dat a motivace využít vytěžené z nich znalosti k navigaci v komplikovaném prostředí, a tím pádem je populárním nástrojem, který se aplikuje na energetické modelování a analýzu opatření, zaměřených na řízení energetických systémů směrem nejen k optimalizaci propustnosti, ale i na harmonizaci jejich působnosti s okolím za účelem zvýšení kvality života spotřebitelů v širším pojmů než počtu dodaných kilowattu za co nejmenší peníze.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Hlavním cílem této práce je zhodnotit ekonomické dopady politik mitigace klimatické změny v České republice a prozkoumat vliv různých scénářů a politických opatření na energetický systém země, ekonomický výkon a emise skleníkových plynů.

Vedlejší cíle zahrnují modelování potenciálního dopadu mechanismů omezení emisí včetně emisních povolenek, analýzu roli dotací pro obnovitelnou energii při podpoře udržitelného rozvoje energetiky a poskytnutí doporučení pro politická opatření na zlepšení strategií České republiky pro mitigaci klimatických změn.

2.2 Metodika

2.2.1 Revize literatury

Provedení revize literatury na téma modelování energetických systémů včetně dokumentace modelovacího rámce MESSAGEix, který bude použit k simulaci energetického systému a ekonomiky České republiky.

2.2.2 Sběr dat

Aktuální a relevantní data o spotřebě a výrobě energie, ekonomických ukazatelích a emisích skleníkových plynů v České republice budou sloužit základem pro modelování. V práci pro energetické modelování a analýzu dat energetického mixu byli použity data Českého statistického úřadu (ČSU), Mezinárodní agentury pro energii (IEA), Úřadu pro energetické informace USA (EIA), Organizaci pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD), Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA), studie (BP, 2021) a (Franke, et al., 2022). Technologické parametry, použité při modelování, jsou uvedeny v (Rečka & Ščasný, 2013) a (Krey, et al., 2019).

2.2.3 Vývoj modelu

Po stanovení výchozích parametrů a předpokladů pro energetický a ekonomický systém České republiky byl proveden výpočet modelu a její validace na základě porovnání výsledků oproti historickým datům.

2.2.4 Analýza opatření

Každý scénář politiky byl implementován v MESSAGEix a model byl spuštěn pro generování výsledků navazujících na příslušné scénáře a byla provedena analýza těchto ekonomických, energetických a environmentálních výsledků.

2.2.5 Interpretace výsledků a doporučení

Na základě analýzy scénářů a jejich implikací byly zformulovány závěry ohledně účinnosti různých opatření v rámci zkoumaných politik mitigace klimatických změn v České republice a doporučení pro politické aktéry a zainteresované strany v energetickém a environmentálním sektoru.

2.2.6 Omezení výzkumu

Modelování bylo provedeno dle zjednodušeného referenčního energetického systému. Reálné systémy jsou komplexnější a zahrnují mnohem více prvků a vazeb, což omezuje interpretaci výsledků. Důležitým bude uvést nepřítomnost v modelování těžby primárních energetických zdrojů, ukládání energií, omezení modelování na elektřinu a předpoklad poptávky jako 0,7 hrubého domácího produktu.

Je nutné podotknout, že některé technicko-ekonomické parametry, použité v modelu, mají poměrně rozsáhlou variabilitu dle použitého zdroje. (Krey, et al., 2019)

2.2.7 Formulace MESSAGE

Níže je uveden shrnutý popis nejdůležitějších částí matematické formulace MESSAGE. Kompletní dokumentaci uvádí zdroj (Krey, et al., 2016)

2.2.7.1 Cílová funkce

Cílová funkce základního modelu minimalizuje celkové diskontované náklady systému včetně nákladů na emise, relaxace dynamických omezení (viz rovnici (1)):

$$\begin{aligned}
OBJ &= \sum_{n,y \in Y^M} df_period_y \cdot COST_NODAL_{n,y} & (1) \\
COST_{NODAL_{n,y}} &= \sum_{c,g} resource_cost_{n,c,g,y} \cdot EXT_{n,c,g,y} + \\
&\sum_t \left(inv_cost_{n,t,y} \cdot construction_time_factor_{n,t,y} \cdot \right. \\
&end_of_horizon_factor_{n,t,y} \cdot CAP_NEW_{n,t,y} + \sum_{y^V \leq y} fix_cost_{n,t,y^V,y} \cdot \\
&CAP_{n,t,y^V,y} + \sum_{m,h}^{y^V \leq y} var_cost_{n,t,y^V,y,m,h} \cdot ACT_{n,t,y^V,y,m,h} + \\
&\left(abs_cost_new_capacity_soft_up_{n,t,y} + \right. \\
&level_cost_new_capacity_soft_up_{n,t,y} \cdot inv_cost_{n,t,y} \cdot \\
&CAP_NEW_UP_{n,t,y} + \left(abs_cost_new_capacity_soft_lo_{n,t,y} + \right. \\
&level_cost_new_capacity_soft_lo_{n,t,y} \cdot inv_cost_{n,t,y} \cdot \\
&CAP_NEW_LO_{n,t,y} + \sum_{m,h} \left(abs_cost_activity_soft_up_{n,t,y,m,h} + \right. \\
&level_cost_activity_soft_up_{n,t,y,m,h} \cdot levelized_cost_{n,t,y,m,h} \cdot \\
&ACT_UP_{n,t,y,h} + \sum_{m,h} \left(abs_cost_activity_soft_lo_{n,t,y,m,h} + \right. \\
&level_cost_activity_soft_lo_{n,t,y,m,h} \cdot levelized_cost_{n,t,y,m,h} \cdot \\
&ACT_LO_{n,t,y,h} \left. \right) + \sum_{e \in E(\hat{t})} \hat{e}\hat{t} \cdot emission_scaling_{\hat{e},e} \cdot emission_tax_{n,\hat{e}\hat{t},y} \cdot \\
&EMISS_{n,e,\hat{t},y} + \sum_s land_cost_{n,s,y} \cdot LAND_{n,s,y} + \sum_r relation_cost_{r,n,y} \cdot \\
&REL_{r,n,y} & (2)
\end{aligned}$$

V rovnici (2) $n^L \in N(n)$ jsou uzly n^L , které jsou pod-uzly uzlu n . Podmnožina technologií $t \in T(\hat{t})$ jsou všechny technologie, které patří do kategorie \hat{t} , analogická notace je použita pro emise $e \in E$.

2.2.7.2 Množiny

Model MESSAGE široce využívá koncept množin za účelem popisu prostorových a temporálních parametrů. V Tabulce 1 jsou popsány všechny množiny modelu MESSAGE. Tabulka 1. Množiny v modelu MESSAGE

Originální název	Překlad	Notace	Popis
Node	Uzel	$n \in N$	Regiony, země, uzly sítě
Commodity	Komodita	$c \in C$	Zdroje, elektřina, voda, dostupnost půdy atd.
Level	Úroveň	$l \in L$	Úrovně referenčního energetického systému nebo dodavatelského řetězce (primární, sekundární, ..., užitečné)
Grade	Stupeň	$g \in G$	Stupně kvality zdrojů v odvětví těžby a těžby
Technology [tec]	Technologie	$t \in T$	Technologie, které využívají vstupní komodity k produkci výstupů; v implementaci GAMS se používá zkratka „tec“.
Mode	Režim	$m \in M$	Provozní režimy pro konkrétní technologie
Emission	Emise	$e \in E$	Skleníkové plyny, znečišťující látky atd.
Land_scenario	Půda_scénář	$s \in S$	Scénáře využití půdy (pro emulátor modelu využití půdy)
Land_type	Půda_typ	$u \in U$	Typy využití půdy (např. pole, les, pastviny)
Year	Rok	$y \in Y$	Období označovaná posledním rokem v modelovém horizontu
Time	Čas	$h \in H$	Dílčí roční období (období, dny, hodiny)
Shares	Podíly	$p \in P$	Soubor omezení podílů technologií a komodit
Relation	Vztah	$r \in R$	Názvy generických vztahů (lineární omezení)
Lvl_spatial			Úrovně prostorové hierarchie, např. globální, region, země nebo uzel sítě
Lvl_temporal			Úrovně časové hierarchie, např. rok, roční období, den nebo hodina

Originální název	Překlad	Notace	Popis
Rating	Hodnocení	$q \in Q$	Identifikuje „kvalitu“ potenciálu obnovitelné energie (hodnocení neexpedovatelných technologií ve vztahu k celkovému využití komodity)

Zdroj: Vlastní zpracování dle (Krey, et al., 2016)

2.2.7.3 Rozhodovací proměnné

Primární úlohou rozhodovacích proměnných je zachytit strategická rozhodnutí ekonomických subjektů v reakci na změny v ekonomickém prostředí nebo politické zásahy.

Tabulka 2. Popis rozhodovacích proměnných MESSAGE

Proměnná	Popis
$OBJ \in \mathbb{R}$	Cílová hodnota optimalizačního programu
$EXT_{n,c,g,y} \in \mathbb{R}_+$	Těžba neobnovitelných zdrojů z rezerv
$STOCK_{n,c,l,y} \in \mathbb{R}_+$	Množství na skladě na začátku období
$STOCK_CHG_{n,c,l,y,h} \in \mathbb{R}$	Vstupní nebo výstupní množství do mezičasového skladu zásob komodity
$COST_NODAL_{n,y} \in \mathbb{R}$	Náklady systému na úrovni uzlů v čase
$REN_{n,t,c,g,y,h} \in \mathbb{R}_+$	Aktivita obnovitelných technologií dle stupně
$CAP_NEW_{n,t,y} \in \mathbb{R}_+$	Nově instalovaná kapacita (roční průměr za dobu trvání)
$CAP_{n,t,y,y^v} \in \mathbb{R}_+$	Udržovaná kapacita v roce ročníku
$CAP_FIRM_{n,t,c,l,y,q} \in \mathbb{R}_+$	Kapacita započítávána do firmy (odeslání)
$ACT_{n,t,y^v,y,m,h} \in \mathbb{R}$	Aktivita technologie (podle ročníku, režimu, subročního času)
$ACT_RATING_{n,t,y^v,y,c,l,h,q} \in \mathbb{R}_+$	Pomocná proměnná pro aktivitu přiřazenou konkrétnímu hodnocení bin 1
$CAP_NEW_UP_{n,t,y} \in \mathbb{R}_+$	Uvolnění horního dynamického omezení na novou kapacitu

Proměnná	Popis
$CAP_NEW_LO_{n,t,y} \in \mathbb{R}_+$	Uvolnění nižšího dynamického omezení na novou kapacitu
$ACT_UP_{n,t,y,h} \in \mathbb{R}_+$	Uvolnění horního dynamického omezení aktivity
$ACT_LO_{n,t,y,h} \in \mathbb{R}_+$	Uvolnění nižšího dynamického omezení aktivity
$LAND_{n,s,y} \in [0,1]$	Relativní podíl scénáře využití půdy (pro emulátor modelu využití půdy)
$EMISS_{n,e,\hat{t},y} \in \mathbb{R}_+$	Pomocná proměnná pro agregované emise podle typu technologie
$REL_{r,n,y} \in \mathbb{R}_+$	Pomocná proměnná pro levou stranu vztahů (lineární omezení)
$COMMODITY_USE_{n,c,l,y} \in \mathbb{R}$	Pomocná proměnná pro množství použité komodity na konkrétní úrovni
$COMMODITY_BALANCE_{n,c,l,y,h} \in \mathbb{R}$	Pomocná proměnná pro pravou stranu pomocné COMMODITY_BALANCE
$STORAGE_{n,t,m,l,c,y,h} \in \mathbb{R}$	Stav nabití nebo obsahu úložiště v každém dílčím ročním časovém úseku
$STORAGE_CHARGE_{n,t,m,l,c,y,h} \in \mathbb{R}$	Nabíjení úložiště v každém dílčím ročním časovém úseku (záporné pro vybití)

Zdroj: Vlastní zpracování dle (Krey, et al., 2016)

2.2.7.4 Pomocné proměnné

Ekonomické agenty sice nemají přímý vliv na pomocné proměnné, avšak tyto proměnné popisují důležité charakteristiky systému.

Tabulka 3. Popis pomocných proměnných MESSAGE

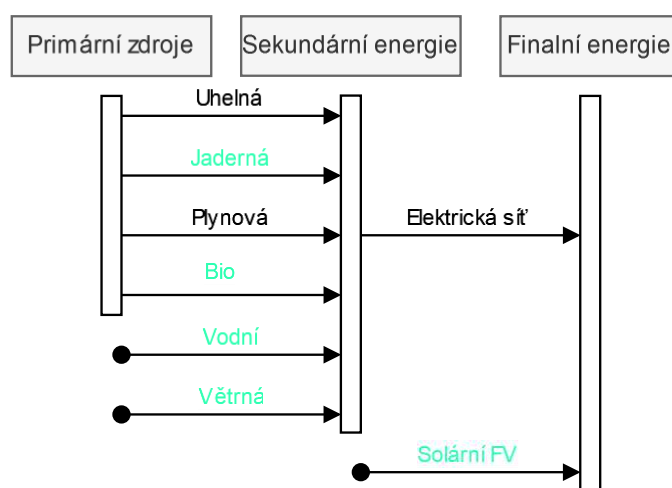
Proměnná	Popis
$DEMAND_{n,c,l,y,h} \in \mathbb{R}$	Úroveň poptávky (v rovnováze s integrací MAKRO)
$PRICE_COMMODITY_{n,c,l,y,h} \in \mathbb{R}$	Cena komodity (nediskontované meze rovnice COMMODITY_BALANCE_GT a rovnice COMMODITY_BALANCE_LT)

$PRICE_EMISSION_{n,\hat{e},\hat{t},y} \in \mathbb{R}$	Cena emisí (nediskontované meze rovnice EMISSION_CONSTRAINT)
$COST_NODAL_NET_{n,y} \in \mathbb{R}$	Systémové náklady na úrovni uzlů očištěné o výnosy/náklady z obchodu s energií
$GDP_{n,y} \in \mathbb{R}$	Hrubý domácí produkt (HDP) v tržních směnných kurzech pro vykazování MAKRO

Zdroj: Vlastní zpracování dle (Krey, et al., 2016)

2.2.8 Schéma referenčního energetického systému

Obrázek 1. Schéma referenčního energetického systému použitého při modelování



Zdroj: Vlastní zpracování

Na schématu z obrázku 1 šipky odpovídají technologiím, které se používá při výrobě elektřiny. Primární zdroje, sekundární, finální energie jsou úrovně referenčního energetického systému. Zelenou barvou jsou označeny ekologičtější technologie výroby. Místo vývozu a dovozu saldo bylo proporcionálně distribuováno mezi použitými v modelu technologiemi.

3 Teoretická východiska

3.1 Přístupy modelování energetického mixu

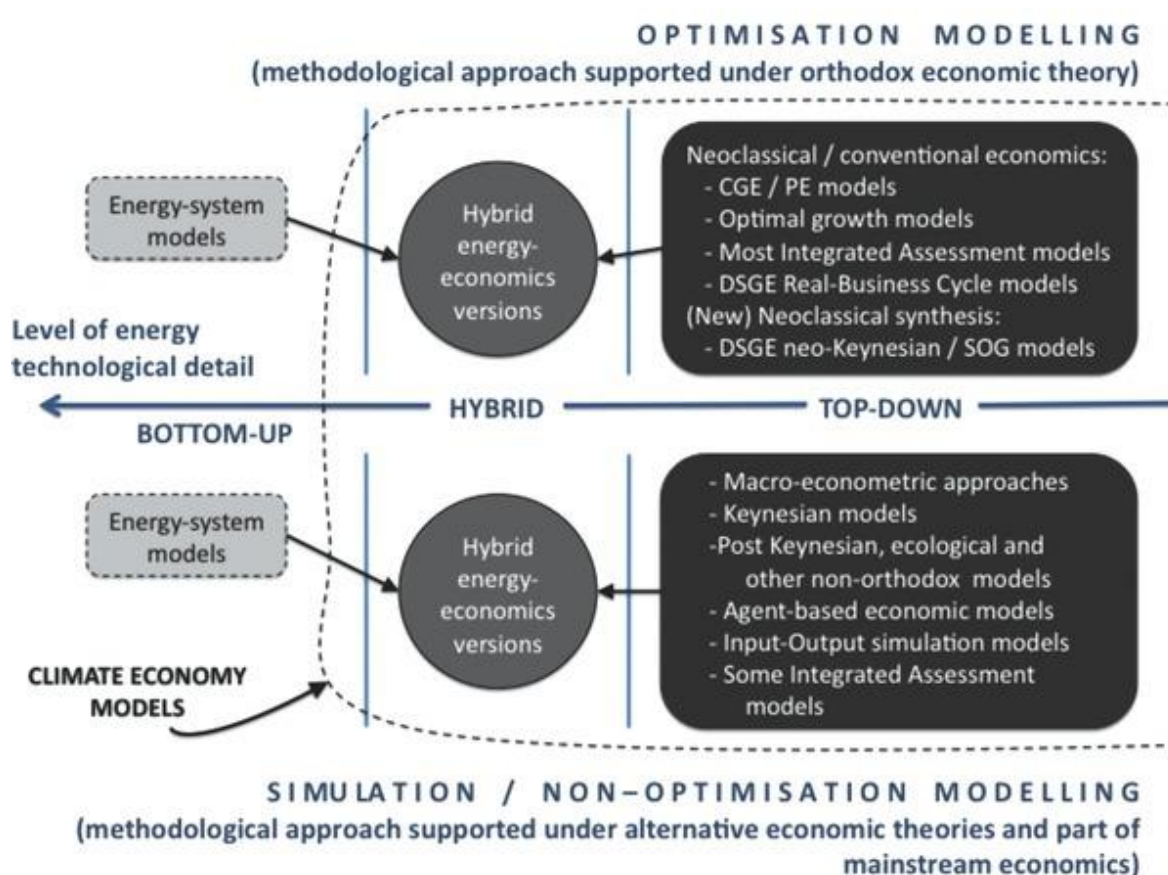
Během literární rešerše byli nalezeny následující způsoby klasifikovat přístupy k modelování energetického mixu v kontextu klimatických změn:

- Dle úrovně detailů a hierarchie (Scriciu, Rezai, & Mechler, 2012)
 - Shora dolů („Top-down“)
 - Sdola nahorů („bottom-up“)
 - Hybridní
- Dle matematických algoritmů, jež jsou základem modelu (Scriciu, Rezai, & Mechler, 2012) (Krey, 2014)
 - Simulační
 - Optimalizační
- Dle časových a prostorových hranic systému (Dodds, Keppo, & Strachan, 2014) (Krey, 2014)
 - S dokonalým předvídaním („Perfect foresight“)
 - Dynamicky rekurzivní („Recursive dynamic“)
 - (Výpočetní) Obecná rovnováha
 - Částečná rovnováha
- Další způsoby (IPCC, 2022)

3.1.1 Dle úrovně detailů a hierarchie

Dle úrovně detailů zdroj (Scriciu, Rezai, & Mechler, 2012) zmiňuje tři přístupy: shora dolů, sdola nahorů a hybridní.

Obrázek 2. Klasifikace modelů dle úrovně detailů a hierarchie



Zdroj: (Scricciu, Rezai, & Mechler, 2012)

Přístup shora dolů reprezentuje agregovanou a globální analýzu, ale přitom ztrácí technologickou diverzitu a často se zaměřuje na interakci uvnitř celého systému, například, interakcí trhu a polických opatření, jenž jsou součástí globálních ekonomických systémů. Integrované hodnoticí modely nejčastěji odpovídají tomuto přístupu. (Scricciu, Rezai, & Mechler, 2012)

Přístup shora dolů zahrnuje více systematických individuálních technologických detailů vybraného omezeného množství konkrétního sektoru hospodářství. Takovéto modely mají tendenci nepočítat s interakcemi mezi sektory nebo technologií a přehlížet interakce s celým systémem. (IPCC, 2022)

Je nutné podotknout, že kvůli odlišným komunitám, zabývajícím se modelováním, a zároveň evoluci modelů klimatických změn směrem k hybridním přístupům, uvedená klasifikace aktuálně nemůže být považována za striktně dichotomickou. (Scricciu, Rezai, & Mechler, 2012)

3.1.2 Dle matematických algoritmů

Dle matematických algoritmů, které jsou základem formulace a výpočtů modelů, se rozlišují modely dvou tříd: simulační a optimalizační. (Krey, 2014)

Simulační modely hodnotí dynamické chování systému a můžou být použity k důvěryhodnému hodnocení výkonu systému při různých souborech klíčových parametrů. Nejčastěji simulační modely vyžadují rozsáhlé znalosti každého parametru z důvodu nutnosti vybrat konkrétní cestu z několika alternativních. (Scrieciu, Rezai, & Mechler, 2012)

Optimalizační modely maximalizují nebo minimalizují cílovou funkci v rámci souboru omezení. Nejčastěji cílová funkce reprezentuje celkové ztráty nebo zisky systému, přičemž soubor omezení pro cílovou funkci můžou reprezentovat omezení reálných systémů, například, omezení toků, přístupnosti k zdrojům a technologiím, finanční a pracovní omezení, aspekty životního prostředí a dalších charakteristik, které může vyžadovat model. (IPCC, 2022)

3.1.3 Dle časových a prostorových hranic systému

Dalším významným klasifikačním bodem je rozdělení dle předpokladu buď dokonalého předvídání nebo rekurzivního dynamického.

Optimalizace v rámci předpokladu dokonalého předvídání spočívá v odvození optimální cesty sady politických opatření, které přivedou k nejlepšímu řešení, a tím pádem řešení modelů takovéto třídy můžou komplikovat implementaci politických opatření, jelikož při takovémto modelování se předpokládá plná informace budoucích stavů systému včetně cen a přístupnosti technologií a zároveň současných a budoucích rozhodnutí. (Dodds, Keppo, & Strachan, 2014)

Rekurzivní dynamické modely, známé jako myopické nebo modely s omezeným předvídáním, poskytují řešení jako cestu, skládající se z posloupnosti kratších cest, přičemž řešení na každém mezikroku se hledá bez informace o budoucích krocích. Tudiž celá cesta řešení je s malou pravděpodobností optimální na celém časovém období. (Krey, 2014)

Modelovací nástroje se také dělí dle plnosti reprezentace ekonomických sektorů a agentů. Pokud model reprezentuje vše ekonomické agenty a jejich interakce, jde o model obecné rovnováhy, jinak při detailnější reprezentaci podmnožiny ekonomických sektorů a agentů jde o model částečné rovnováhy. (IPCC, 2022)

3.1.4 Další způsoby klasifikace

Další způsoby klasifikovat modely zahrnují rozdělení dle klíčových charakteristik: (IPCC, 2022)

- Dle geografických jednotek a rozsahu
 - Model může být podnárodní, národní, regionální až po globální
 - Dokonce modely se stejným geografickým pokrytím mohou se lišit kvůli hloubce rozdělení a počtu regionů
 - Zvlášť modely použití půdy jsou citlivé na hlubší formulaci struktury využití prostoru pro agrární účely
- Dle časového horizontu
 - Krátkodobé modely mohou predikovat budoucnost na několik let, zatímco horizont predikcí dlouhodobých modelů může dosahovat konce století
- Dle proměnných životního prostředí
- Dle technologických portfolií
- Dle socioekonomických předpokladů (Hardt & O'Neill, 2017)

3.2 Energetické modelování v ČR

3.2.1 Přehled modelů

Energetické modelování v ČR bylo realizováno pomocí následujících modelů:

- TIMES-CZ (Centrum pro otázky životního prostředí University Karlovy (UK), 2015)
- EFOM-ENV (Hospodářská Komora České Republiky (HKČR), 2012)
- MESSAGE (Rečka & Ščasný, 2013)
- MAES (E. G. Ú. Brno, 2009)
 - Sekce provozu a rozvoje elektrizační soustavy dlouhodobě vyvíjí a rozšiřuje komplexní modelový systém pro simulaci technických i ekonomických procesů v elektrizační soustavě – MAES. Modelový systém MAES není určen ke komerčnímu prodeji a je využíván při řešení projektů zadaných sekci Provozu a rozvoje el. soustavy v úzké vazbě na potřeby zákazníků.
- PLEXOS (Ministerstvo Průmyslu a Obchodů (MPO), 2023)

- Na základě memoranda o spolupráci mezi Centrem pro otázky životního prostředí UK a společností ČEPS, a.s., validuje ČEPS výsledky navrženého optimálního mixu výroby elektřiny modelem TIMES-CZ z hlediska zdrojové přiměřenosti.
- E3ME (Ministerstvo Průmyslu a Obchodů (MPO), 2023)
 - Model vychází z post-keynesovské ekonomické teorie a umožňuje zachytit jak krátkodobé dynamické změny, tak konvergenci k dlouhodobému trendu. Difuze inovací a volba mezi technologiemi flexibilně reaguje na změnu cen a je zakomponována v samostatných modulech, které umožňují lepší reprezentaci rozvoje nových technologií a volby mezi nimi.
- DASMODO (Ministerstvo Průmyslu a Obchodů (MPO), 2023)
 - Statický mikrosimulační optimalizační model, který umožňuje odhadnout sociální dopady politik a opatření podle příjmových decilů českých domácností.

3.2.2 TIMES-CZ

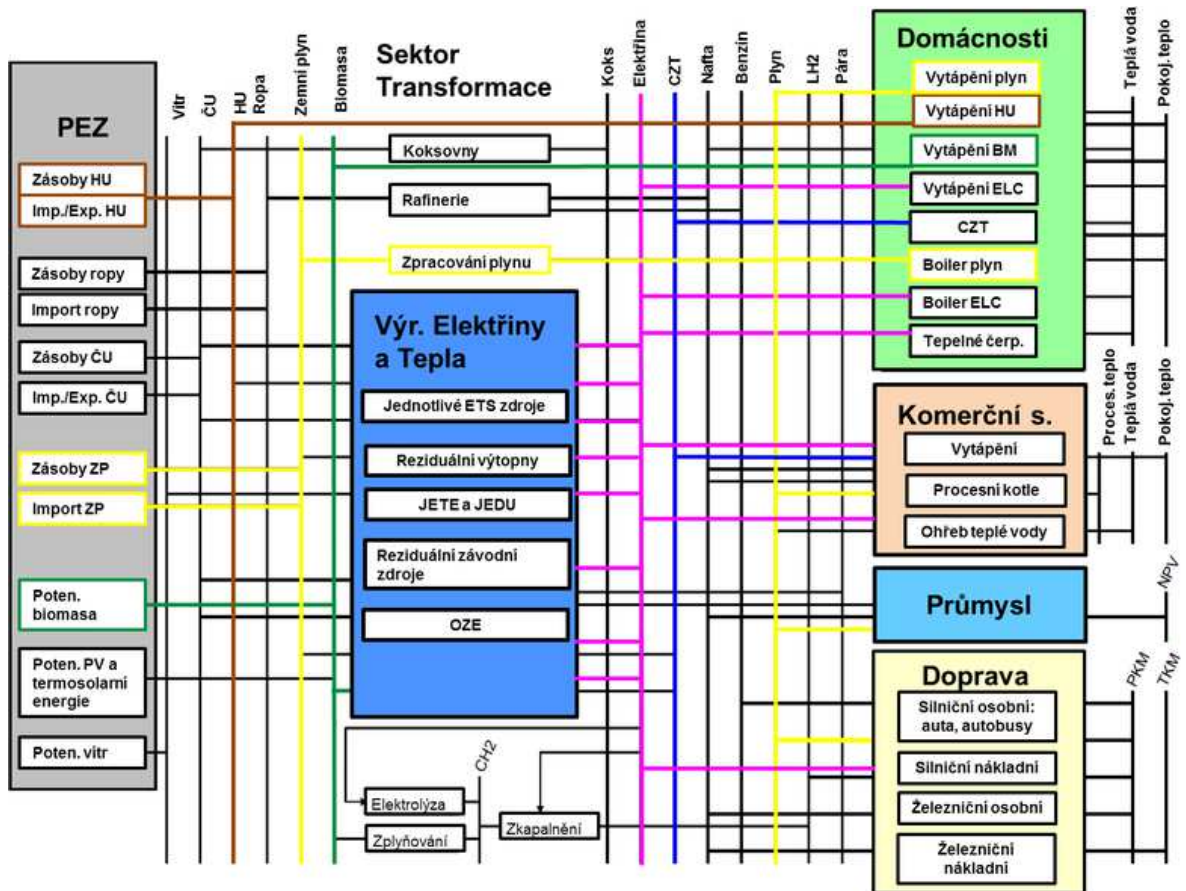
TIMES-PanEU je energetický, technologicky orientovaný model využívající modelový generátor TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) vyvinutý v rámci Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) v Mezinárodní energetické agentuře (IEA). (Centrum pro otázky životního prostředí University Karlovy (UK), 2015)

Panevropský model TIMES-PanEU je sestavený Institutem energetické ekonomie a racionálního užití energie (IER) ze Stuttgartské univerzity. (Capros, et al., 2014)

Úplný popis generátoru modelů TIMES a jeho objektivní funkce je uveden v dokumentaci pro model TIMES. (Loulou, Remne, Kanudia, Lehtilä, & Goldstein, 2005)

Model TIMES-CZ je nejaktuálnější z modelů, používaných pro modelování energetického mixu ČR.

Obrázek 3. Schéma referenčního energetického systému TIMES-CZ



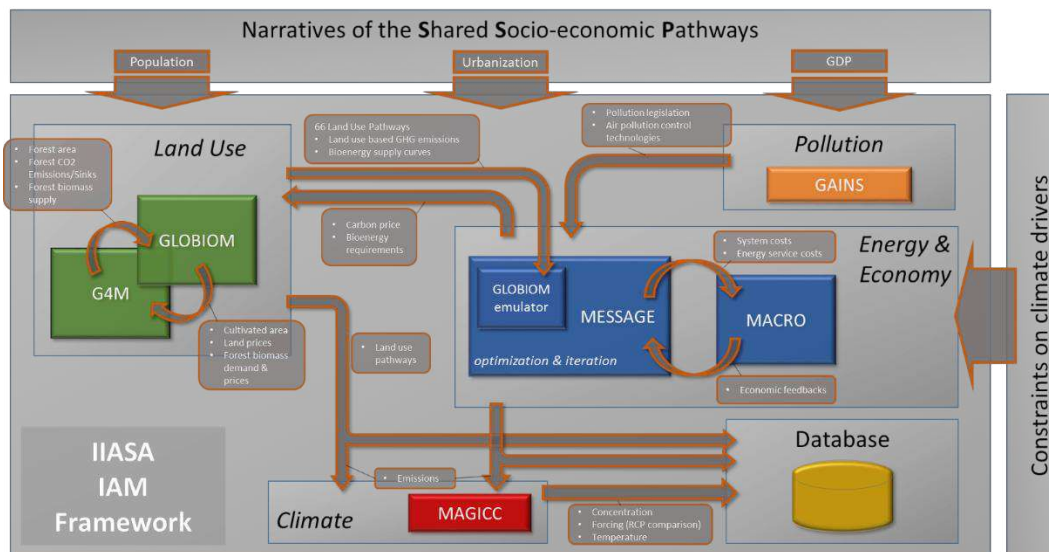
Zdroj: (Centrum pro otázky životního prostředí University Karlovy (UK), 2015)

3.3 MESSAGEix

Messageix je veřejně přístupný modul, který je součástí širšího modelovacího rámce (frameworku) IISA-IAM, kam patří:

- MESSAGE – energetický model
- GLOBIOM – model použití půdy
- MACRO – ekonomický model
- MAGICC – klimatický model
- GAINS – model znečištění ovzduší

Obrázek 4. Modelovací rámec IISA-IAM

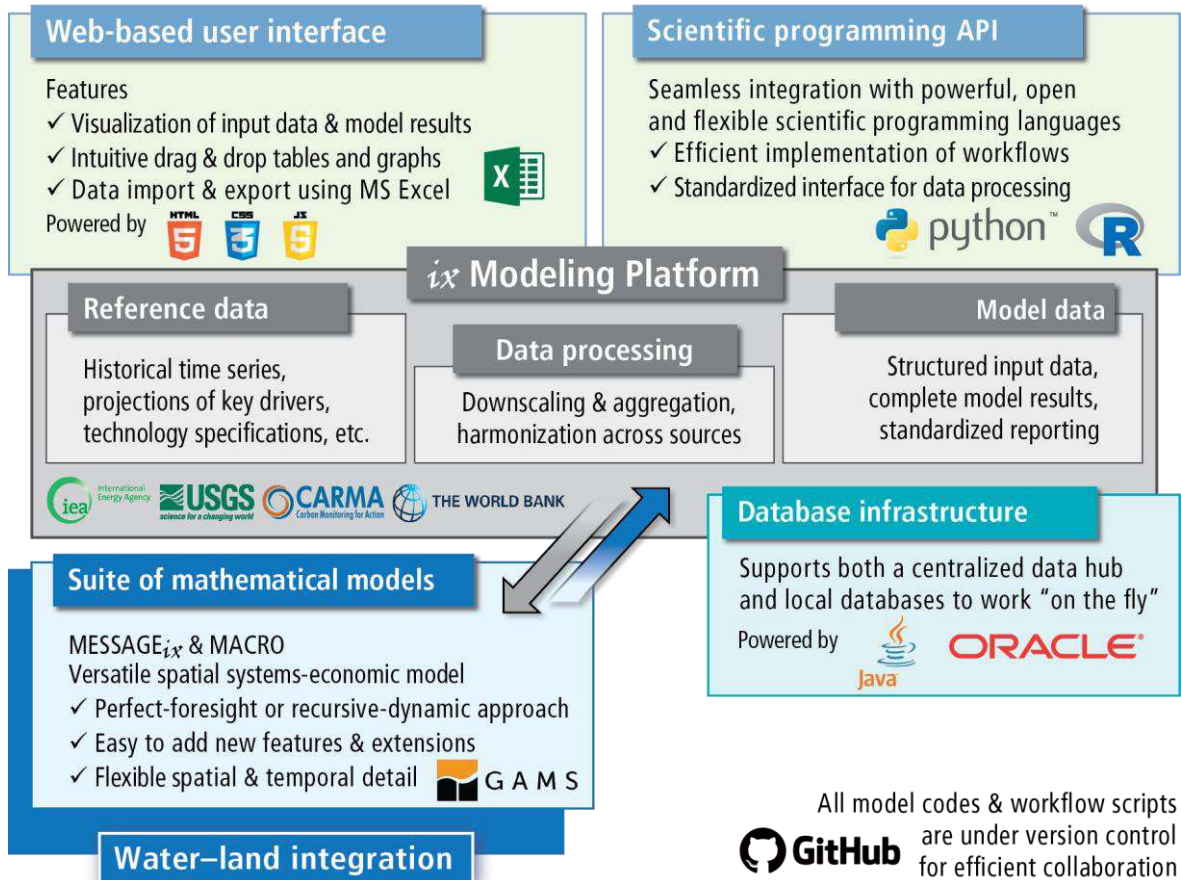


Zdroj: (Fricko, et al., 2017)

Samotný modul MessageIX zahrnuje modely MESSAGE, MACRO a navíc má v sobě emulátor GLOBIOM, takže pokrývá to nejdůležitější v základním modelování energetického mixu. MessageIX disponuje dvěma modelovacími algoritmy: dokonalé předvídavosti („perfect foresight“) a dynamické rekurzivní („dynamic-recursive“). (IIASA Energy, Climate, and Environment (ECE) Program, 2018)

Přístup k modulu je zajištěn pomocí modelovací platformy IX, která má realizaci Application Programming Interface (API) v jazycích R a Python a poskytuje import a export dat z a do MS Excelu, vizualizaci dat a používá kód GAMS pro definici a výpočty modelovacích algoritmů.

Obrázek 5. Integrace MESSAGE a modelovací platformy IXMP



Zdroj: (Huppmann, et al., 2019)

Formulace modelů MESSAGE, MACRO a spoje MESSAGE-MACRO je realizována v jazyce GAMS.

Dle klasifikací, uvedených v předchozí kapitole, model MESSAGE-GLOBIOM spadá do následujících kategorií:

- Zdola nahoru (bottom-up)
- Optimalizační
- Výpočetní všeobecná rovnováha
- Dle nastavení buď s dlouhodobým předvídaním nebo rekurzivní dynamická

Model MESSAGE byl použit pro aktualizaci Vnitrostátního plánu ČR v oblasti energetiky a klimatu. (Ministerstvo Průmyslu a Obchodu (MPO), 2023)

3.4 Koncepční rámec

Hlavním dokumentem, vztahujícím k politice ČR v oblasti energie, je vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu. (International Energy Agency (IEA), 2021)

Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu (NKEP) je zpracována na základě požadavku nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1999 o správě energetické unie a opatření v oblasti klimatu a obsahuje cíle a politiky ve všech pěti rozměrech energetické unie na období 2021-2030 s výhledem do roku 2050. Stěžejní část Vnitrostátního plánu tvoří nastavení příspěvku ČR ke klimaticko-energetickým cílům EU v oblasti snižování emisí, zvyšování podílu obnovitelných zdrojů energie a zvyšování energetické účinnosti. Struktura a náležitosti Vnitrostátního plánu respektují výše zmíněné nařízení. (Ministerstvo Průmyslu a Obchodů (MPO), 2023)

Aktualizace tohoto dokumentu v roce 2023 uvádí následující rozměry, dle kterých jsou stanoveny politiky a cíle:

- Snižování emisí uhlíků
- Energetická účinnost
- Energetická bezpečnost
- Vnitřní trh s energií
- Výzkum, inovace a konkurenceschopnost

Vnitrostátní plán uvádí, že ČR se zavázala snížit emise skleníkových plynů o 55 % do roku 2030 a dosáhnout klimatické neutrality do roku 2050. Cílem je snížit podíl fosilních paliv na spotřebě primární energie na 50 % do roku 2030 a na 0 % do roku 2050. Modelovaný v rámci Vnitrostátního plánu scénář ukazuje, že tyto cíle jsou dosažitelné při nastavení ambiciózních politik a opatření.

Dalším důležitým dokumentem, na který odkazuje i Vnitrostátní plán, je Státní energetická koncepce, schválená v roce 2015. V rámci této koncepce se identifikuje pět strategických priorit, které mají přispět k plnění vrcholových cílů a mezi kterými figuruje i zvyšování energetické účinnosti (Ministerstvo Průmyslu a Obchodu (MPO), 2014):

- vyvážený mix primárních energetických zdrojů;
- zvyšování energetické účinnosti národního hospodářství;
- rozvoj síťové infrastruktury ČR, posílení mezinárodní spolupráce a integrace trhů s elektřinou a plynem;
- podpora výzkumu, vývoje a inovací;

- zvýšení energetické bezpečnosti a odolnosti ČR.

Vnitrostátní plán odkazuje i na další dokument – Politiku ochrany klimatu z roku 2017. V tomto dokumentu jsou uvedena politická opatření, která patří do oblasti působnosti Ministerstva Životního Prostředí. Politika ochrany klimatu stanoví 41 opatření, které je možné shrnout dle následujících skupin (Ministerstvo Životního Prostředí ČR (MŽP), 2017):

- Politiky a opatření vedoucí ke snížení emisí napříč sektory (průřezová opatření), jejichž velká část je věnována obchodování emisemi
- Opatření vůči energetice, zaměřené na zvýšení podílů obnovitelných zdrojů energie v energetickém mixu, plánování vývoje jaderné energetiky, omezení přístupnosti spalovacích energetických zdrojů, snížení energetické náročnosti v sektorech energetiky a průmyslu, zvýšení energetické účinnosti
- Doprava: opatření na stimulaci využití alternativních pohonů včetně nákupu příslušných vozidel, rozvoj šetrných způsobů dopravy
- V rámci zemědělství a lesnictví jsou naplánována opatření na ochranu půdy, podporu zalesňování, ekologického zemědělství, bioplynových stanic, využití obnovitelných zdrojů energie.
- Realizace plánu odpadového hospodářství
- Opatření skupiny mezinárodní ochrany klimatu a rozvojové spolupráce zahrnují alokaci prostředků na realizaci opatření mezinárodní ochrany klimatu
- Podpora výzkumu a vývoje, zahrnující mimo jiné aktualizaci vzdělávacích programů, osvětu v oblasti čisté mobility a začlenění environmentálního značení (typu I a III), EMAS a Čistší produkci do dotačních programů
- Podpůrná opatření, zaměřená na implementaci, monitoring a vyhodnocování politik

4 Vlastní práce

4.1 Analýza dat energetického mixu – neobnovitelné zdroje

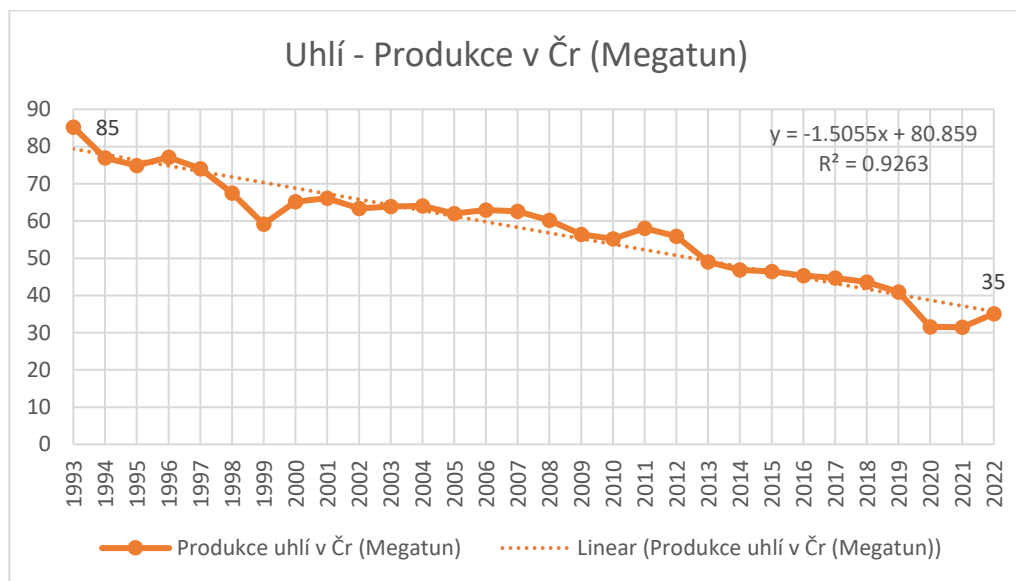
4.1.1 Uhlí

Česká republika disponuje významnými potvrzenými zásobami uhlí. Dle studie z roku 2021, na území ČR jsou 3538 miliony tun, z nichž 2458 činí zásoby hnědých uhlí a 1080 – zásoby černých. Co se týká potenciálu tohoto zdroje, ten je ohodnocen 9522 megatun pro hnědé uhlí a 16503 megatun pro černé. (Franke, et al., 2022)

Vzhledem k produkci, hnědé uhlí činí 29,5 megatun, černé – 2,1 megatun, celkem 31.6 megatun. (Franke, et al., 2022) Potvrzených zásob uhlí dle poměru zásob k aktuální spotřebě by stačilo na více než 100 let. (BP, 2021)

Data byla zkontrolována porovnáním s dalším zdrojem, který odkazuje na Pražskou energetickou. (United States Energy Information Administration (EIA), 2024)

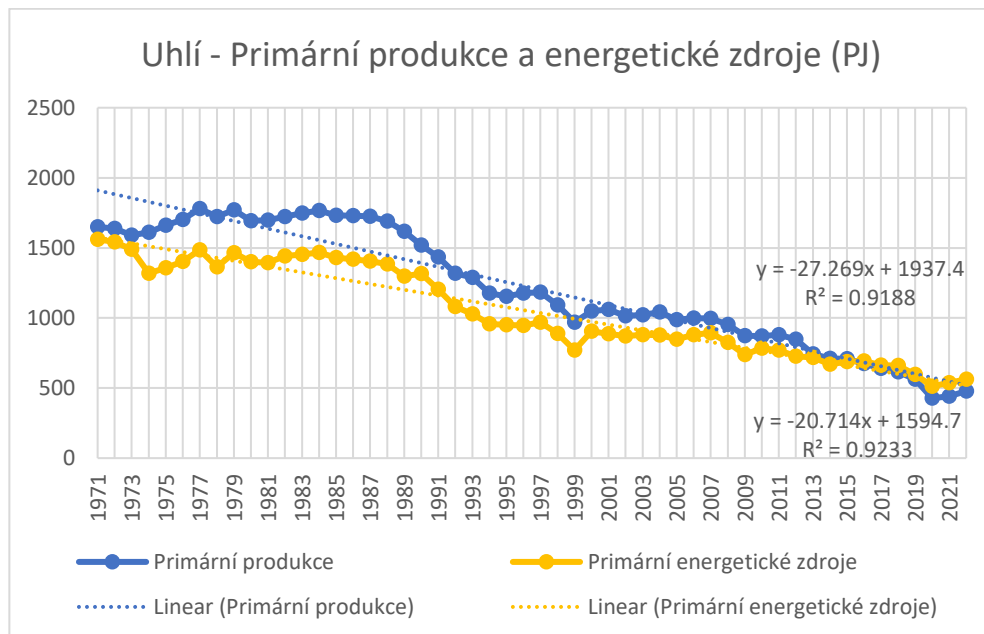
Graf 1. Uhlí – Produkce v ČR (1993–2024)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (United States Energy Information Administration (EIA), 2024)

Produkce uhlí od roku 1993 výrazně poklesla – téměř o třetinu: z 85 megatun do 35 megatun v roce 2022. Trend se dobře popisuje lineární závislostí s koeficientem determinace 0.9263 a ukazuje meziroční pokles produkce o 1.5055 PJ.

Graf 2. Uhlí – Primární produkce a energetické zdroje (1971–2022)



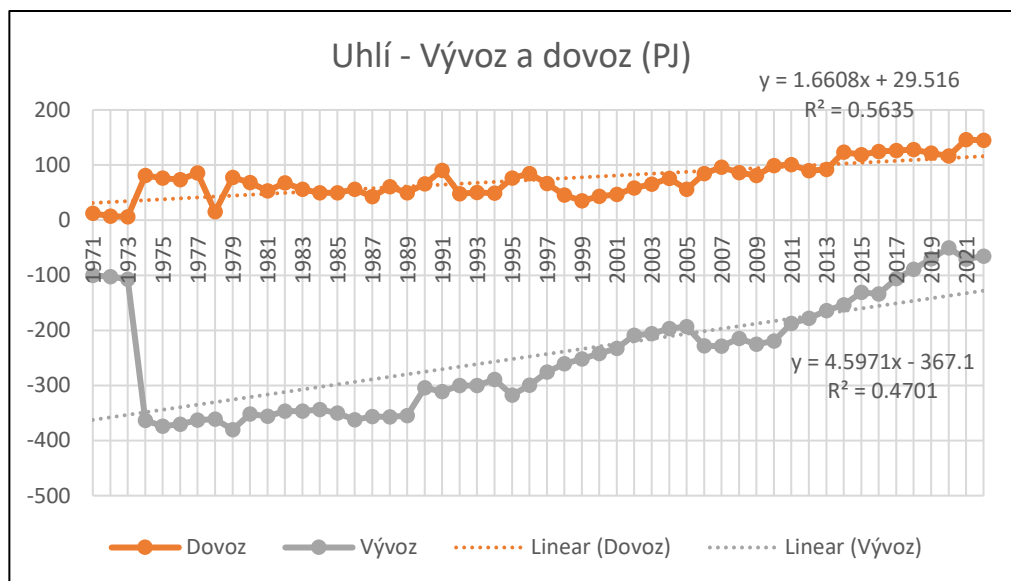
Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Vzhledem k primární produkci a primárních energetických zdrojů (Total Energy Supply), uhlí pořád jsou nejvýznamnějším zdrojem, i když produkce výrazně poklesla z maxima 1799 PJ v roce 1979 do 477 PJ v roce 2022.

Primární produkce dle lineární trendové křivky klesá o 27,269 PJ meziročně, primární energetické zdroje – o 20,7144 PJ meziročně. Obě křivky mají významné koeficienty determinace – respektive 0,9188 a 0,9233.

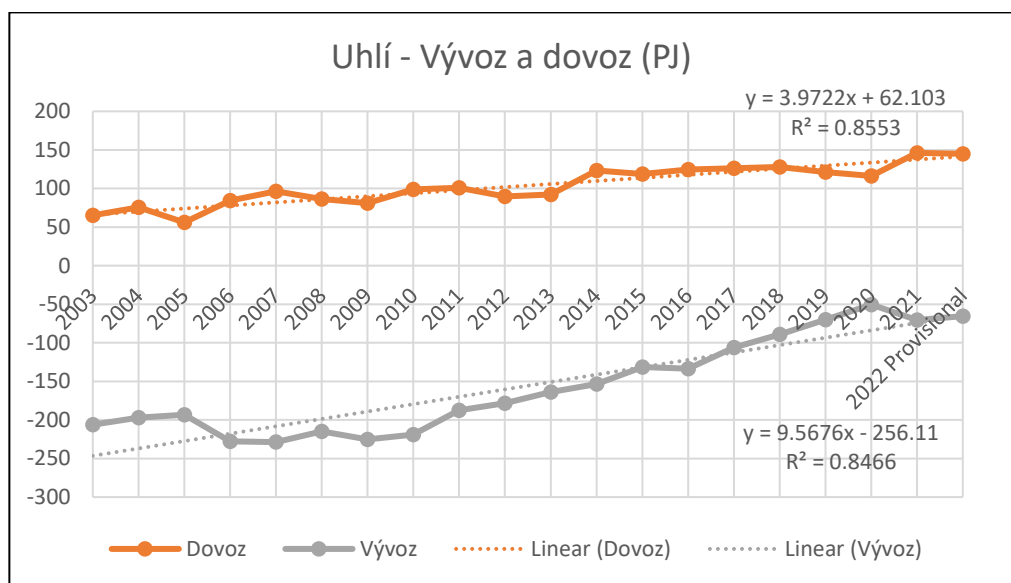
Jelikož Česká republika nedostatek uhlí nemá, dovoz a vývoz jsou řádově menší, než primární produkce:

Graf 3. Uhlí – Vývoz a dovoz (1971–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Graf 4. Uhlí – Vývoz a dovoz (2003–2022)



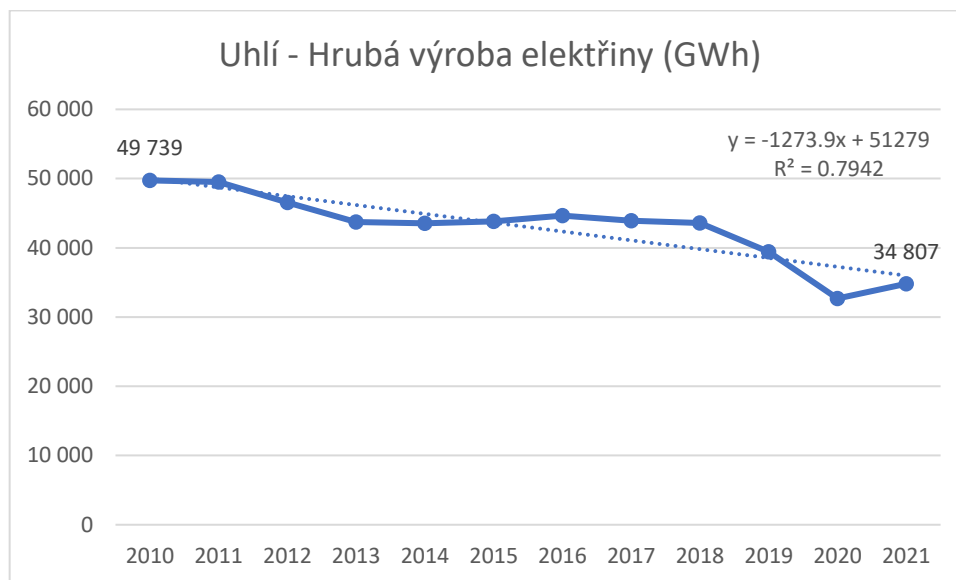
Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Vývoz od roku 1979 klesal z maxima 380 PJ do 51 PJ v roce 2020, potom však narostl na 65 PJ. Dovoz od roku 1999 naopak rostl, od 35 PJ do 145 PJ v roce 2022.

Pokusy o vyhlazení na celém souboru přivedly k nespolehlivým hodnotám koeficientu determinace v řadu 0.5, takže soubor byl zkrácen na 20 let pozorování, což přivedlo ke zlepšení nárůstu koeficientu determinace na 0,8553 pro dovoz a 0.8466 pro vývoz. Tím

pádem je možné očekávat, že vývoz bude dál narůstat o 3.9722 PJ meziročně a dovoz bude klesat o 9.5676 PJ meziročně.

Graf 5. Uhlí – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)



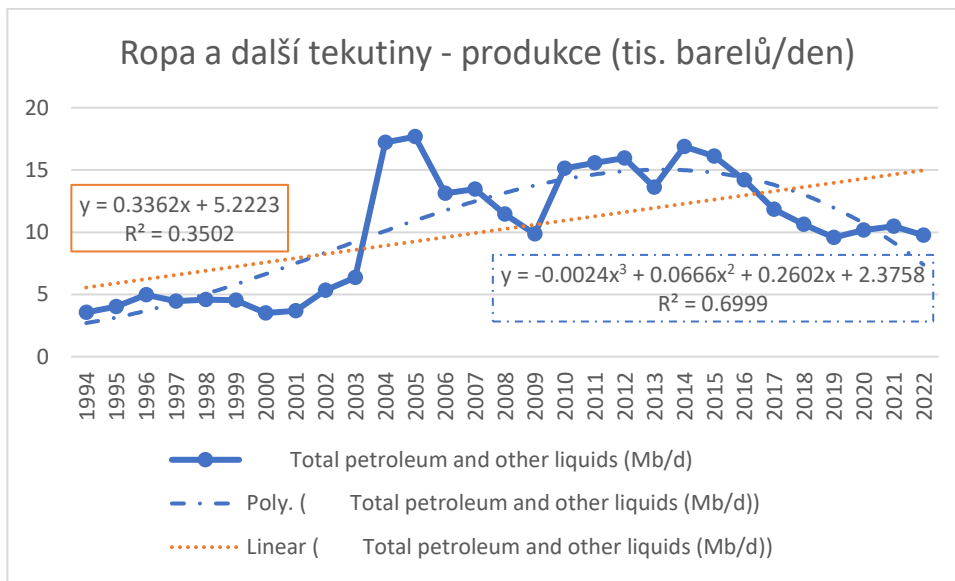
Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Výroba elektřiny poklesla z 49739 GWh v roce 2010 na 34807 GWh v roce 2021. Ten pokles je poměrně dobře popsán lineární závislostí s koeficientem determinace 0,7942, takže meziroční pokles je zhodnocen 1273,9 GWh.

4.1.2 Ropa

Na rozdíl od uhlí, ČR nedisponuje významnými rezervy ropy. Produkce v roce 2020 činila 0.1 megatun, což je desetina od rezerv a zbytek potenciálu byl zhodnocen 29 megatuny (Franke, et al., 2022).

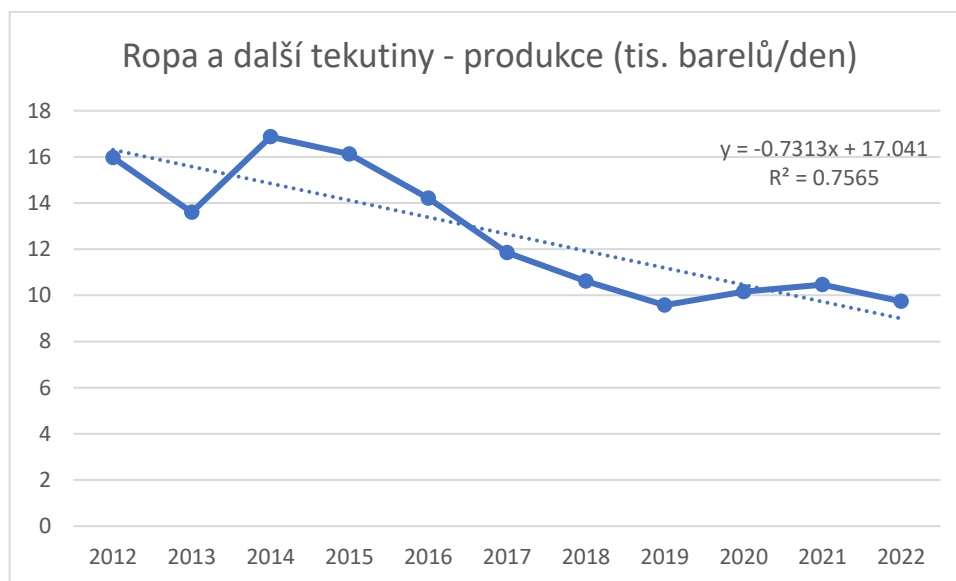
Graf 6. Ropa a další tekutiny – produkce (1994–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (United States Energy Information Administration (EIA), 2024)

Fakticky výroba ropy ztrojnásobila v roce 2004 z 6 na 18 barelů denně. Od této doby však poklesla na 10 barelů/den. Hodnota koeficientu determinace 0,3502 pro lineární trendovou křivku naznačuje, že tento druh modelu vysvětluje pouhou třetinu rozptylu. Pro dosažení vyhovující hodnoty 0,7 byl použit polynomiální model s třemi stupni volnosti. Prudký nárůst v letech 2004-2005 a následný pád až do roku 2009 nelze vysvětlit lineární závislostí.

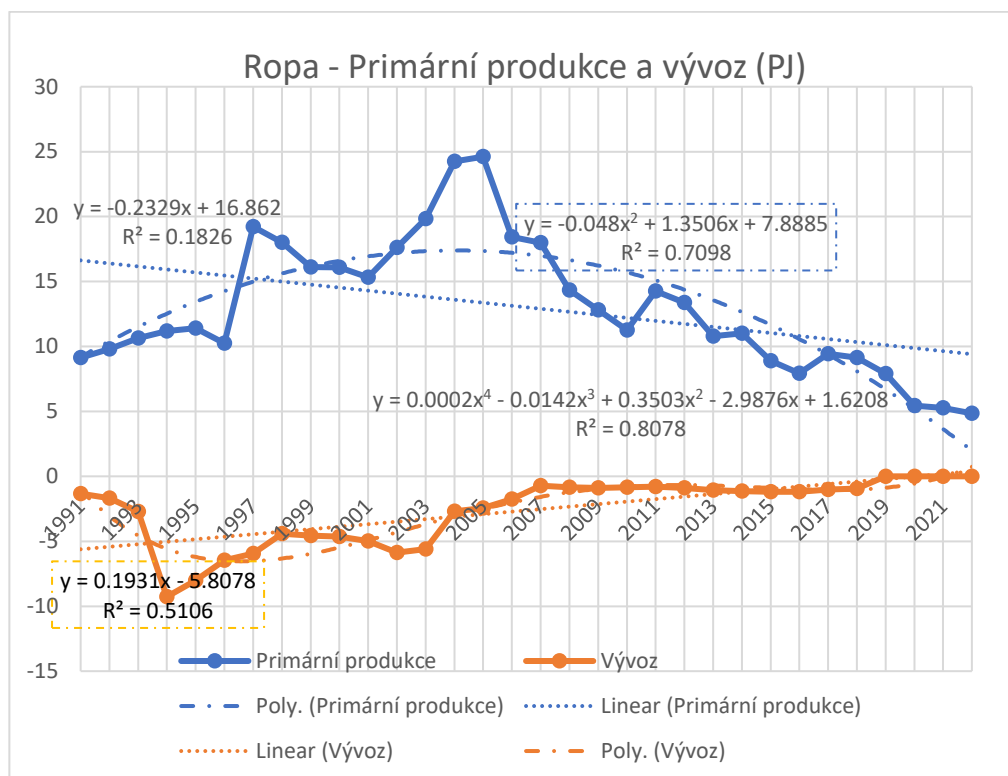
Graf 7. Ropa a další tekutiny – produkce (2012–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (United States Energy Information Administration (EIA), 2024)

Nicméně, data za posledních 10 let se poměrně dobře popisují lineární trendovou křivkou s koeficientem determinace 0,7565. Dle této trendové křivky meziroční pokles je 0,7313 tisíc barelů za den.

Graf 8. Ropa – Primární produkce a vývoz (1991–2022)



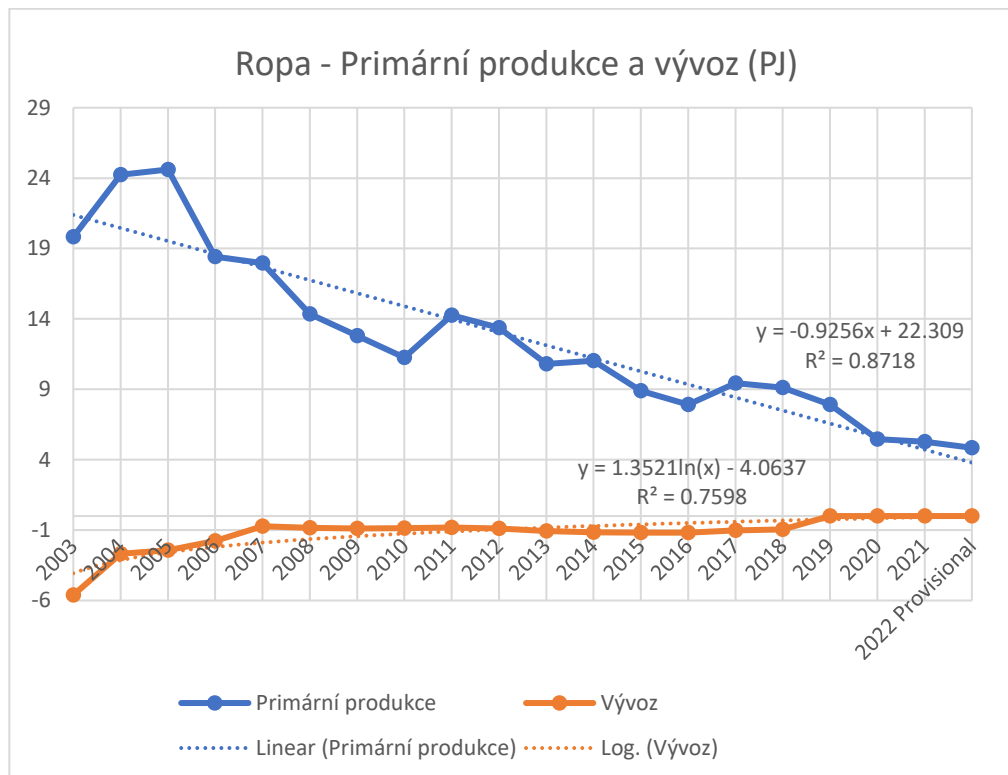
Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Na rozdíl od uhlí, primární produkce ropy řadově odpovídá vývozu. Oba ukazatele od roku 2004 klesají, přičemž žádný vývoz od roku 2019 už není.

Pokusy o popis lineární trendovou křivkou na celém časové období nebyly úspěšné. V případě primární produkce koeficient determinace dosáhl 0,1826, takže takovýto model by byl spíše škodlivý než užitečný, ale použití polynomiální trendové křivky přivedlo k solidní hodnotě 0,7098, kvůli vysvětlení nárůstu produkce do roku 2004 a poklesu od roku 2005.

Co se týká vývozu, lineární trendová křivka ukazuje srovnatelný s průměrem výsledek, vyjádřený hodnotou koeficientu determinace 0,5106. Vylepšit tento výsledek se podařilo použitím polynomiální trendové křivky se stupně volnosti 4 s dosažením hodnoty koeficientu determinace 0.8078, jelikož se lineární závislostí nepopisuje nárůst vývozu na začátku 90. let, následný pokles, zastavení na hodnotě 1 od roku 2007 do roku 2019, kdy vývoz dosáhl nulové hodnoty. Dokonce stupeň volnosti 3 nebyla úplně dostačující a vykazovala skromnou hodnotu koeficientu determinace 0,66.

Graf 9. Ropa – Primární produkce a vývoz (2003–2022)

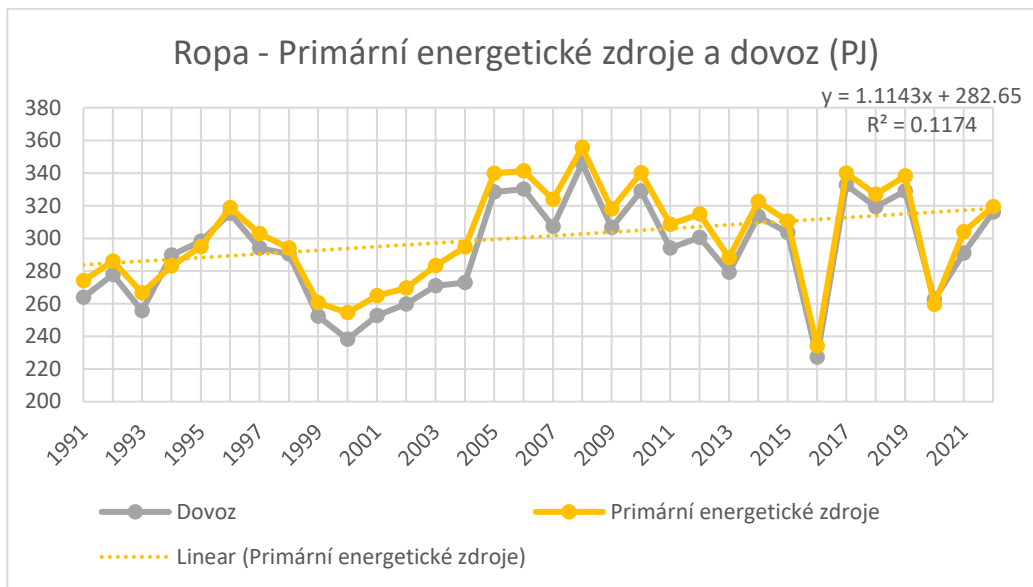


Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Lineární trendová křivka úspěšně popisuje primární produkci ropy za poslední 10 let s koeficientem determinace 0,8718. Meziroční pokles produkce je zhodnocen 0,9256 PJ.

Vzhledem k tomu, že se vývoz v rocích 2007-2019 rovná 1 a po 2019 – nule, byla zvolena logaritmická trendová křivka, která má významný koeficient determinace 0,7598. Nárůst kvality křivky je možný, ale vyžaduje další stupeň volnosti.

Graf 10. Ropa – Primární energetické zdroje a dovoz (1991–2022)

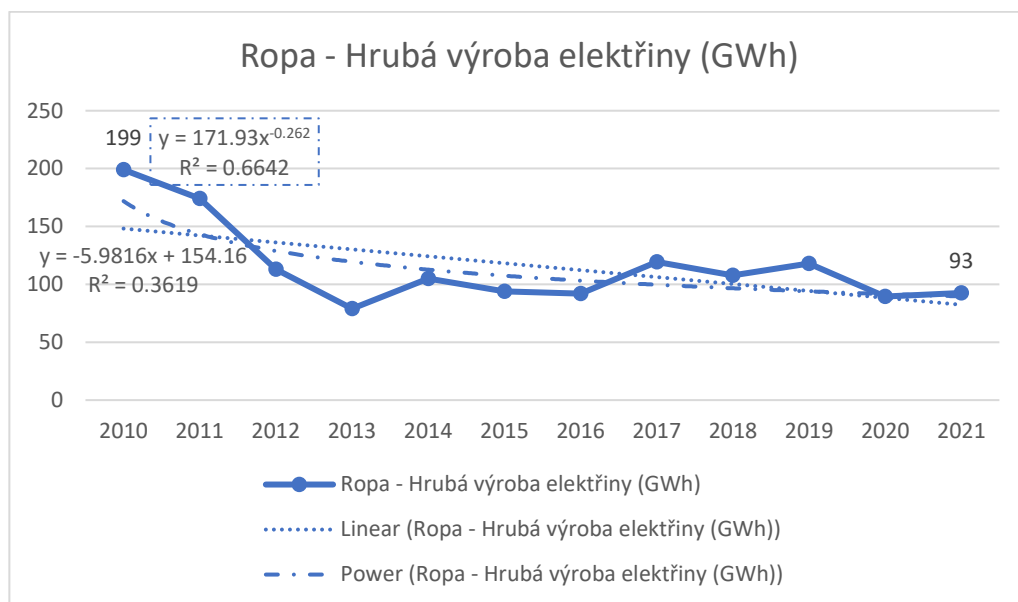


Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Téměř celé primární energetické zdroje jsou závislé na dovozu, přičemž hodnoty jsou řadově vyšší než hodnoty primární produkce. Například, v roce 2022 primární energetické zdroje byly zhodnoceny 319 PJ, z nichž 316 PJ činí dovoz. Primární produkce je zhodnocena o patnáctkrát menší hodnotou – 5 PJ.

Lineární trendová křivka dle koeficientu determinace 0,1174 vysvětluje jenom desetinu rozptylu. Pokusy o použití exponenciální, polynomiální, logaritmické křivky nepřivedly k vyhovujícím hodnotám koeficientu determinace.

Graf 11. Ropa – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Ropa se používá j výrobě elektřiny s dlouhodobě klesajícím trendem. V roce 2021 bylo vyrobeno pouhých 93 GWh, zatímco v roce 2010 byl vyroben více než dvojnásobek – 199 GWh.

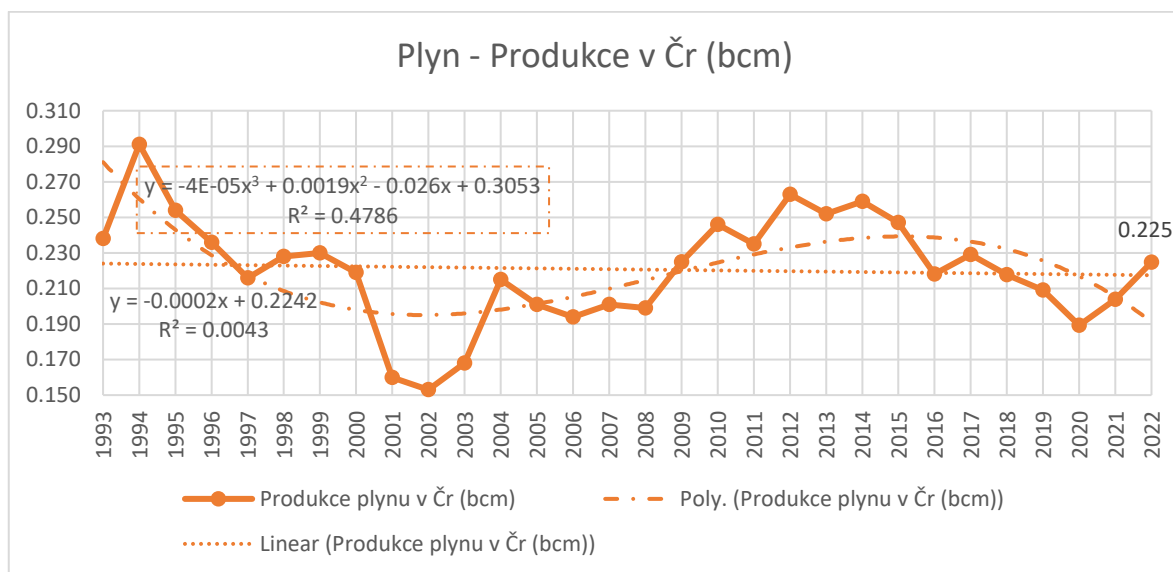
Lineární trendová křivka popisuje výrobu elektřiny s nevysokým koeficientem determinace 0,3619 a hodnotí meziroční pokles 5,9816 GWh. Při stejném počtu stupňů volnosti nejlépe popisuje data mocninná trendová křivka s koeficientem determinace 0,6642.

Výroba elektřiny pomocí této technologie z důvodu malého a dlouhodobě klesajícího produkovaného množství nebyla zahrnuta do modelu.

4.1.3 Plyn

Česká republika v roce 2020 vyrobila 0.2 bcm zemního plynu, přičemž z celkového potenciálu 202 bcm zůstalo 182 bcm, což znamená, že většina není vyčerpána, ale z tohoto potenciálu pouhých 4 bcm jsou fakticky přístupné (Franke, et al., 2022), což je méně než dovoz plynu za jeden rok (United States Energy Information Administration (EIA), 2024).

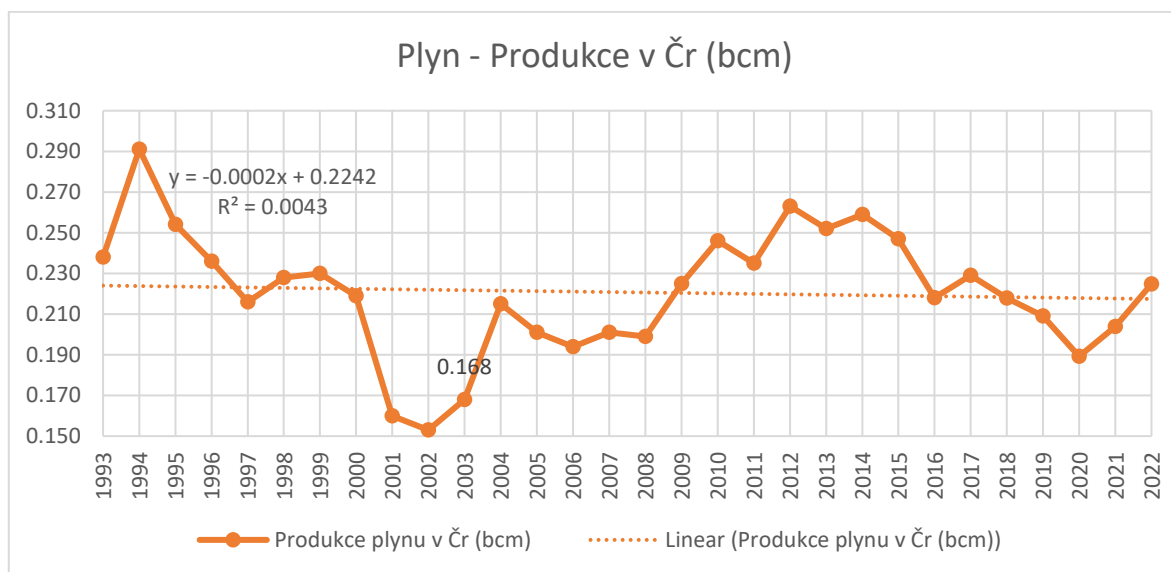
Graf 12. Plyn – Produkce v ČR (1993–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (United States Energy Information Administration (EIA), 2024)

Historicky produkce plynu v ČR během posledních 30 let fluktovala kolem 0.2 bcm. Lineární trendová křivka má nevýznamný koeficient determinace 0,0043 a predikuje téměř nulovou meziroční změnu. Významné hodnoty koeficientu determinace dosahuje polynomiální trendová křivka, která znázorňuje pokles do roku 2002, nárůst do roku 2012 a zase pokles.

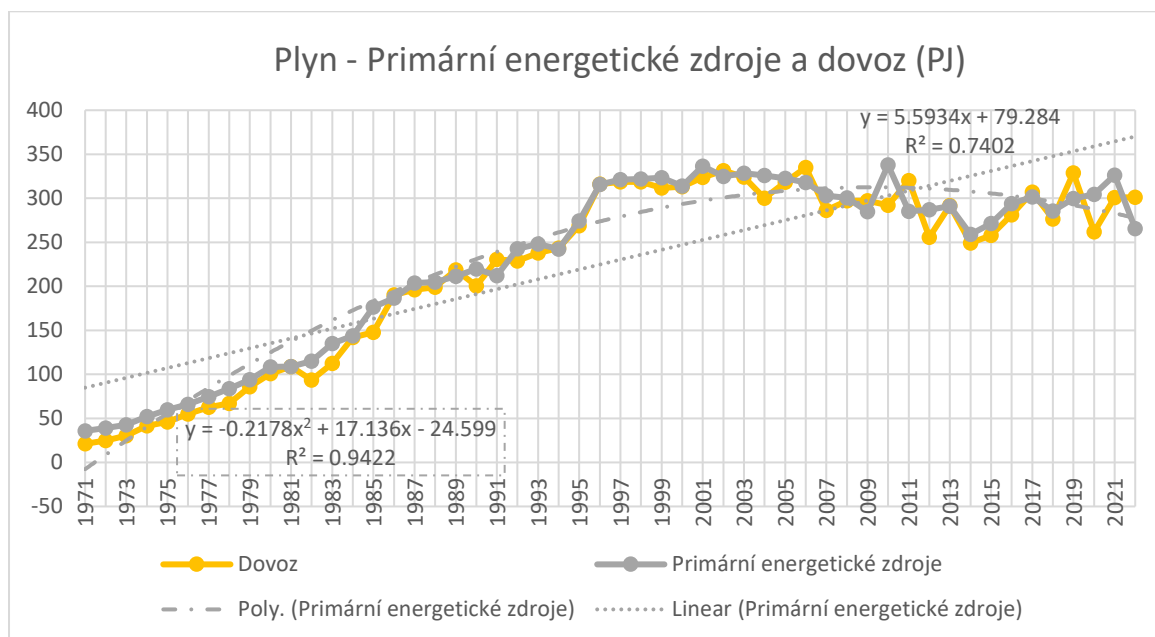
Graf 13. Plyn – Produkce v ČR (2012–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (United States Energy Information Administration (EIA), 2024)

Omezení časového období právě do posledních deseti let přináší solidní hodnotu koeficientu determinace 0,7042, takže dle lineárního modelu produkce plynu klesá o 0,0061 bcm ročně, ale je nutné upozornit, že poslední 3 roky produkce rosla.

Graf 14. Plyn – Primární energetické zdroje a dovoz (1971–2022)

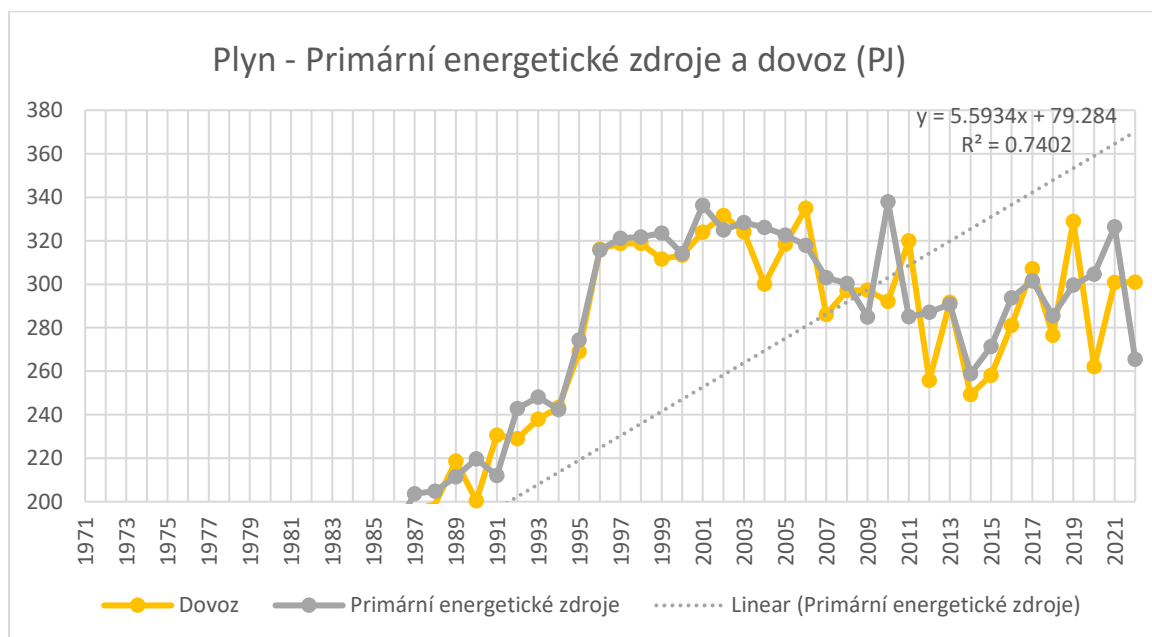


Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Z grafu primárních energetických zdrojů a dovozu je patrné, že jejich hodnoty jsou téměř nerozlišovatelné, což reprezentuje dovozní závislost na tomto zdroji.

I když lineární model dosahuje poměrně velké hodnoty koeficientu determinace 0,7402, trendová křivka se oddaluje od reálných hodnot blízko k současnosti. Polynomiální křivka s dvěma stupně volnosti dosahuje mimořádné hodnoty 0,9422 a tím pádem zachycuje otočení trendu kolem roku 2000. Ale detailnější zkoumání ukazuje, že ten trend zase otočil o deset let později.

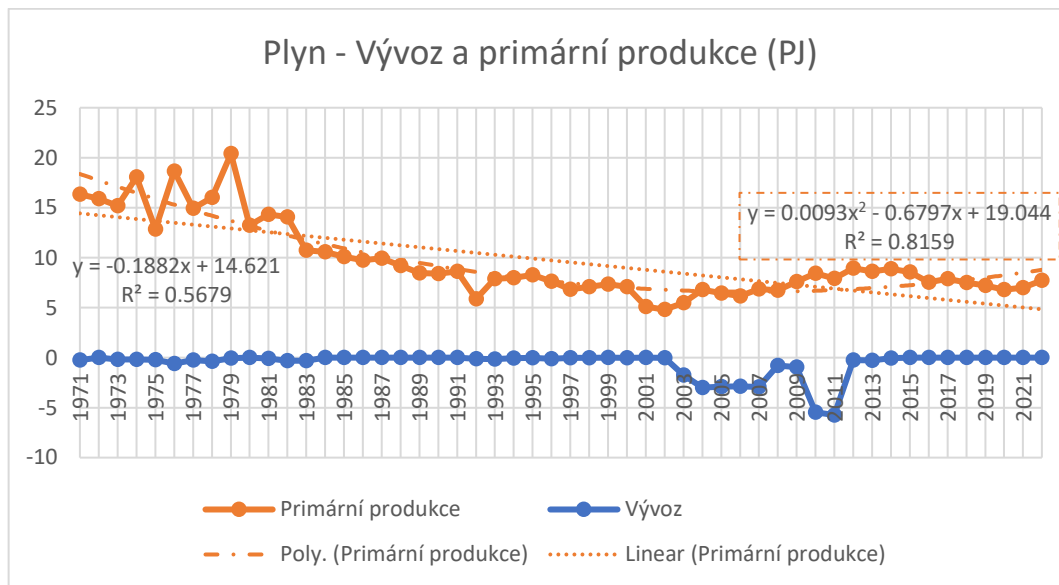
Graf 15. Plyn – Primární energetické zdroje a dovoz (2012–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Po vyloučení odlehlého pozorování roku 2022, když primární energetické zdroje poklesly o 20%, z 326 na 266 PJ, lineární trendová křivka dosahuje významné hodnoty koeficientu determinace 0,488, tudíž nárůst může být ohodnocen 4,2748 PJ ročně.

Graf 16. Plyn – Vývoz a primární produkce (1971–2022)

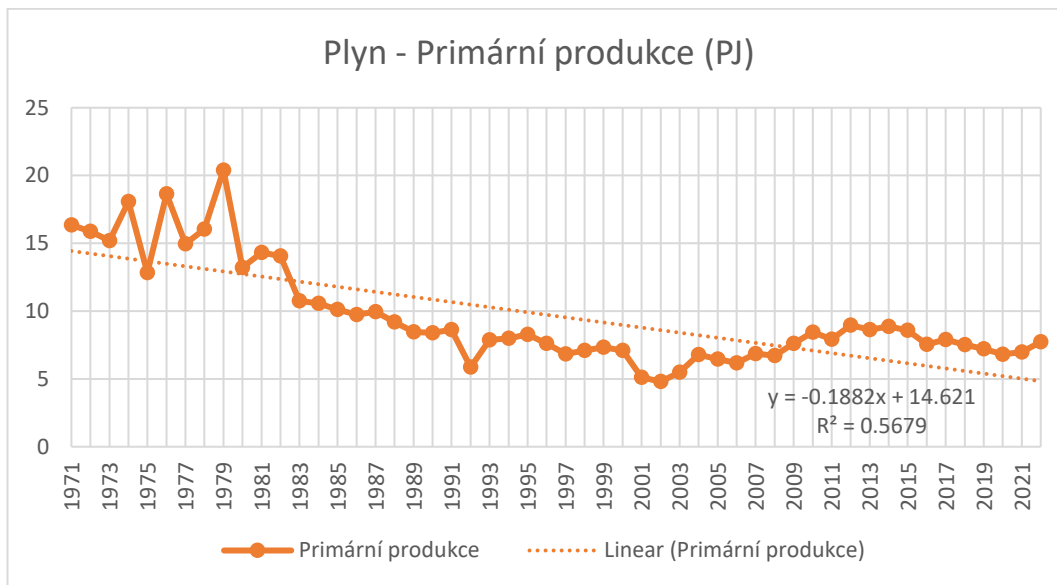


Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Jak je patrné z grafu, vývoz je zanedbatelný.

Primární produkce do minima 5 PJ v roce 2002 poklesla z maxima 20 PJ v roce 1979. Tak významný dlouhodobý pokles ovlivnil lineární trendovou křivku, která při významné hodnotě koeficientu determinace 0,5679 hodnotí pokles na celém časovém období o 0,1882 PJ ročně, ale trend se otočil, což demonstruje mnohem větší koeficient determinace 0,8159 kvadratické funkce. Nicméně, další méně významné otočení trendu o 10 let později zachycuje pouze polynom stupně 4.

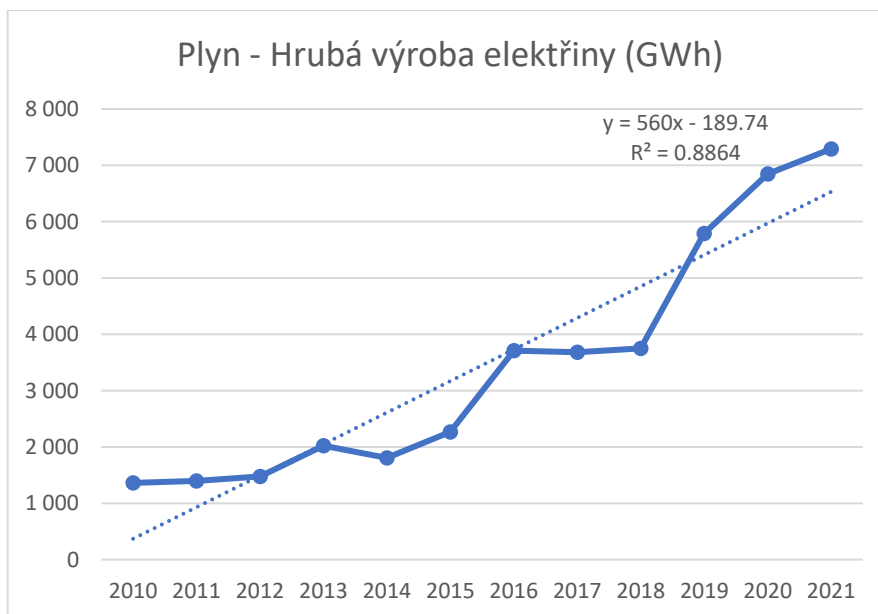
Graf 17. Plyn – Primární produkce (2013–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Lineární trendová křivka za období posledních 10 let při obstojném koeficientu determinace 0,654 vykazuje pokles o 0,19 PJ meziročně, ale je nutné upozornit, že poslední tři roky primární produkce roste.

Graf 18. Plyn – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)



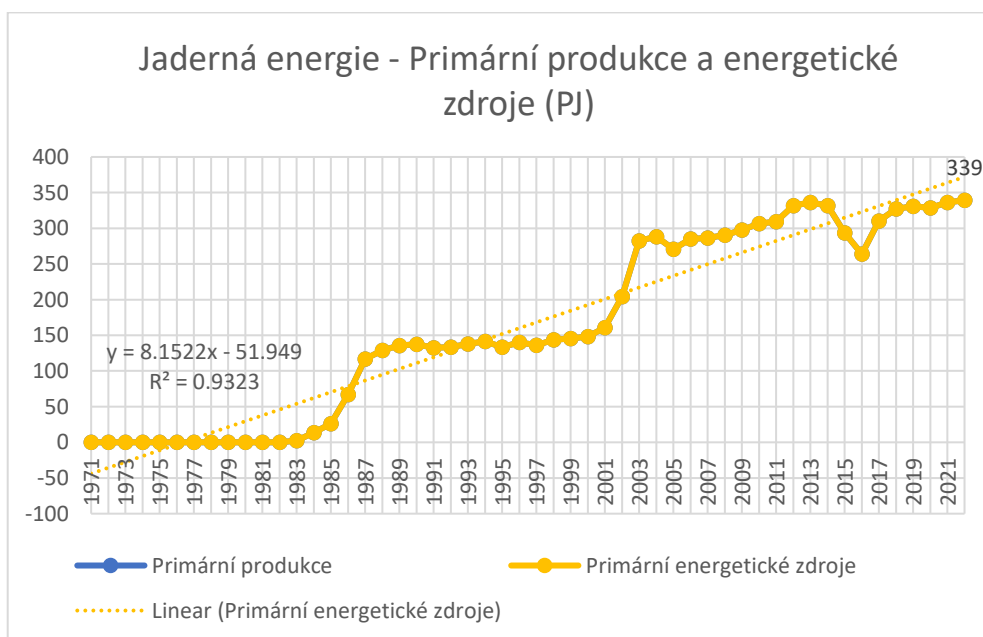
Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Výroba elektřiny od roku 2010 prudce roste, což potvrzuje i lineární model se spolehlivým koeficientem determinace 0,8864. Meziroční nárůst tímto modelem je ohodnocen 560 GWh.

4.1.4 Uran

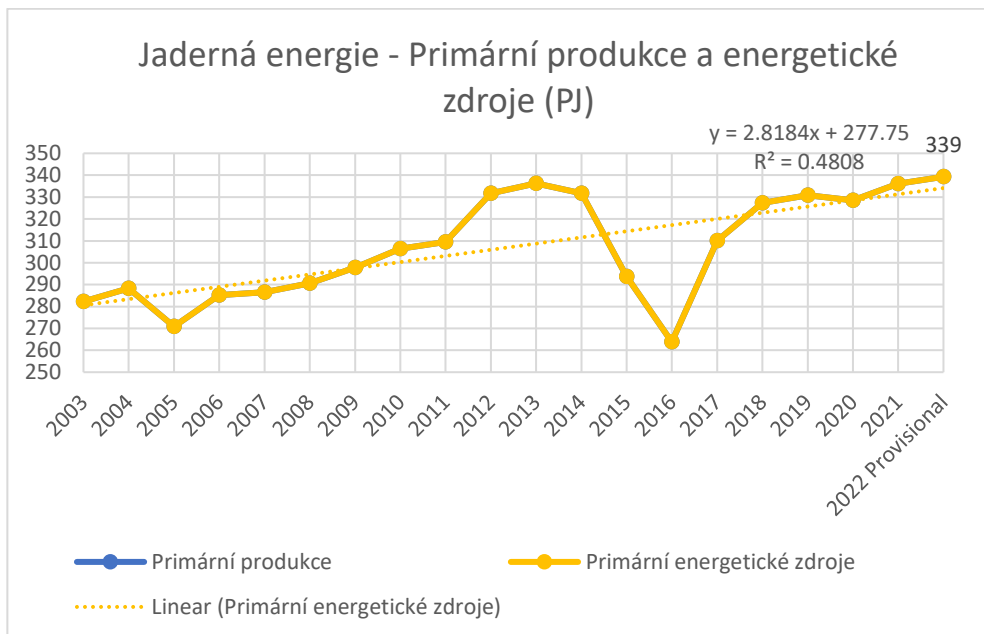
Česká republika má bohaté zdroje uranu. Těžba však od roku 1989 dlouhodobě klesala a dosáhla nuly i od roku 2017 těžba uranu na území ČR se neprovádí (OECD, 2006), i když do roku 1989 ČR byla jedním ze světových lídrů dle objemu vytěženého uranu (International Atomic Energy Agency (IAEA), 2024). Zdroj (International Energy Agency (IEA), 2021) uvádí, že to z důvodů ekologických a ekonomických: cena uranu na globálním trhu se snížila tak silně, že těžba na území ČR jako posledního státu v Evropě, kde se v tuto dobu těžba uranu vůbec prováděla, už nebyla tak ekonomicky významná, aby ospravedlnila ekologické škody.

Graf 19. Jaderná energie – Primární produkce a energetické zdroje (1971–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

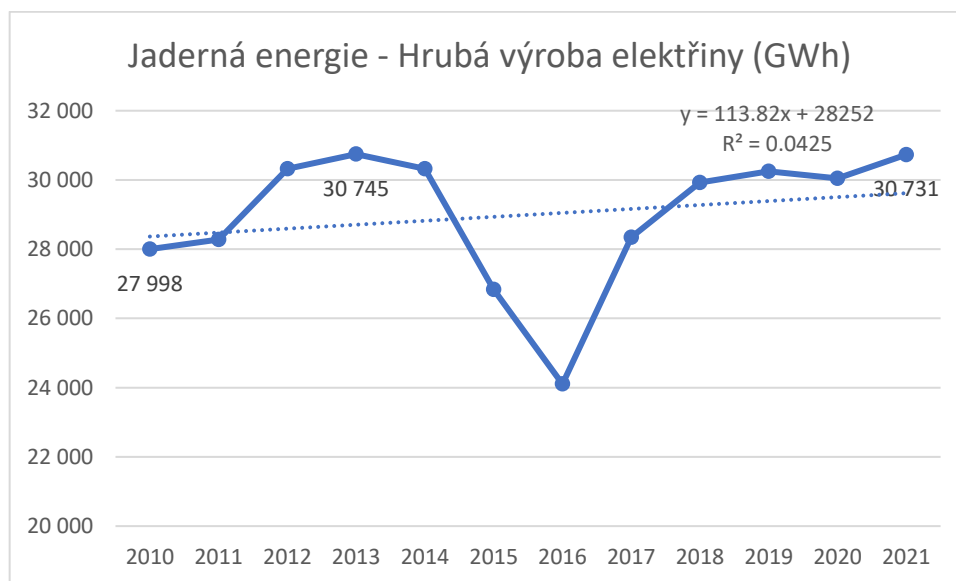
Graf 20. Jaderná energie – Primární produkce a energetické zdroje (2003–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Žádný vývoz ani dovoz jaderné energie se neprovádí, takže primární energetické zdroje mají stejnou hodnotu jako primární produkce. V roce 2022 hodnocení dosažených hodnot činí rekordních 339 PJ.

Graf 21. Jaderná energie – Hrubá výroba elektřiny (2010–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

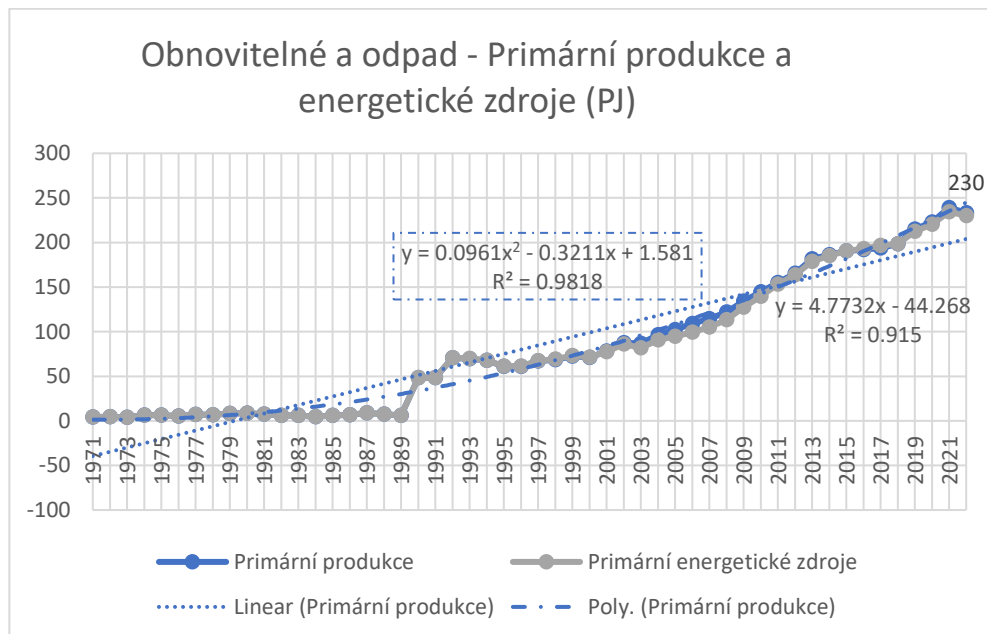
V roce 2009 se vyrábělo 27998 GWh elektřiny, po poklesu v roce 2016 trend pokračoval v růstu a v roce 2021 dosáhl 30731 GWh, čímž se přiblížil k maximálně dosažené hodnotě 30745 GWh v roce 2013.

Lineární trendová křivka má koeficient determinace 0,0425, čímž téměř nevysvětluje rozptyl. Nicméně, směr trendu odpovídá datům a predikuje 113,84 GWh ročně, což vzhledem k poklesu v roce 2016 je spíše konzervativní prognóza.

4.2 Analýza dat energetického mixu – obnovitelné zdroje

Obnovitelné zdroje a odpad tvoří významný podíl na energetickém mixu ČR, navíc ten přínos dlouhodobě roste od začátku devadesátých let.

Graf 22. Obnovitelné a odpad – Primární produkce a energetické zdroje (1971–2022)



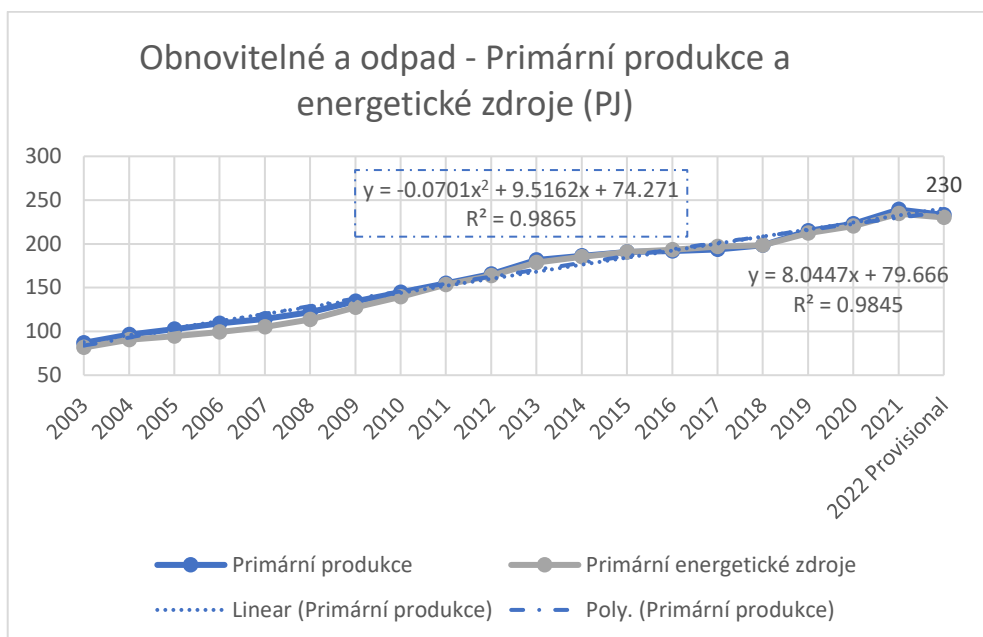
Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Primární energetické zdroje a produkce nevykazují významný rozdíl na grafu, takže vývoz a dovoz hrají druhořadou roli. V roce 2022 primární energetické zdroje ohodnoceny 230 PJ, což už je srovnatelné s 266 PJ od zemního plynu.

Do roku 1989 obnovitelné zdroje měli zanedbatelný podíl na energetickém mixu s hodnoty pod 10 PJ, což značně ovlivňuje lineární trendovou křivku. I když vykazuje velkou hodnotu koeficientu determinace 0,915, systematicky podceňuje reálné hodnoty v posledních deseti letech, což je silným důvodem brát ohodnocený tímto modelem meziroční nárůst produkce 4,7732 PJ jako příliš konzervativní.

Kvadratická trendová křivka dosahuje vynikající hodnoty 0,9818, což znamená, že dvě stupně volnosti poměrně jednoduchého modelu nevysvětlují pouhých 2% rozptylu v datech. Nárůst od roku 1989 je zjevně prudký, ale je otázkou, zda to bude nadále trvat.

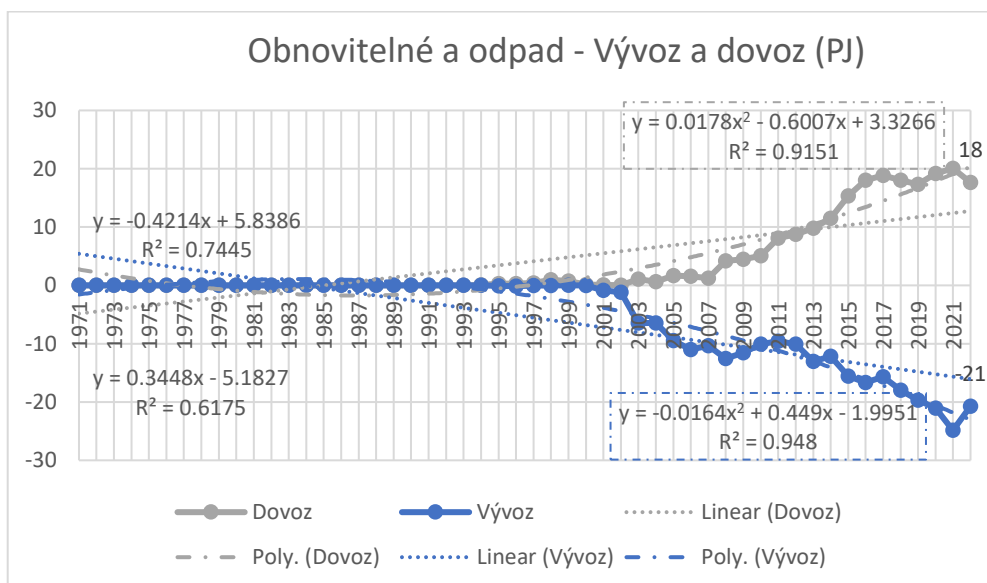
Graf 23. Obnovitelné a odpad – Primární produkce a energetické zdroje (2003–2022)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Experimenty s modely na zkráceném časovém období na 30, 20 a 10 let ukazují relativní spolehlivost lineárního modelu, který hodnotí meziroční nárůst produkce 6,14 PJ, 8,05 PJ a 6,49 PJ. Na druhou stranu, kvadratický model na datech za 20 let mění kvadratický koeficient na záporný, čímž demonstruje svou nespolehlivost a slabší prediktivní schopnost.

Graf 24. Obnovitelné a odpad – Vývoz a dovoz (1971–2022)



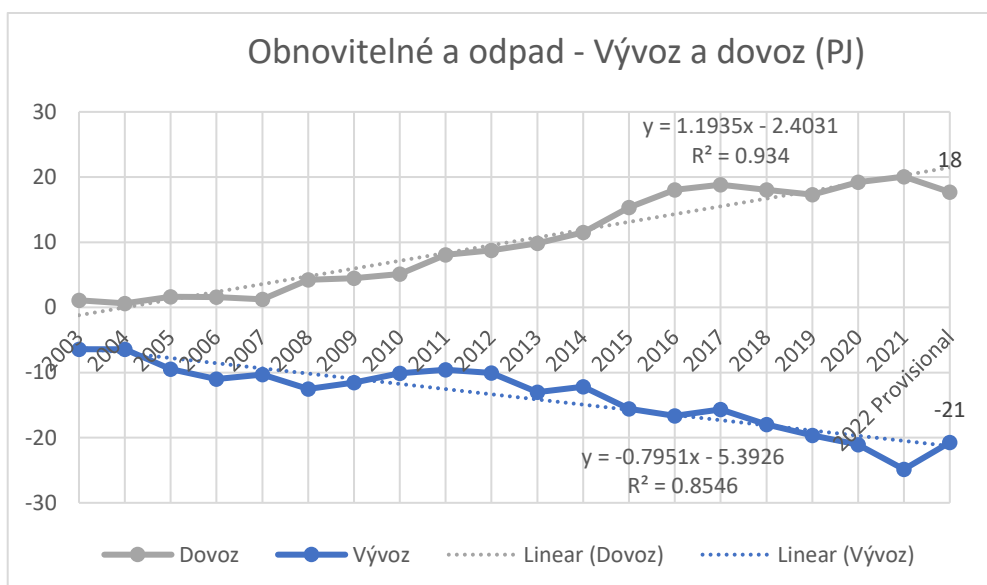
Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Hodnocení dovozu a vývozu v roce 2022 jsou v řadu 20 PJ, což je o řád méně než primární energetické zdroje a produkce. Tendence však je stejně rostoucí.

Lineární trendové křivky pro dovoz a vývoz sice demonstrují solidní hodnoty koeficientu determinace – respektive 0,6175 a 0,7445 – ale kvůli období od roku 1971 do roku 2002, když hodnoty vývozu a dovozu byly blízko nule, nejsou vhodné pro modelování, ale hodnocení růstu – respektive 0,4214 PJ a 0,3448 PJ ročně – je možné brát jako podceňující.

Kvadratické křivky dosahují velkých hodnot koeficientu determinace – 0,9151 pro dovoz a 0,948 pro vývoz, což naznačuje, že z dlouhodobého pohledu obnovitelné zdroje porostly rychleji než lineárně.

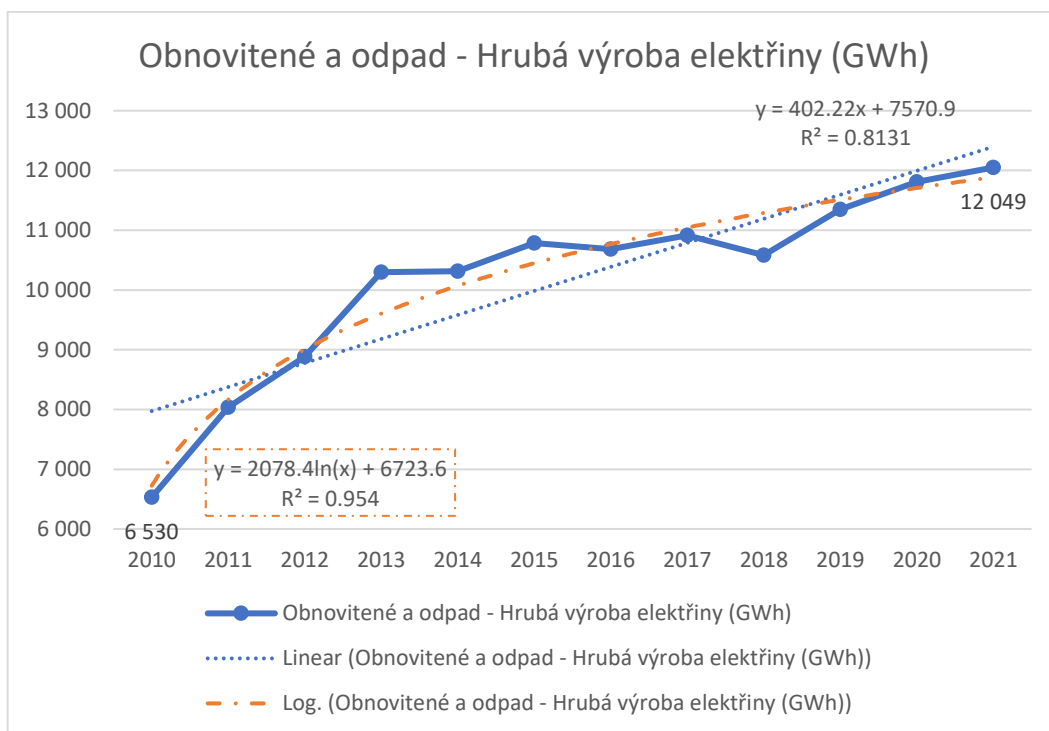
Graf 25. Obnovitelné a odpad – Vývoz a dovoz



Zdroj: Vlastní zpracování dle (International Energy Agency (IEA), 2023)

Analýza dat na aktuálnějším časovém období ukazuje, že lineární křivky jsou schopni data popsat tak, že přidání dalších stupňů volnosti zásadně model nevylepší. V případě dovozu koeficient determinace se rovná 0,934 a hodnocený růst je 1,1935 PJ ročně. V případě vývozu koeficient determinace se rovná 0,8546 a hodnocený růst je 0,7951 PJ ročně. Při detailním pohledu je vidět, že v posledních letech růst dovozu zpomalil, zatímco růst vývozu se chová přibližně konstantně.

Graf 26. Obnovitelné a odpad – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů a odpadů téměř zdvojnásobila z 6530 GWh v roce 2010 na 12049 GWh v roce 2021.

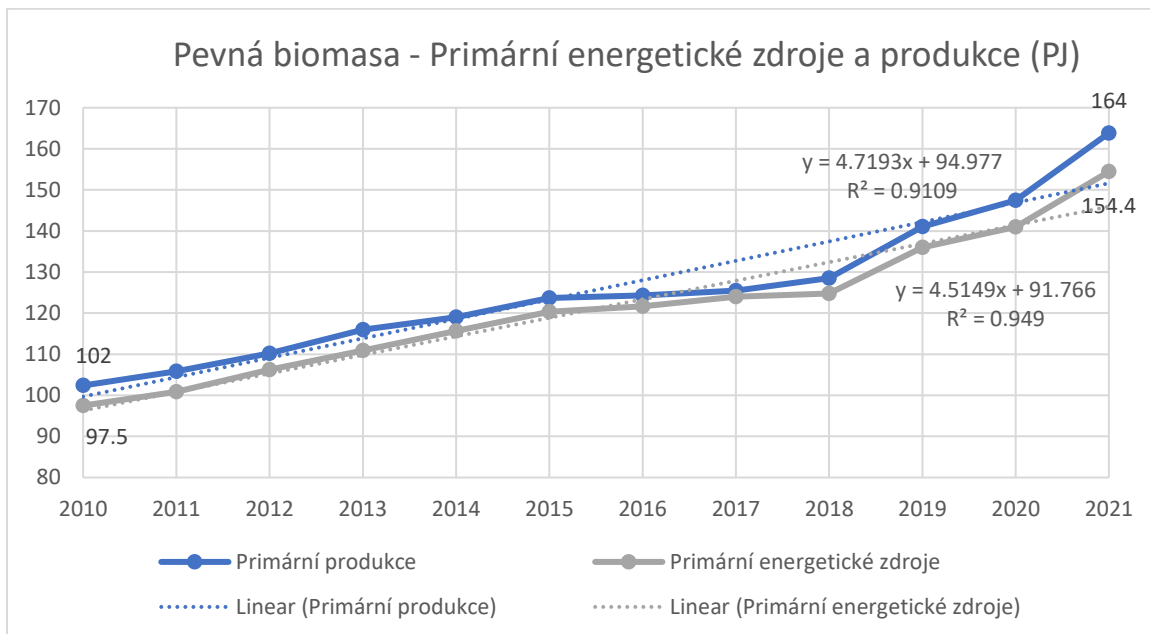
Lineární trendová křivka dosahuje dobré hodnoty koeficientu determinace 0,8131 a hodnotí nárůst o 402 GWh ročně.

Vylepšit vysvětlovací schopnost lze bez navýšení počtu stupňů volnosti pomocí použití logaritmické křivky, která vykazuje koeficient determinace 0,954. Nicméně, kvůli zaměření České republiky na podporu obnovitelných energetických zdrojů je možné očekávat rychlejší nárůst než logaritmický.

4.2.1 Pevná biomasa

Biomasa a biopaliva tvoří drtivou většinu zelené energie ČR, z nichž největší podíl má pevná biomasa.

Graf 27. Pevná biomasa – Primární energetické zdroje a produkce (2010–2021)



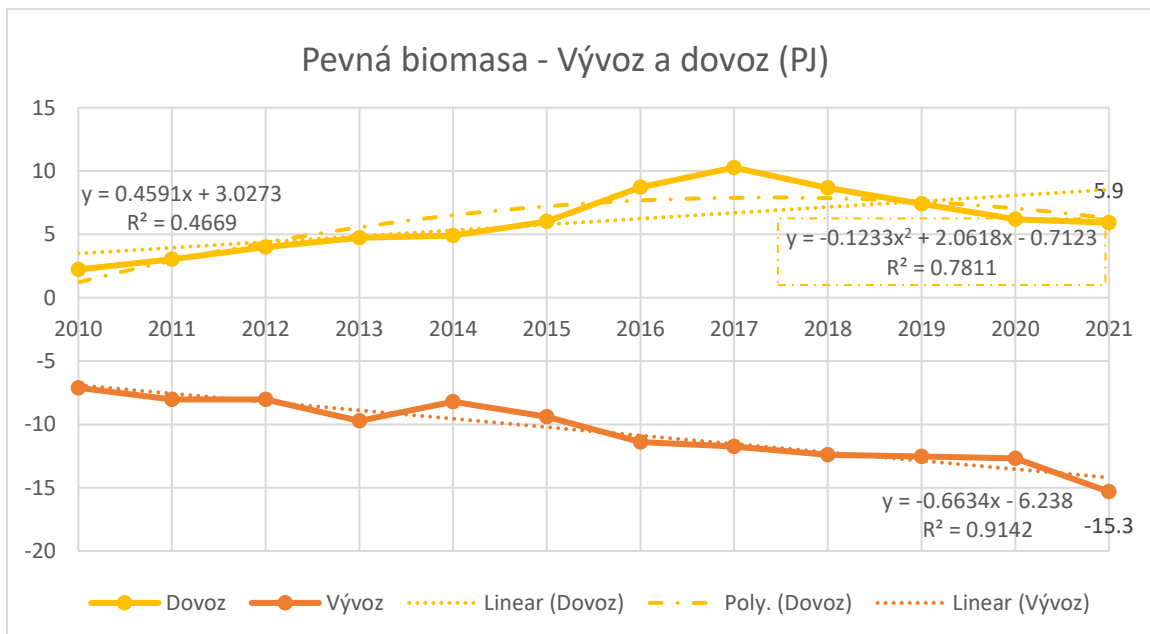
Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Pevná biomasa v roce 2021 dosáhla v primárních energetických zdrojích a primární produkci respektive 154 PJ a 164 PJ, přičemž tendence je rostoucí od roku 2010, když této hodnoty byli 97 a 102 PJ.

Lineární trendová křivka hodnotí meziroční nárůst primární produkce 4,7193 PJ, což je nejspíš konzervativní hodnocení vzhledem k tomu, že nárůst od roku 2018 je mnohem rychlejší, ale koeficient determinace dosahuje velké hodnoty 0,9109, takže toto hodnocení je možné označit za spolehlivé.

Primární energetické zdroje mají přibližně stejnou hodnotu, což svědčí o malém podílu salda vývozu a dovozu. Lineární trendová křivka však není úplně identická primární produkce a při větším koeficientu determinace 0,949 meziroční nárůst je ohodnocen 4,5149.

Graf 28. Pevná biomasa – Vývoz a dovoz (2010–2021)



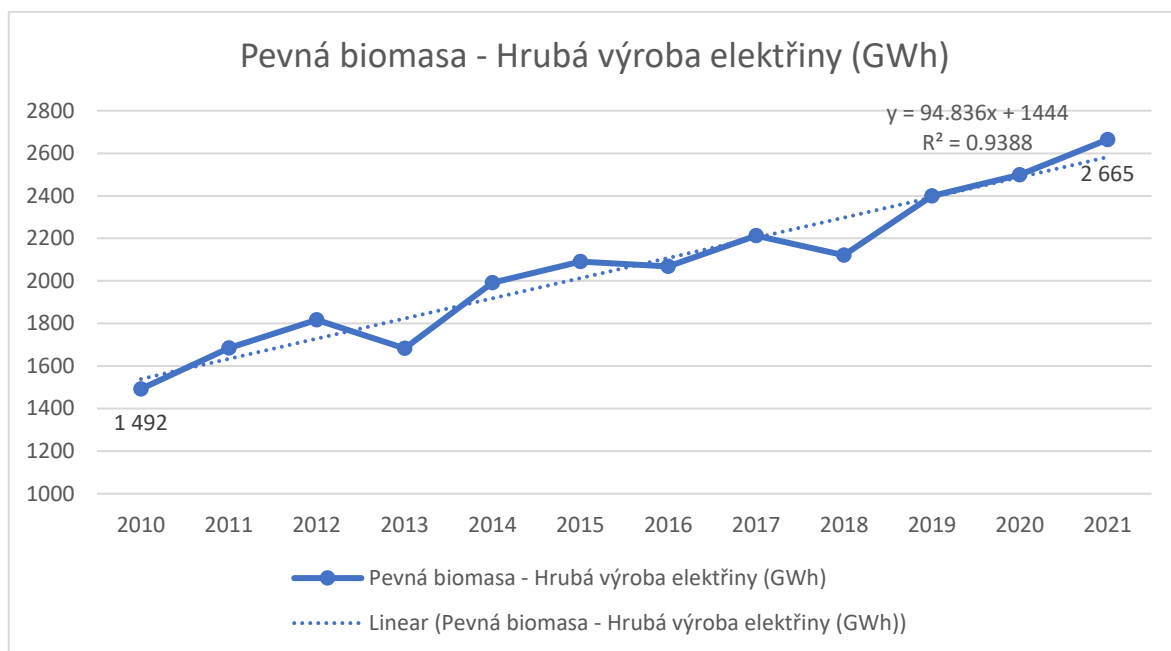
Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Co se týká dovozu a vývozu, čísla jsou o řád menší, ale oba, zvláště vývoz od roku 2010 značně porostl a činí 15.3 PJ z 21 PJ od obnovitelných zdrojů a odpadů celkem.

Lineární trendová křivka v případě dovozu ukazuje vyhovující koeficient determinace 0,4669 s meziroční nárůstem 0,4591 PJ, ale této křivce se nepodařilo vysvětlit otočení trendu v roce 2017, natož zpomalení klesajícího trendu v posledních letech. Kvadratická trendová křivka zachycuje otočení trendu a demonstruje mnohem přesvědčivější hodnotu koeficientu determinace 0,7811.

Data vývozu, na rozdíl od dovozu, dle koeficientu determinace 0,9142 mnohem lépe se vysvětluje lineární trendovou křivkou než dokonce data dovozu polynomem třetího stupně. Lineární model hodnotí meziroční nárůst vývozu 0,6634 PJ.

Graf 29. Pevná biomasa – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

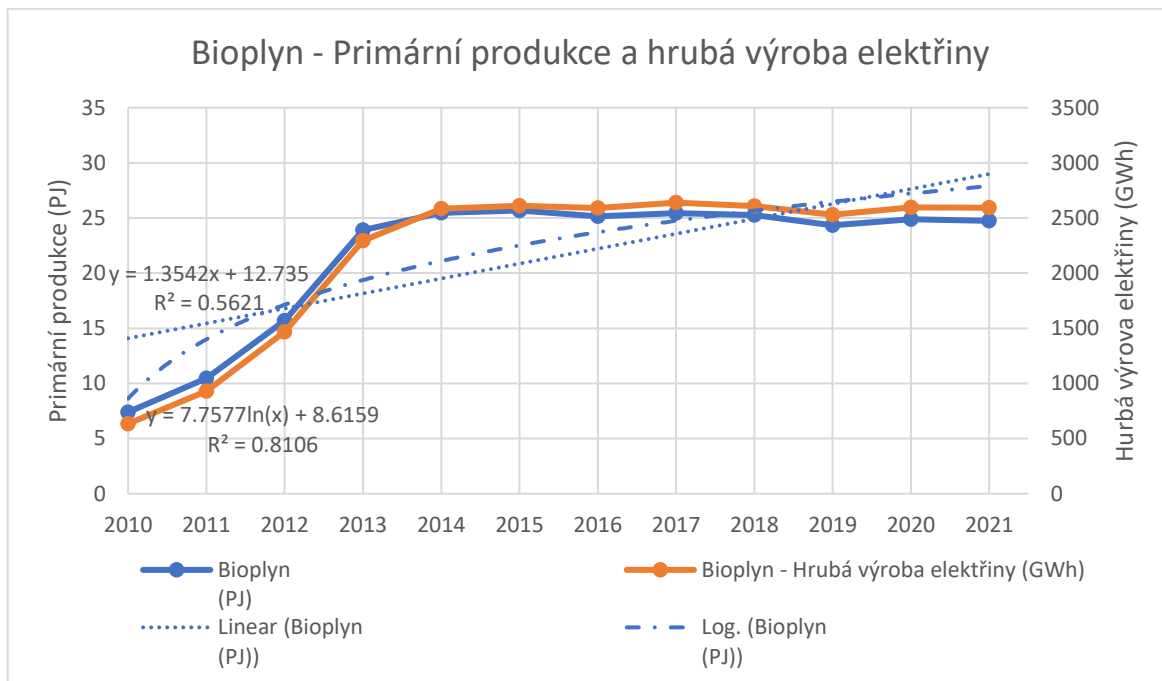
Výroba elektřiny porostla z 1492 GWh v roce 2010 na 2665 GWh v roce 2021.

Lineární trendová křivka hodnotí meziroční nárůst 94,835 GWh při velké hodnotě koeficientu determinace 0,9388, což signalizuje o spolehlivosti tohoto modelu.

4.2.2 Bioplyn

Bioplyn má druhý nejvyšší podíl na obnovitelných zdrojích.

Graf 30. Bioplyn – Primární produkce a hrubá výroba elektřiny (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

V roce 2021 hodnota primární produkce dosáhla 25 PJ, přičemž během předchozích let žádný vývoz ani dovoz neprobíhal, takže primární energetické zdroje měly stejnou hodnotu, jako primární produkce, ale v roce 2021 bylo dovezeno 0.79 PJ bioplynu, což znamená, že primární energetické zdroje dosáhli hodnoty 26 PJ.

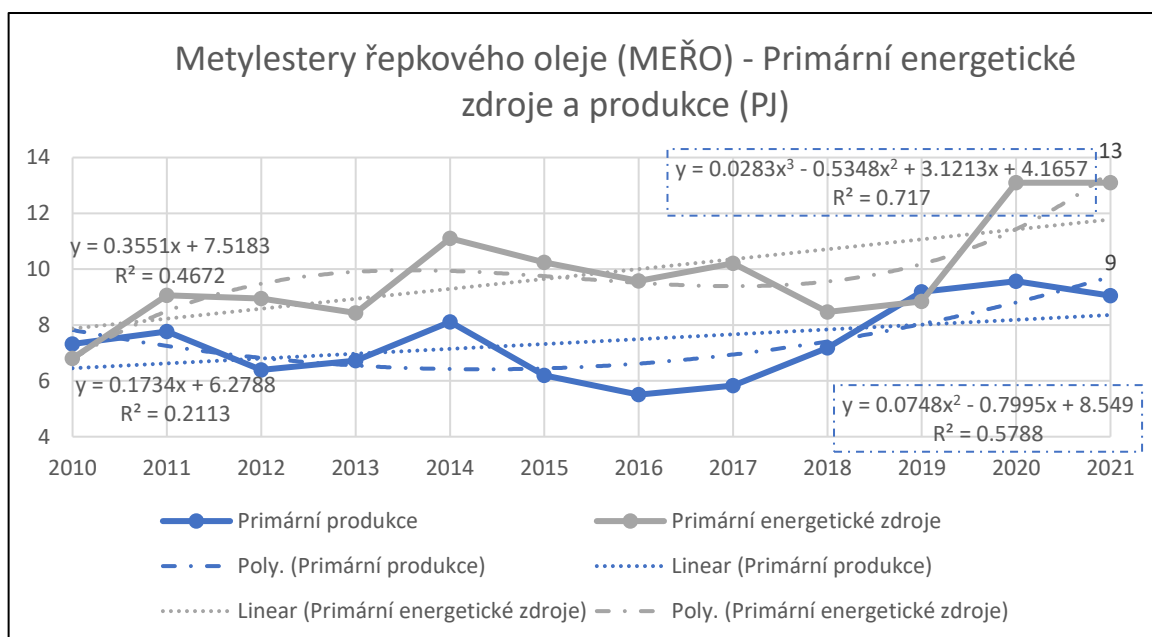
Lineární trendová křivka hodnotí meziroční nárůst 1,3542 PJ při solidní hodnotě koeficientu determinace 0,5621, ale z grafu plyne, že po roku 2013 produkce nerostla.

Hrubá výroba elektřiny má přibližně stejnou podobu křivky, a proto dá se interpretovat stejnými trendovými křivkami. Hrubá výroba elektřiny dosáhla 2592 GWh v roce 2021.

4.2.3 Metylestery řepkového oleje (MEŘO)

Metylestery řepkového oleje (MEŘO), v angličtině známé jako „pure biodiesels“, mají významný podíl na primárních zdrojích energie, zvláště obnovitelných.

Graf 31. Metylestery řepkového oleje (MEŘO) - Primární energetické zdroje a produkce (2010–2021)



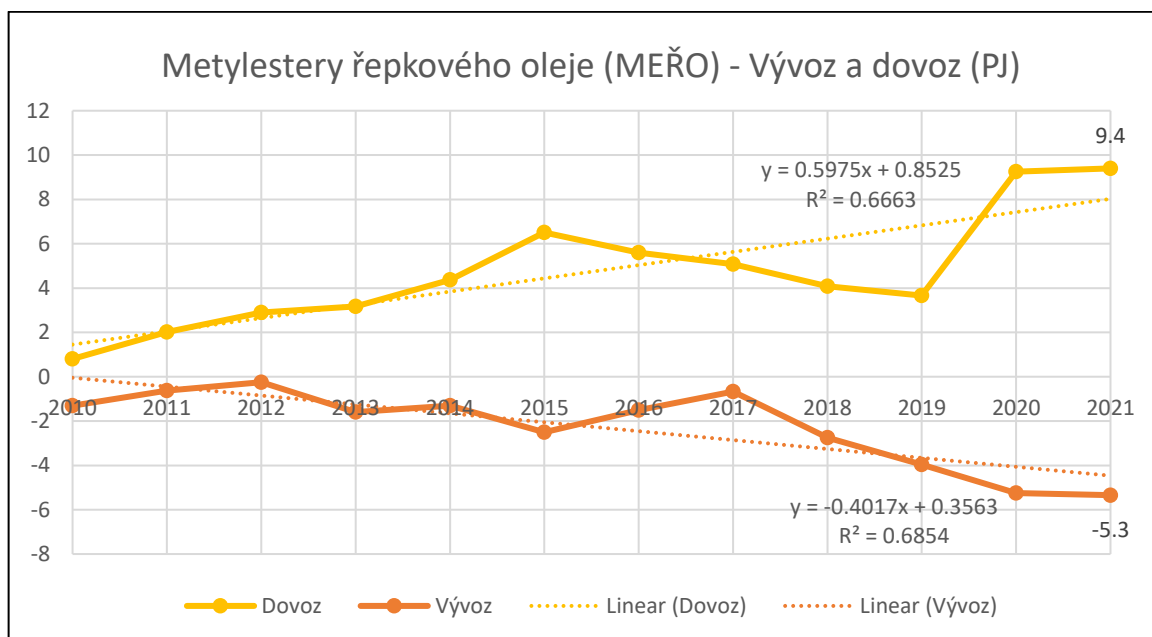
Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

V roce 2021 primární produkce měla hodnotu 9PJ, primární energetické zdroje – 13PJ.

Lineární trendová křivka primární produkce vykazuje vyhovující hodnotu koeficientu determinace 0,4672 a predikuje meziroční růst o 0,3551 PJ. Zvednout hodnotu koeficientu determinace na 0,717 se podařilo jenom polynomem třetí stupně, což pomáhá zvýraznit dvě otočení trendů – v roce 2014 a v roce 2019. Celkově tendence je rostoucí, ale spíše chaoticky.

V případě primárních energetických zdrojů lineární křivka demonstruje nepřesvědčivý koeficient determinace 0,2113 se skromným růstem o 0,1734 PJ ročně. Kvadratická trendová křivka zvedá koeficient determinace na 0,5788, čímž zvýrazňuje otočení trendu v roce 2016. Polynom stupně 3 naznačuje další otočení trendu v roce 2020, ale kvůli pokles v roce 2021 se nedá s úplnou jistotou tvrdit o otočení trendu od roku 2016.

Graf 32. Metylestery řepkového oleje (MEŘO) - Vývoz a dovoz (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Dovoz a vývoz vykazují rostoucí tendenci, dovoz v roce 2021 dosáhl 9 PJ, vývoz – 5 PJ. Je nutné podotknout, že ten zdroj je jeden z malá, který má řadově srovnatelné hodnoty vývozu, dovozu, primární produkce a energetických zdrojů.

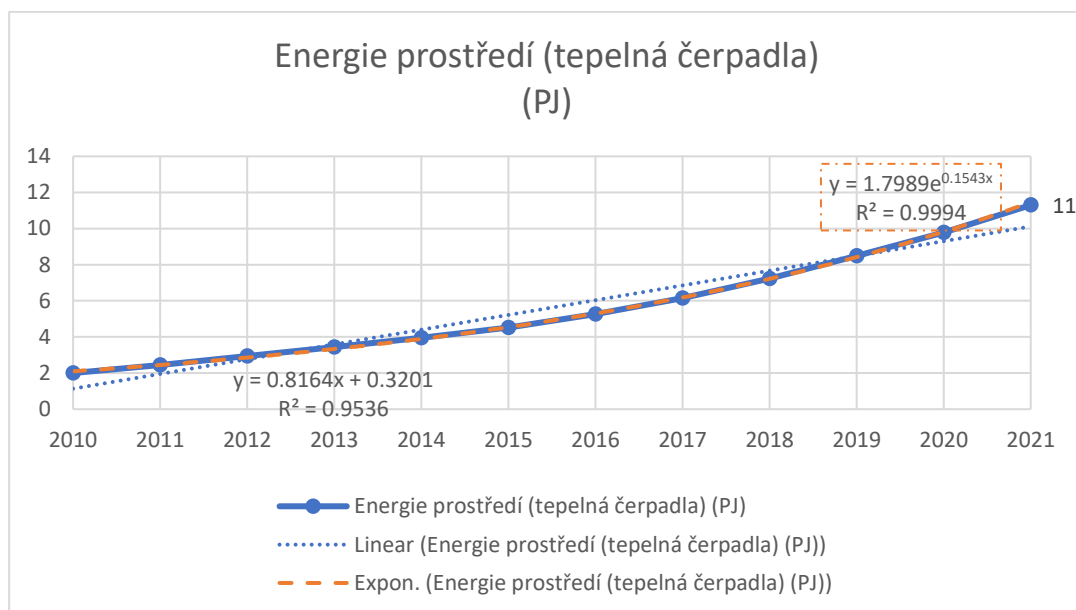
Lineární trendová křivka v obou případech obstojně reprezentuje data s koeficienty determinace 0,6854 pro vývoz a 0,6663 pro dovoz. Meziroční nárůst v případě vývozu je zhodnocen 0,4017 PJ a 0,5975 v případě dovozu.

I když metylestery řepkového oleje (MEŘO) představují druh biopaliv s významným podílem na energetickém mixu České republiky, zatím se nepoužívá k výrobě elektřiny.

4.2.4 Energie prostředí (tepelná čerpadla)

Tepelná čerpadla mají významný podíl na energetickém mixu ČR. Žádný vývoz ani dovoz se neprovádí, takže primární produkce se rovná primárním energetickým zdrojům.

Graf 33. Energie prostředí (tepelná čerpadla) (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

V roce 2021 primární produkce dosáhla 11 PJ, přičemž od roku 2010 více než zpětinásobila. Nicméně, energie prostředí se k výrobě elektřiny v České republice nepoužívá, takže nebyla zahrnuta do modelu.

Lineární trendová křivka sice ukazuje velkou hodnotu koeficientu determinace 0,9536, podceňuje kraje a přeceňuje střed časového období, takže hodnocení meziročního nárůstu 0,8164 PJ je rozumné považovat za konzervativní.

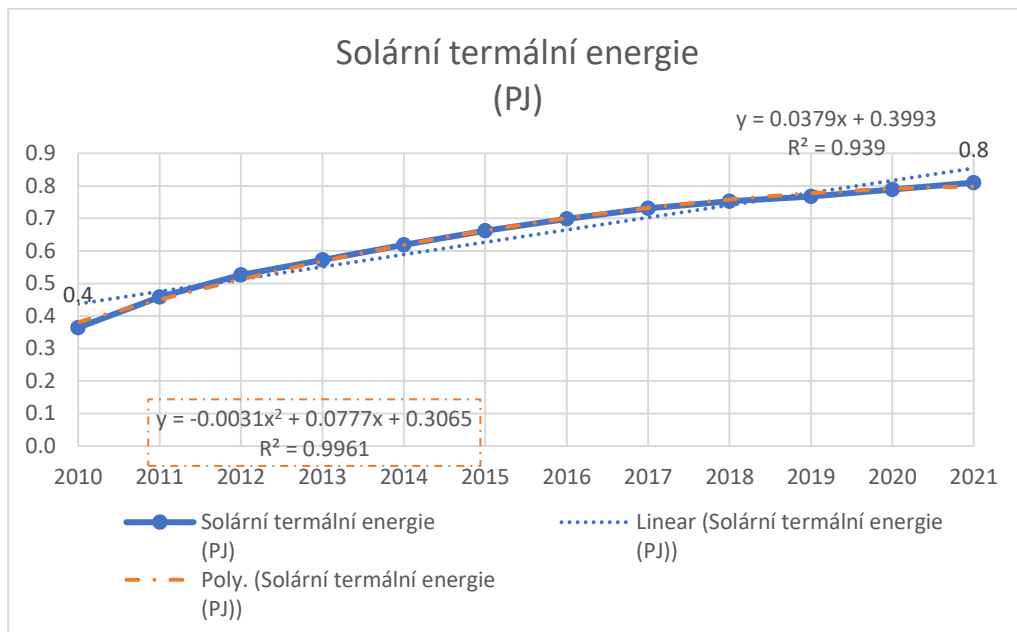
Exponenciální trendová křivka dosáhla neuvěřitelné hodnoty koeficientu determinace 0,9994, což svědčí o nárůstu zhruba 15% ročně.

Významná část (1,01 PJ) tohoto druhu energie se používá v sektoru průmyslu, ale většina je zařazena do kategorie „Ostatní sektory“, tím pádem energie prostředí se nepoužívá k výrobě elektřiny a není zahrnuta do modelu.

4.2.5 Solární energie

Údaje o solární energii v ČR se dělí na solární termální a solární fotovoltaickou. Žádný vývoz ani dovoz se neprovádí, takže primární produkce se rovná primárním energetickým zdrojům.

Graf 34. Solární termální energie (2010–2021)



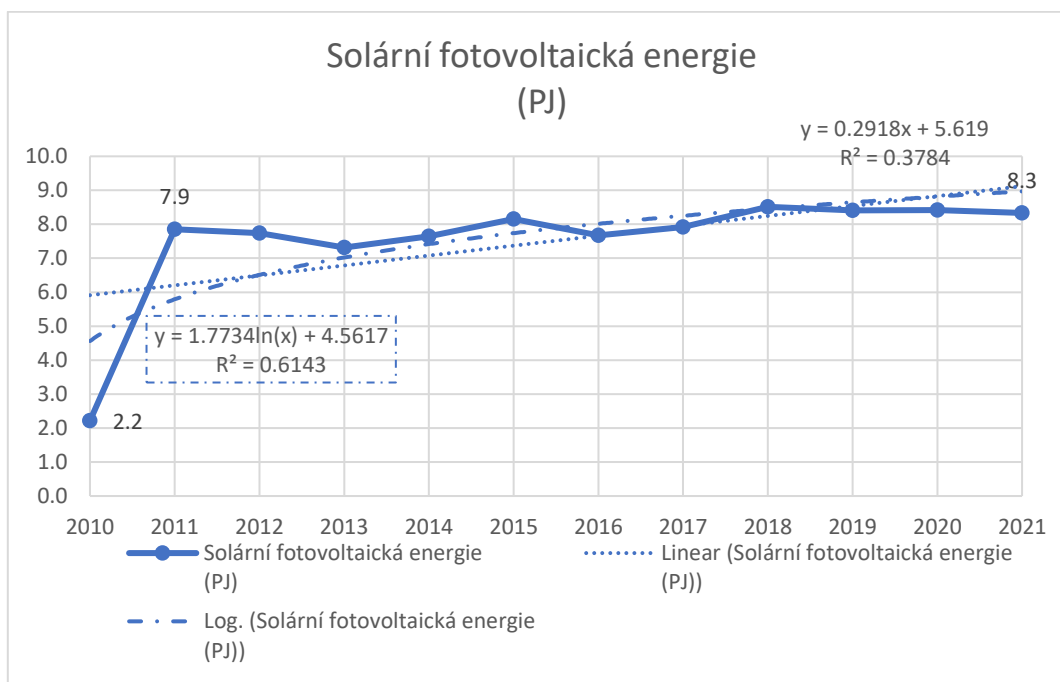
Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Solární termální energie v roce 2021 přinesla 0.81 PJ, takže její podíl na energetickém mixu je zanedbatelný, i když nárůst od roku 2010 více než zdvojnásobil.

Lineární trendová křivka vykazuje velkou hodnotu koeficientu determinace 0,939, ale přeceňuje začátek a podceňuje konec zkoumaného časového období. Tím pádem, predikovaný meziroční nárůst o 0,03 PJ lze pokládat za konzervativní.

Přidání dalšího stupně do modelu zvyšuje koeficient na 0,9961, což znamená, že model vysvětluje téměř celý rozptyl v datech.

Graf 35. Solární fotovoltaická energie (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Co se týká solární fotovoltaické energie, čísla v porovnání s termální jsou o řad vyšší a dosáhly hodnoty 8,3 PJ v roce 2021, ale růst se od roku 2011 téměř neprojevuje.

Lineární trendová křivka nemůže popsat skokový nárůst z 2,2 PJ v roce 2010 na 7,9 PJ o rok později, nicméně ukazuje významný koeficient determinace 0,3784 a predikuje spíše optimistický nárůst 0,2918 PJ ročně, který však dlouhodobě může být pravděpodobným.

Situaci s prudkým nárůstem a následným zpomalením nejlíp popisuje logaritmická trendová křivka, ale politická opatření a snaha o posílení pozic obnovitelných zdrojů v energetickém mixu České republiky tuto smutnou stagující tendenci mohou pozitivně ovlivnit.

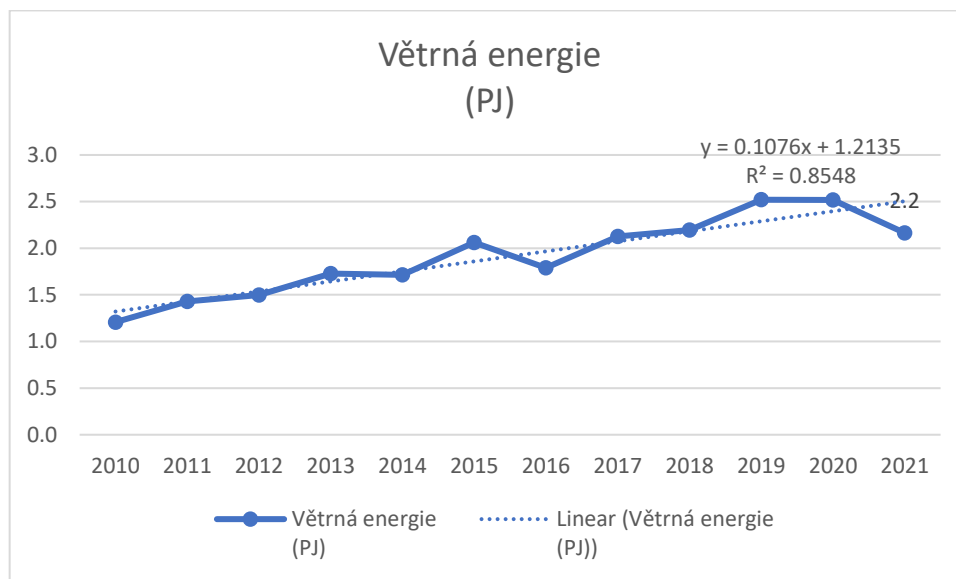
Objem primární produkce solární fotovoltaické energie má stoprocentní shodu s objemem hrubé výroby elektřiny.

Zdroj (Brno, 2019) uvádí, že potenciální instalované kapacity solární fotovoltaické energie činí 39 GW, což znamená, že při konzervativním koeficientu využití 12,5% to může přinést až $0.039 \text{ PW} * 12,5\% * 8760 \text{ hodin/rok} = 43 \text{ PJ}$ ročně.

4.2.6 Větrná energie

Žádný vývoz ani dovoz se neprovádí, takže primární produkce se rovná primárním energetickým zdrojům.

Graf 36. Větrná energie (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Výroba větrné energie v roce 2021 dosáhla 2.2 PJ a od roku 2010 zdvojnásobila. Vývoz a dovoz jsou nulové. (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Dynamika výroby větrné energie se dobře popisuje lineární trendovou křivkou s koeficientem determinace 0,8548. Lineární model hodnotí meziroční nárůst o 0,1076 PJ. 100% větrné energie se používá na výrobu elektřiny.

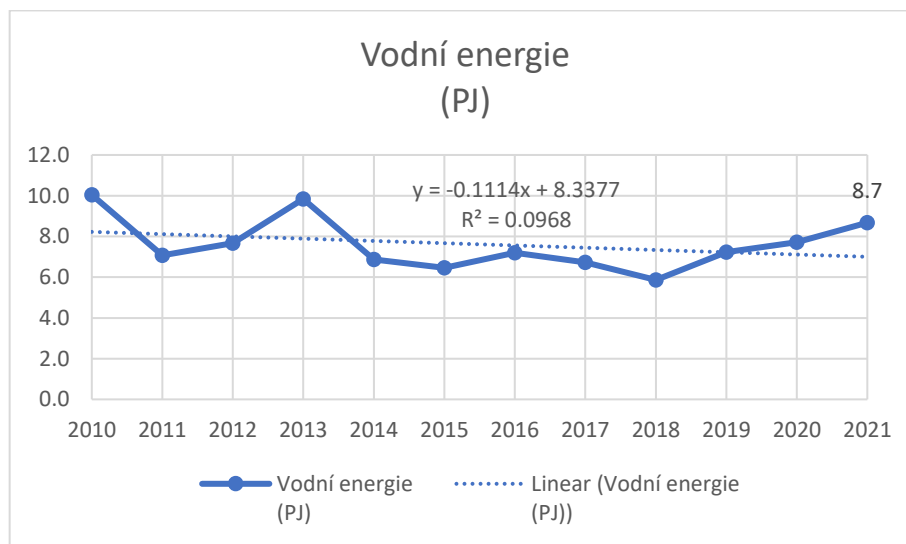
Objem primární produkce solární fotovoltaické energie má stoprocentní shodu s objemem hrubé výroby elektřiny.

Zdroj (Hanslian, 2020) rozděluje potenciál větru na technický, odpovídající teoretickým hodnotám, a na realizovatelný, který počítá s reálnými možnostmi a omezeními. V rámci realizovatelného potenciálu konzervativní scénář je ohodnocen 6,2 TWh/rok, optimistický – 18,8 TWh/rok. Ze předpokladu 1 TWh = 3,6 PJ, v konzervativním scénáři větrná energie dosáhne hodnoty 22,4 PJ a 67,8 PJ v optimistickém. Tím pádem, současně ČR využívá pouhou desetinu potenciálu tohoto zdroje, a to v rámci konzervativního předpokladu. Je nutné však podotknout, že dokonce i optimistický scénář několikanásobně zaostává od současné výroby energie pomocí biopaliv.

4.2.7 Vodní energie

Žádný vývoz ani dovoz se neprovádí, takže primární produkce se rovná primárním energetickým zdrojům.

Graf 37. Vodní energie (2010–2021)

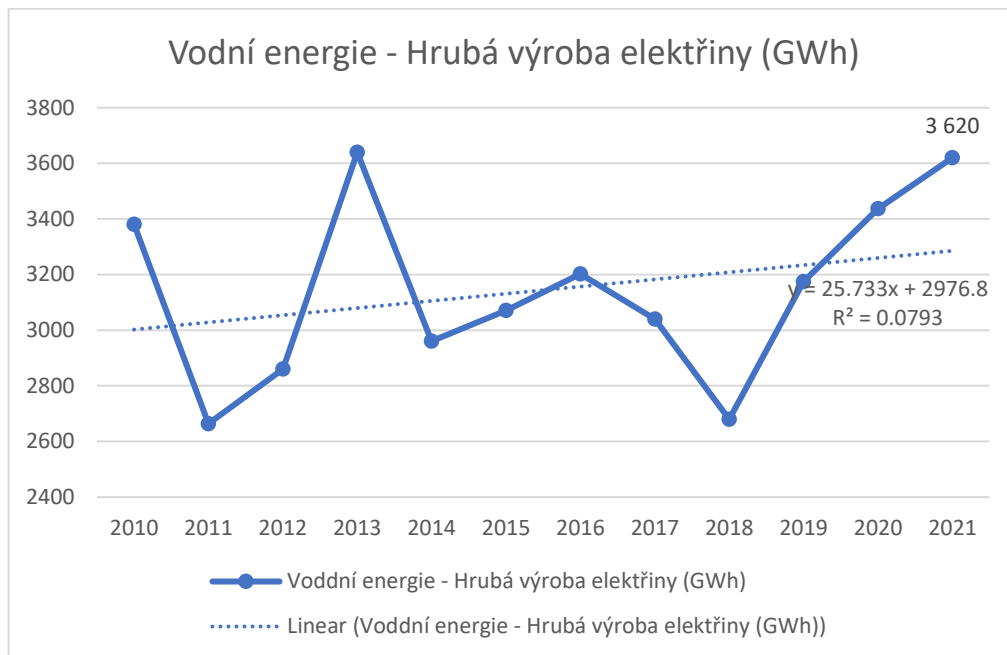


Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Vodní energie v ČR přináší kolem 9 PJ, v roce 2021 produkce z tohoto zdroje dosáhla 8,7 PJ. Od roku 2010 zjevná dynamika není evidována, produkce energie z pohybu vody spíše kolísá, což je zahrnuto do modelu.

Lineární trendová křivka dle koeficientu determinace vysvětluje pouhých 0,0968 rozptylu, což nemůže být považováno za užitečný model a potvrzuje vizuální hodnocení fluktuující povahy křivky produkce.

Graf 38. Vodní energie – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)



Zdroj: Vlastní zpracování dle (Český Statistický Úřad (ČSU), 2023)

Na rozdíl od solární a větrné energie, graf hrubé výroby elektřiny není identický grafu vodní energie – v roce 2021 byla dosazena 3620 GWh, to je téměř stejná hodnota, jako v roce 2013 – 3639 GWh, ale v případě primární produkce v roce 2013 bylo 9,8 PJ oproti 8,7 PJ v roce 2021, což je signálem vylepšení technologií výroby elektřiny pomocí vody.

Jinak potenciál vodní energie na území České republiky je téměř vyčerpán. (Trnavský, 2009)

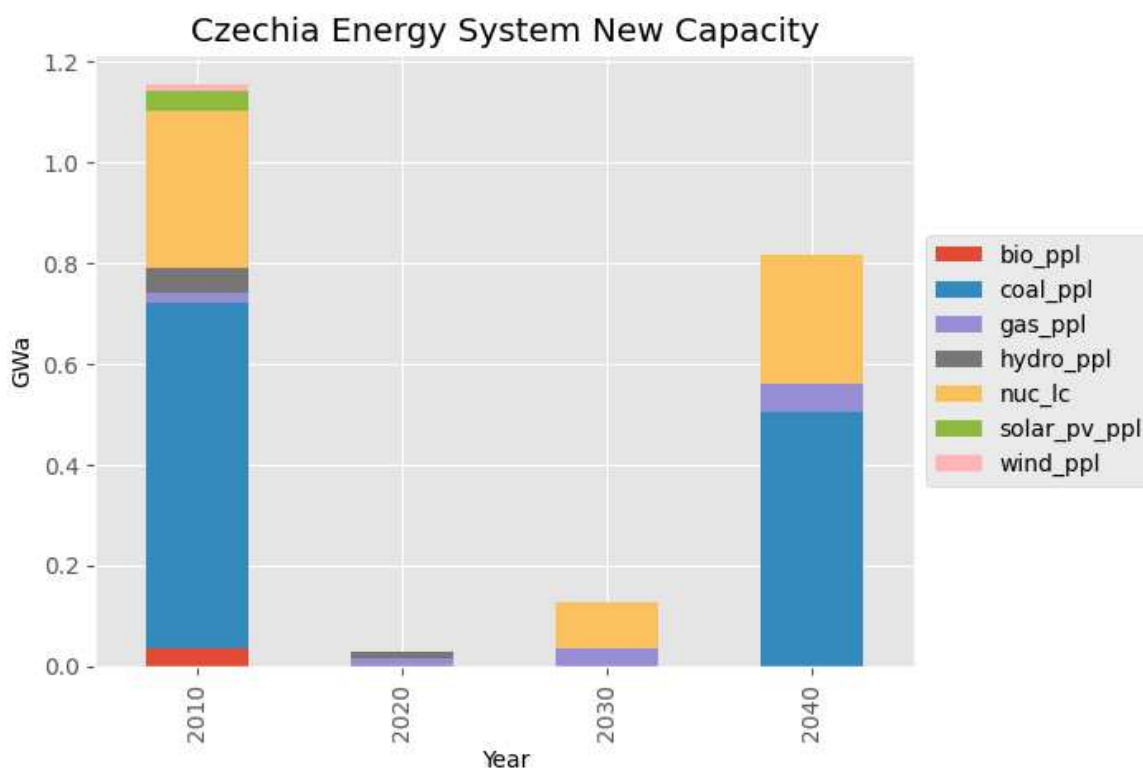
5 Výsledky a diskuse

Model MESSAGE byl použit k modelování třech scénářů: základnímu scénáře bez opatření, scénáře dotací obnovitelných zdrojů a scénáře, kde navíc k dotacím se přidává emisní povolenky.

5.1 Základní scénář

Základní scénář nezahrnuje výše zmíněné externí vlivy. Lze předpokládat, že vývoj dle tohoto scénáře odpovídá co nejlépe vlivu tržních mechanismů.

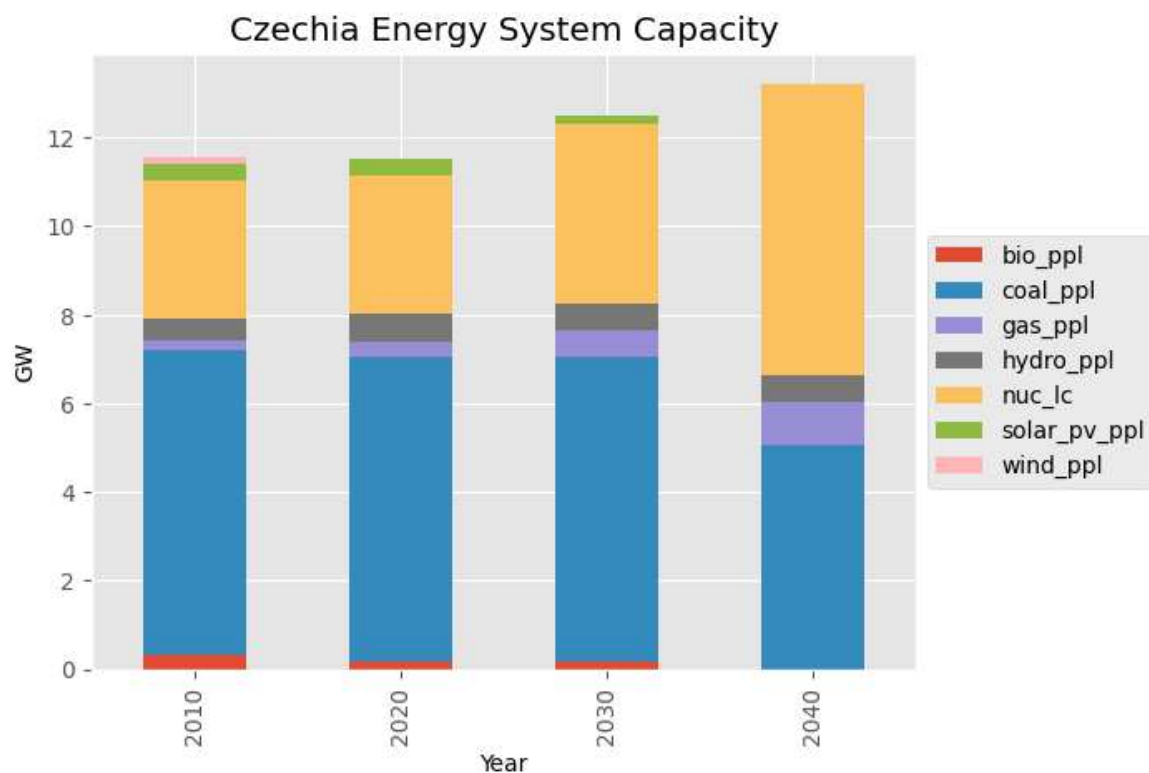
Graf 39. Scénář „Základní“ – Nové kapacity energetického mixu ČR



Zdroj: Vlastní zpracování

Maximální změnu dle nově vybudovaných kapacit kvůli velké efektivitě, atraktivním investičním a fixním nákladům dostanou jaderné elektrárny. Srovnatelné, ale o něco dražší a méně účinné uhelní elektrárny dostanou druhé největší nové kapacity. Nakonec plynové elektrárny kvůli nejmenším nákladům na výstavbu a údržbu dostanou nárůst kapacit, ale řadově menší, a to kvůli násobně slabší efektivitě.

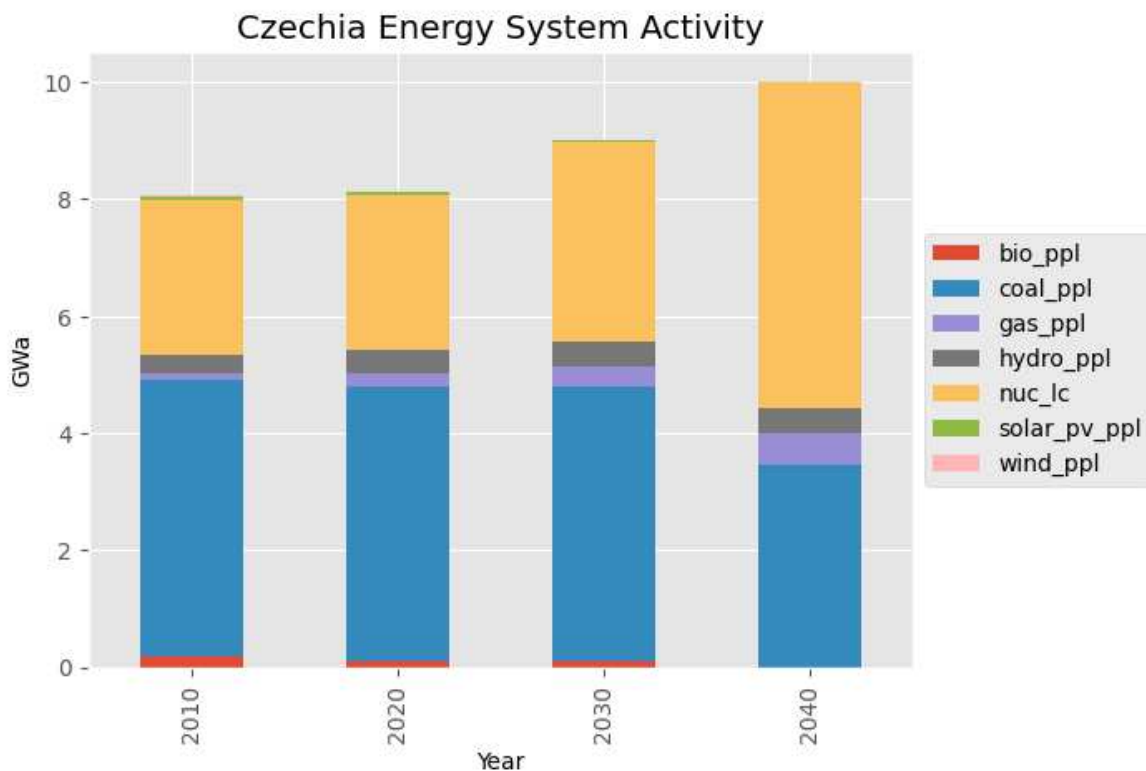
Graf 40. Scénář „Základní“ – Kapacity energetického mixu ČR



Zdroj: Vlastní zpracování

Z grafu plyne, že postupně ekonomicky efektivnější technologie produkce elektřiny vytlačují a nahrazují ty slabší. Při chybějících nově vybudovaných kapacitách přirozeně se vyřadí k roku 2040 z provozu větrné, fotovoltaické a bioelektrárny.

Graf 41. Scénář „Základní“ - Aktivita energetického mixu ČR



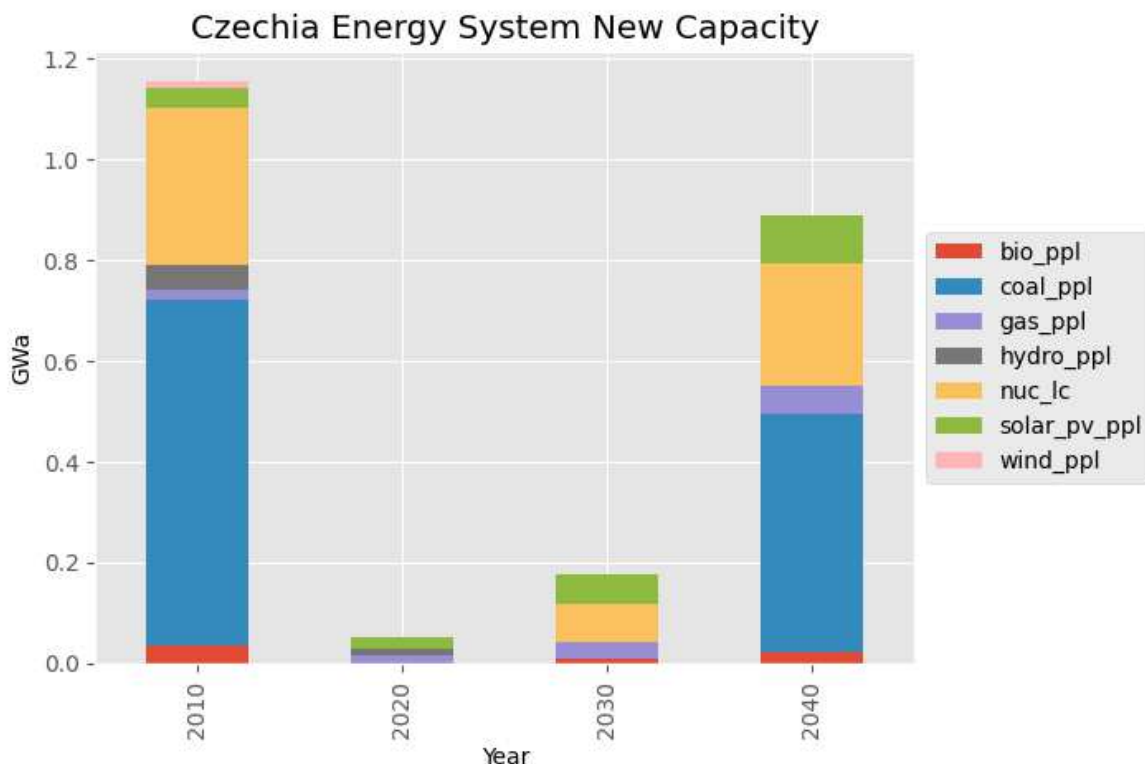
Zdroj: Vlastní zpracování

Graf aktivity znázorňuje ještě větší podíly jaderných a uhelných elektráren kvůli relativně větší efektivitě výroby elektřiny.

5.2 Dotace obnovitelných zdrojů

V daném scénáře bylo předpokládáno, že větrné, fotovoltaické a bio- elektrárny dostanou dotace 85% investičních nákladů.

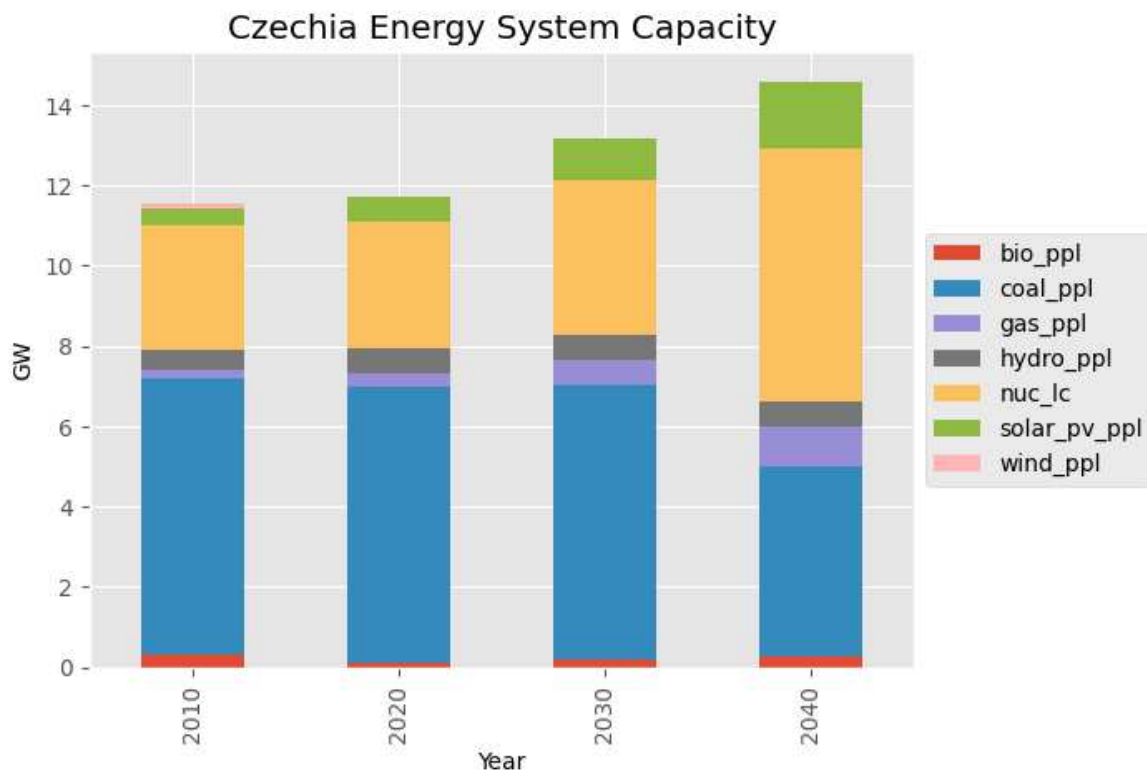
Graf 42. Scénář „Dotace obnovitelných zdrojů“ - Nové kapacity energetického mixu ČR



Zdroj: Vlastní zpracování

Z grafu nově vybudovaných kapacit je patrné, že největší účinnost dotace dosahují pro fotovoltaické elektrárny. Důvodem jsou druhé nejnížší po plynovým fixní náklady. Jelikož v rámci tohoto scénáře jsou investiční náklady dotovány, tento parametr dostává větší vliv na model, a proto bioelektrárny a větrné elektrárny, které mají po vodním elektrárnám největší fixní náklady, nevykazují stejnou atraktivitu z hlediska modelu, přičemž větrné elektrárny kvůli násobně nižší efektivitě v porovnání s bio nové kapacity vůbec v rámci scénářů nedostanou. Stojí za zmínku, že kapacity konvenčních technologií výroby elektřiny, jmenovitě uhelní, jaderné a plynové elektrárny, i bez dotací rostou, tudíž vliv dotací investičních nákladů jako nástroje zvýhodnění ekologičtějších technologií výroby automaticky nevede k jejich dominanci na energetickém trhu.

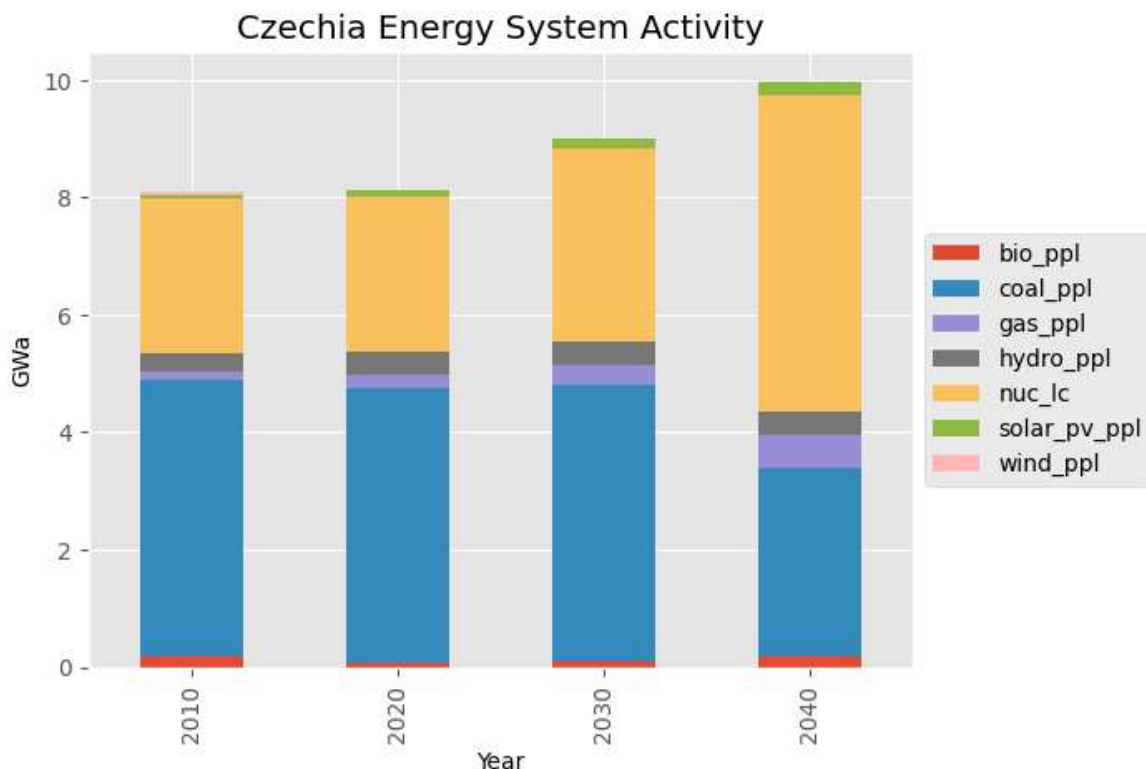
Graf 43. Scénář "Dotace obnovitelných zdrojů" - Kapacity energetického mixu ČR



Zdroj: Vlastní zpracování

V podmínkách nepřítomnosti nástrojů motivace ke snižování použití efektivních, avšak neekologických technologií, jakož jsou použité v následujícím scénáře emisní povolenky, uhelné elektrárny pokračují v existenci až do roku 2040, když jsou částečně nahrazeny jadernými, plynovými a slunečními elektrárnami.

Graf 44. Scénář "Dotace obnovitelných zdrojů" - Aktivita energetického mixu ČR



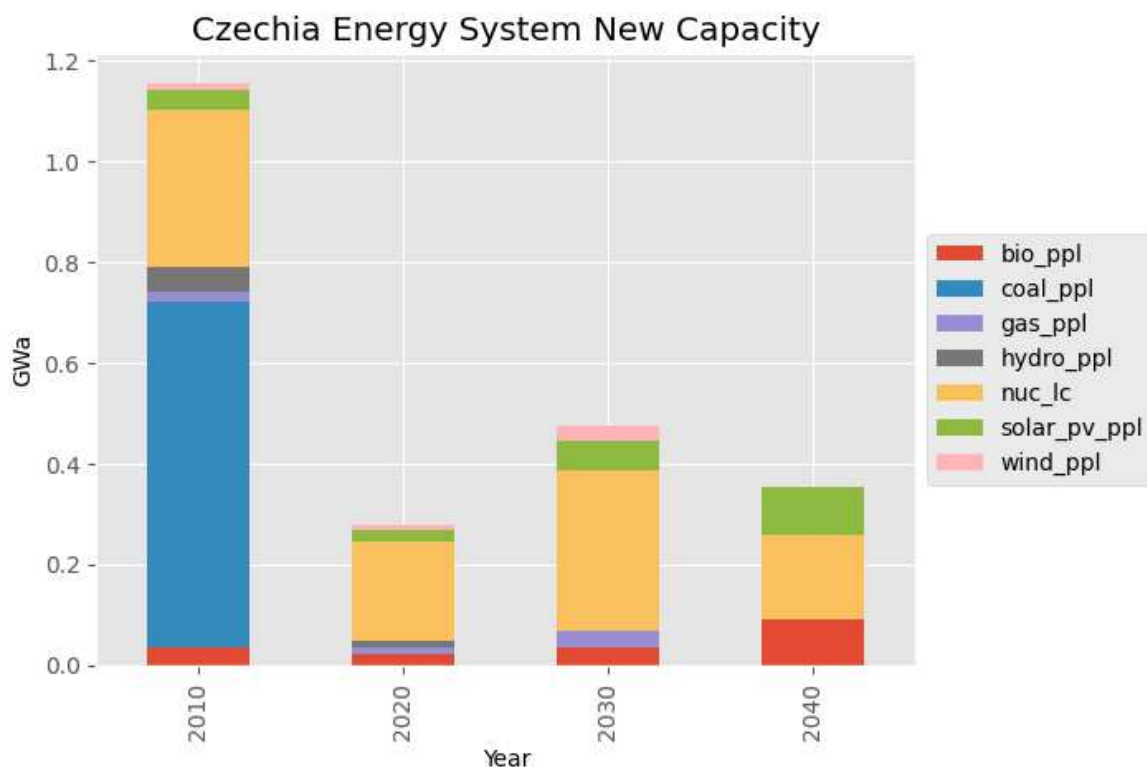
Zdroj: Vlastní zpracování

Graf aktivity zvýrazňuje kvůli relativně menší efektivitě výroby elektřiny ne tak velkou významnost solární fotovoltaické energie v energetickém mixu a větší dominance jaderné energie.

5.3 Emisní povolenky a dotace

V rámci tohoto scénáře bylo předpokládáno, že emisní povolenky mají cenu 20 za tunu CO₂ v roce 2010, 25 v roce 2020, 50 v roce 2030 a 75 v roce 2040. Dotace jsou předpokládány ve stejných hodnotách, jako v předchozím scénáři, a jsou použity pouze pro obnovitelné zdroje: solární fotovoltaickou, větrní energie a biopaliva.

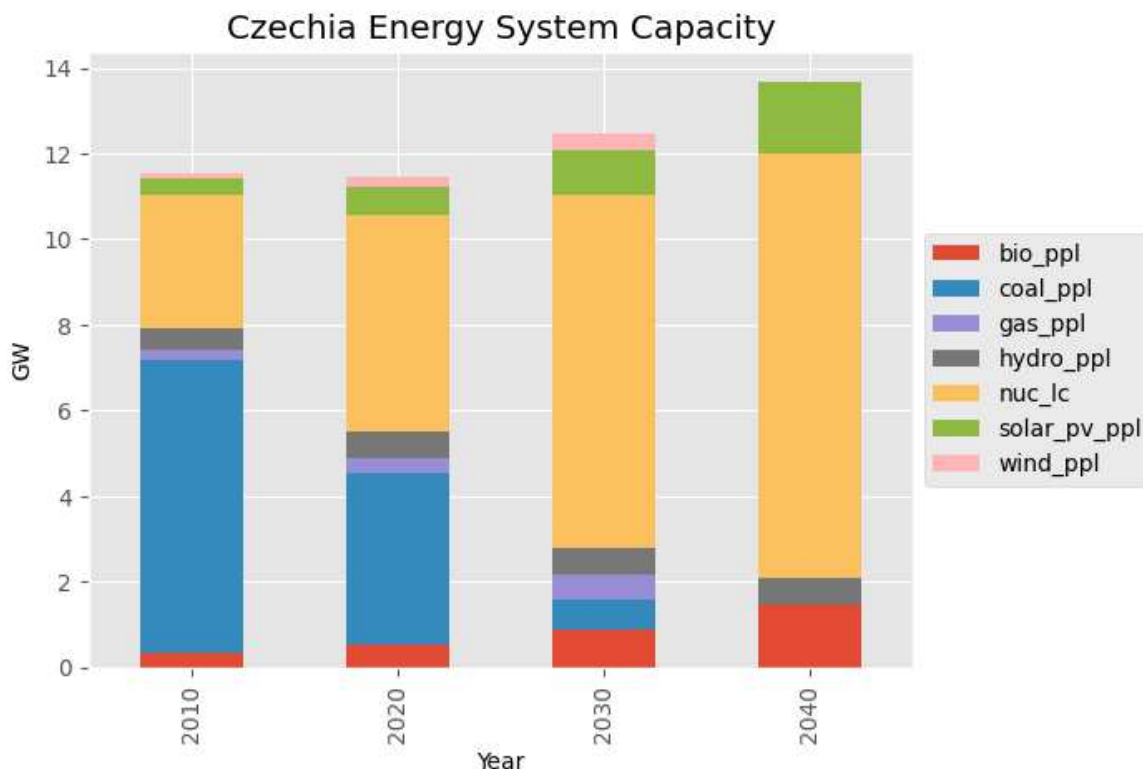
Graf 45. Scénář "Emisní povolenky a dotace" - Nové kapacity energetického mixu ČR



Zdroj: Vlastní zpracování

Největší podíl mezi vybudovanými kapacitami dle modelu zaberou jaderné elektrárny, ale nové kapacity dostanou všechny obnovitelné zdroje: biopaliva, fotovoltaika, vítr, a dokonce i plyn, který je ekologičtější než uhlí.

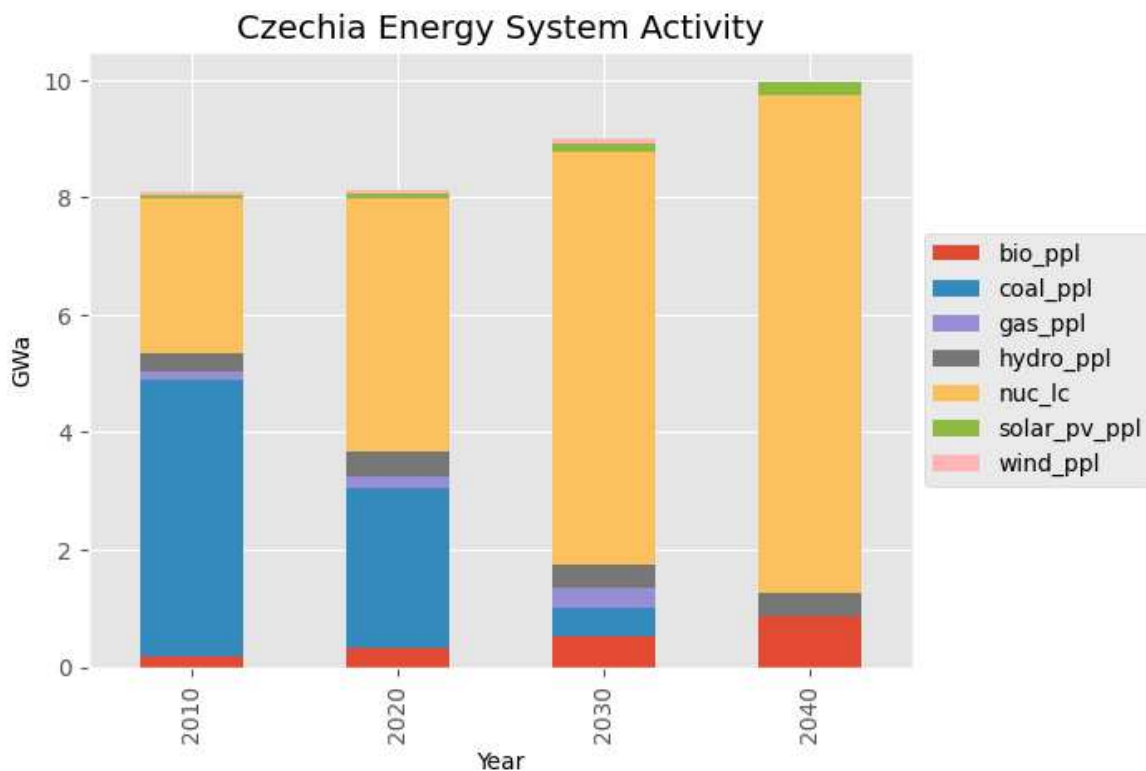
Graf 46. Scénář "Emisní povolenky a dotace" - Kapacity energetického mixu ČR



Zdroj: Vlastní zpracování

Z grafu plyne, že uhelní elektrárny zmizí z energetického mixu k roku 2040. Důvodem k tomu jsou pouze emisní povolenky, jelikož pouze dotace k tomuto výsledku nepřivedly. Při maximálních cenách emisních povolenek však zůstává pouze fotovoltaické, bio a jaderné elektrárny. Možným důvodem je, že nejefektivnější z hlediska výroby elektřiny jaderné elektrárny nemůžou uspokojit poptávku v podmínkách tak rychlého poklesu kapacit uhelných elektráren, a proto se v energetickém mixu 2020 a 2030 let vyskytuje i nárůst plynových kapacit, i když jsou také zdaněny, jenom méně.

Graf 47. Scénář "Emisní povolenky a dotace" - Aktivita energetického mixu ČR



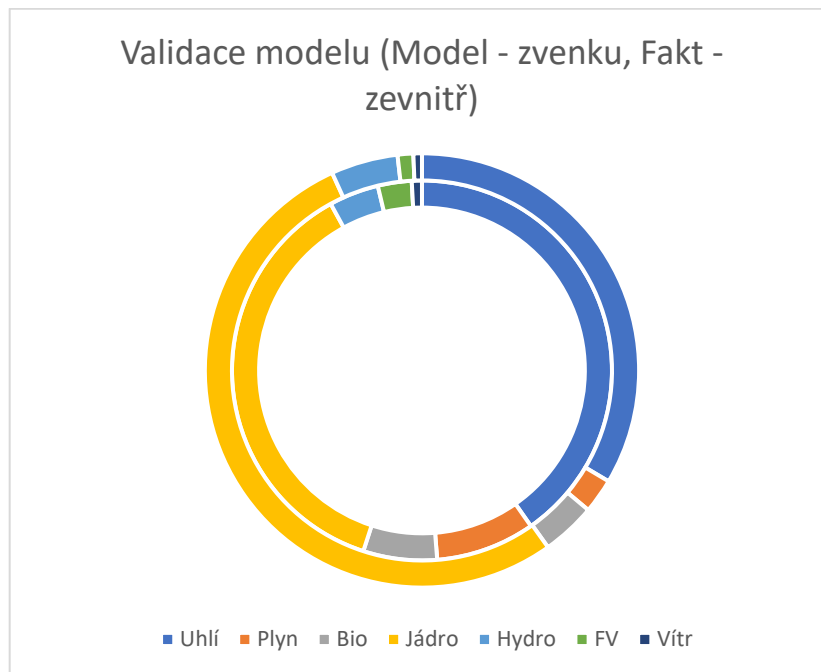
Zdroj: Vlastní zpracování

V podmínkách dotací obnovitelných zdrojů a rostoucích cen emisních povolenek k roku 2020 v hrubé výrobě elektřiny dle modelu budou dominovat jaderné elektrárny, které vykazují prudký růst. Nicméně, biopaliva a fotovoltaika v poměru k hodnotám roku 2010 taktéž významně rostou.

5.4 Validace modelu (Emisní povolenky a dotace)

Výstup modelu z roku 2020 byl porovnán s reálnými daty a za účelem validace byly provedeny párový T-test a Welchův test.

Graf 48. Validace modelu pro scénář "Emisní povolenky a dotace"



Zdroj: Vlastní zpracování

Vizuální reprezentace znázorňuje, že největší rozdíl mezi modelem a reálnými daty spočívá v příliš optimistickém pohledu modelu vůči růstu jádra. Nicméně, ostatní ukazatele aktivity jsou poměrně blízko realitě. Navíc, odhad modelem tendencí, že podíl jádra, biopaliv, větrné, sluneční a plynové energie v energetickém mixu poroste, a podíl uhlí se zkrátí, je dalším pozorováním v prospěch modelu.

Tabulka 4. Výstup párového T-Testu

	Variable 1	Variable 2
Mean	1.158574	1.15974
Variance	1.866226	2.813028
Observations	7	7
Pearson Correlation	0.938141	
Hypothesized Mean Difference	0	
df	6	
t Stat	-0.005	
P(T<=t) one-tail	0.498085	

	Variable 1	Variable 2
t Critical one-tail	1.94318	
P(T<=t) two-tail	0.996171	
t Critical two-tail	2.446912	

Zdroj: Vlastní zpracování

Byl proveden párový T-test, jehož nulovou hypotézou je nepřítomnost statisticky významných rozdílů mezi průměry pár. Výsledek testu tuto hypotézu nedá odmítnout ani pro významnost 0.9.

Musí být zmíněno, že T-test funguje v rámci předpokladu stejné směrodatné odchylky u populací, což se dá zpochybnit ve výš uvedeném případě.

Welchův test nevyžaduje tento předpoklad. Ten test byl proveden pomocí knihovny stats v Python.

Obrázek 6. Výstup Welchůva testu

```
t-statistic: -0.0014261091209408915
p-value: 0.9988865104817926
Fail to reject the null hypothesis: Samples are not statistically different
```

Zdroj: Vlastní zpracování

I když odděleně vizuální analýza, T-test a Welchův test na takovém relativně malém množství dat nemusí svědčit o tom, že model rozumně reprezentuje data, v kombinaci se dá tvrdit, že validace modelu proběhla uspokojivě.

6 Závěr

V dané práci byl proveden vývoj zjednodušeného modelu energetického mixu České republiky pomocí modelovacího rámce MESSAGE. Pomocí tohoto modelu byli zanalyzovány 3 scénáře rozvoje energetického mixu: základní, s použitím dotací na obnovitelné zdroje a poslední scénář měl navíc k dotacím i emisní povolenky.

V nepřítomnosti externího vlivu uhelní elektrárny kvůli svým výhodám v účinnosti, investičních nákladech a nákladech na údržbu rychle nahrazují ostatní technologie výroby.

Dotace obnovitelných zdrojů sice navýšili jejich podíl v energetickém mixu při zmenšení podílu uhelní energie, ale nedokázali změnit energetický mix na úplně uhlíkově neutrální.

Scénář s emisními povolenky a dotacemi prošel validací reálnými daty a predikoval dominance jaderné energie v energetickém mixu kvůli největší účinnosti výroby elektřiny a aspoň v porovnání s obnovitelnými zdroji konkurenceschopných nákladech na údržbu při významném růstu solární fotovoltaické energie a energie, vyrobené pomocí biopaliv.

Tento scénář byl jediný, který dokázal úplně odstranit uhelní energie z energetického mixu, tudíž pouze dotací obnovitelných zdrojů není možné dosáhnout uhlíkové neutrality, zahrnuté do Vnitrostátního planu ČR v rámci dodržení nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) o správě energetické unie a opatření v oblasti klimatu.

Tím pádem, politická opatření ČR, jmenovitě implementace obchodování emisními povolenky a dotace obnovitelných zdrojů jsou nenahraditelné pro dosažení výš uvedených cílů, a dokonce i zjednodušený model energetického mixu je schopen to potvrdit a posloužit k nekomplikované komunikace těchto souvislostí dotčeným fyzickým a právnickým osobám.

7 Seznam použitých zdrojů

- BP. (2021). Statistical Review of World Energy.
- Brno, E. G. (2019). Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu Národního Klimaticko-Energetického Plánu (NKEP) pro oblast FVE.
- Capros, P., Paroussos, L., Fragkos, P., Tsani, S., Boitier, B., Wagner, F., . . . Bollen, J. (February 2014). Description of models and scenarios used to assess European decarbonisation pathways. *Energy Strategy Reviews*, 2, 220–230. doi:10.1016/j.esr.2013.12.008
- Centrum pro otázky životního prostředí University Karlovy (UK). (2015). Kvantifikace environmentálních a zdravotních dopadů z povrchové těžby hnědého uhlí. *Kvantifikace environmentálních a zdravotních dopadů z povrchové těžby hnědého uhlí*. Načteno z <https://www.mpo.cz/dokument161524.html>
- Český Statistický Úřad (ČSU). (2023). Energetická bilance 2010–2021.
- Dodds, P. E., Keppo, I., & Strachan, N. (June 2014). Characterising the Evolution of Energy System Models Using Model Archaeology. *Environmental Modeling & Assessment*, 20, 83–102. doi:10.1007/s10666-014-9417-3
- E. G. Ú. Brno. (2009). Simulační a analytický model MAES [online]. Načteno z http://egubrno.cz/sekce/s001/s001_maes.html
- Franke, D., Ladage, S., Lutz, R., Pein, M., Pletsch, T., Rebscher, D., . . . von Görne, G. (2022). BGR Energy Study 2021. doi:10.25928/ES-2021-EN
- Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., . . . Riahi, K. (2017, January). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 251–267. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.004
- Hanslian, D. (2020). Aktualizace potenciálu větrné energie v České republice z perspektivy roku 2020. *Ústav fyziky atmosféry AV ČR, vvi*.
- Hardt, L., & O'Neill, D. W. (April 2017). Ecological Macroeconomic Models: Assessing Current Developments. *Ecological Economics*, 134, 198–211. doi:10.1016/j.ecolecon.2016.12.027
- Hospodářská Komora České Republiky (HKČR). (2012). 90/12 Potenciál snižování emisí znečišťujících látek v ČR k roku 2020. *90/12 Potenciál snižování emisí znečišťujících látek v ČR k roku 2020*. Načteno z <http://www.komora.cz/pro-podnikani/legislativa->

- a-normy/pripominkovani-legislativy/nove-materialy-k-pripominkam/90-12-potencial-snizovani-emisi-znecistujicich-latek-v-cr-k-roku-2020-t-10-4-2012.aspx
- Huppmann, D., Gidden, M., Fricko, O., Kolp, P., Orthofer, C., Pimmer, M., . . . Krey, V. (2019, February). The MESSAGE Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development. *Environmental Modelling & Software*, *112*, 143–156. doi:10.1016/j.envsoft.2018.11.012
- IIASA Energy, Climate, and Environment (ECE) Program. (2018). MESSAGEix model & framework. Načteno z <https://docs.messageix.org/en/latest/framework.html>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2024). Czech Republic country report. *Czech Republic country report*.
- International Energy Agency (IEA). (2023). World Energy Balances (database).
- International Energy Agency (IEA). (2021). Czech Republic 2021. Energy policy overview. *Czech Republic 2021. Energy policy overview*.
- IPCC. (August 2022). Annex III: Scenarios and modelling methods. *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*, 1841–1908. doi:10.1017/9781009157926.022
- Krey, V. (February 2014). Global energy-climate scenarios and models: a review. *WIREs Energy and Environment*, *3*, 363–383. doi:10.1002/wene.98
- Krey, V., Guo, F., Kolp, P., Zhou, W., Schaeffer, R., Awasthy, A., . . . van Vuuren, D. P. (2019, April). Looking under the hood: A comparison of techno-economic assumptions across national and global integrated assessment models. *Energy*, *172*, 1254–1267. doi:10.1016/j.energy.2018.12.131
- Krey, V., Havlik, P., Fricko, O., Johanna, Z., Gidden, M., Strubegger, M., . . . Riahi, K. (2016). *MESSAGE–GLOBIOM 1.0 Documentation*. Laxenburg. Načteno z <http://data.ene.iiasa.ac.at/message-globiom/>
- Loulou, R., Remne, U., Kanudia, A., Lehtilä, A., & Goldstein, G. (2005). Documentation for the TIMESModel PART I. Načteno z <http://www.iea-etsap.org/web/Docs/TIMESDoc-Intro.pdf>
- Ministerstvo Průmyslu a Obchodu (MPO). (12 2014). Státní energetická koncepce České republiky. Praha.
- Ministerstvo Průmyslu a Obchodu (MPO). (2023). Aktualizace Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu.

- Ministerstvo Životního Prostředí ČR (MŽP). (2017). Politika ochrany klimatu v České republice.
- OECD. (2006). Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective. *The Red Book Retrospective*.
- Rečka, L., & Ščasný, M. (2013). ANALÝZA DOPADŮ REGULACE V ČESKÉMELEKTROENERGETICKÉM SYSTÉMU – APLIKACE DYNAMICKÉHO LINEÁRNÍHO MODELU MESSAGE. *Politická ekonomie [online]*.
- Scricciu, S., Rezai, A., & Mechler, R. (November 2012). On the economic foundations of green growth discourses: the case of climate change mitigation and macroeconomic dynamics in economic modeling. *WIREs Energy and Environment*, 2, 251–268. doi:10.1002/wene.57
- Trnavský, J. (February 2009). Potenciál vodní energie v České republice. *Energie 21*. Načteno z <https://old2.profiipress.cz/archiv/energie-21-022009/>
- United States Energy Information Administration (EIA). (2024). World data.

8 Seznam obrázků, tabulek, grafů a zkratk

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1. Schéma referenčního energetického systému použitého při modelování	18
Obrázek 2. Klasifikace modelů dle úrovně detailů a hierarchie.....	20
Obrázek 3. Schéma referenčního energetického systému TIMES-CZ.....	24
Obrázek 4. Modelovací rámec IISA-IAM.....	25
Obrázek 5. Integrace MESSAGE a modelovací platformy IXMP.....	26
Obrázek 6. Výstup Welchůva testu	73

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1. Množiny v modelu MESSAGE.....	14
Tabulka 2. Popis rozhodovacích proměnných MESSAGE.....	16
Tabulka 3. Popis pomocných proměnných MESSAGE.....	17
Tabulka 4. Výstup párového T-Testu.....	72

8.3 Seznam grafů

Graf 1. Uhlí – Produkce v ČR (1993–2024).....	29
Graf 2. Uhlí – Primární produkce a energetické zdroje (1971–2022).....	30
Graf 3. Uhlí – Vývoz a dovoz (1971–2022).....	31
Graf 4. Uhlí – Vývoz a dovoz (2003–2022).....	31
Graf 5. Uhlí – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021).....	32
Graf 6. Ropa a další tekutiny – produkce (1994–2022)	33
Graf 7. Ropa a další tekutiny – produkce (2012–2022)	34
Graf 8. Ropa – Primární produkce a vývoz (1991–2022)	35
Graf 9. Ropa – Primární produkce a vývoz (2003–2022)	36
Graf 10. Ropa – Primární energetické zdroje a dovoz (1991–2022).....	37
Graf 11. Ropa – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)	38
Graf 12. Plyn – Produkce v ČR (1993–2022).....	39

Graf 13. Plyn – Produkce v ČR (2012–2022).....	40
Graf 14. Plyn – Primární energetické zdroje a dovoz (1971–2022).....	40
Graf 15. Plyn – Primární energetické zdroje a dovoz (2012–2022).....	41
Graf 16. Plyn – Vývoz a primární produkce (1971–2022).....	42
Graf 17. Plyn – Primární produkce (2013–2022).....	43
Graf 18. Plyn – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)	43
Graf 19. Jaderná energie – Primární produkce a energetické zdroje (1971–2021)...	44
Graf 20. Jaderná energie – Primární produkce a energetické zdroje (2003–2022)...	45
Graf 21. Jaderná energie – Hrubá výroba elektřiny (2010–2022).....	46
Graf 22. Obnovitelné a odpad – Primární produkce a energetické zdroje (1971–2022)	47
.....	
Graf 23. Obnovitelné a odpad – Primární produkce a energetické zdroje (2003–2022)	48
.....	
Graf 24. Obnovitelné a odpad – Vývoz a dovoz (1971–2022)	48
Graf 25. Obnovitelné a odpad – Vývoz a dovoz	49
Graf 26. Obnovitelné a odpad – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021)	50
Graf 27. Pevná biomasa – Primární energetické zdroje a produkce (2010–2021)....	51
Graf 28. Pevná biomasa – Vývoz a dovoz (2010–2021).....	52
Graf 29. Pevná biomasa – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021).....	53
Graf 30. Bioplyn – Primární produkce a hrubá výroba elektřiny (2010–2021)	54
Graf 31. Metylestery řepkového oleje (MEŘO) - Primární energetické zdroje a produkce (2010–2021).....	55
Graf 32. Metylestery řepkového oleje (MEŘO) - Vývoz a dovoz (2010–2021)	56
Graf 33. Energie prostředí (tepelná čerpadla) (2010–2021).....	57
Graf 34. Solární termální energie (2010–2021)	58
Graf 35. Solární fotovoltaická energie (2010–2021).....	59
Graf 36. Větrná energie (2010–2021)	60
Graf 37. Vodní energie (2010–2021)	61
Graf 38. Vodní energie – Hrubá výroba elektřiny (2010–2021).....	62
Graf 39. Scénář „Základní“ – Nové kapacity energetického mixu ČR	63
Graf 40. Scénář „Základní“ – Kapacity energetického mixu ČR	64
Graf 41. Scénář „Základní“ - Aktivita energetického mixu ČR	65

Graf 42. Scénář „Dotace obnovitelných zdrojů“ - Nové kapacity energetického mixu Čr	66
Graf 43. Scénář "Dotace obnovitelných zdrojů" - Kapacity energetického mixu Čr	67
Graf 44. Scénář "Dotace obnovitelných zdrojů" - Aktivita energetického mixu Čr	68
Graf 45. Scénář "Emisní povolenky a dotace" - Nové kapacity energetického mixu Čr	69
Graf 46. Scénář "Emisní povolenky a dotace" - Kapacity energetického mixu Čr...	70
Graf 47. Scénář "Emisní povolenky a dotace" - Aktivita energetického mixu Čr	71
Graf 48. Validace modelu pro scénář "Emisní povolenky a dotace"	72

8.4 Seznam použitých zkratk

Čr	Česká republika
PJ	Petajoule
GWh	Gigawatthodina
Bcm	Miliardy kubických metrů (Billion cubic metres)
MEŘO	Methylestery řepkového oleje
TWh	Terawatthodina

Přílohy

1. Soubor Microsoft Excel vstupních dat do modelu czechia_baseline_data.xlsx
2. Soubor Jupyter Notebook s kódem Python, použitý k vývoji modelu
Czechia_energy_system.ipynb
3. Soubor Microsoft Excel grafů pro této práci Charts.xlsx
4. UML Schéma referenčního energetického systému, použitého v modelování
UML_Schéma.svg