

Kdy zvítězí Maxwell nad Gibbsem v dopravě? Chemické nebo elektrické nosiče energie.

Jan Macek, ČVUT v Praze, FS, Centrum vozidel udržitelné mobility

jan.macek@cvut.cz



Motivace

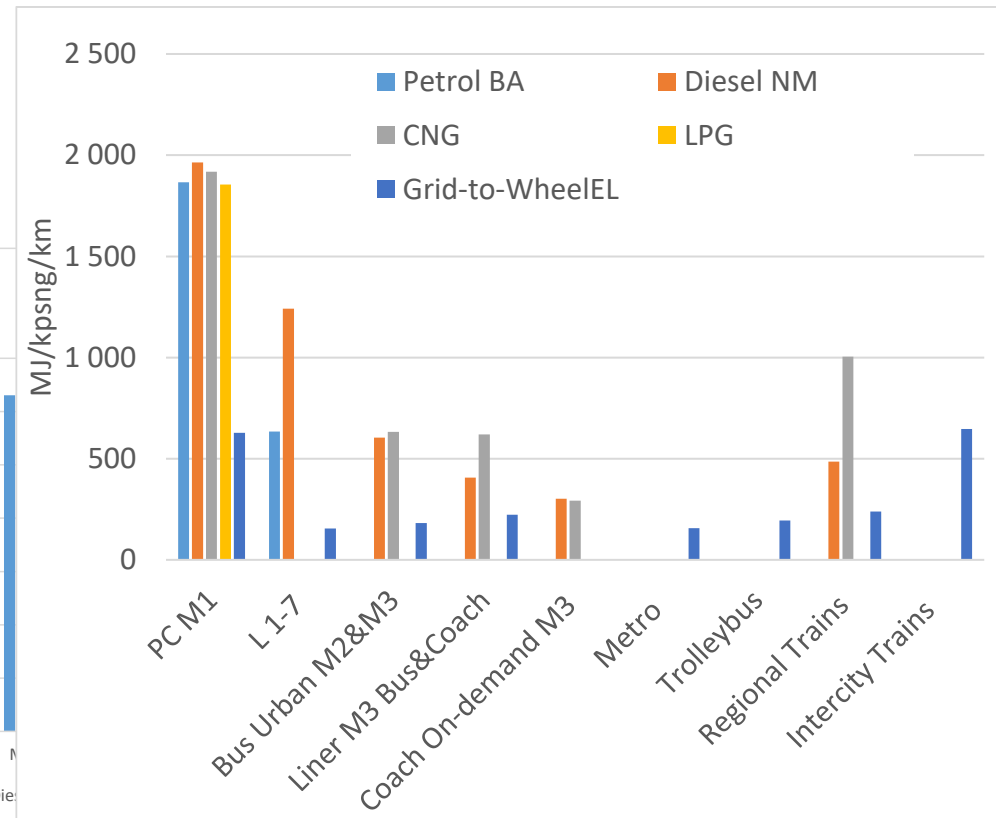
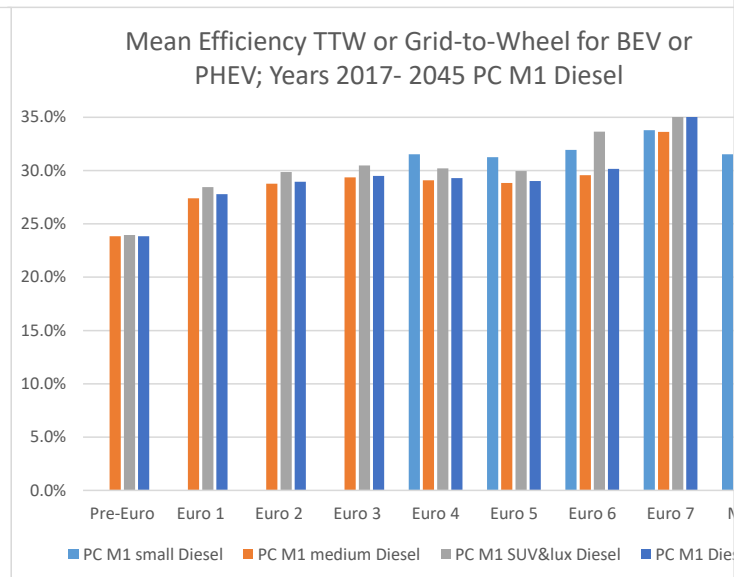
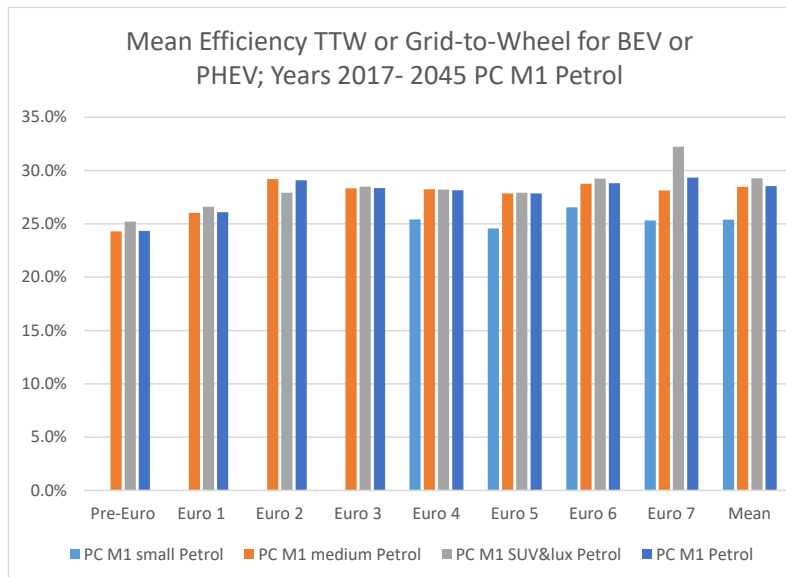
- Hledají se kompromisy mezi krajními přístupy k „bezemisní budoucnosti“ silničních vozidel a zachováním konkurenceschopnosti evropské ekonomiky, k čemuž přispívá (bez nároků na úplnost)
 - časově zpožděná zpětná vazba z komplexních dopadů jednostranně pojatých opatření v dopravě (holistický přístup a technologická neutralita jsou nutné)
 - objevuje se generace pravdomluvných důchodců, kteří si uvědomují následky extrémních stanovisek
 - změnila se mezinárodní situace z kooperativní na konfrontační.
- **Cíl: ukázat výsledky aplikace statisticko-simulačních přístupů k vyhodnocení emisí skleníkových plynů na příkladu osobních vozidel M1 v ČR na základě fyzikálních možností. Ekonomická analýza je mimo možnosti autora.**
- Budou prezentovány možné scénáře vývoje vozového parku osobních vozidel dle EuroEnergy (přijaty MPO ČR) s různou intenzitou nasazení elektrifikovaných vozidel v období 2025-2045 na základě rozsáhlého výpočetního prostředku FECET, upraveného pro dynamické scénáře s časovou proměnlivostí základních parametrů.
- Pro zjednodušení výkladu jsou nepodstatné faktory vypuštěny, ale na základě podrobných rozborů vzniklých mimo tento referát – podrobnosti může autor dodat.

Způsob posouzení – metrika množství emisí skleníkových plynů – a její analýza

- S ohledem na značné **emise skleníkových plynů** při výrobě baterií je nutno hodnotit emise skleníkových plynů za celý životní cyklus srovnávaných vozidel (LCA). Výroba samotného vozidla bez baterie s celou hnací jednotkou je zhruba stejně emisně náročná (elektromobily používají podstatně více emisně náročných lehkých materiálů), údržba se ukazuje jako nevýznamná, recyklace je zatím spíše emisně ztrátová.
- Často uváděné **srovnání účinnosti a emisí** od úložiště energie na kola vozidla Tank-to-Wheel **TTW** je zavádějící, protože se srovnávají **formy energie o různé kvalitě**. Nevratnosti při přeměně vstupní chemické energie na mechanickou (**Gibbs**, volná entalpie) jsou zákonitě daleko větší než u vstupní elektrické energie s pomocí málo ztrátových elektromagnetických sil (**Maxwell**), i když i zde existují nevratnosti vedoucí k disipaci na tepelnou energii (ohmické odpory, rozptylové magnetické toky, elektrochemické děje v akumulátorech).
- Nutno srovnávat transformaci energie a emise od primárního zdroje (Well) s nevratnostmi při „výrobě“ nosiče energie – elektřiny nebo paliva – Well-to-Grid a při distribuci a ukládání energie do zásobníku Grid-to-Tank, úhrnem **WTG+GTT=WTT**. **Rozhraní nutno pečlivě definovat**, zejména u omezeně životných „obnovitelných“ zdrojů „zdarma a bezemisních“ je nutné započítat emise při výrobě elektrárny (LCA el), u klasických zejména nevyužitou vstupní energii.

Způsob posouzení – metrika množství emisí skleníkových plynů – a její analýza

- Spolehlivé jsou vstupy u vozidel se spalovacími motory. Navýšení proti výhřevnosti v důsledku výroby paliv asi +25%. 10 kWh=1 dm³ motorové nafty B7. Emise asi 325 g CO_{2eq}/kWh chem. Účinnost TTW v provozu kolem 30%. Vyhodnocení pomocí FECET, viz Vize 2050 z r. 2023
- Složitější je to u elektrické energie – emisní faktor ve statistikách je na hrubou výrobu, ale WTG je na čistou spotřebu na vstupu nabíječky (ztráty: elektrárna+distribuce+stabilizace sítě+dovoz+LCA el – více než 20%). **U elektromobilu se navíc předpokládá nižší průměrná rychlost kvůli dojezdu.**
- GTT – „ztráty“ nabíječka+baterie+chlazení během nabíjení.
- **TTW účinnost nezahrnuje jízdní odpory (větší u těžšího vozidla), lepší je „účinnost“ přepravy MJ/kpsng/km.**



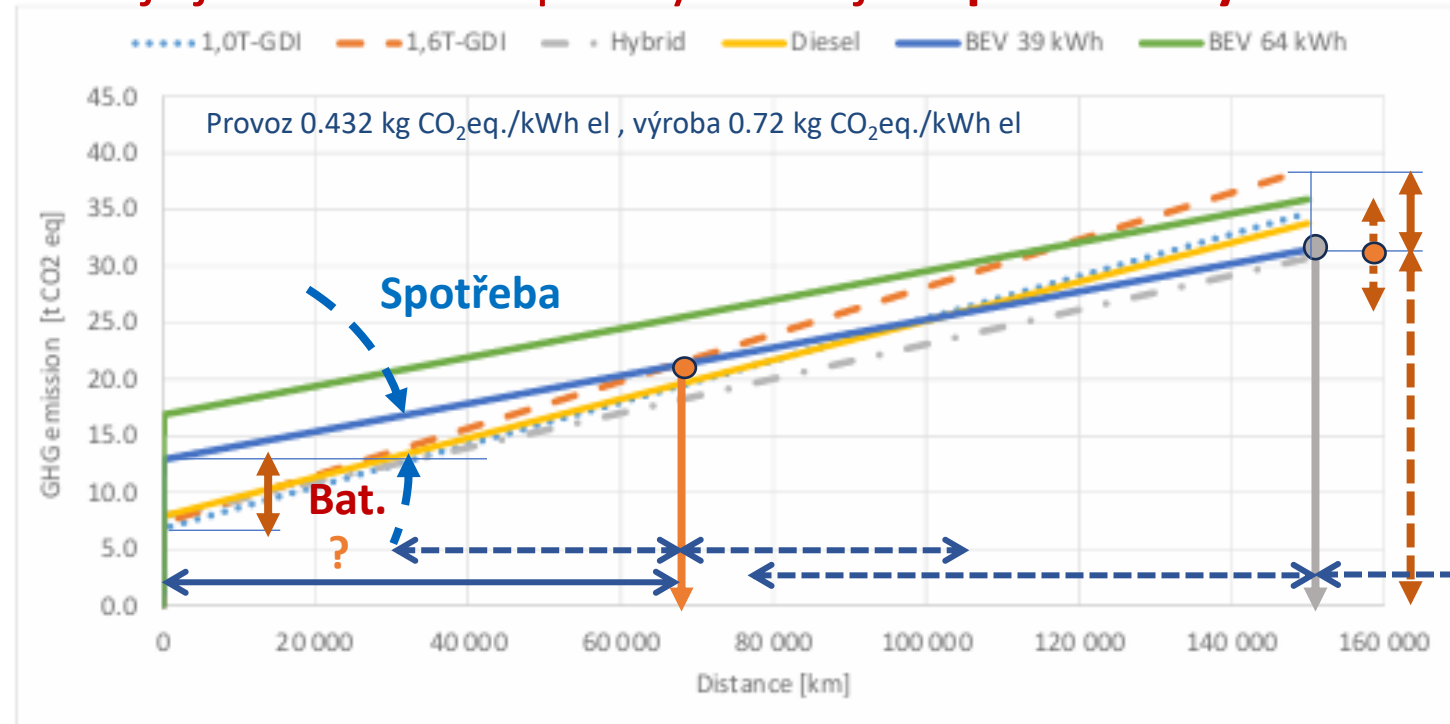
Způsob posouzení – metrika množství emisí skleníkových plynů – a její analýza

Hmotnost produkováných plynů (tuny za dobu využitelnou zákazníkem) je pro veřejnost málo vypovídající – proto obvykle kritický nájezd CM v km, při němž mají srovnávaná vozidla stejné GHG emise a nad nějž je nová koncepce výhodnější – **prohra - výhra**.

Vstupy jsou nejisté, v případě **výroby baterií** je nejistota energetické spotřeby větší než $\pm 40\%$, v případě **provozní spotřeby** $\pm 10\%$.

Pro mezní hodnoty se „!“ změní z výroby baterie o $\pm 3 \text{ t CO}_{2\text{eq.}}$ vůči cca 30 t, ze spotřeby $\pm 1.7 \text{ t CO}_{2\text{eq.}}$.

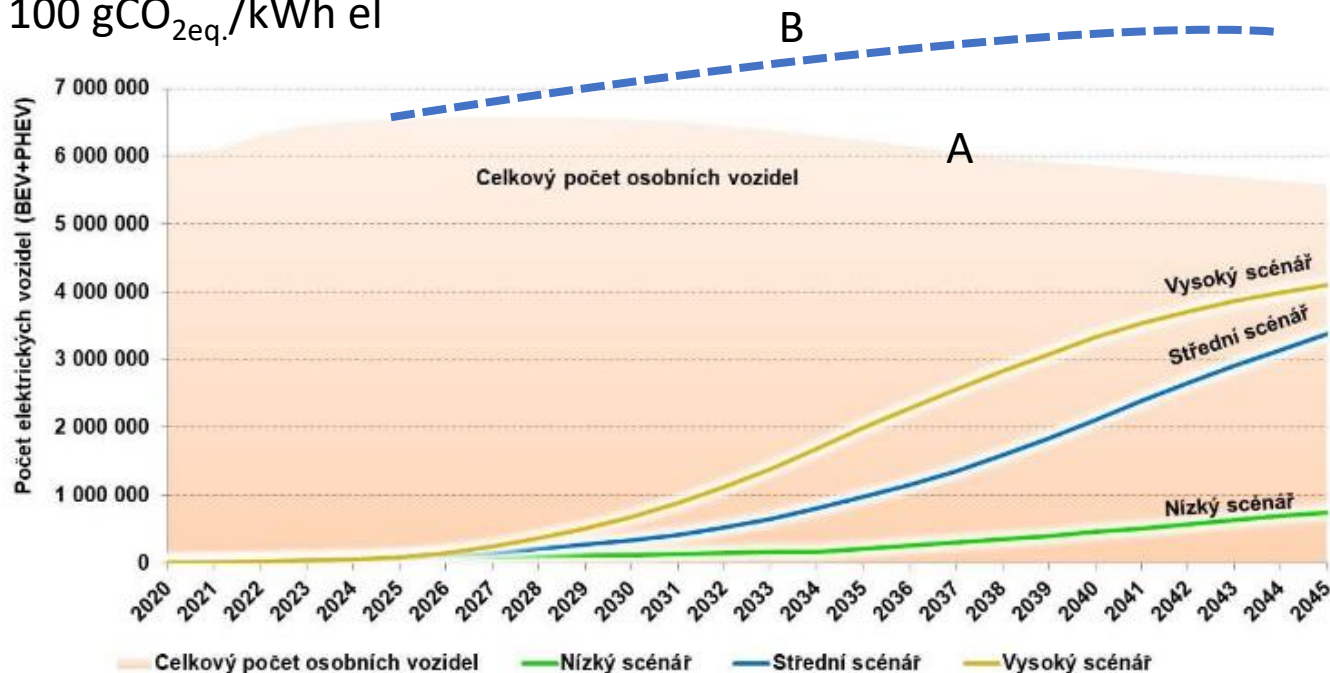
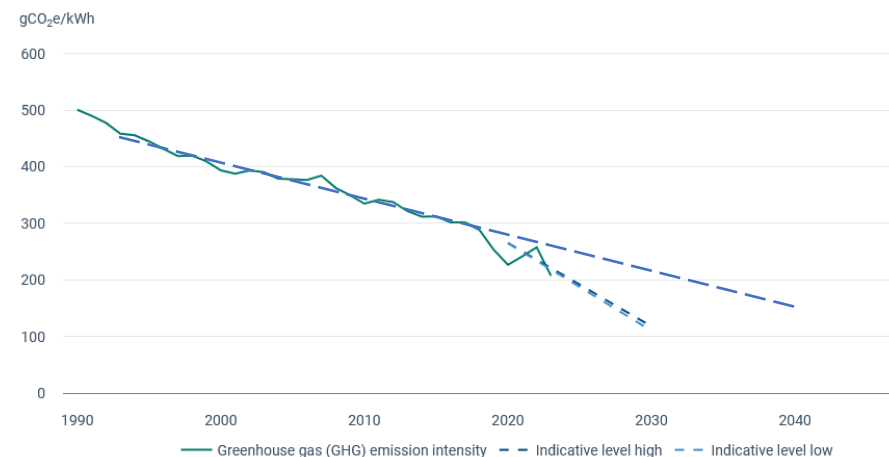
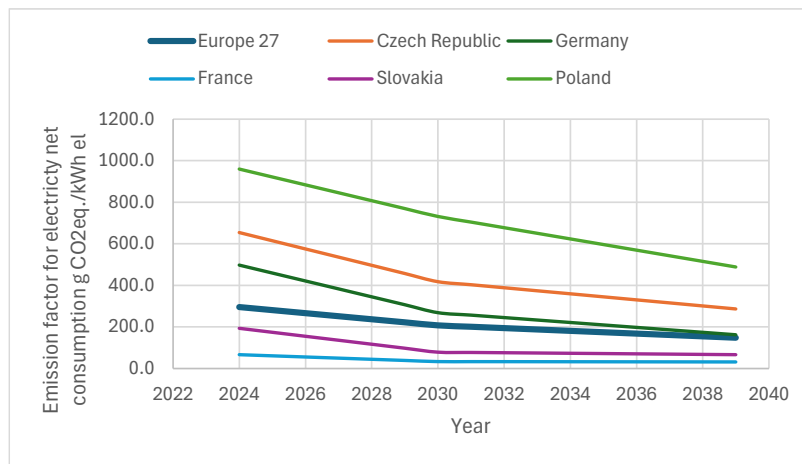
„?“ se změní velmi zhruba o $\pm 30\,000 \text{ km}$ resp. o $\pm 10\,000 \text{ km}$ – změny kritického nájezdu jsou tedy neúměrné skutečnému zisku/ztrátě na cílové hodnotě emisí.



$$CM \approx \frac{\text{Emissions from batt. prod.} \pm \text{Uncertainty of batt. prod. em.}}{\text{kWh/100 km ICEV} * 325 * \left(1 - \frac{1}{2.3 \pm 0.23} * \frac{\text{Em.fact.el.}}{325}\right)}$$

Další vstupy pro posouzení vybraných scénářů

Emisní faktory pro čistou spotřebu elektrické energie včetně LCA el. převzaty z GreenNCAP. Jsou do značné míry potvrzeny materiály JRC EU na rozdíl od The icct a EEA, předpokládajícím průměrný EU faktor kolem 100 gCO_{2eq.}/kWh el



Scénář dle Euro Energy byl použit pro další výpočty v původní variantě A

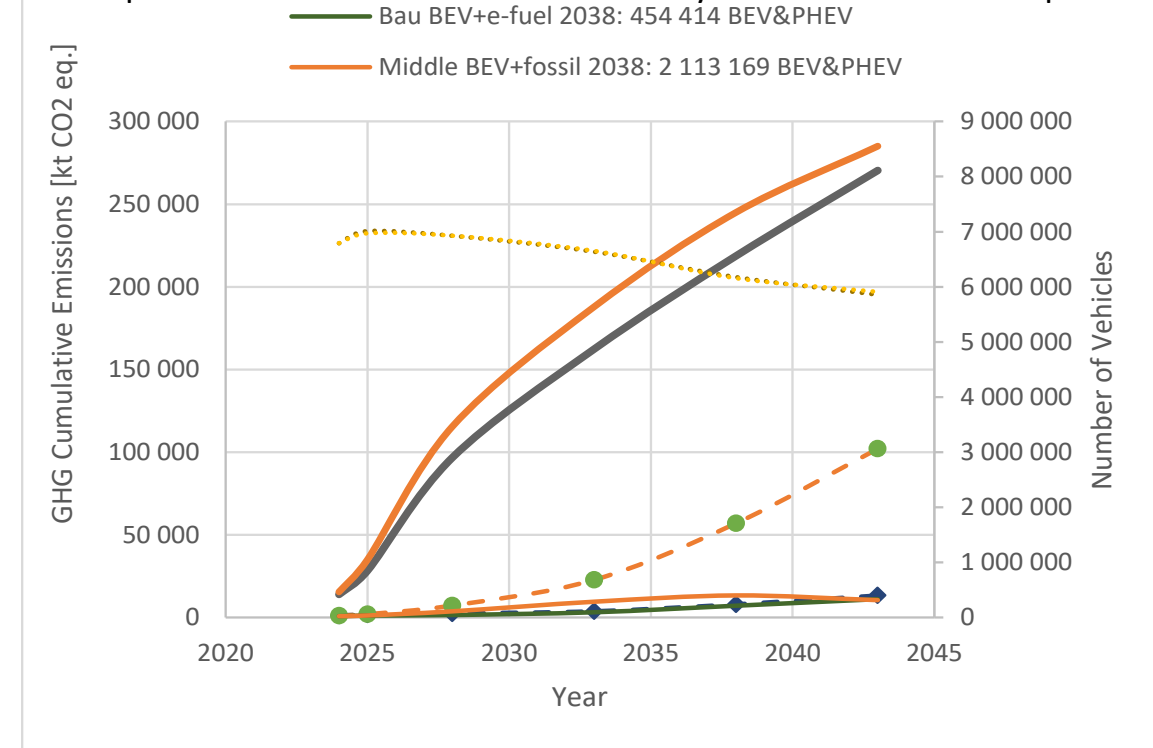
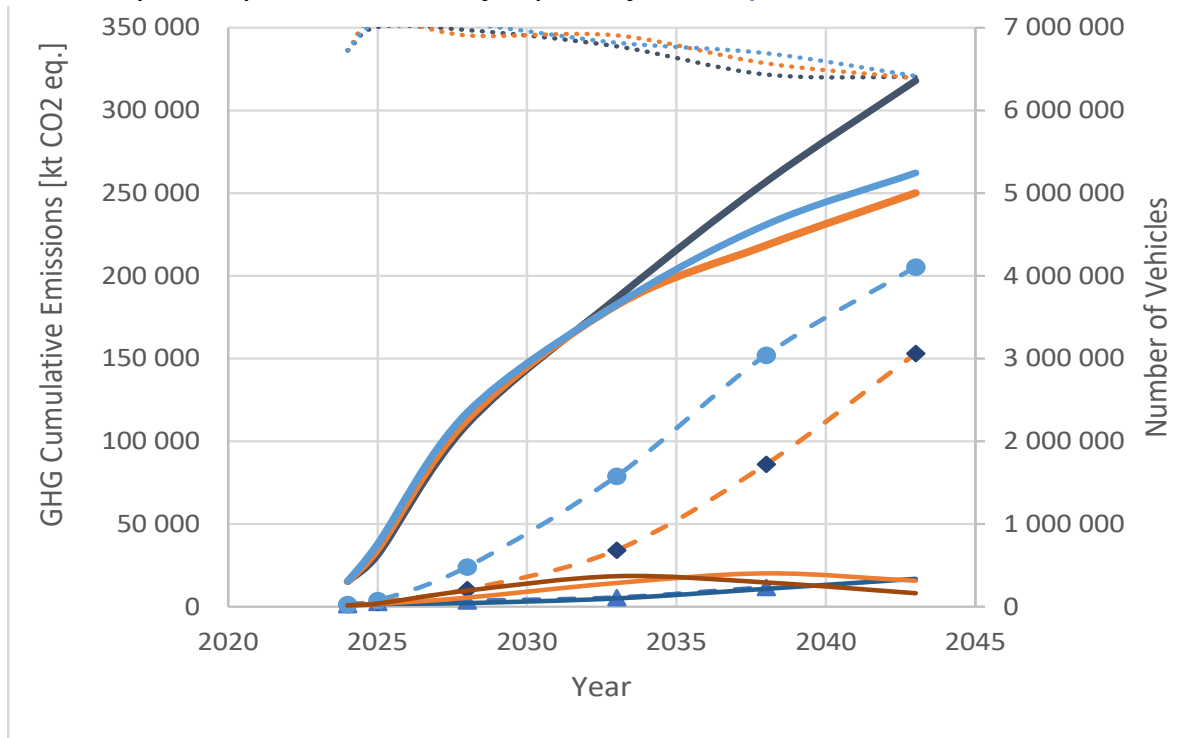
- vysoký scénář zavádění BEV+omezeně PHEV do 2035 se zákazem nových ICEV od r. 2035
- střední scénář s odsunem zákazu ICEV na rok 2045
- nízký scénář – business as usual BAU

Doplněna varianta B – realističtěji rostoucí celkový počet vozidel do 7 800 000 v r. 2040. Jinak počty BEV a PHEV ponechány.

Příklady výsledků pro energetický mix a emisní faktor čisté spotřeby dle GreenNCAP pro současnou a budoucí flotilu vozidel v ČR (bottom-to-up simulace kalibrované dle individuálních dat ze STK)

Srovnání scénářů pro faktory Německa a ČR z hlediska kumulativních emisí LCA

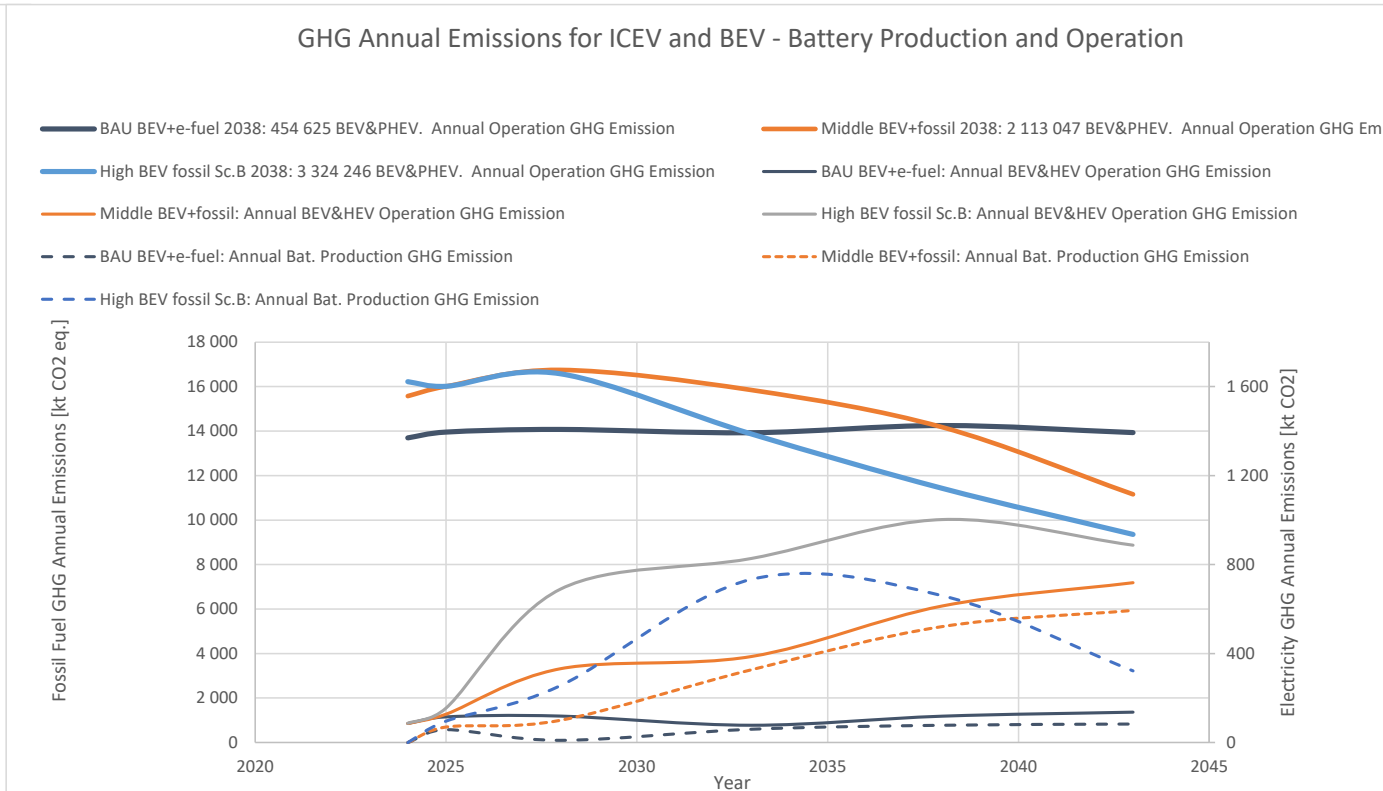
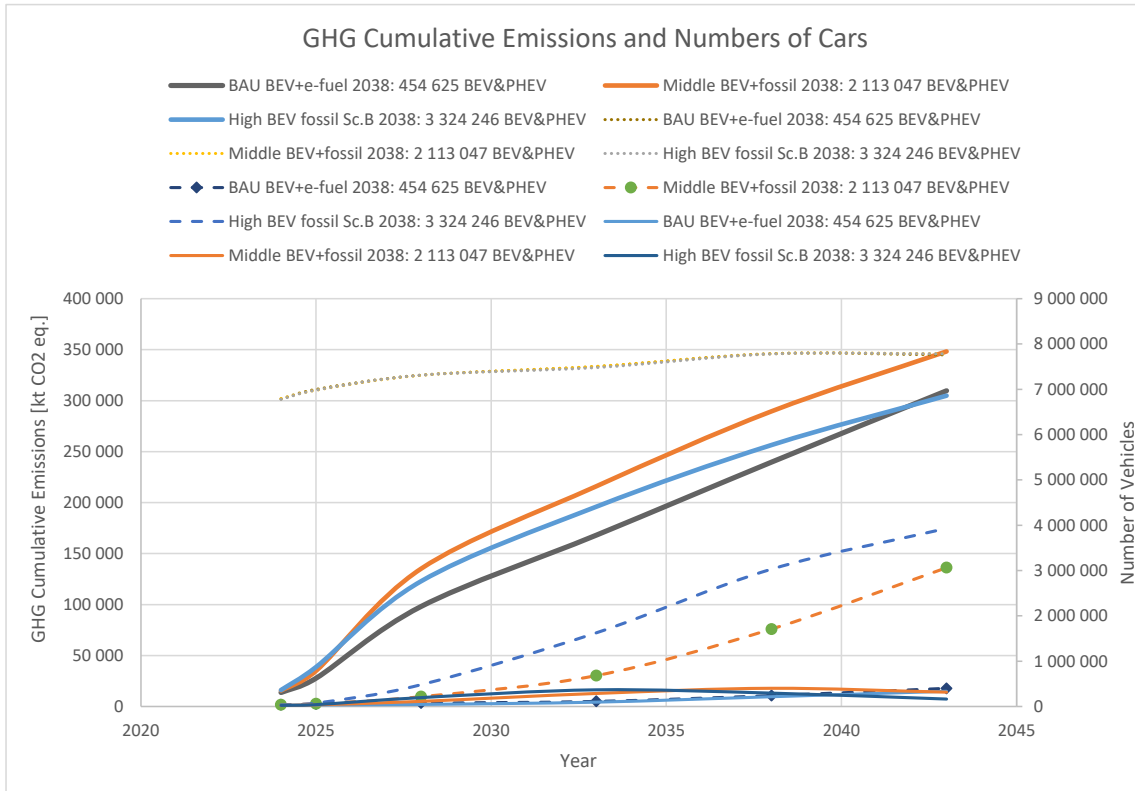
- pro variantu A** (pro německý emisní faktor) je z hlediska skleníkových plynů delší dobu (do 2045) nejvýhodnější **střední scénář**, **BAU** je nejhorší, neboť pokles emisního faktoru elektřiny není kompenzován při stálém emisním faktoru fosilních paliv, **vysoký** scénář způsobuje emisní šok na počátku a v dlouhodobém výhledu bude lepší než **střední scénář**, kde kumulativní emise stoupají od r. 2040 rychleji; **čárkované počty vozidel BEV, plně PHEV (dole), tečkované všech**;
- BAU** ani **střední scénář** nesplňují požadavek EU na flotilový průměr nově vyrobených vozidel; ten je splněn jen ve **vysokém** scénáři.
- varianta A** (pro český emisní mix) je nejlepší pro **BAU** při míšení 75% standardního paliva s 25% syntetického FT paliva, vyráběného z francouzské elektřiny a s účinností WTT 40%, WTW cca 12% (DAC pro CO₂ ⇒ CO, elektrolýza vody na H₂, FT), ČR elektřina pro provoz, srovnání se **středním** scénářem; tečkované počty všech vozidel, čárkované BEV;
- vliv českého emisního faktoru proti německému je zřetelný při srovnání obou obrázků pro **střední** scénář;
- problém vzniká s požadavkem EU na nezaměnitelnost syntetického a fosilního paliva.



Příklady výsledků pro energetický mix a emisní faktor čisté spotřeby dle GreenNCAP pro současnou a budoucí flotilu vozidel v ČR

Srovnání variant scénáře B pro německý emisní faktor elektřiny z hlediska kumulativních emisí LCA

- pro variantu scénáře **B** je z hlediska skleníkových plynů po jistou dobu (do cca 2043) nejvýhodnější **BAU** při míšení 75% standardního paliva s 25% syntetického dle předchozího snímku, německá elektřina i pro provoz; **při větším podílu syntetického paliva se hodnoty na BAU křivce změni v poměru emisních faktorů, lze tedy dosáhnout velké výhody, pokud nerozhodne cena;**
- vlivem relativně menšího počtu elektromobilů (zachovány počty BEV a PHEV dle scénáře A - čárkovaně) a nižšího emisního faktoru elektřiny je **střední scénář** zanedbatelně výhodný proti **vysokému** jen na samotném počátku (do 2027); počty všech vozidel tečkovaně;
- nesplněn požadavek EU na nezaměnitelnost syntetického paliva s fosilními palivy;
- obr. vpravo – vyneseny roční emise z provozu vozidel (klasická stupnice vlevo) i z výroby baterií a elektrického provozu (stupnice vpravo).



Závěry

- **V dlouhodobém časovém měřítku (50 let a více) lze očekávat vítězství Maxwella, v krátkodobém má Gibbs stále naději při pochopení podstaty zvládnutí chaosu.**
- **Holistický přístup a technologická neutralita** (bez dodatečných podmínek, vylučujících alternativy) při posuzování skutečných dopadů na emise skleníkových plynů by mohla ještě evropský automobilový průmysl zachránit. Je to jedno z posledních odvětví high-tech v Evropě.
- Stabilita opatření z úrovně EU nesmí vyloučit **vyhodnocování a úpravy pomocí zpětné vazby**, avšak ne systémem „Nepomohlo to, proto musíme ještě zintenzivnit tlak“.
- **Mnohost cest řešení nesmí být na závalu** v době, kdy se optimální postup stále hledá. Není to investičně optimální, ale jde o běžný postup v rizikových situacích. Kompromis není sprosté slovo, nejde o hru s nulovým součtem ani o vítězství jediné správné ideologie.
- **Výsledky hodnocení kumulativních emisí ukazují, že odklad zákazu spalovacích motorů a zmírnění emisních požadavků na flotilový průměr vyrobených a v EU registrovaných automobilů jsou racionální, pokud nám jde opravdu o snížení emisí.**
- **Palivo se dopravuje snadněji a s menšími investicemi než elektřina.**
- Řešení by měli navrhnout **odborníci v daném oboru** (ideálně ti, co již nejsou závislí na grantech), ne referendum ať už hlasováním široké „vědecké obce“ (třeba i o platnosti 2. zákona termodynamiky?) nebo dokonce pomocí AI, „vzdělané“ také pomocí většinového názoru.
- Autor by nerad použil epitaf „Já jsem vám to říkal“.

Thank you for your attention! Questions?

jan.macek@cvut.cz

Acknowledgement for support inside IMPERIUM and ADVICE projects of H2020 together with programs of The Technological Agency of the CR, NCK 2 and THETA, projects Josef Božek National Center of Competence, TN0200 0054, and Model Support of Clean and Sustainable Mobility in CR, TK 0401 0099.

The collaboration with colleagues from mentioned projects, especially Prof. Ing. Milan Pospíšil, CSc., Ing. Josef Morkus, CSc., Mgr. Vojtěch Máca, Ph.D. and ČAPPO, ing. Jan Mikulec, CSc. is highly appreciated, as well.

Moreover, colleagues from the think tank Realistická energetika a ekologie, especially Prof. Ing. Milan Apetaur, DrSc., Dr. Milan Smutný, Ing. Jan Vondráš and Ing. Jaroslav Čížek, <https://realisticka.cz>, helped significantly.