



Centrum socio-ekonomického výzkumu
dopadů environmentálních politik



UNIVERZITA KARLOVA
Centrum pro otázky životního prostředí

Modelování dekarbonizace české ekonomiky: Scénáře pro NKEP a jak dále?

Milan Ščasný*, Lukáš Rečka*, Vojtěch Máca*, Vladimír Kubeček*

Matěj Opatrný, Dali Laxton, Patrik Lenz, Lukáš Novák, Inaki Veruete, Vědunka Kopečná,
Bence Kiss-Dobronyi♦, Ioannis Gutzianas♦, Dora Fazekas♦

* Univerzita Karlova, Centrum pro otázky životního prostředí

♦ Cambridge Econometrics

• ČEPS, a.s.

Kampus Hybernská, 8. leden 2024

T A
Č R

Tento projekt SS04030013 Centrum socio-ekonomického výzkumu dopadů environmentálních politik je financován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí ČR v rámci Programu Prostředí pro život..

www.tacr.cz

www.mzp.cz



15:15-15:40	Modelování scénářů dekarbonizace: Přístupy, modely, scénáře, ekonomické dopady Milan Ščasný, UK-COŽP SEEPIA
15:40-15:55	Validace makro-modelování – Zdrojová přiměřenost, stabilita sítě a dodávek elektrické energie Vladimír Kubeček, ČEPS a UK-COŽP SEEPIA Diskuse
16:15-17:00	Modelování energetiky a průmyslu (TIMES) Lukáš Rečka, UK-COŽP SEEPIA
17:00-17:20	Modelování dopravy (TIMES) Vojtěch Máca, UK-COŽP SEEPIA
17:20-17:45	Diskuse & Jak dále



- méně **emisí**, více **OZE**, větší **energetická efektivita**
 - + při zachování **ekonomického výkonu** a bez eskalace sociálních dopadů a **energetické chudoby**
- úspory energie → nižší výdaje za energie
- nové technologie (CCS|CCU, SMR, AI,..) a energie (vodík)
- elektrifikace
- nové struktury (infrastruktura, smart,...) a instituce (governance)
- změna chování a životního stylu



Co znamená modelování?

Nejde o předpověď budoucnosti, ale analýzu vývoje na základě předpokladů

- **Ekonomická racionalita** (kupují|investují, co je levnější)
 - Realita obvykle neodpovídá výsledkům optimálního (racionálního) chování
- **Exogenní vs endogenní faktory a parametry**
 - **Exogenní:** definovány zadavatelem nebo modelářem
 - **Endogenní:** výsledkem modelování a predikcí modelem
- **Validace** modelovacích nástrojů
 - TIMES → PLEXOS
 - TIMES → E3ME
- **Integrace** modelů
 - E3ME|CGE → DASMOM
 - TIMES → E3ME
 - TIMES → CGE, CGE → DASMOM



Predikce investic během příštích 10 let: **5 300 mld. Kč** (WEM|NKEP)

➤ ve srovnání s HDP: **≈ 6 000 mld. Kč** (ČR 2022)

Ekonomika bez FF55 nebo NKEP bude vést ke změnám a tedy k investicím

➤ **ve srovnání s referenčním sc.|BAU: + 750 mld. Kč**

- *NJZ:* + 138 mld. Kč
- *Renovace budov* + 370 mld. Kč
- *FVE, VtE* + 130 mld. Kč

Modelování dopadů musí vždy **srovnávat dopady scénářů s a bez politiky**



- + **investice** do technologií (OZE, EE, BEV,...)
- + **náklady financování investic** (výstavba NJZ)
- + vyšší cena **emisních povolenek** a tím platby za emise
- + náklady **systemu** (přenosové a distribuční sítě, ukládání elektřiny)
- + náklady další **infrastruktury** (dobíjecí stanice)

- Nižší výdaje za nepotřebný **kapitál** (neúsporné spotřebiče, vozidla,...)
- Nižší **výdaje za energie**
- Nižší výdaje za **povolenky** v případě snížení emisí
- Nižší výdaje za nepotřebnou **infrastrukturu** (čerpací stanice PH)



MODELY



SEPIA Modelování energetického systému

- + detailní informace o technologiích
- HDP a další agregáty jsou exogenní -- dopady není možné kvantifikovat

Uhlíkové kalkulačky, Pathway Explorer

- Prostá výměna jedné technologie nebo služby za druhou; bez optimalizace nákladů, nereálné kombinace technologií a scénářů možné

Simulační modely

- elektro-energetický mix výroby elektřiny z pohledu stability sítě a dodávek (zdrojová přiměřenost)
- PLEXOS (ČEPS, ČEZ): PyPSA (DG REFORM|MPO); modely AV ČR (Horáček) nebo AMO (Krčál – vč. tepla)

Nákladová optimalizace

- Nákladové optimalizační modely: TIMES-CZ

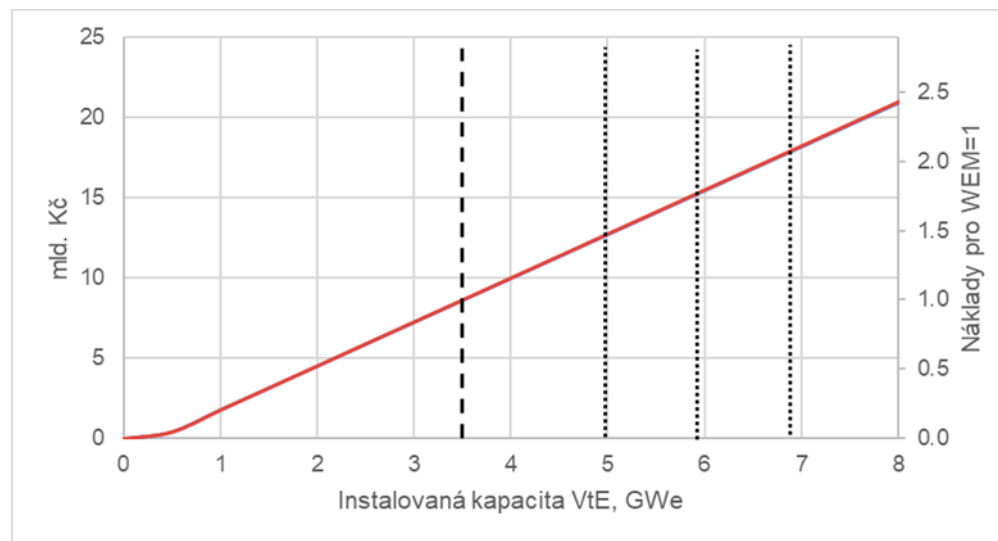
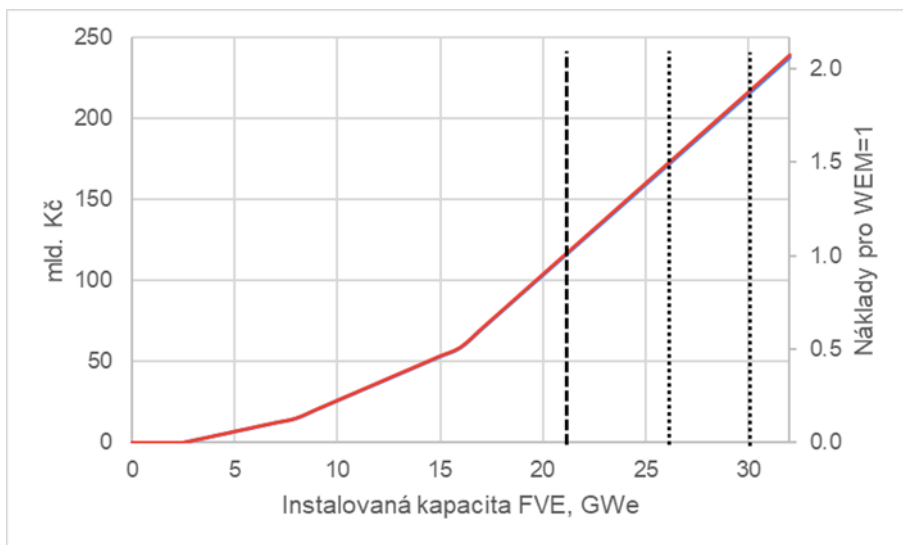
Výzva:

- jak modelovat systémové náklady (náklady elektroenergetického systému)



Systemové náklady OZE v TIMES, mld. Kč(2020)

+15% kapacity baterií, bez efektu BEV a změn na straně spotřeby



Pozn.: kapacita FVE a VTE v různých scénářích WEM je značena čárkovanou/tečkovanou linkou

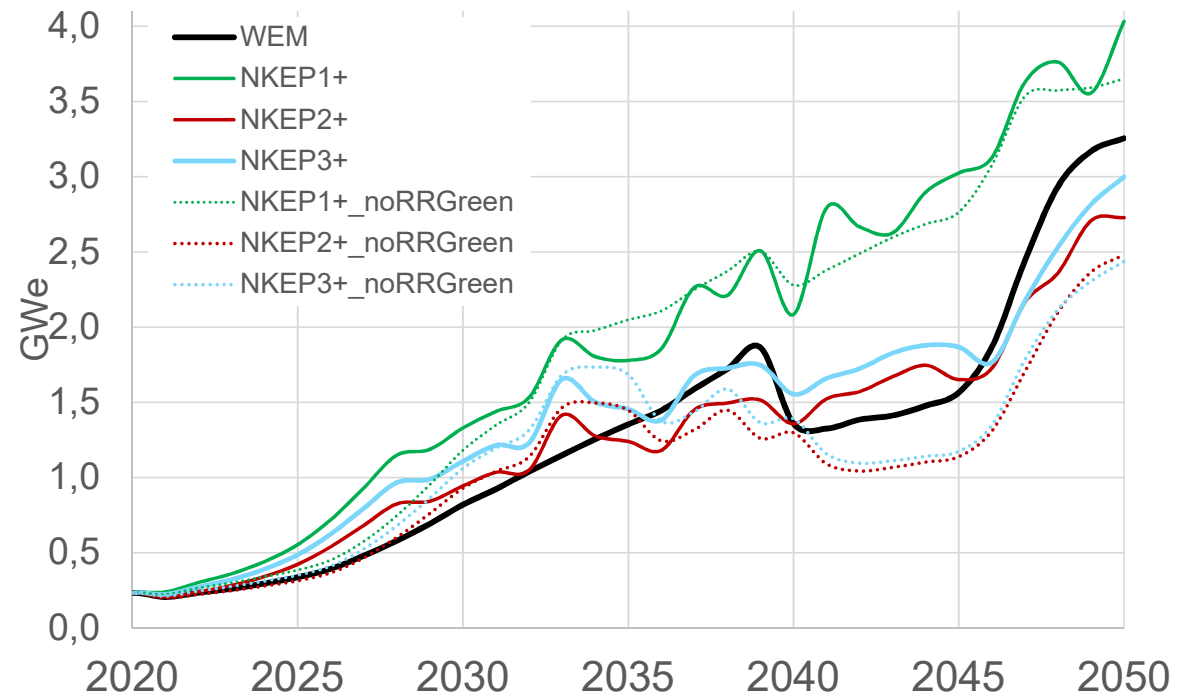
Ukládání elektřiny z OZE

TIMES, PLEXOS

- 15% instalované kapacity FVE+VtE

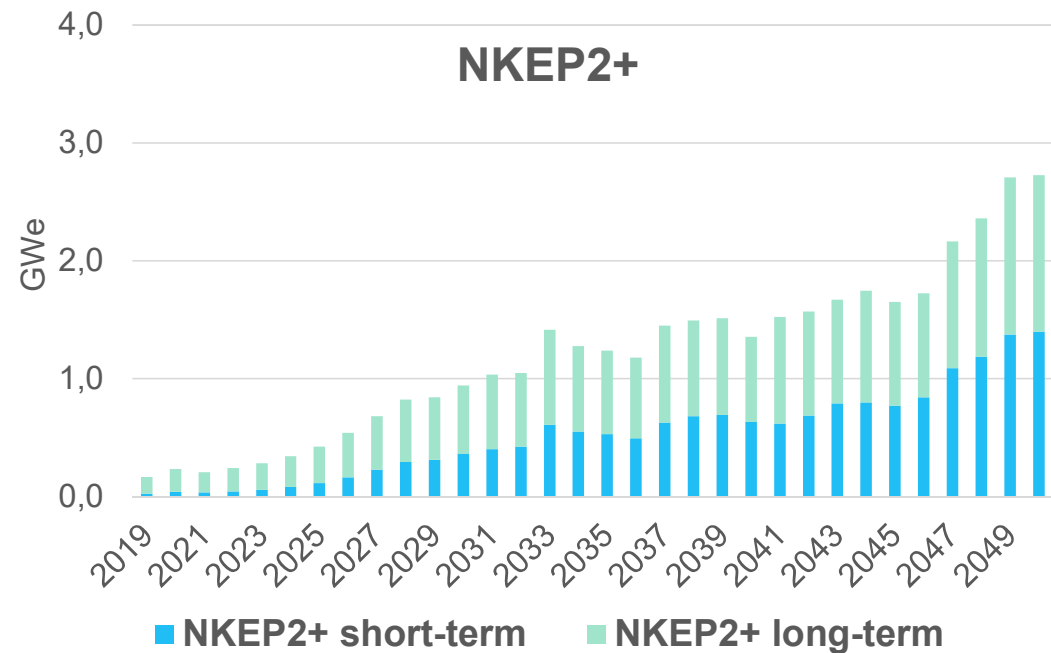
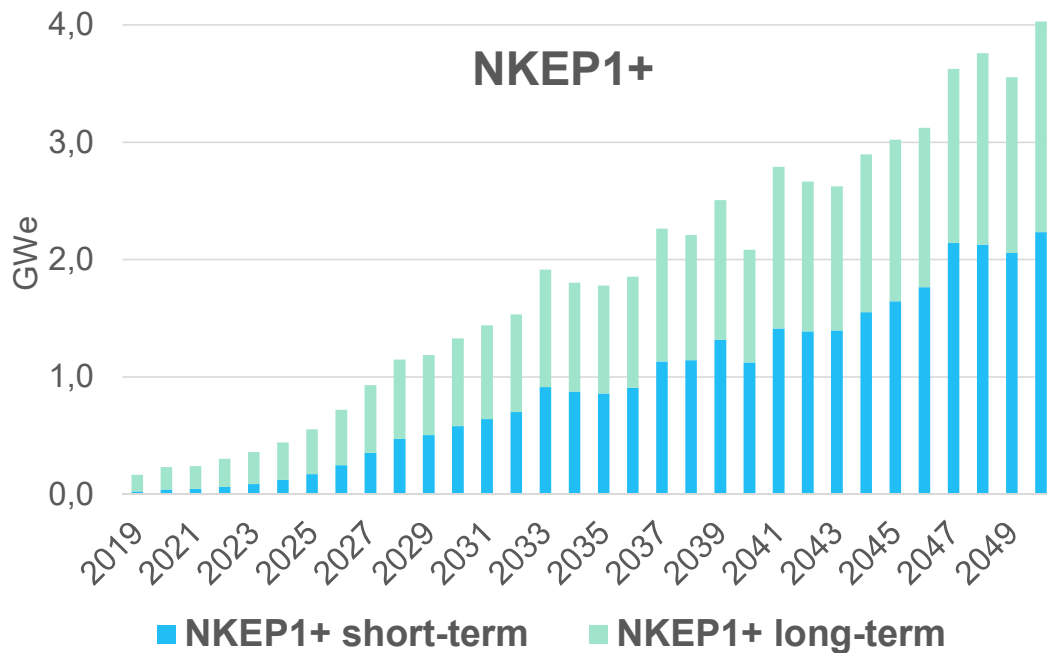
E3ME:

- Short-term & long-term storage, GWe
- endogenně determinovaná cena i objem ukládání →



E3ME FTT:Power

Electricity storage, short-term & long-term, GWe



TIMES-CZ

- Optimalizační model energetického systému ČR 2019-2050
- volba technologického mixu na základě celkových nákladů technologií (CAPEX, OPEX, WACC, paliva, daně/dotace, EUA) → **minimalizace celkových diskontovaných nákladů**
- exogenní agregátní **poptávka po energetických službách** (°C vytápění, spotřebiče, okm, tkm, výroba energeticky náročných výrobků...)
- substituce na několika úrovních:
 - **mezi efektivitou (úspory) a spotřebou nosičů energie** (MWh, GJ, I)
 - **mezi teplem a elektřinou**
 - **mezi domácí výrobou a dovozy** (elektřina, vodík, ukládání uhlíku z CCS)
 - **mezi technologiemi jak se energie (kWh, GJ) vyrobí**
- **technologický mix, spotřeba elektřiny**, tepla, litrů ropných produktů je endogenní (výsledkem nákladové optimalizace v modelu)

PLEXOS (ČEPS, a.s.)

- Simulační model zdrojové přiměřenosti
- Profily dovozů modelovány v rámci sítě ENTSO-E
- **technologický mix a spotřeba elektřiny** jsou exogenní (jsou vstupem do modelu)
- validace předpokladů o instalacích OZE, profily dovozu/vývozu elektřiny s TIMES-CZ



- + dopady na makro ekon agregáty (HDP, zaměstnanost, výstup,...)
- chybí technologie, distribuční dopady omezeně (reprezentativní domácnost)

Input-output analýza

- fixní tech koef → pouze dopady v krátkém období

Modely obecné rovnováhy (CGE)

- obecná rovnováha, dokonalá konkurence, plně využití kapacity a zdroje

Post-keynesiánské (ekonometrické modely, E3ME)

- nerovnováha, nedokonalá konkurence, nevyužití kapacity, úvěrové financování

Hybridizace makroekon modelů (CGE|E3ME)

- technologické moduly (výroba ele a tepla, substituce vozidel, atp.)
- dopady na segmenty domácností (více segmentů, link na mikro-simulace)
- externality (škody na ŽP a zdraví)



E3ME

- Makro-ekonometrický globální model
- FTT: *Future Technology Transformations* (Power, Heat, Transport, Steel)
- Volba podobně jako v TIMES plus endog learning curves, vliv kapacit na přírůstky (diff.eq)
- FTT:Power – vynucené skladování elektřiny pro VREs plus nižší využití (*curtailments*)
- Výnos z prodeje EUA závisí na objemu GHG emisí, které ovlivňuje recyklace výnosů a investiční podpory
- Ve spolupráci s *Cambridge Econometrics*

CGE

- Dynamický výpočetní model obecné rovnováhy ČR -- vychází z neoklasické mikroekonomické teorie, kdy se předpokládá rovnováha na trzích přes cenový mechanismus a dokonalá konkurence
- Hybridní model propojuje CGE s: modelem produkce sektoru elektřiny, diskrétní volby typu vozidla a zásob a toků vozidel.
- 9 typů domácnosti, 23 výrobních sektorů, vládní sektor a zahraničí
- Substituce mezi vstupy popsány produkční funkcí s elasticitami substituce mezi výrobními faktory
- (*Vědunka Kopečná, Inaki Veruete*)

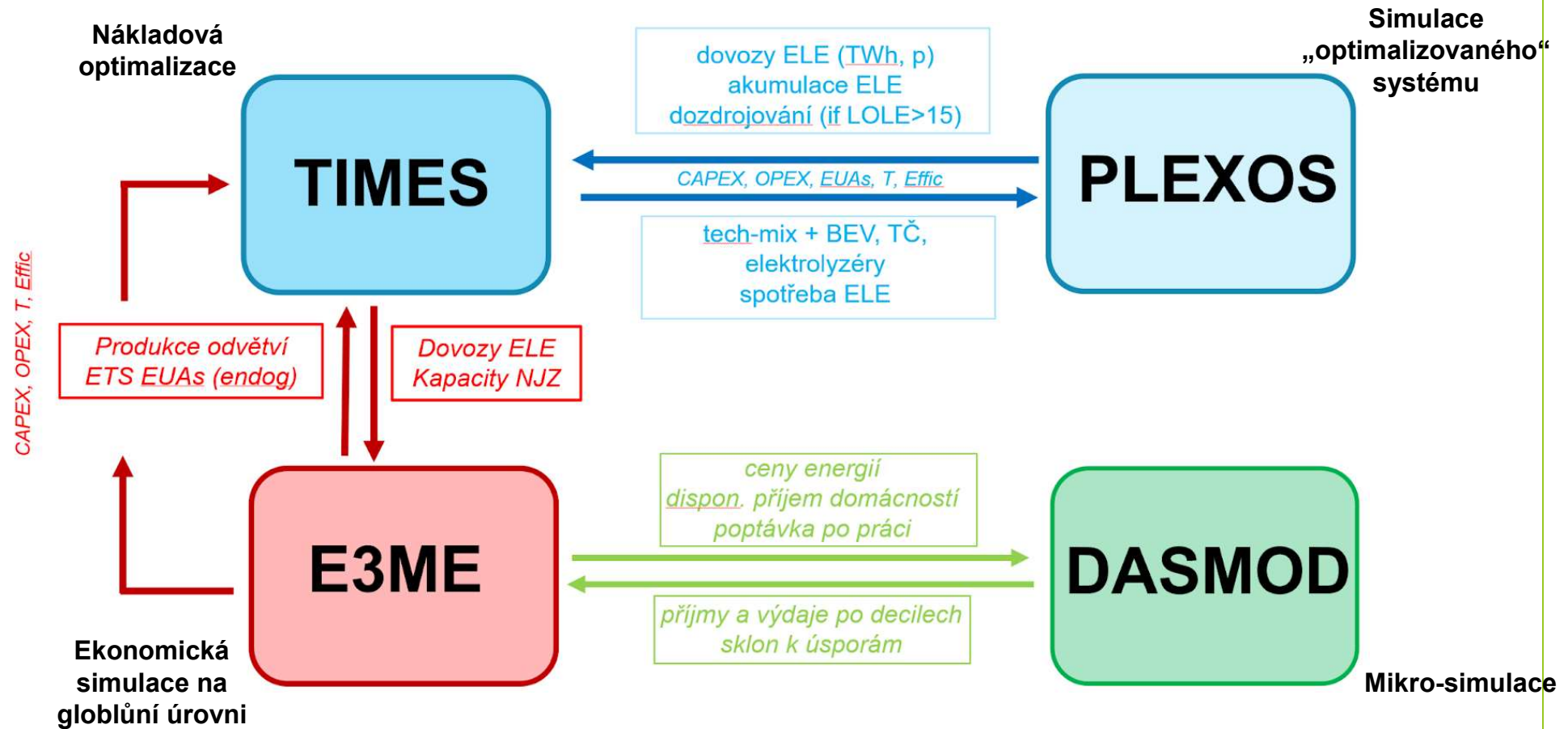
DASMOD

- Mikro-simulační model
- Cca 3000 domácností: výdaje, příjmy, daně
- (*Matěj Opatrný, Milan Ščasný*)



Modelling tools

Soft-linked TIMES-PLEXOS-E3ME-DASMODO



SCÉNÁŘE



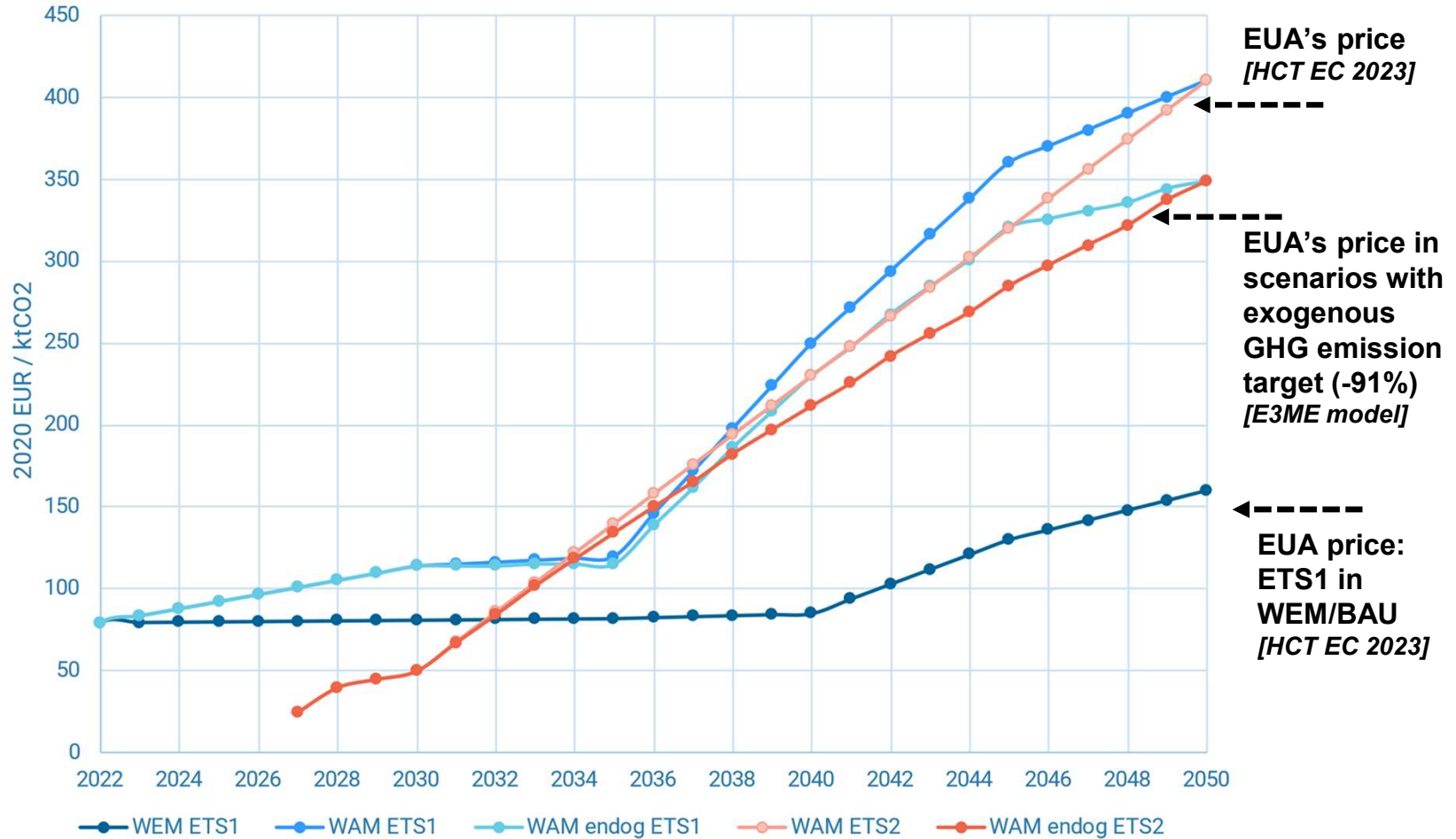
- zohlednění EU politik balíčku **Fit for 55** a jejich implementace v ČR, zejména předpoklad **ceny EUA** dle (EC 2023).
- dosáhnoutí **klimatické neutrality na úrovni ČR**, resp. maximální míry dekarbonizace v modelovaných sektorech do roku 2050
- zohlednění hlavních **tezí a předpokladů, které byly definovány ze strany vlády** v rámci přípravy aktualizace Vnitrostátního plánu v oblasti energetiky a klimatu
 - Většina omezení stanovuje **dostupné maximum** (FVE, VtE, úspory, dovozy) nebo **požadované minimum** (NJZ), přičemž konečný objem je determinován modelem TIMES na základě nákladové optimalizace



Definice scénářů

	WEM(BAU)	WAM's
ETS1	HCT* (EC 2023): WEM	HCT 2023: WAM
ETS2	x	HCT 2023: WAM
GHG emise	x	def. maximum v 2050***
Odklon od uhlí	x	2033 (nejpozději)
Zákaz registrace nových ICE	x	2035+
Úspory v budovách**	Základní	Progresivní
RES: PV [2022→2030→2050]	2.1 →6.0→21 Gwe	2.1→ 10.1 →26 GWe
RES: WIND [2022→2030→2050]	0.34→0.7→3.5 GWe	0.34→ 1.5 →5.5 GWe
NJZ (Nové jaderné zdroje)	1x1100 MW	3x1100 MW + 1xSMR
CCS	x	<9Mt 2030, <18Mt 2050
Čistý dovoz elektřiny	PLEXOS	PLEXOS
Dovozy vodíku	x	<36.7 TWh, 66 €/MWh in 2050
System elektro-energetiky	<i>LOLE<15hod; ukládání; náklady sítí</i>	

Cena emisních povolenek (EUA)



Scénáře pro modelování – hlavní rozdíly

	WEM	WAM3 [NKEP3]	WAM2plus [NKEP2+]	WAM1plus [NKEP1+]
Stávající JE Dukovany _ 2040MW	EDU1 (510MW do 2045) EDU2 (510MW do 2046) EDU3 (510MW do 2046) EDU4 (510MW do 2047)	EDU1 (510MW do 2045) EDU2 (510MW do 2046) EDU3 (510MW do 2046) EDU4 (510MW do 2047)	EDU1 (510MW do 2045) EDU2 (510MW do 2046) EDU3 (510MW do 2046) EDU4 (510MW do 2047)	EDU1 (510MW do 2045) EDU2 (510MW do 2046) EDU3 (510MW do 2046) EDU4 (510MW do 2047)
Stávající JE Temelín_2200MW	ETE1 (1100MW do 2060) ETE2 (1100MW do 2062)	ETE1 (1100MW do 2060) ETE2 (1100MW do 2062)	ETE1 (1100MW do 2060) ETE2 (1100MW do 2062)	ETE1 (1100MW do 2060) ETE2 (1100MW do 2062)
Nový jaderný zdroj 1100 MW	NJZ1 EDU5 COD 2040	NJZ1 EDU5 COD 2036	NJZ1 EDU5 COD 2036	NJZ1 EDU5 COD 2040
Malý modulární reaktor SMR 350MW	výsledek modelu	SMR1 COD 2035 + další výsledek modelu	SMR1 COD 2035 + další výsledek modelu	výsledek modelu (ale žádný před 2040)
Další Nové jaderné zdroje_1100MW	výsledek modelu	NJZ2 ETE3 COD 2039 NJZ3 ETE4 COD 2041 + další výsledek modelu	NJZ2 ETE3 COD 2039 NJZ3 ETE4 COD 2041 + další výsledek modelu	výsledek modelu (žádný před 2040)
CAPEX 1100MWe (ceny 2015)	CapEx 5400 €/kWe	CapEx 5400 €/kWe	CapEx 5400 €/kWe	CapEx 5400 €/kWe
WACC 1100MWe	4%	4%	4%	4%
CAPEX SMR 350MW	CapEx 5400 €/kWe	CapEx 5400 €/kWe	CapEx 5400 €/kWe	CapEx 5400 €/kWe
WACC SMR 350MW	5%	5%	5%	5%
horkovod JEDU - Brno	ne	ano	ano	ne

	WEM	WAM3 [NKEP3]	WAM2plus [NKEP2+]	WAM1plus [NKEP1+]
FVE [PVs] 2030 (celkové) <i>2022: 2,09 GWe</i>	6 GWe	10,1 GWe	8,1 GWe	14,1 GWe
FVE [PVs] 2050 (celkové)	21 GWe	26,1 GWe	23,1 GWe	30,1 GWe
VTE [WIND] 2030 (celkové) <i>2022: 0,339 GWe</i>	0,7 Gwe	1,5 GWe	1,34 GWe	2,0 GWe
VTE [WIND] 2050 (celkové)	3,5 GWe	5,5 GWe	5,34 GWe	7,0 GWe
PLEXOS (dozdrojování)	ne	ano	ano	ano
MAKRO: produkce odvětví	ne	E3ME s revidovanou predikcí HDP-CZ	E3ME s revidovanou predikcí HDP-CZ	E3ME s revidovanou predikcí HDP-CZ
CCS	ne	9 Mt (2033-2042) plus 18 Mt (2043-2050)	9 Mt (2033-2042) plus 18 Mt (2043-2050)	9 Mt (2033-2042) plus 18 Mt (2043-2050)
Vodík pro osobní auta (H2 pro OV)	není	max 600k FCEV	max 600k FCEV	max 600k FCEV
GHG emisní cíl 2050	není	6 Mt	6 Mt	6 Mt

Úspory v budovách

- Substituce mezi náklady zateplení a cenami energií (kWh, GJ)
- Potenciál úspor: **“Základní”** (WEM) a **“Progresivní”** scénář Renovace budov (MPO)

Vozidla

- Centrální registr vozidel (≈100 technologií)
- Účetní stock-flow modl vozidel
 - Celkové náklady vlastnictví (TCO)
 - Celkový vozový park je zafixovaný (6.5 mil. OV), s max FCEV (< 10% parku)

Poptávka po energetických službách

- Konzervativní (pesimistický) předpoklad
 - Vytápění: °C, velikost bytů,
 - Doprava: vkm, pkm (roční náběh ≈12,000 km); substituce dopravních módů zatím nepredikována
- Optimističtější předpoklad
 - Výroba energeticky náročných produktů – predikce výstupu odvětví modelem E3ME



Sectors with exogenous carbon emissions (not modelled in TIMES)

ZEMĚDĚLSTVÍ

- 8 Mt 2020 → **+6.3 Mt** 2050 (*UZEI 2023; SEEPIA/ARAMIS 2023*)
- Omezené opatření, např. precizní zemědělství
- Bez výraznější změny diet

ODPADY & F-plyny

- 10 Mt 2020 → **+2 Mt** 2050 (*“Reference scenario EC 2020”, EC 2021*)

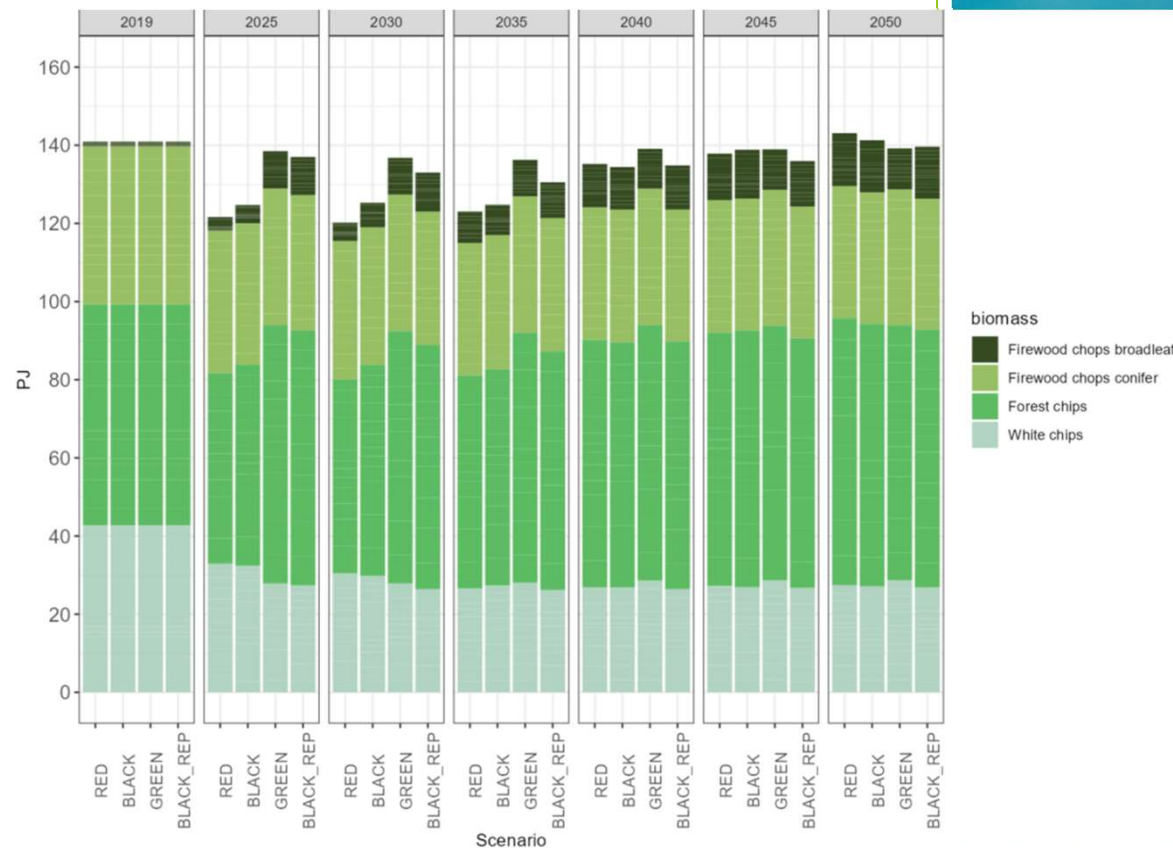
LULUCF-LESNÍCTVÍ

- Scénáře s dopadem kůrovcové kalamity (IFER, TAČR LESY 2021-2023)
- **ČERVENÝ**: +2,2 Mt v 2030, **-3,0 Mt** v 2050
- **ZELENÝ**: vyšší těžba → nižší sekvestrace uhlíku a vyšší emise



TIMES-CZ is a spatially-enriched energy system model, following EUROSTAT's NUTS3 level (14 regions)

- Regionalised **biomass availability** (IFER: Cienciala & Melichar 2023)
- Regionalised **heat production and heat use**
- Regionalised demand on (some) **energy services**
- More realistic costs by including **Transportation costs** (14 x 14 cost matrix)



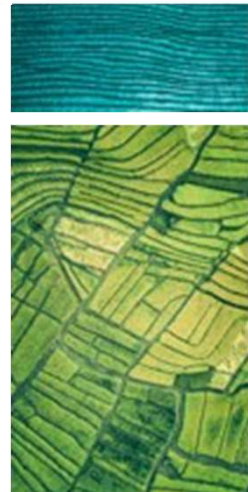
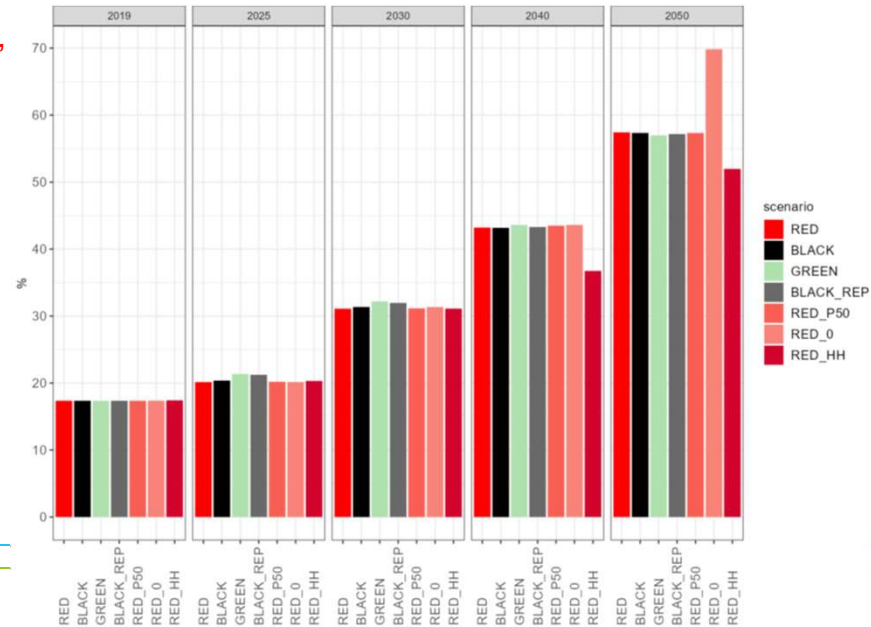
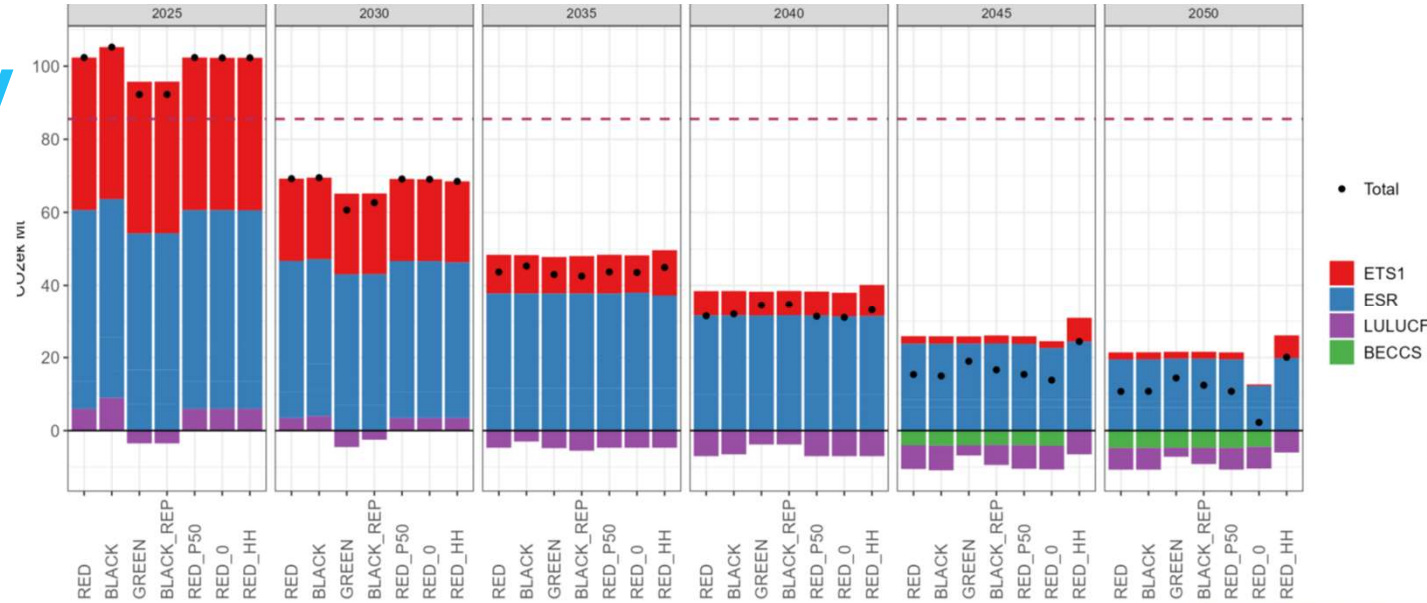
IFER Forest biomass availability affected by spruce bark beetle infestation

- RED
- GREEN
- BLACK
- BLACK-REP

plus three policy measures

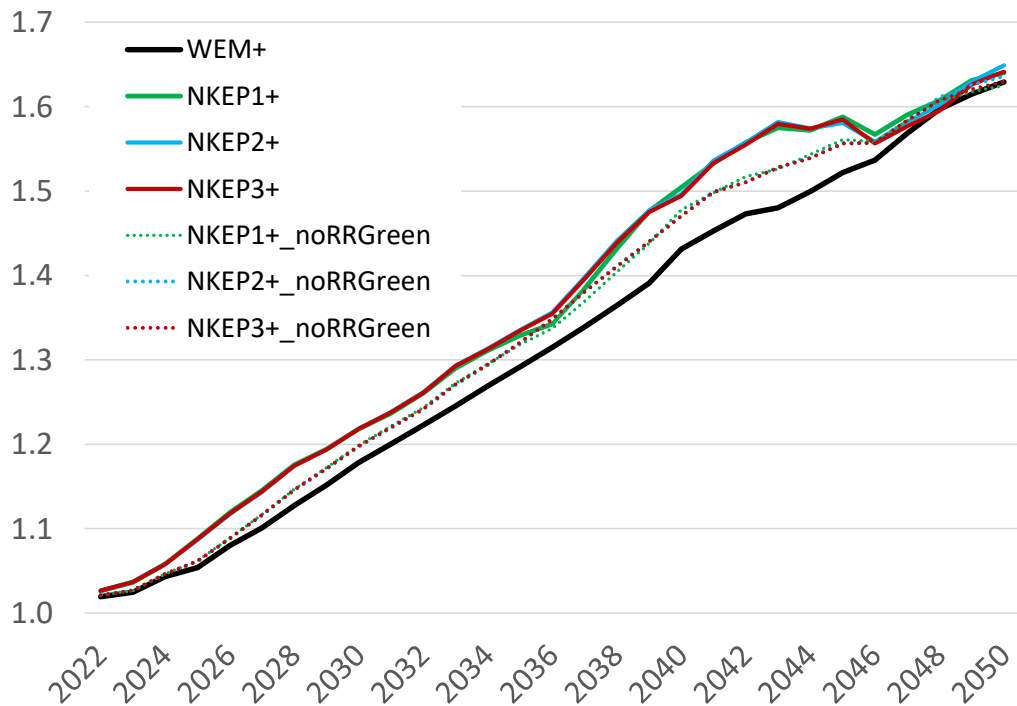
- RED_0 carbon-neutrality
- RED_P50 50% subsidy to pellets production
- RED_HH ecological limits, biomass available only for households

GHG emissions on the top, RES share on the bottom

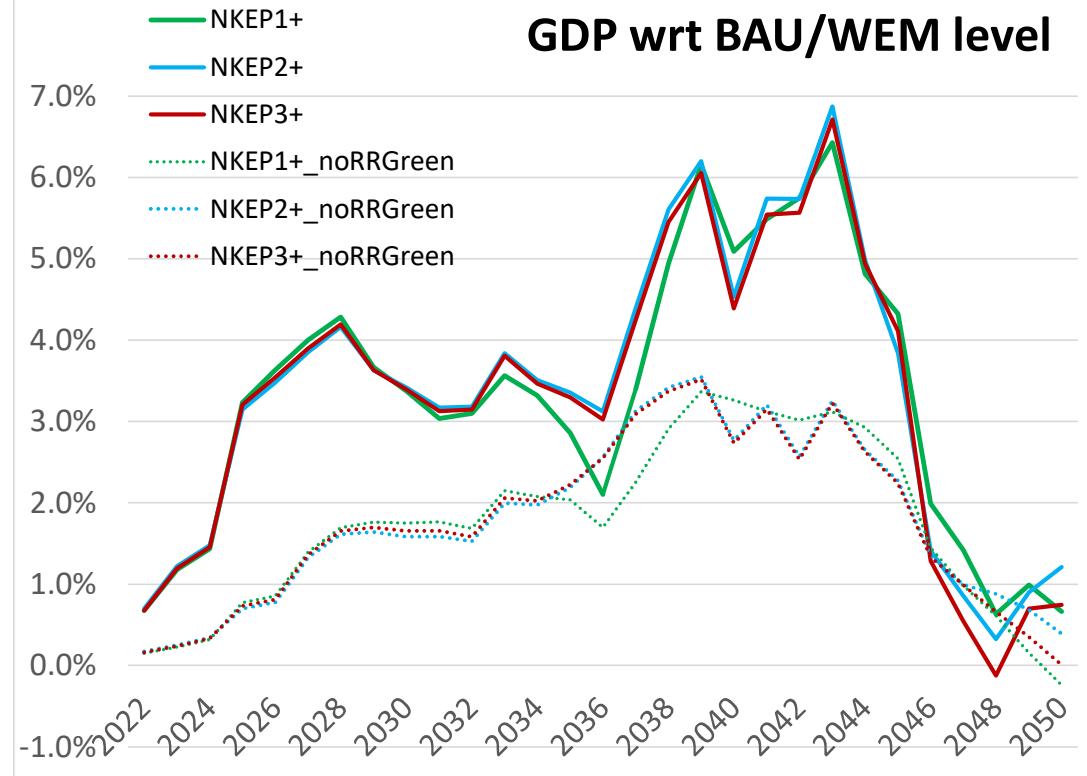


GDP, Czech Republic 2020-2050

GDP growth, 2019=1.0



GDP wrt BAU/WEM level



Note: Scenario with “*_noRRGreen*” describes the option with recycling a part of the EUA revenues to State Budget (e.g. covering the public debt)

Dopady na ekonomiku a domácnosti nemusí být negativní

Investice stimulované podporami z EU zvyšují ekonomickou produkci, včetně čistého vývozu a celkově **zvyšují HDP** během celého období, nejvíce v období největší investiční aktivity (2035-2042)

Ekonomická produkce zvyšuje výrazně **poptávku po práci**, zejména v odvětví stavebnictví, ve zpracovatelském průmyslu a službách

Ekonomická aktivita a zaměstnanost oboje zvyšují **příjmy a spotřebu domácností**

Negativní dopady na domácnosti jsou mitigované přes **sociální kompenzace** poskytované prvním dvěma decilům (scénář NKEP)

Zvýšené výdaje v důsledku zvýšených cen zboží převyšují zvýšené příjmy oproti roku 2019, avšak ve srovnání s WEM si domácnosti mírně polepší. Podíl ohrožených energetickou chudobou (M2) zůstává kolem roku 2030 srovnatelný jako v roce 2019 nebo jako ve WEM ($\approx 13\%$).



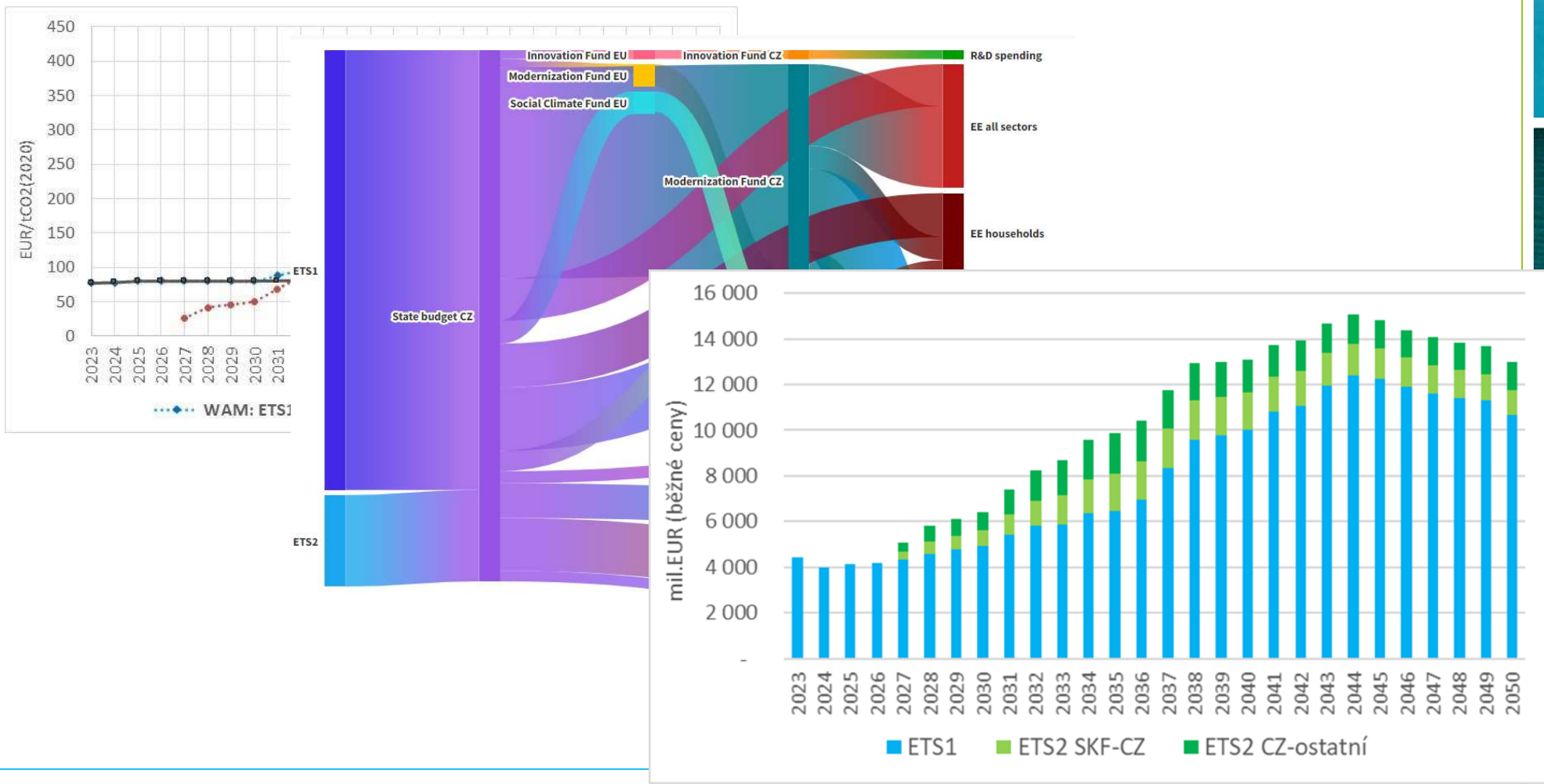
SEPIA Dopady na ekonomiku a domácnosti – nemusí být pozitivní

- Nevyužití zdrojů z EU → **nedostatek projektů**, které mohou získat investiční podporu (povolovací řízení, admin překážky, ...) nebo využití zdrojů neefektivně → nedostatek **kvalitních projektů**, preference vyčerpat zdroje i pro neefektivní projekty
- Využití projektů energetické efektivity na zvýšení celkové **ekonomické efektivity** → dostatek kapacit firem a vůle potenciál využít
- Nedostatek **pracovních sil** v odvětvích s očekávanou zvýšenou poptávkou po práci (stavebnictví, výstavba OZE a úspor)
- **Reakce spotřebitelů** na změny cen → investice do úspor (nedostatek kapitálu, nájemné bydlení, bytové domy) a celkově do změny chování (reflektované elasticitami poptávek v modelech)



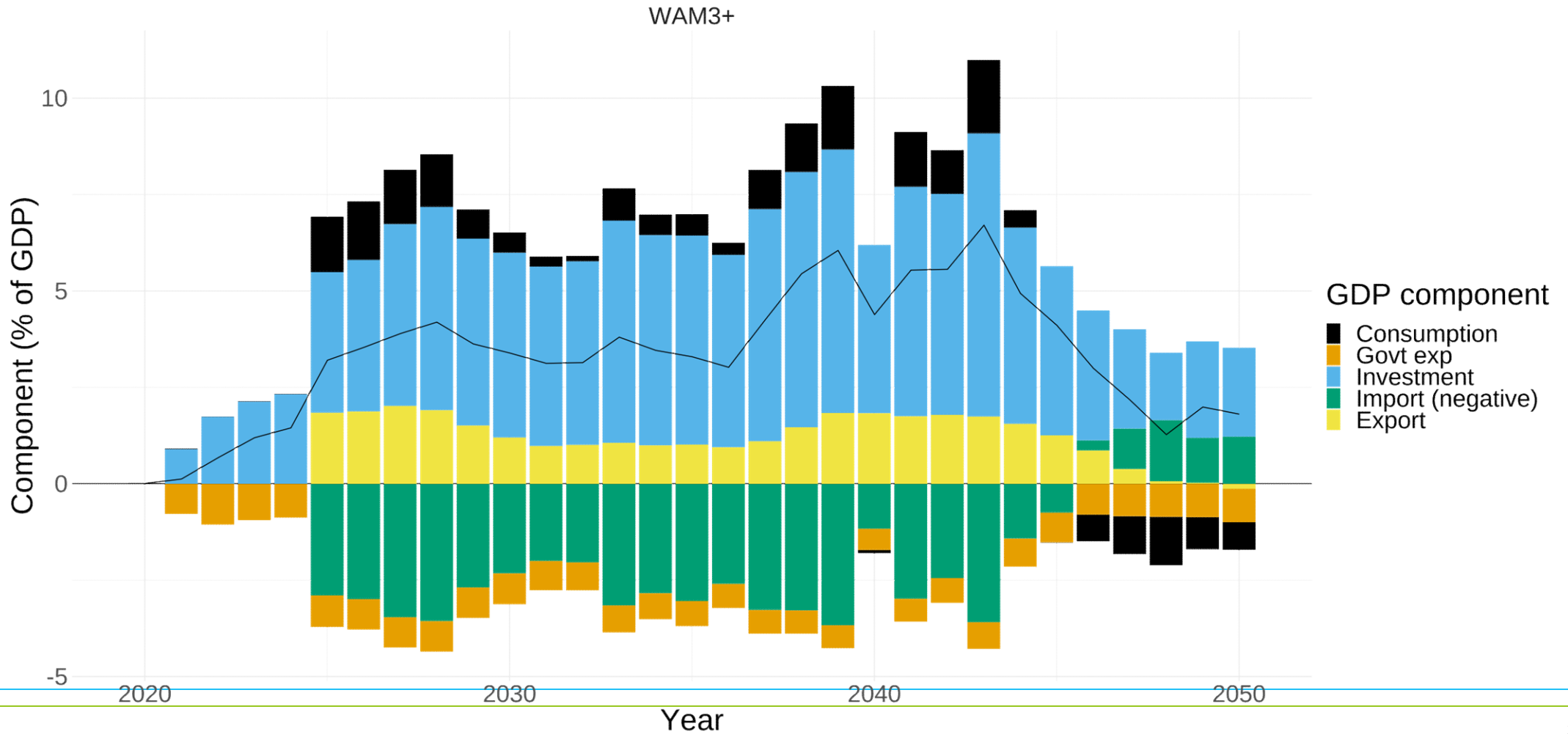
Makroekonomické dopady

Temna a světlá strana EU ETS



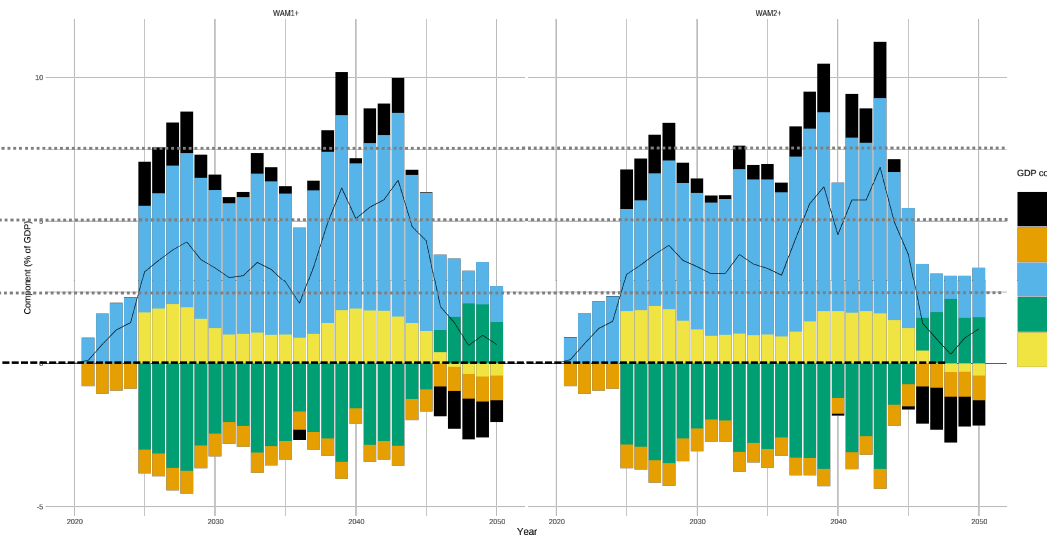
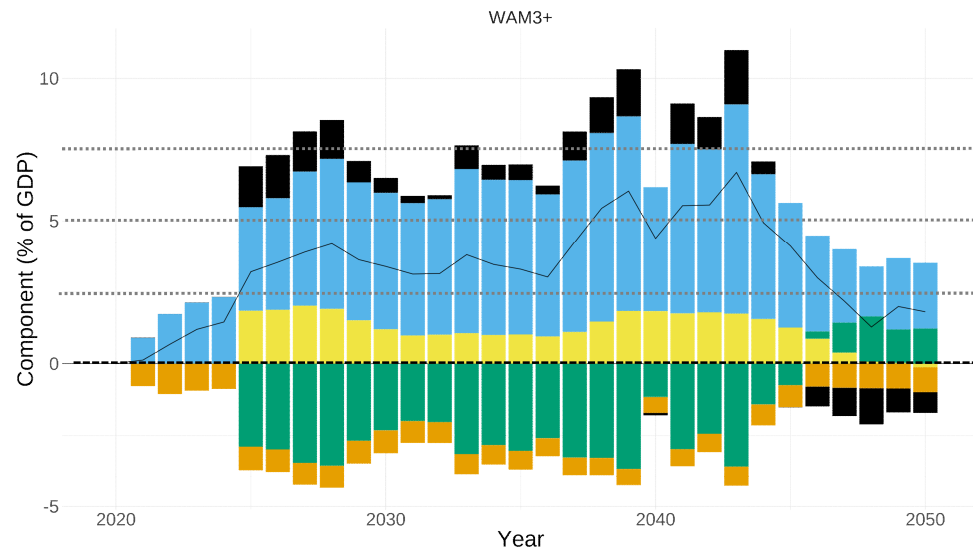
GDP (C + I + (Ex-Im) + GOV)

WAM (NKEP3) compared to WEM, Czech Republic 2020-2050



GDP (C + I + (Ex-Im) + GOV)

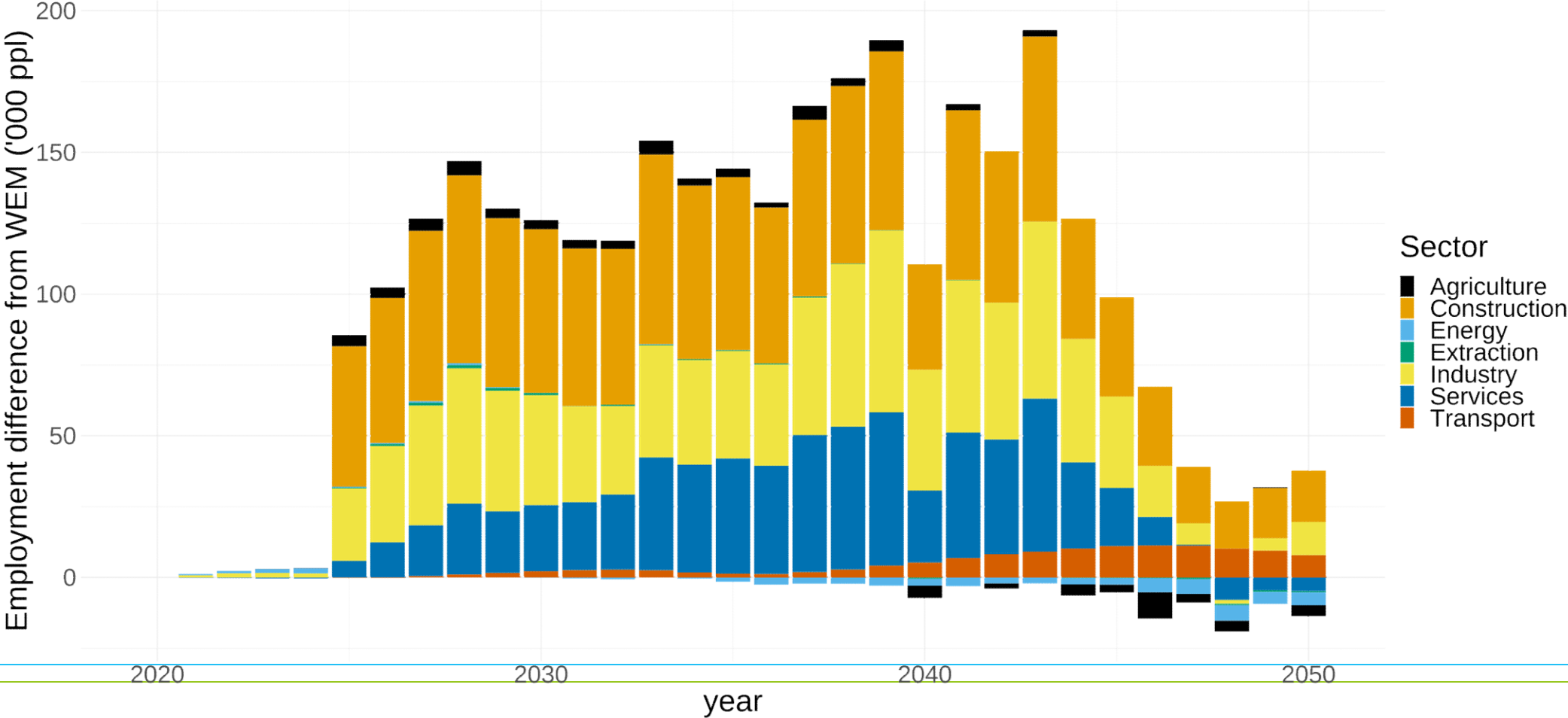
WAM (NKEP3) compared to WEM, Czech Republic 2020-2050



EMPLOYMENT

WAM (NKEP3) compared to WEM, Czech Republic 2020-2050

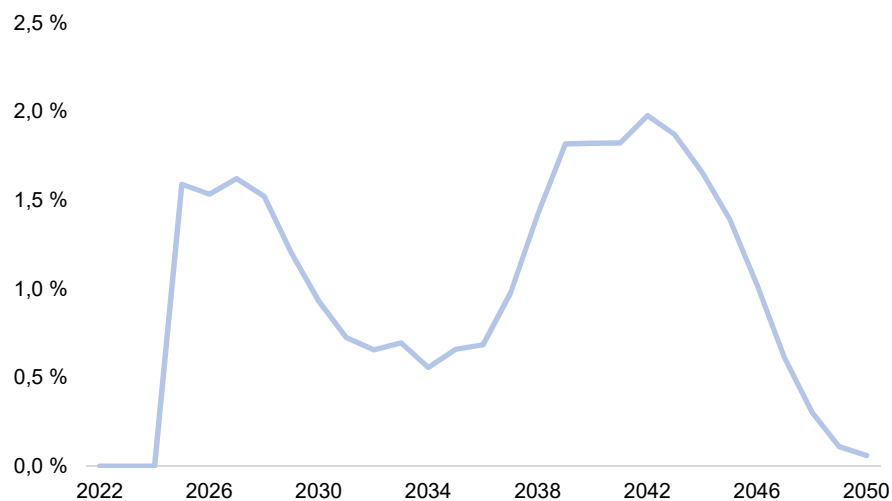
WAM3+



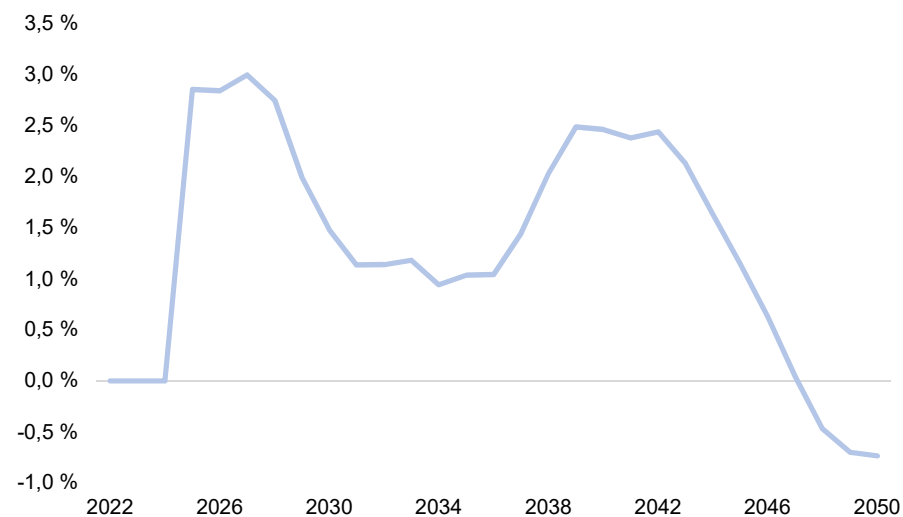
COMPETITIVENESS

Dopady na konkurenceschopnost – vývozní pozice ČR (podíl vývozu ČR na světovém a EU exportním trhu), rozdíl WAM ve srovnání s WEM

Panel A – podíl na světovém vývozním trhu

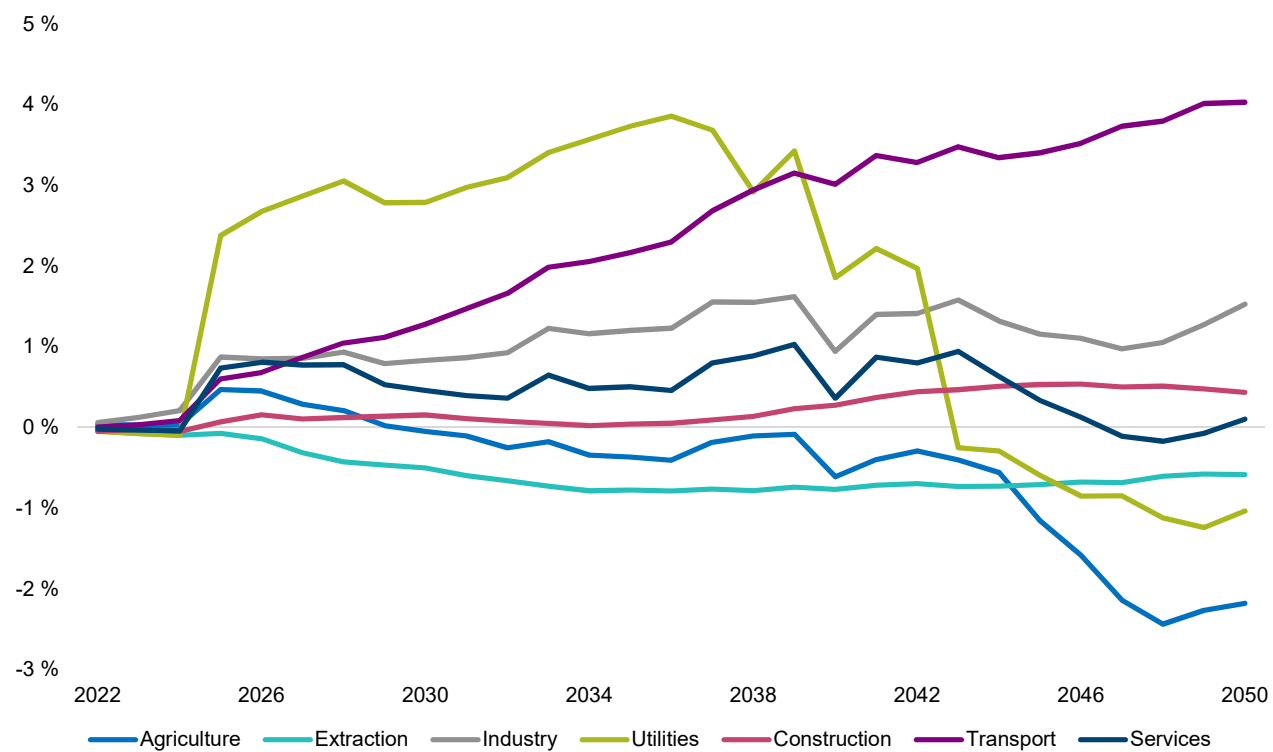


Panel B – podíl na vývozním trhu EU



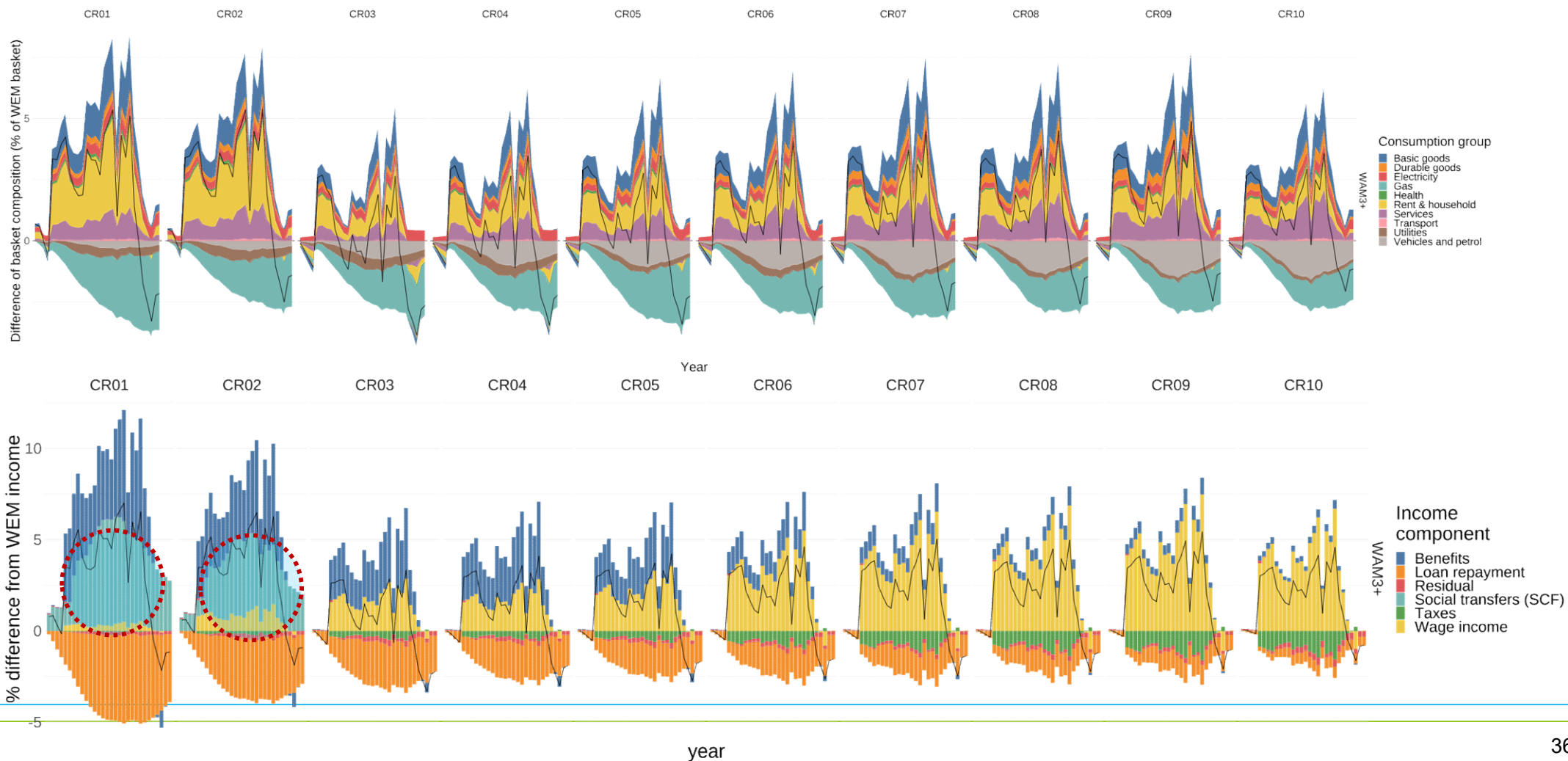
COMPETITIVENESS

Dopady na konkurenceschopnost – **dopad na produktivitu práce ČR**, procentuální rozdíl WAM ve srovnání s WEM



DISTRIBUTIONAL IMPACTS (Households)

WAM (NKEP3) compared to WEM, Czech Republic 2020-2050



JAK DÁLE...

Scénáře 2024

- Citlivost na cíl **klimatické neutrality na úrovni ČR** do roku 2050
- Nevynucování maxim/minim na určité technologie (FVE, NJZ)
- Update **CAPEX a nákladů financování** technologií, zejména NJZ, OZE-E a úspor
- Citlivostní analýza na objem a cenu **dováženého vodíku**
- **Ukládání uhlíku** v ČR vs. mimo území ČR a jeho cena



Úspory v budovách

- Substituce mezi náklady zateplení a cenami energií (kWh, GJ)
- **Revize potenciálu úspor v budovách a jejich nákladů** (data SBLD, energetické štítky, ENERGO, spolupráce se SEVEN)

Vozidla

- Účetní stock-flow model vozidel: odklon od konceptu TCO k **pravděpodobnostnímu modelu volby vozidel**
- Diskuse efektu změny dopravního modu, car-sharing|poolingu a autonomních vozidel a elektromobility na **snížení celkového vozového parku** (<6.5 mil. OV)

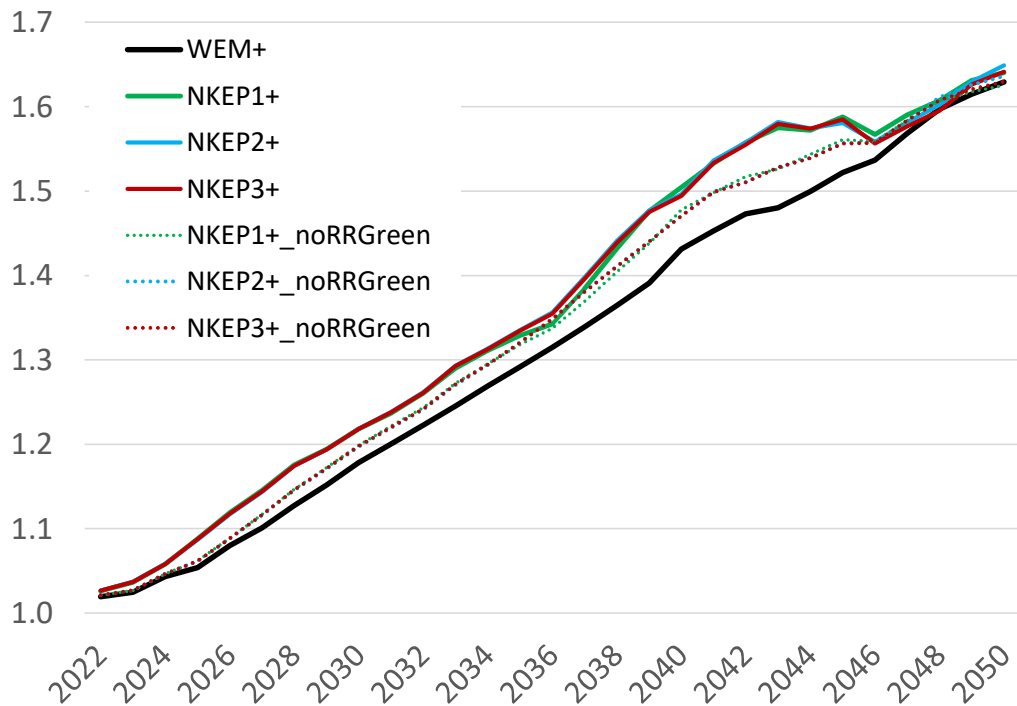
Poptávka po energetických službách

- Konzervativní (pesimistický) předpoklad poptávky po ES
 - Vytápění: vliv klimatické změny na **HDD (-) a CDD (+)**, **behaviorální změna** (°C, velikost bytů,..)
 - Doprava: **snížení pkm|vkm** (<12,000 km) v důsledku substituce dopravních módů
- Optimističtější předpoklad (doposud)
 - Výroba **energeticky náročných produktů** – predikce výstupu odvětví modelem E3ME

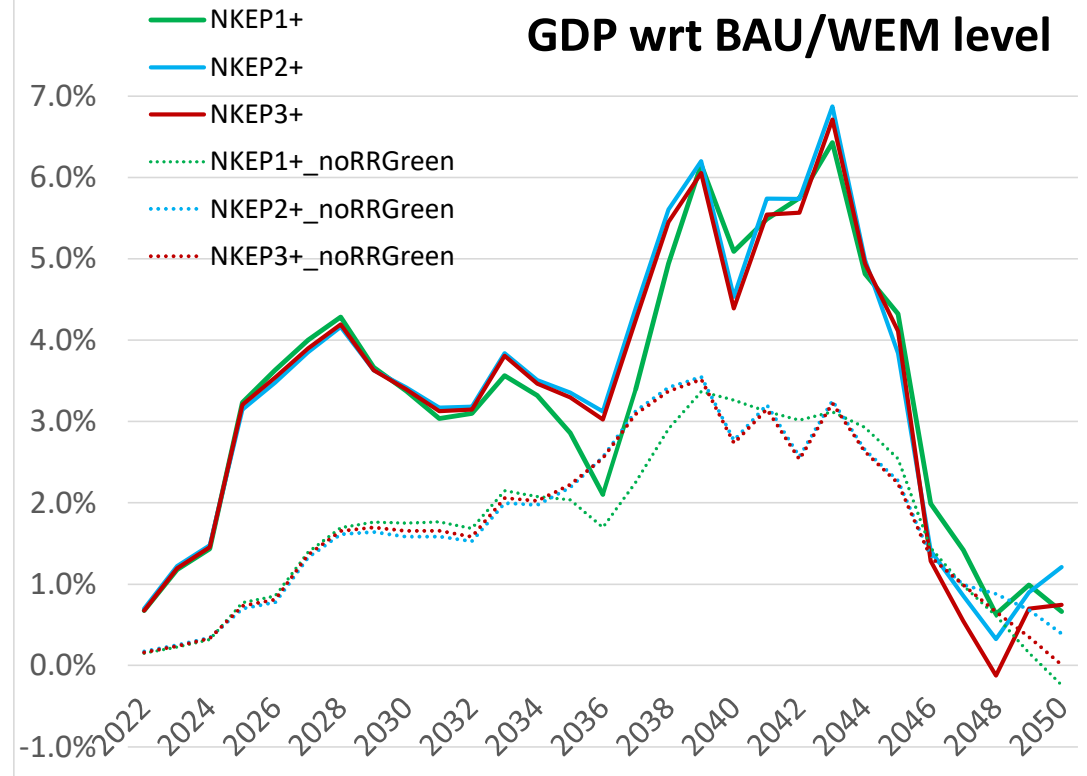


GDP, Czech Republic 2020-2050

GDP growth, 2019=1.0



GDP wrt BAU/WEM level



Note: Scenario with “*_noRRGreen*” describes the option with recycling a part of the EUA revenues to State Budget (e.g. covering the public debt)

Čtyři scénáře ve stravování (inspirované studií Poore a Nemecek (2018)) a jejich možné dopady na emise skleníkových plynů (Opatrný, Ščasný, Kmeťková 2023):

- **Scénář 1** – Snížení konzumace **hovězího a skopového** masa o **15 %** do 2030 a **50 %** do 2050
- **Scénář 2** - Snížení konzumace hovězího a skopového masa, **kravského mléka a sýrů** o 15 % do 2030 a 50 % do 2050
- **Scénář 3** - Snížení konzumace hovězího, skopového, **vepřového a drůbežího masa**, kravského mléka a sýrů o 15 % do 2030 a 50 % do 2050
- **Scénář 4** - Snížení spotřeby **všech živočišných produktů** o 15 % do 2030 a 50 % do 2050

Mt CO ₂ ekv.	UZEI (2023)	Scénář 1	Scénář 2	Scénář 3	Scénář 4
2030	7,07	6,86	6,71	6,64	6,55
2050	6,27	5,66	5,22	5,00	4,73

Děkujeme

Milan Ščasný

Centrum pro otázky životního prostředí UK

milan.scasny@czp.cuni.cz

Lukáš Rečka, Vojtěch Máca, Dali Laxton, Patrik Lenz, Lukáš Novák, Bence Kiss-Dobronyi, Ioannis Gutzianas, Dora Fazekas

