



UNIVERZITA KARLOVA

Centrum pro otázky životního prostředí

Energetické modely

Modely systému energetiky

Milan Ščasný

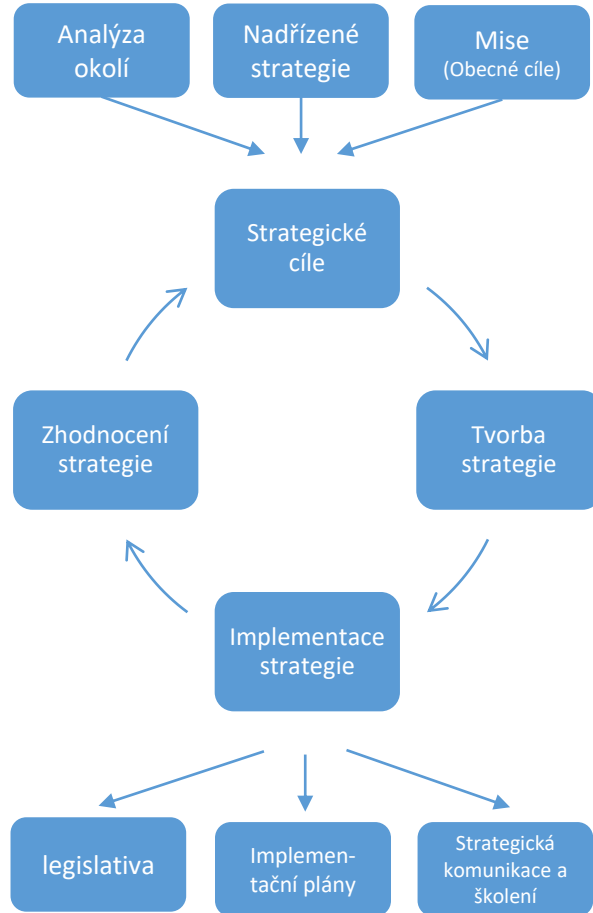
Lukáš Rečka (TIMES), Vojtěch Máca (TRAN), Vědunka Kopečná (CGE, přehled ESM), Vladimír Kubeček (regulace)

Struktura prezentace

- Role modelů v procesu energetické transformace (Kubeček)
- Modely energetiky: Přístupy k analýze a modelování (MŠČ)
- Dekarbonizační studie v ČR: přehled modelovacích přístupů (Kopečná)
- Model TIMES: popis, aplikace a další vývoj (MŠČ)
- Ekonomické modelování dopadů (RVUR červen)



Strategie jako proces



Role strategického týmu

- Zajišťovat proces
- Zajišťovat výzkum
- Zajistit podporu
- Koordinovat
- Vzdělávat/školit
- Udržovat historii
- Vést statistiku
- Vést hodnotící kritéria
- Komunikovat
- Zajišťovat potřebné nástroje

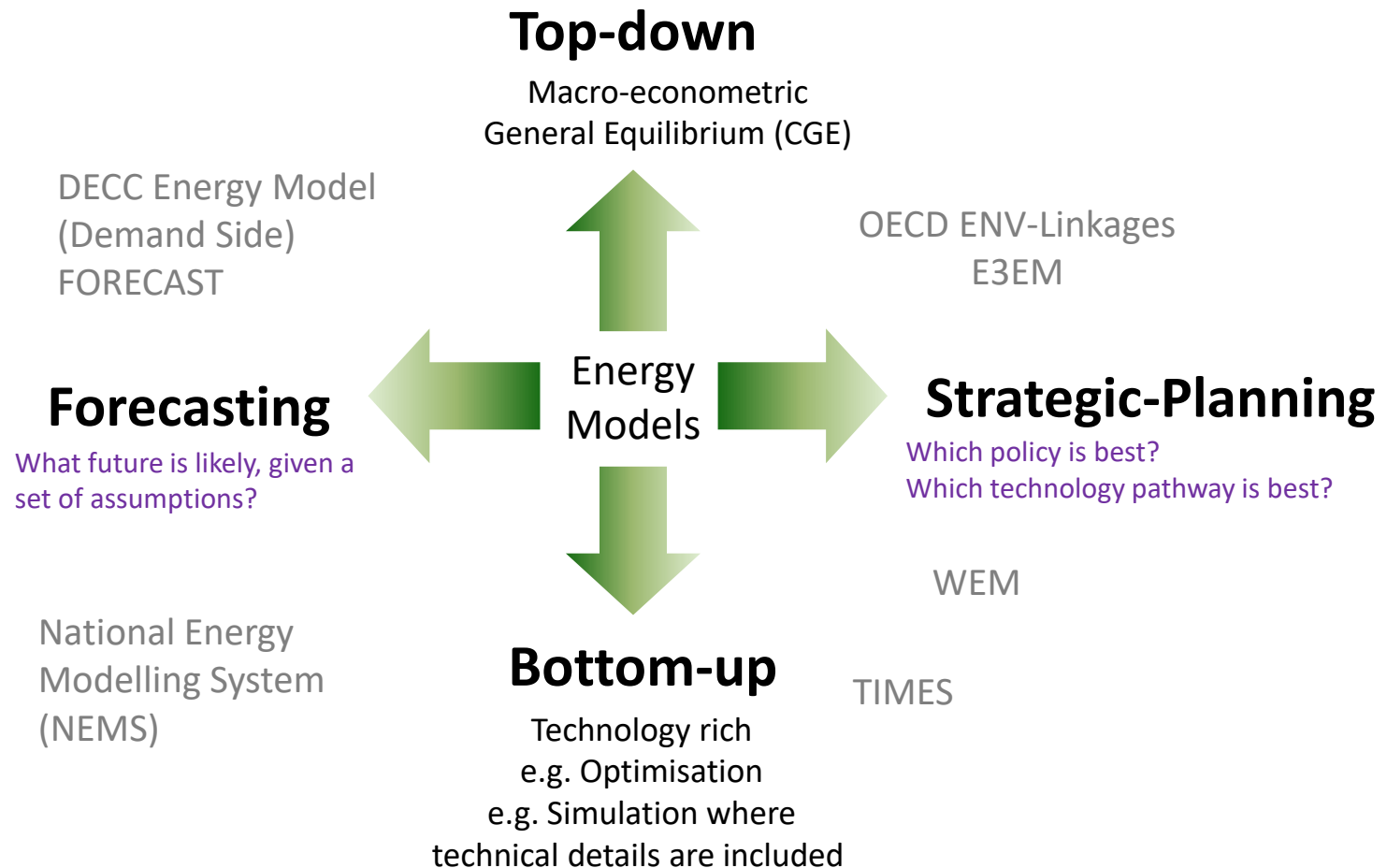
Jakou roli hrají energetické modely

- Modely poskytují a umožňují konsistentní analytický rámec
 - Jsou zjednodušeným pohledem na reálný svět
 - Hloubka (detail modelu) závisí vždy na cíli (otázce) a dostupných datech
- Výběr modelu závisí na cíli a horizontu analýzy
- Energetické modelování je dlouhodobý a průběžný proces, zahrnující odborníky z různých oborů
- Limity jednotlivých modelů je třeba zohlednit při interpretaci výsledků (neexistuje perfektní analýza)
- Energetické strategie nejsou o předpovídání budoucnosti, ale o podpoře rozhodování při nejistotě
- Model energetického systému je rámec pro přemýšlení o bezpečnosti/ dostupnosti/ dekarbonizaci energetiky o příležitostech a nástrahách jednotlivých řešení.

Model není odpověď sama o sobě!



Energy models ask questions from a given perspective



Přístupy analýzy (II)

Simulační modely

- Výpočet efektu pro stávající systém (nebo jeho malé změny)

Bottom-up Energy System Modely

- **Dispatch model**
 - *plánování* na úrovni provozovny nebo celého systému (regulátor), obvykle ve velkém časovém detailu (hodinová granularita) -- krátkodobý horizont
 - *dispatch optimalizace* pro středně i dlouho-dobé plánování
- **Dlouhodobější optimalizační modely energetického systému**
 - Výroba = Spotřeba pro delší časovou periodu (rok, 5 let) během dlouhého období
 - ekonomika → *investiční optimalizace*
- **Spotřeba energií** je obvykle exogenní; nemohou analyzovat dopady na ekonomiku

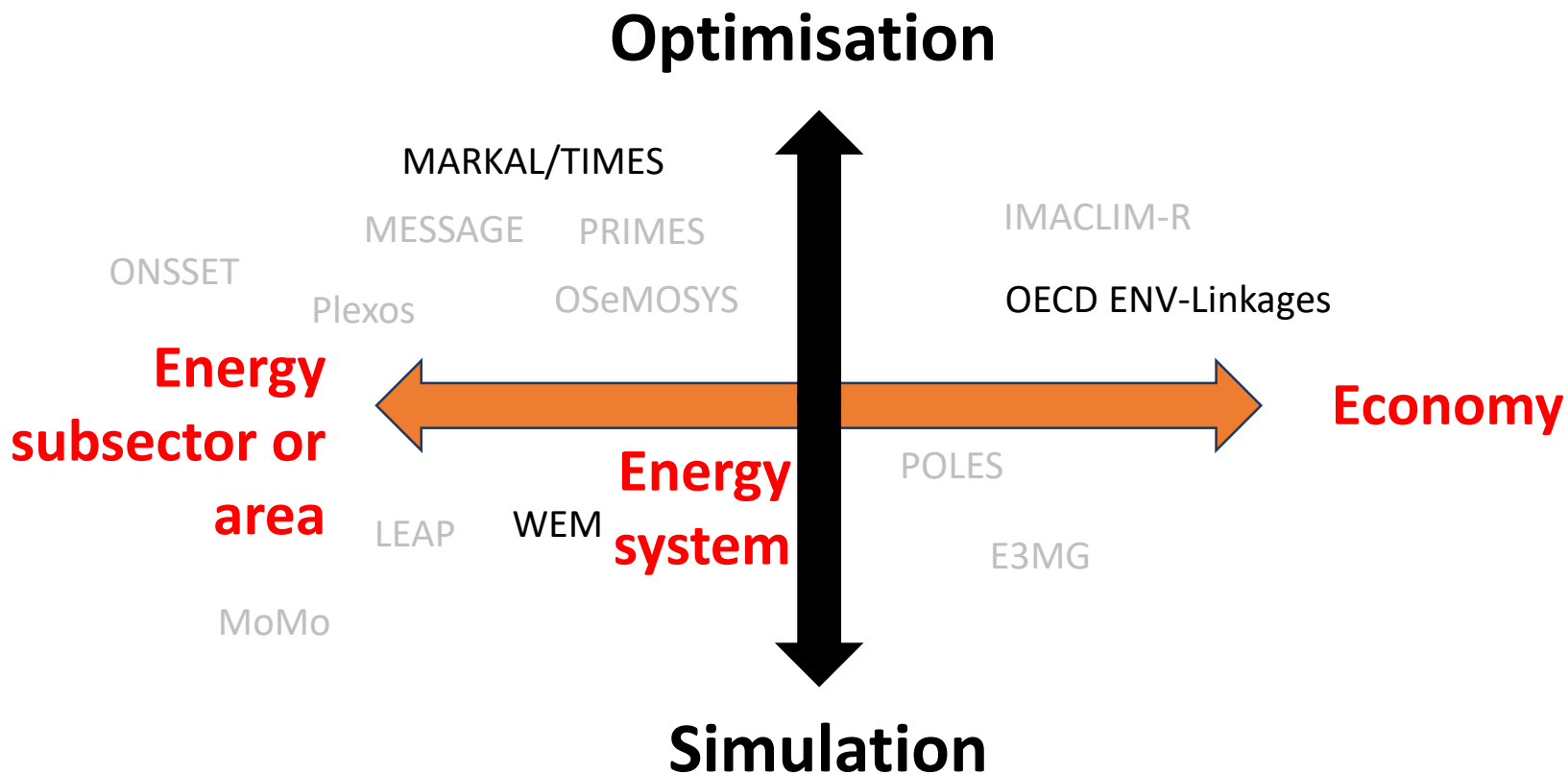
Top-down Ekonomické modely

- Analyzují dopady na ekonomiku, vč. spotřeby energií → RVUR červen?



Optimisation vs. Simulation

...applied to the whole economy or the energy sector only or a small subsector



Model classification:

Optimisation vs. Simulation

- A **simulation** model allows the testing of a certain configuration of the energy system and obtains the final dispatch together with indicators such as total annual costs, annual CO2 emissions, primary energy savings or excess electricity production. The dispatch carried out by simulation models is usually driven by a simple heuristic technique.
- A method that performs **dispatch optimization** instead is usually based on linear programming and realizes the dispatch following a merit-order logic.
- **Investment optimization** models deal with not only the annual dispatch of the energy system but also optimize the investments on capacity expansion. These types of models can be further subdivided in single-objective (SO) and multi-objective (MO) optimization approach.



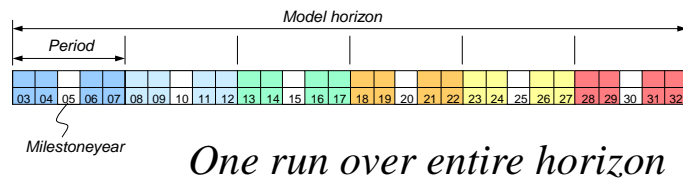
Klasifikace modelů

- Bottom-up (technology-rich) vs. top-down (economic)
- Time horizon: static (short-term) vs. long-term
 - LT perfect foresight (e.g. MARKAL/TIMES, OSeMOSYS, ...) vs. LT myopic (w a sequence of optimization problems)
- Methodology: simulation, dispatch optimisation, investment optimisation
- Programing technique: LP, MILP, dynamic, heuristic technique
- Energy sector coverage: a part, sector, the energy system
- Geographical coverage (region, country, Europe, globe)
- Time resolution: horizon (2020-50), period (5 years), simulation year

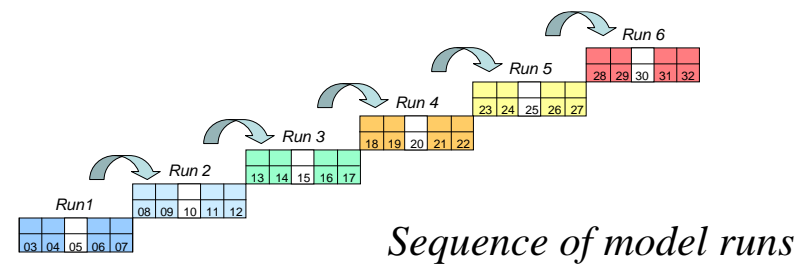


Different ways of looking into the uncertain future

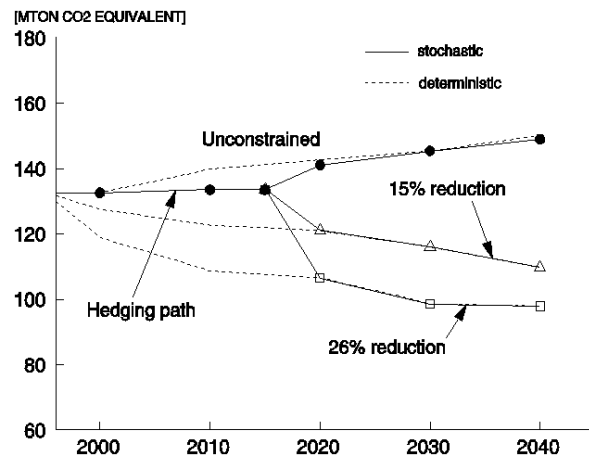
Perfect



Myopic



Probabilistic



Přístupy k analýze

Modelování / predikce / projekce vs. simulace

- „what if“ → srovnání **referenčního scénáře** („*business-as-usual*“) a **scénáře politiky** („*counter-factual*“)
- simulace: em. kalkulačka, McKinsey

Rozsah systému

- Elektroenergetika, +teplárenství, **energetická bilance**
- 1 sektor, několik sektorů, **celá ekonomika** → závislosti mezi odvětvími, zpětné vazby

Předmět modelování

- Co je **endogenní** (výstupem modelu) vs. **exogenní** (předpoklad)
- ***emise, OZE, spotřeba elektřiny*** mohou být endog. i exogenní

Behaviorální odezva

- fixní technologické koeficienty vs. **substituce**
- **reakce** na změnu cen a příjmu (elasticity)



Dekarbonizační studie pro ČR

Přehled modelů energetiky



Long-term perfect foresight Energy System Models

World-wide applications

- EFOM Finon (1976)
- GENIE Mattsson and Wene (1997)
- MARKAL/TIMES Fishbone and Abiack (1981)
- MESSAGE Messner (1997)
- NEMS Gabriel et al. (2001)
- POLES Criqui et al. (1998)
- PRIMES Capros et al. (1998)
- WEM International Energy Agency (2010)

CZE Applications

- **EFOM** (1995-2000's, Enviros)
- **MESSAGE** (2010-2015, UK COŽP)
 - Rečka, L., Ščasný, M. (2013), Environmental regulation impacts on the Czech power system by the dynamic linear optimisation model MESSAGE. *Politická ekonomie* 2/2013: 248-273.
- **TIMES** (2015+, UK COŽP)
 - Analýza **vývoje energetiky a emisí do roku 2050** (Rečka & Ščasný 2016 *Energy*)
 - Analýza **80% redukčního cíle pro GHG** (Rečka & Ščasný 2017 IDEA/CERGE)
 - Analýza **prolomení ÚEL těžby hnědého uhlí** (Rečka & Ščasný 2017 *Energies*; 2018 *Fuel*)
 - Analýza zavedení **uhlíkové daně**. Studie pro MF (2018)
 - Analýza zavedení **Bonus-malus** v ČR. Studie pro MŽP (2019)
 - Analýza zvýšení podílu **biopaliv v dopravě**. (Pospíšil a kol. 2020)
 - Analýza zvýšení podílu **OZE a 55% cíle pro GHG**. Studie pro Moderní energetiku (2021)



TIMES: Metodologie ve zkratce

- „*The Integrated MARKAL-EFOM System*“; rozvíjený v rámci **IEA-ETSAP** (*Energy Technology Systems Analysis Program*) a JRC
- „bottom-up“ **technologický optimalizační model** dílčí rovnováhy pro dlouhodobé predikce v sektorech energetiky a dopravy
- **minimalizace nákladů** celého energetického systému během 2015-2050 při
 - zadaných **omezení** (dostupnost paliv, technologií, emisních stropů, atp.)
 - **cenách** paliv a **investičních nákladech** nových technologií
 - exogenní **agregované poptávce** po (elektríně a teple) nebo energ. službách
- **scénáře politiky**: C daň, poplatky na emise, bonus/malus, dotace na tech's, EUA
- **výstupy (endogenní)**: palivový-mix, technologický-mix, vozový park, spotřeba energií, náklady, emise
- **aplikace**: prolomení UEL, emisní cíle, bonus/malus, OZE v dopravě
- Co model **neumí**: dopady na ekonomiku, predikce agregované poptávky po energiích / službách, nároky na el. sítě, není „dispatch“ model



Model TIMES-CZ

- Energetický, technologicky orientovaný, dynamický model
 - **Celá energetická bilance ČR**, lokalizace Pan-Europe TIMES
 - Težba → transformace energie → konečná spotřeba energií → en.sloužby
- Možnosti snížení emisí
 - Snížení **spotřeby energií**, energ. služeb a **výroby** EN-náročných komodit
 - Náhrada **paliv** (např. uhlí → biomasa) nebo **technologií** (uhlí → RES)
 - Zvýšení **energetické účinnosti** (kotle, zateplení, spotřebiče, ...)
 - **Zachytávání** a uskladnění uhlíku (zatím se nepředpokládá)
- Nemodeluje přenosové sítě

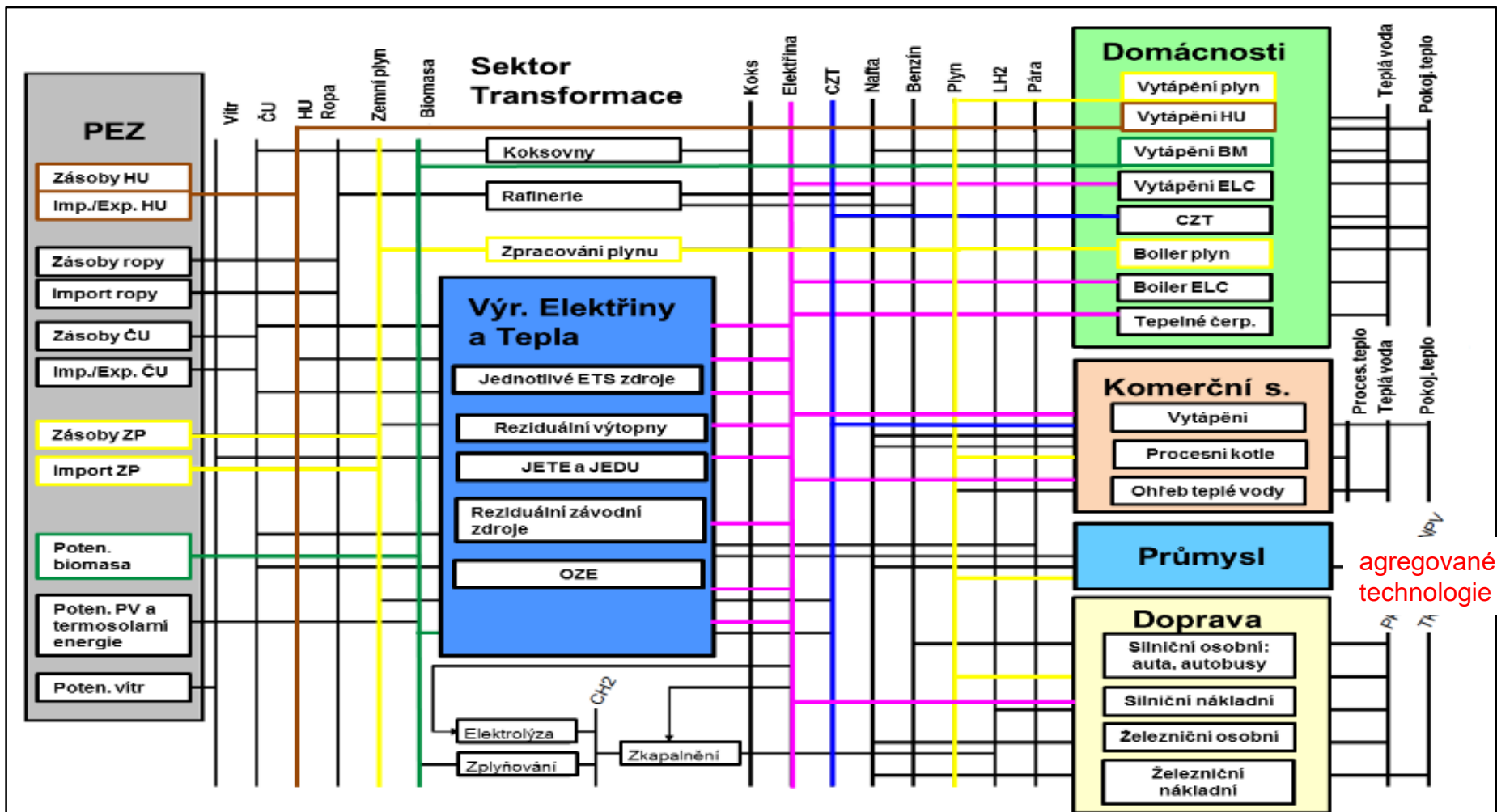
15

Více o modelu: www.times-czp.cuni.cz



TIMES-CZ (v.02)

Model energetického systému, který pokrývá celou energetickou bilanci



TIMES: key data inputs (exogenous)

Technology data

- **capital costs**, variable and O&M costs
- **technical** parameters (lifetime, efficiency, energy input)
- emission intensity
- **emission-damage factors** (health benefits)
- for currently operated as well as expected in future

Inputs

- Fuel costs, biomass harvesting, (bio)fuels production and processing

Final demand

- aggregate **residential energy consumption** or **energy services**
- **building stock** and EE potential
- **industry output** (e.g., steel, cement that determine energy demand)
- **exports** can be fixed or based on optimization (exogenous price)
- **imports** can be fixed or based on optimization (exogenous price)



TIMES: policies and model outputs

Policies and regulations

- **EUA price**
- **emission and resource tax** (carbon tax, emission charges, resource fees)
- **product tax** (electricity or heat, malus)
- **subsidy** (RES, vehicle bonus, co-generation)
- **resource availability** (territorial eco limits on brown coal, biomass potential)
- **technology restrictions** / phase-out (phasing-out nuclear, new techs)

Outputs (endogenous)

- **fuel-mix** (fossil, nuclear, RES)
- **technology-mix** (power & heat plants, vehicle stock)
- **costs**: annualised capital costs, fuel and O&M costs
- **GHG & AQ emissions**
- **damage** (enviro externality)

- Optimisation for the whole system, i.e. country
- **demand** is fixed (exogenous) !



Agregovaná poptávka

Celková spotřeba energií, $D(E_t)$, [KWh, GJ]

NEBO

Poptávka po **energetických službách**, ES_t , [°C, pkm/tkm,
#spotřebičů, výroba oceli, cementu, atd.]

kde

$$D(E_t) = f(ES_t, EE_t)$$

$$\partial E_t / \partial ES_t > 0,$$

$$\partial E_t / \partial EE_t < 0 \quad \& \quad EE_t \text{ je zateplení a účinnost kotle}$$

$$ES_t \text{ je exogenní a je platí } ES_t = (D(E_t) + EE_t)$$

Rebound effect ? – zvýšení ES_t důsledkem snížení mezní ceny ES_t díky
zvýšení energetické účinnosti EE_t



Úspory energií v residenčním sektoru

Building stock

Single House-Rural
Single House-Urban
Multi Apartment-All
By regions
By year of building construction

End-use description

Space Heating
Space Cooling
Water Heating
Lighting
Cooking
Refrigeration
Cloth Washing
Cloth Drying
Dish Washing
Other Electric
Other Energy

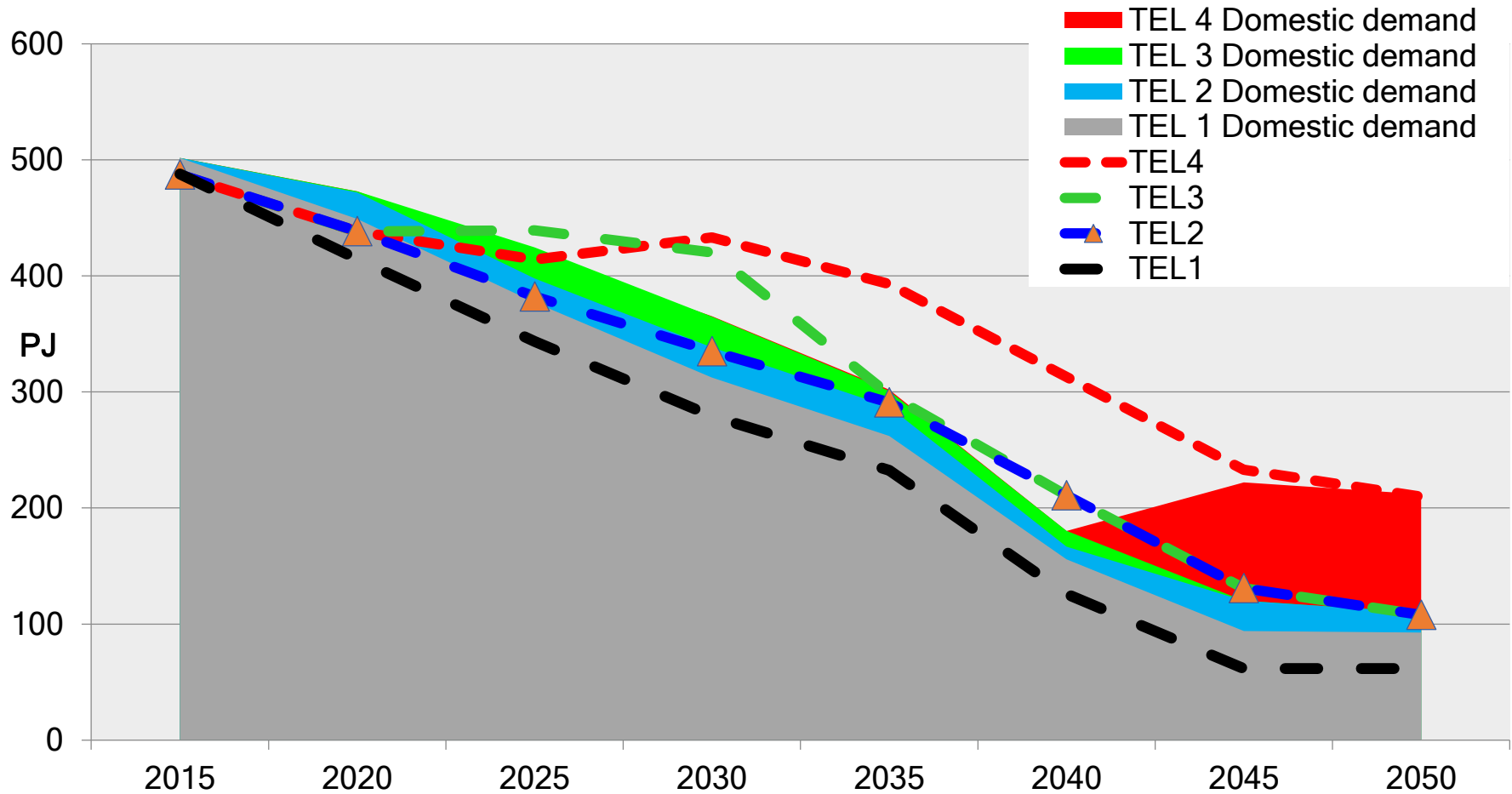
Příklady aplikací



Prolomení Územních ekologických limitů těžby

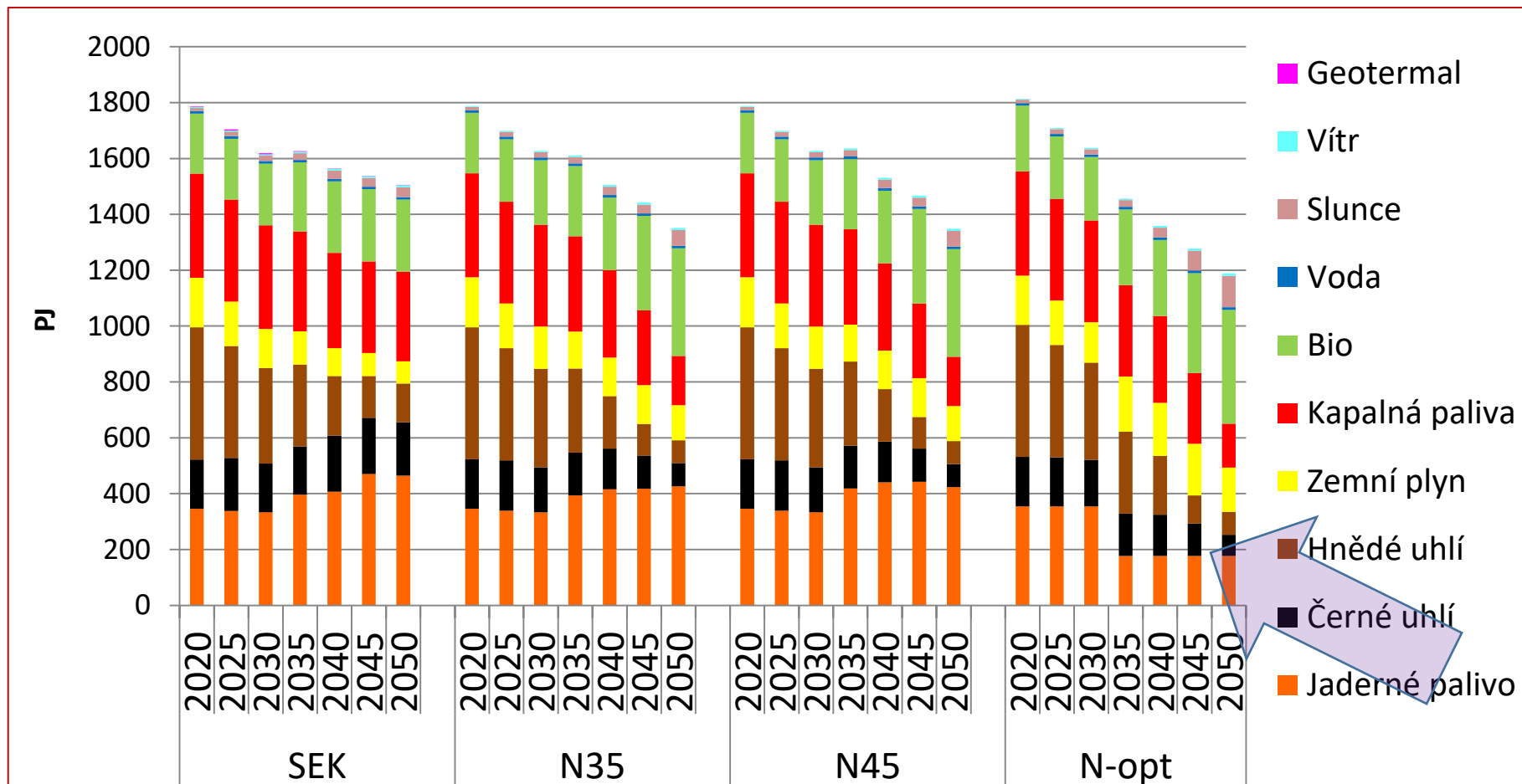
Plánovaná těžba a (tuzemská) spotřeba

(při výstavbě nové JE)



Spotřeba primární energie: Predikce TIMES

<< 80% snížení emisí skleníkových plynů do 2050 >>



Pozn.: **SEK** – Státní energetické koncepce (MPO 2015)

N35 a **N45** – Nový jaderný zdroj, při životnosti JE Dukovan do roku 2035 nebo 2045

N-opt – optimální scénář, který minimalizuje náklady systému

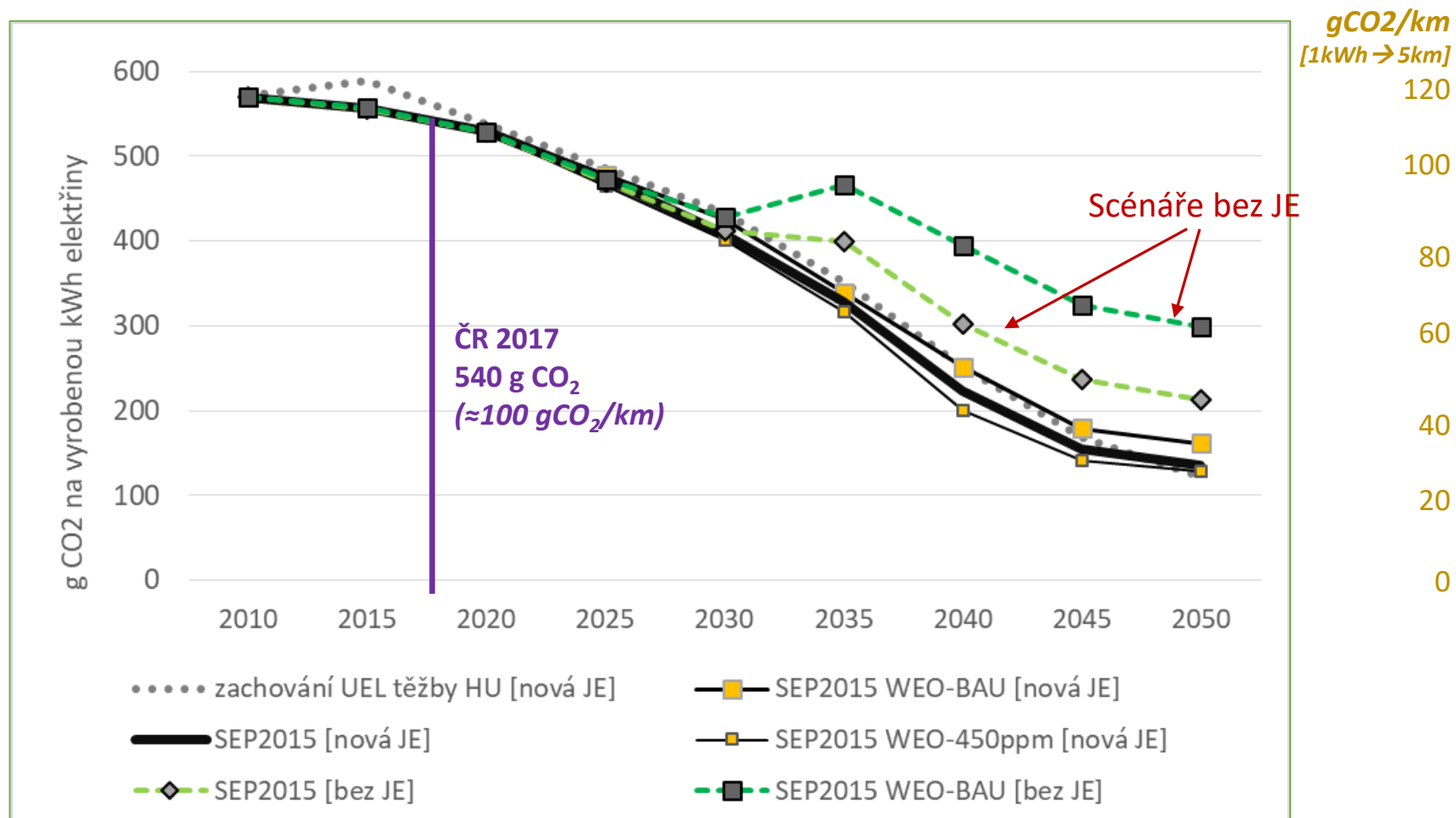
Zdroj: Rečka, L., Ščasný, M. (2016). 80% snížení emisí skleníkových plynů: analýza vývoje energetiky ČR do 2050. IDEA 21/2016.

CERGE-EI, Praha.

Jaká bude uhlíková stopa elektrických aut?

Predikce modelem TIMES

Uhlíková intenzita výroby elektrické energie, 2015-50 [gCO₂/kWh]



Emise CO₂ výroby elektrické energie, 2015-50

L. Rečka, M. Ščasný / Energy 108 (2016) 19–33

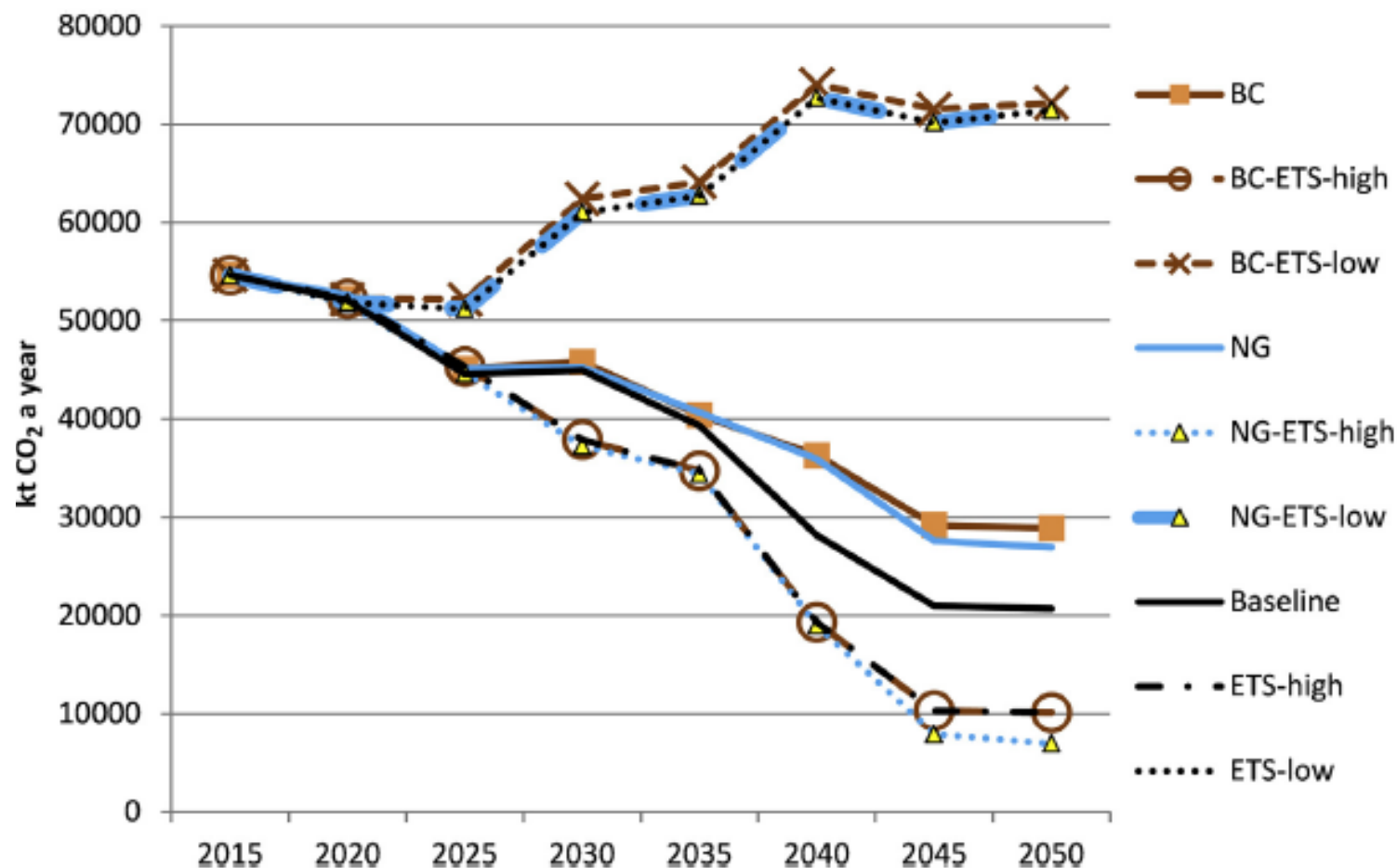
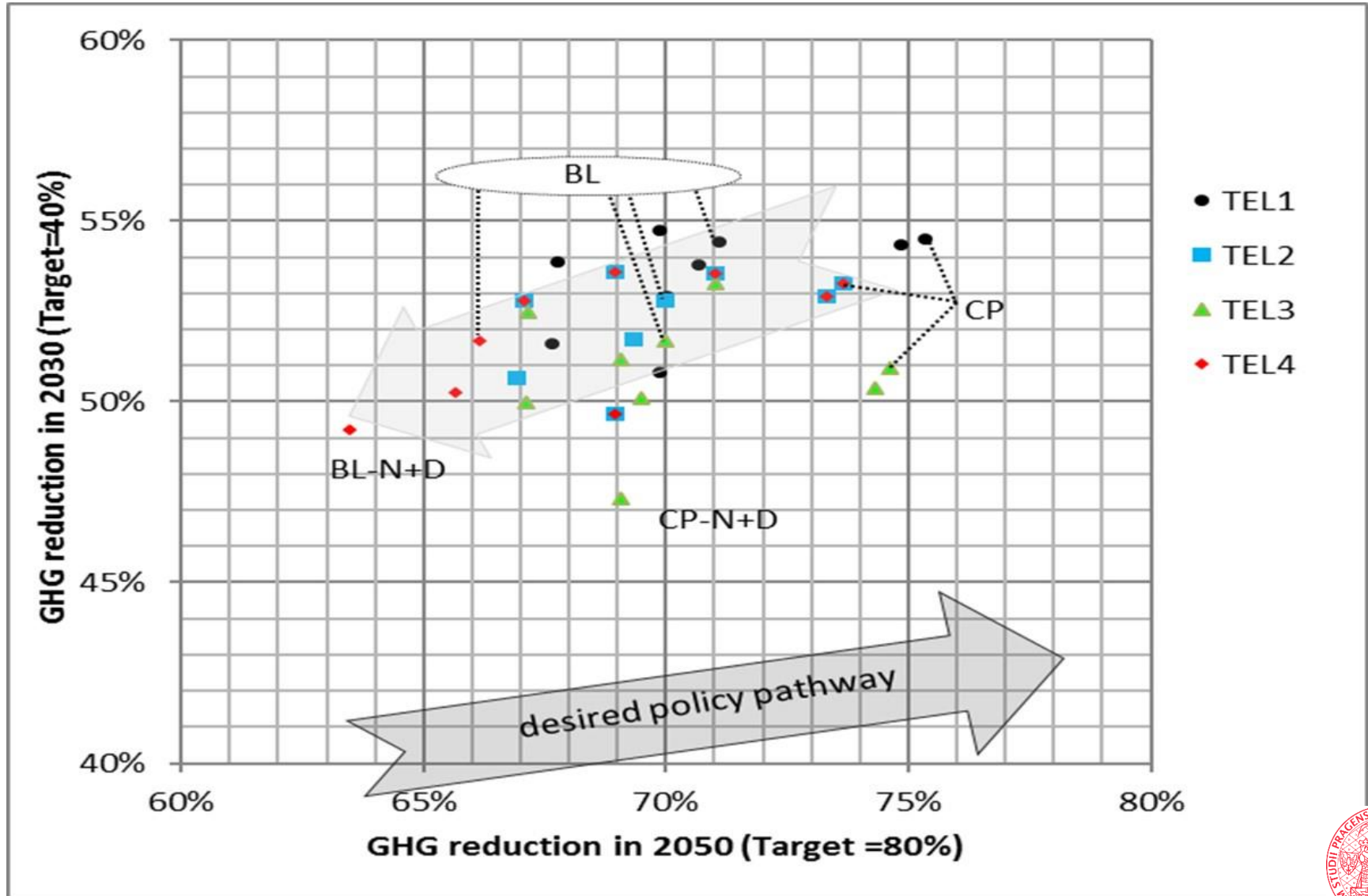


Fig. 9. CO₂ emission.

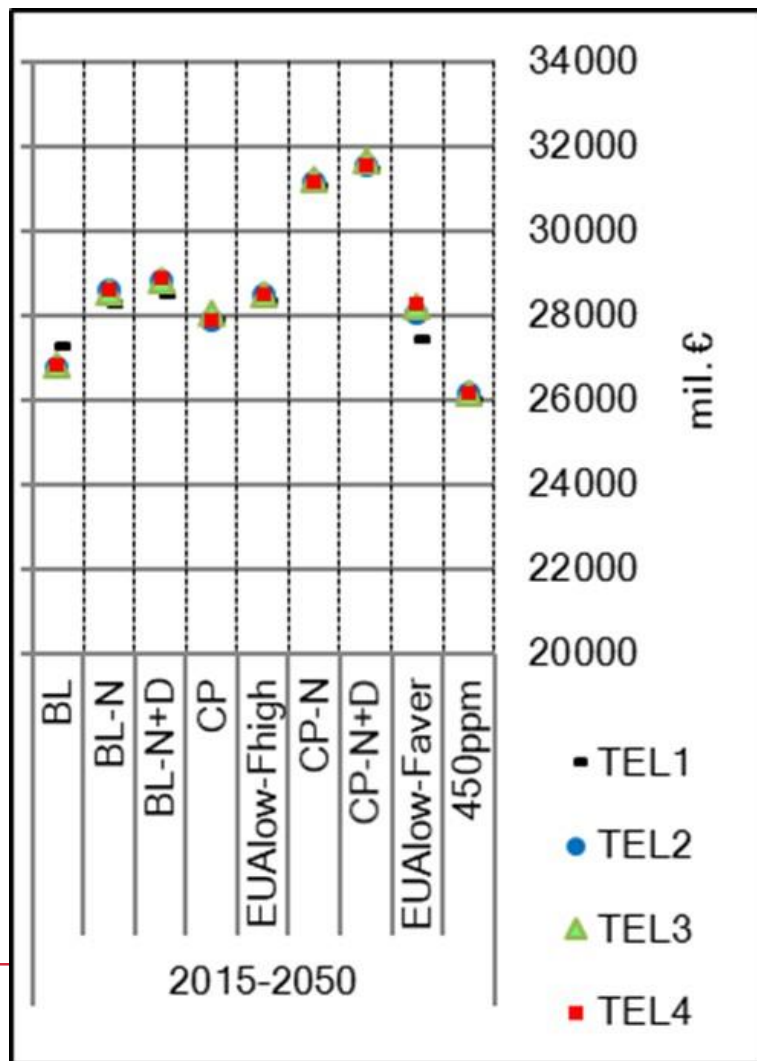


Snížení GHG emisí v 2030 a 2050 pro různé scénáře (model TIMES), srovnání s cíli 2030 a 2050

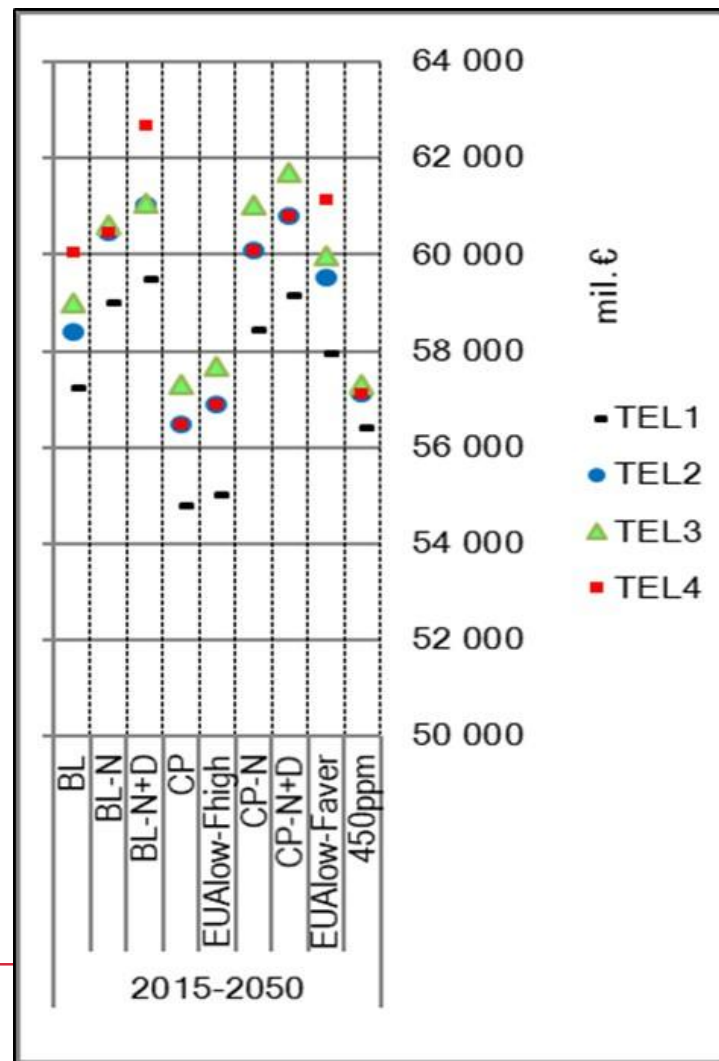


Celkové externí náklady způsobené emisemi TZL (výroba elektřiny a tepla) a GHG (celková energetická bilance)

Air pollution damage



Climate change damage

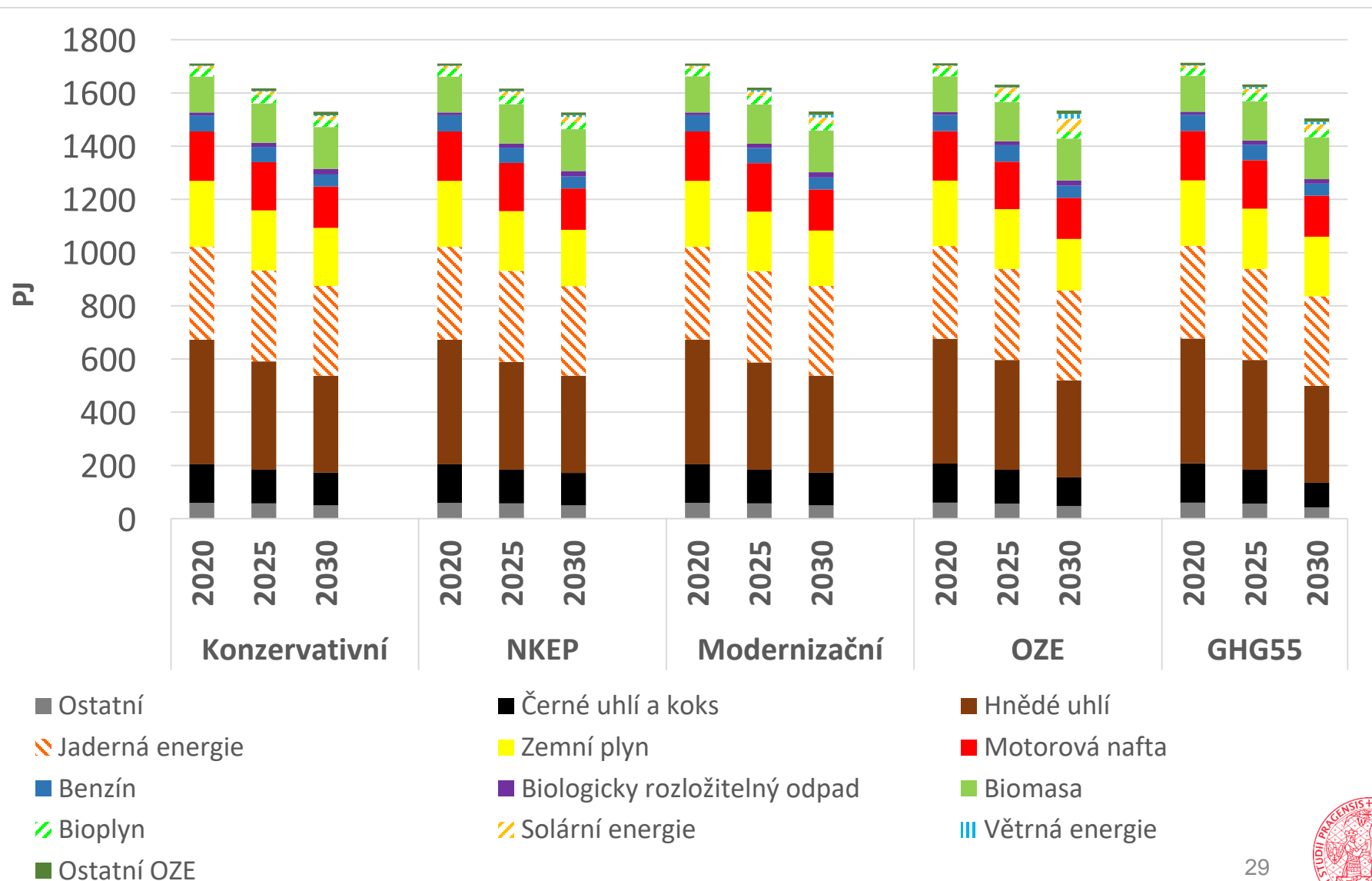


Rozvoj obnovitelných zdrojů a splnění redukčního cíle 55% pro emise GHG v ČR do roku 2030

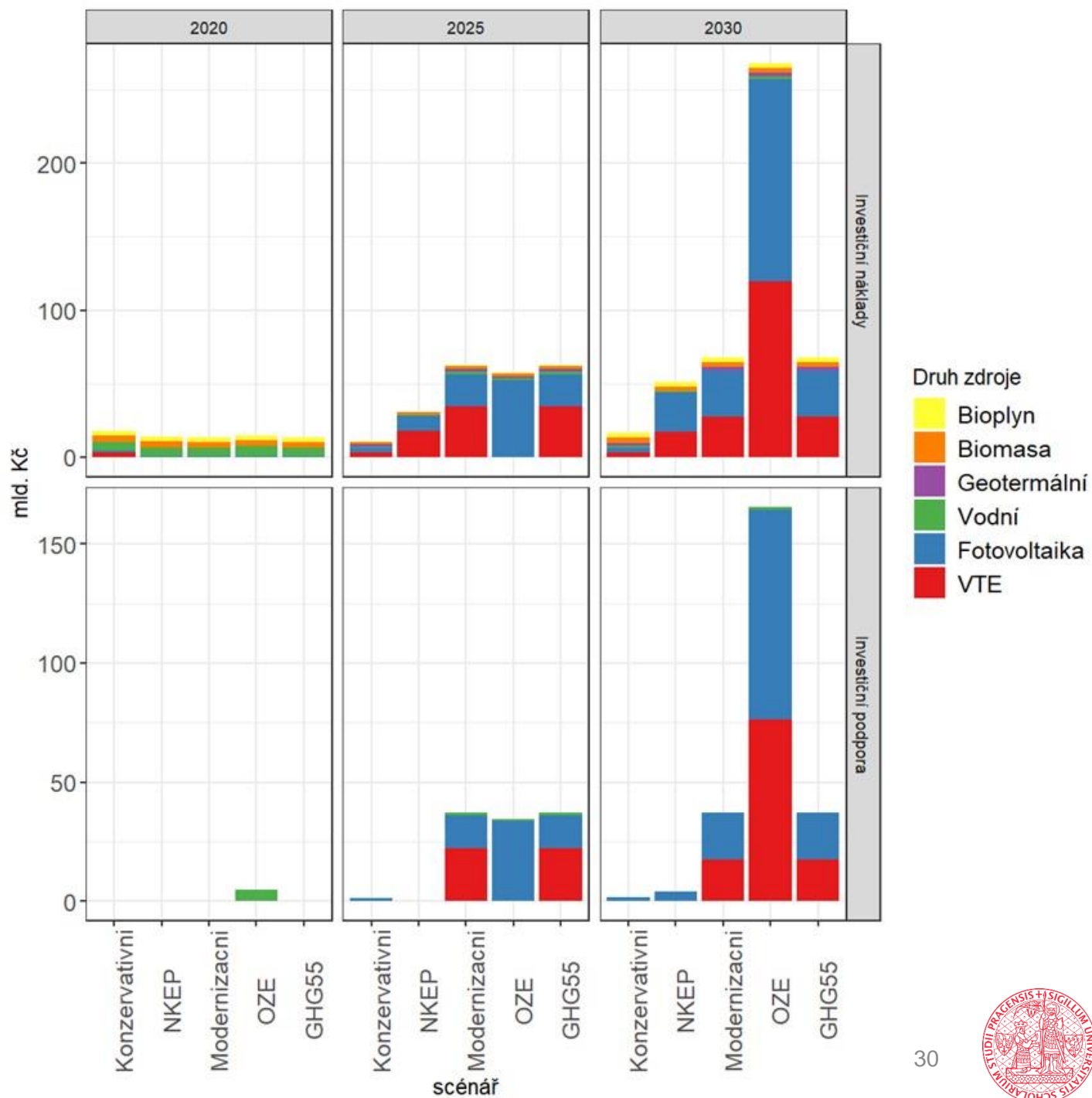
- Finální verze studie příští týden
- Scénáře
 - ❑ **Konzervativní scénář** -- při dosavadním tempu růstu instalovaných kapacit FVE a VTE
 - ❑ **Scénář NKEP** -- dle Vnitrostátního plánu ČR v oblasti energetiky a klimatu z roku 2019
 - ❑ **Modernizační** -- NKEP + investiční podpora OZE (RES+ Modernizačního fondu, 74.8 mld. Kč)
 - ❑ **OZE** – Modernizační, ale podpora bez omezení objemu celkové podpory
 - ❑ **GHG55** -- investiční podpora OZE zastropována, ale hledá optimální řešení pro snížení emisí GHG o 55 % oproti roku 1990 (<73,8 Mt CO₂)
- Hlavní závěry
 - emise CO₂ mohou být sníženy až na 45 % úrovně roku 1990
 - externí náklady z energetiky se sníží v důsledku snížení emisí PM, SO_x a NO_x
 - Nejvýraznější rozdíl v přírůstcích instalovaného výkonu je u FVE a PVE
 - Investiční náklady mohou činit až 15 tis. Kč na snížení 1 t CO₂ v roce 2030
 - Mezní náklady na dodatečné snížení emisí GHG oproti Konzervativnímu jsou nejnižší u GHG55



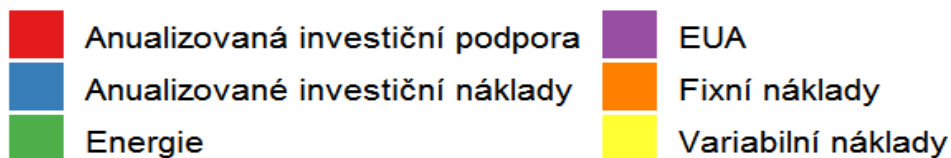
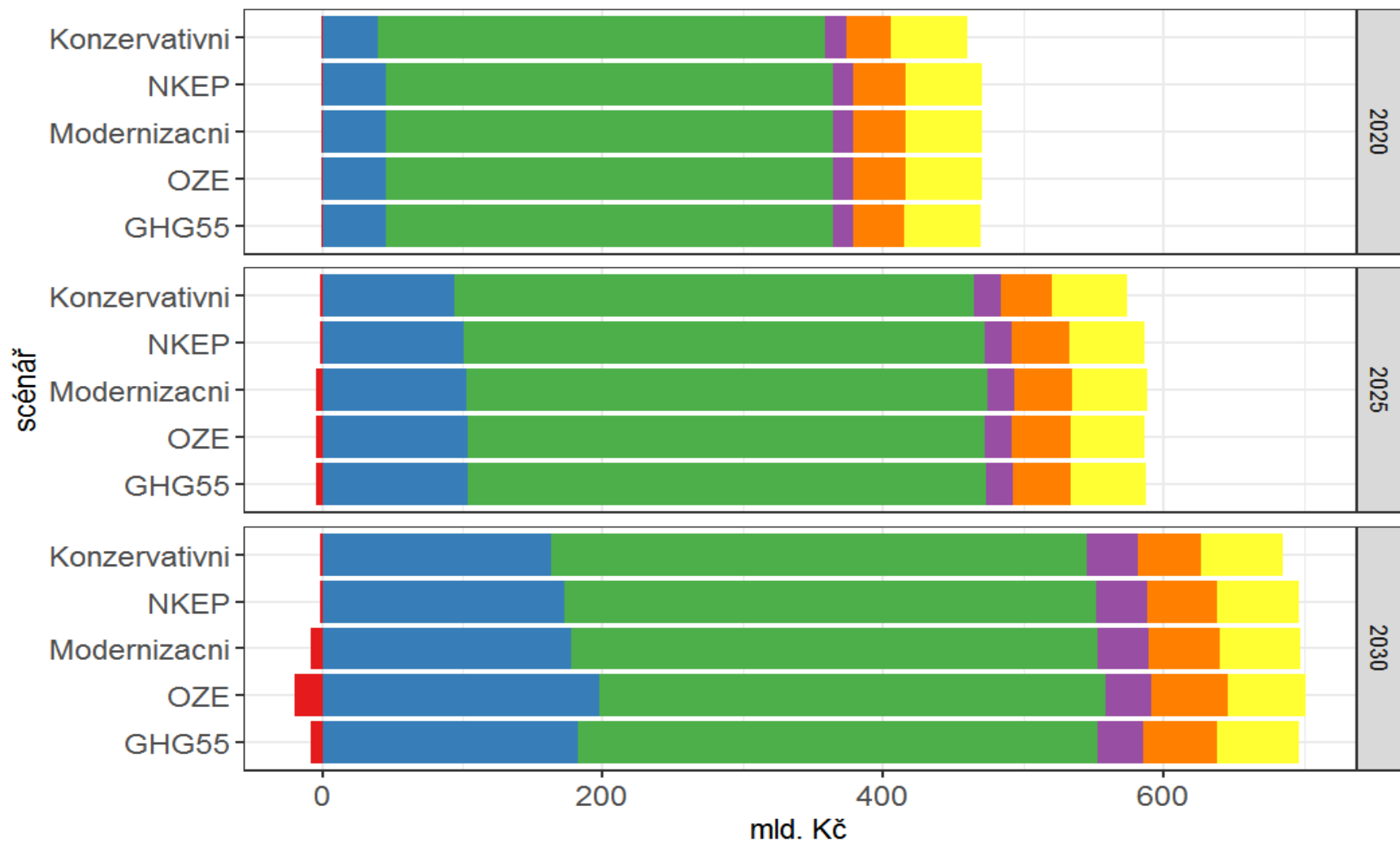
OZE & 55% GHG: Hrubá domácí spotřeba



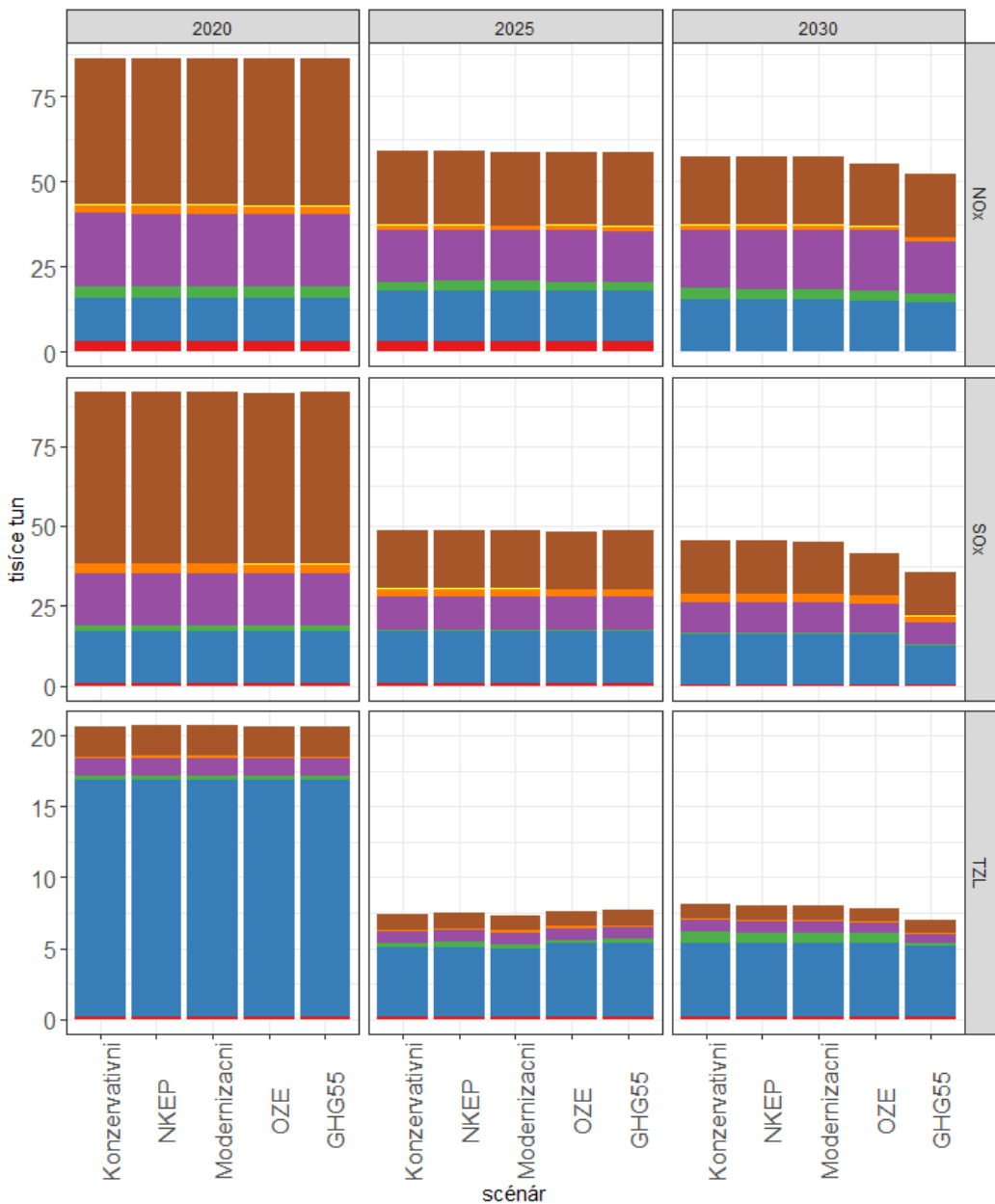
Rozvoj OZE: Investice a podpora do OZE (mld. Kč)



Celkové anualizované náklady [mld. Kč]



Emise NOx, SOx a TZL ze spalování paliv ve stacionárních zdrojích [kt]



Kumulativní externí náklady z energetiky (1A1a) 2020-2030 [mld. Kč]

Scénář	NOx	SOx	TZL	celkem
Konzervativní	87	90	7,11	184,4
NKEP	87,24	89,57	7,078	183,9
Modernizační	87,07	89,5	7,056	183,6
OZE	85	86,1	6,908	178
GHG55	85,97	87,17	6,923	180,1



Úprava a rozšiřování modelu TIMES-CZ

Rozvoj modelu TIMES-CZ (do 2021)

- TIMES-CZ v01 (2014-15) – elektroenergetika + část teplárenství
- TIMES-CZ v02 (od 2016) – celá energetická bilance
- TIMES-TRAN (2019) – dopravní modul
- TIMES-CZ v02+ (2020-211) – integrace TRAN, BIOGAS, BIOLIQ
- TIMES-CZ v03 (vývoj)
 - ref. rok 2015 → 2019
 - regionalizace tepla (14 krajů)
 - dostupnost biomasy (křovec, adaptace)
 - úspory energie a bytový fond (ENERGO, SBLD, SILC)
 - ETS provozovny, detailní EFs
- TIMES-CZ v03+ (výhled)
 - spotřeba energií ve službách a průmyslu (produkce dle IEA)
 - AGRiculture



TIMES-TRAN: Vehicle stock-flow model

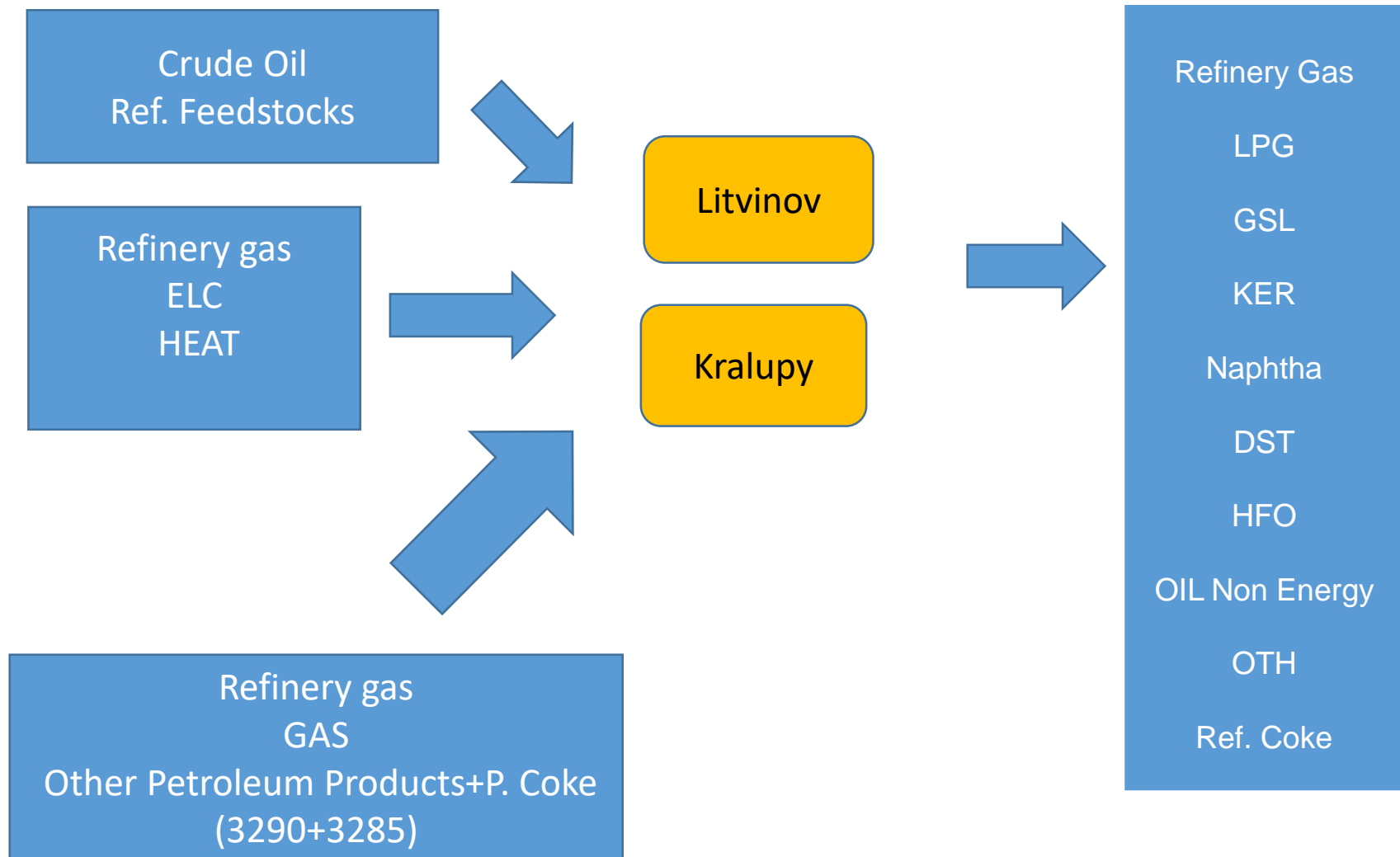
- segmenty COPER (mini, small, medium)
- stáří (EURO normy)
- pohonu (BA, nafta, hybrid, LPG, CNG, PHEV, BEV, biopaliva)

kategorie vozidla	hlavní palivo	Euro norma
velikostní kategorie	sekundární palivo	emisní faktory NOx, PM
ročník	poměr hlavního a sekundárního paliva	počet vozidel
prům. obsazenost/vytížení	účinnost/ spotřeba (Mvkm/PJ)	
předpokl. životnost	průměrný roční nájezd - dle věku	
pořizovací náklady	prům. fixní náklady - dle věku	

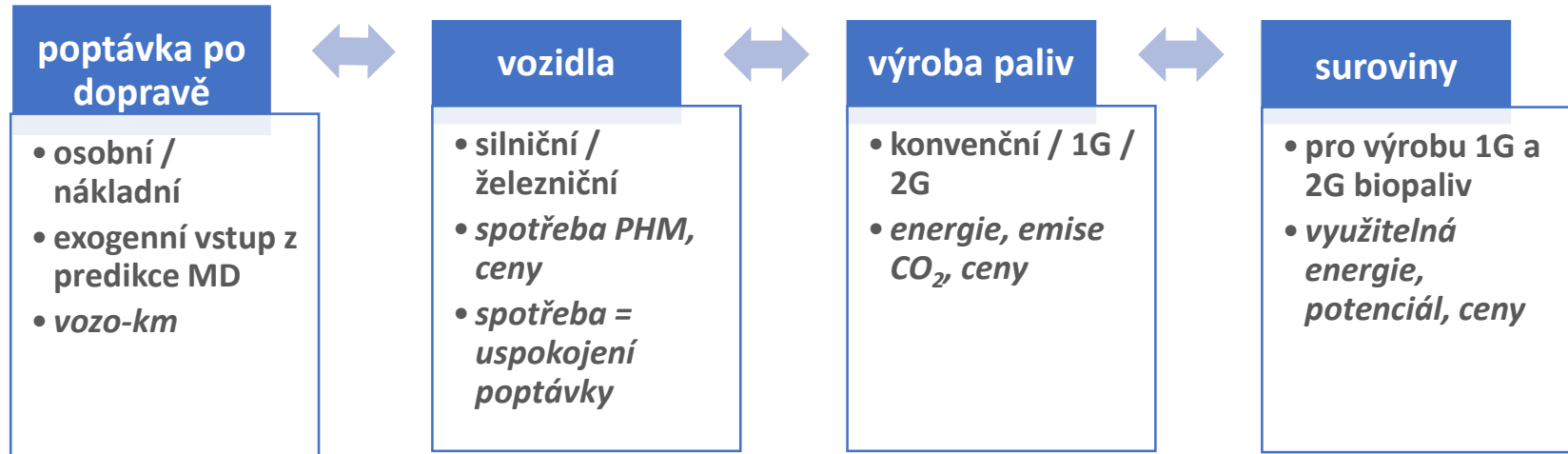
- TAČR RegSim, TAČR NOx2030 (spolu s CDV a MENDELU)
- Total Cost of Ownership
- ~135 technologií, nové i ojeté vozidla
- Spotřeba elektřiny napojená na výroby elektřiny v TIMES-CZ



TIMES-CZ v.03: Flexible Refinery



TIMES-TRAN: Možnosti optimalizace



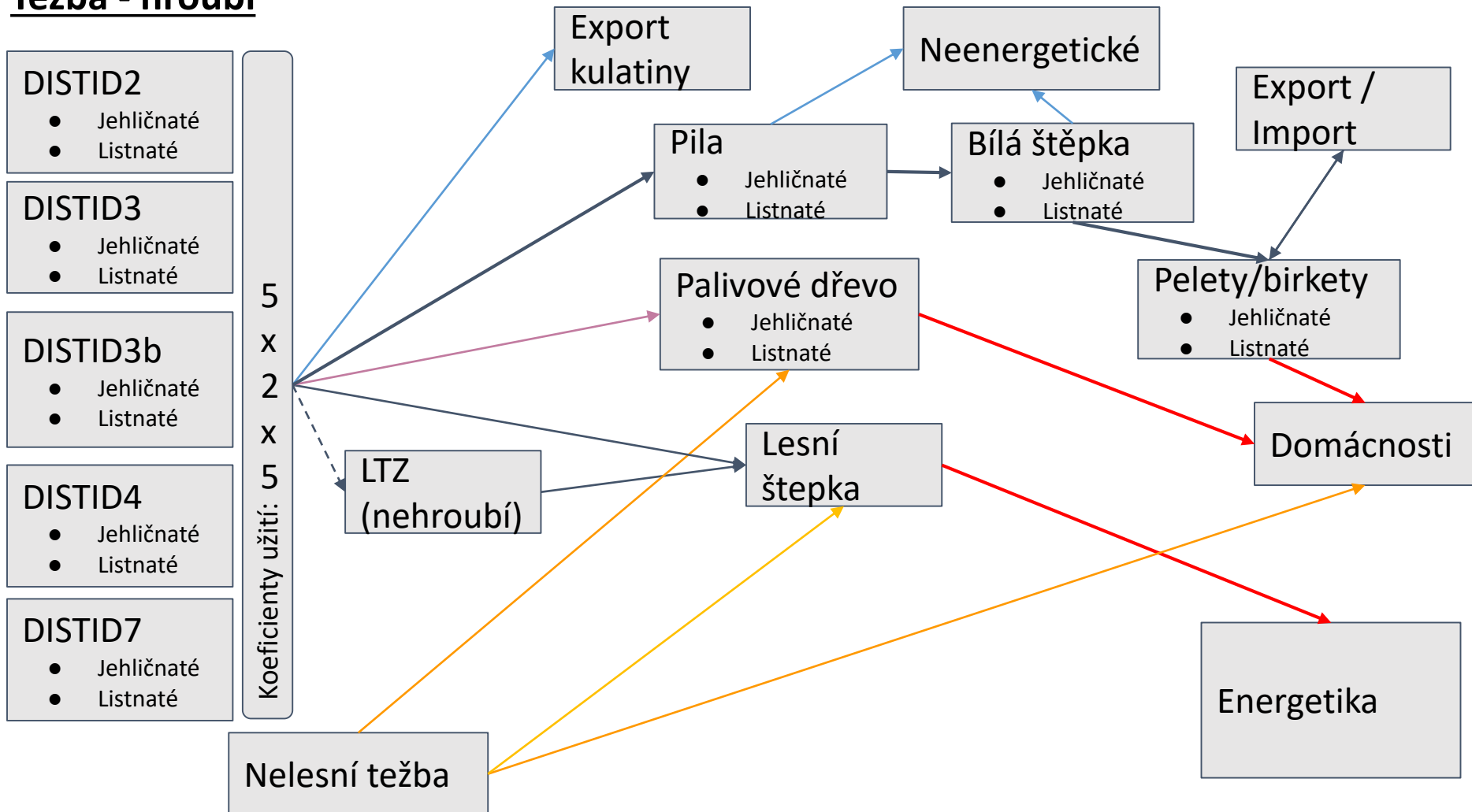
Biomasa v TIMES-CZ

- TAČR Eta TL0200440: **LESY-ADAPT** (*Modelování scénářů udržitelné skladby lesa ve vztahu k navrženým adaptačním opatřením, vlivu na sektor energetiky, emise skleníkových plynů a celkovou přijatelnost těchto scénářů pro českou veřejnost, 2019-2023, UK COŽP a IFER*)
- Aktualizace a regionalizace **potenciálu dřevní biomasy** pro energetické užití
 - Dle 3 adaptačních scénářů vč. efektu kůrovcové kalamity (IFER)
 - 14 krajů – omezení dostupnosti pro velké zdroje v rámci kraje
- Rozlišení **typu biomasy** a jejích produktů
 - štěpka
 - palivové dřevo
 - pelety/brikety
- Zpřesnění **nákladových křivek biomasy**
 - Dle typu a využití potenciálu
 - Rozlišení nákladů na dopravu



Rozšíření modelu TIMES-CZ v LESY-ADAPT

Těžba - hroubí



Poděkování: Rozvoj modelu TIMES (2018-2026)

TAČR TK01010119: RegSim – Integrované modely pro analýzu dopadů regulací a simulace dlouhodobých scénářů vývoje energetiky

- (doprava, predikce: NKEP2019, GHG55, NetZeroC)

TAČR TL02000440: LESY-ADAPT – Modelování scénářů udržitelné skladby lesa ..., vlivu na sektor energetiky, emise skleníkových plynů a celková přijatelnost těchto scénářů

- (biomasa, +IFER, BIOM)

TAČR TITSMZP713 OZE-Tran – Optimální využití obnovitelných zdrojů energie v dopravě

- (biopaliva v dopravě, +VŠCHT, ČVUT)

TAČR SS02030031: ARAMIS – Integrovaný systém výzkumu, hodnocení a kontroly kvality ovzduší

- (úspory energie, update energetická bilance, emisní inventury, +ČHMU)

TAČR SS03010156: NOx2030 – Predikce úspor emisí ze silniční dopravy do roku 2030 dosažených aplikací vybraných daňových a poplatkových nástrojů

- (snížení emisí NOx 2030 v dopravě, +CDV)

TAČR TC7 SS04030013: SEEPIA – Centrum socio-ekonomického výzkumu dopadů envi politik

- (aplikace, projekce, GreenDeal)

GAČR EXPRO 19-26812X: F3EM – Frontiers in Energy Efficiency Economics and Modelling

- (hybridizace)



Děkujeme za pozornost

milan.scasny@czp.cuni.cz

