



**26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA  
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOĽAJOVÝCH  
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“  
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko**

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.2.01>

**PROBLEMATIKA AKUMULACE ENERGIE PRO VOZIDLA  
ISSUES OF ENERGY ACCUMULATION FOR VEHICLES**

**Jan MACEK, Josef MORKUS <sup>\*)</sup>**

**1 ÚVOD**

Při hledání možných postupů dekarbonizace energetiky i mobility - 0 - se jako možnosti jeví pro nosiče energie na vozidle akumulace elektrické energie z bezuhlíkových zdrojů (obnovitelných občasných zdrojů energie, OZE a jaderných elektráren) do akumulátorových baterií, do vodíku pro palivové články 0 i pro spalovací motory a právě pro ně také do syntetických paliv od kyslíkatých organických sloučenin (alkoholy, étery, estery atp.) až po „na míru“ syntetizované uhlovodíky o různém bodu varu i různé reaktivitě (oktanovém čísle). Tento článek se věnuje zhodnocení účinnosti zpracování energie nosiče na trakční práci, spojenému ovšem s nároky na výrobu a ztrátami při distribuci nosiče energie, ale i nároky na výrobu vozidla se systémem pro ukládání energie.

V antropogenních emisích skleníkových plynů hraje velkou roli oxid uhličitý ze spalovacích pochodů fosilních paliv (deriváty ropy, zemní plyn, uhlí), používaných v dopravě i energetice a ve zpracovatelském průmyslu. Vedle energie potřebné pro zpracovatelské procesy se uhlíkaté suroviny uplatňují – jako redukční činidlo – i v metalurgických pochodech. Kromě toho produkuje velká množství oxidu uhličitého chemický průmysl hnojiv a výbušnin, výroba a likvidace/recyklace plastů i průmysl stavebních hmot.

Zatímco se v energetice a do jisté míry i ve zpracovatelském průmyslu otevírají cesty možné náhrady nebo zachycování a zpětného využití uvolněných skleníkových plynů, hlavně oxidu uhličitého, představují zejména pozemní a létající dopravní prostředky problém nalezení nosiče energie s dostatečnou měrnou energií pro toto mobilní použití, neboť odpory proti pohybu závisejí především na hmotnosti dopravního prostředku včetně zásobníku nosiče energie. Je vhodné připomenout, že 3,6 MJ = 1 kWh, přičemž 1 kWh odpovídá téměř přesně energetickému obsahu 0,1 dm<sup>3</sup> motorové nafty B7 nebo 0,11 dm<sup>3</sup> automobilového benzínu E5. Při srovnávání hmotností zásobníků je ovšem nutno vzít v úvahu i rozdíly v účinnosti zpracování energie ze zásobníku, zejména pokud jde o paliva a baterie. Vyšší účinnost při zpracování elektrické energie, vyrobené ovšem s nízkou účinností předem, vede u osobních automobilů ke zlepšení srovnatelného množství energie v akumulátoru v poměru 1:2,5 – 1:3 pro osobní automobily, 1:2 pro nákladní automobily - 0.

Při hodnocení není možno přehlédnout ani emise skleníkových plynů působící materiálové nároky na výrobu zejména uhlíkatých nosičů energie z cirkulujícího uhlíku v atmosféře, ani emise z výroby materiálů a dílů na výrobu vozidel, ani další vedlejší účinky

<sup>\*)</sup> **Prof. Ing. Jan MACEK, DrSc.**, ČVUT v Praze, FS, U 12201, Technická 4, CZ 166 07 Praha 6, +420 224 352 504, jan.macek@fs.cvut.cz, projektový manažer Centra vozidel udržitelné mobility CVUM Fakulty strojní.

**Ing. Josef MORKUS, CSc.**, ČVUT v Praze, FS, U 12201, +420 224 352 498, josef.morkus@fs.cvut.cz, výzkumný pracovník

nových systémů dopravy, spojené také s budováním nové energetické infrastruktury. Celostní (holistický) systém posuzování se jeví jako nezbytný – 0.

V neposlední řadě je nutno vzít v úvahu i časový průběh změn systémů výroby energie i mobility samotné, který zahrnuje více než dobu pracovního aktivního života jedné generace. Např. doba výměny 50% vozidlového parku při obdélníkovém symetrickém rozložení četnosti vozidel a při průměrném stáří 15 let by trvala při jeho nerozšířené reprodukci právě 15 let. Pokud se proces ovlivní horší užitnou hodnotou nových vozidel, jako tomu je v případě těch bateriových (cena, dojezd, pohodlí, bezpečnost atd.), doba obměny celého parku, měřená dosažením stejných přepravních výkonů, trvá pak násobně déle - 0. Ve stejném směru působí realističtější rozložení četnosti stáří vozidel. Příklad Německa ukazuje více než po 15 letech „Energiewende“ nedobré důsledky podcenění základních fyzikálních zákonitostí a malé faktické zákaznické reakce, a to přes enormní dotační podporu. Musíme přitom hodnotit faktické výsledky ve spotřebě různých druhů energií nebo v emisích z mobility, ne tedy počtem prodaných vozidel nebo instalovaného výkonu nových energetických zdrojů, což je pro úspěch procesu rozhodující.

Začneme proto definicemi základních pojmů a budeme je aplikovat na zjednodušené prediktivní modely budoucích vozidel i jejich očekávaných dopadů na energetickou infrastrukturu. Neuvážené prosazování jednoho řešení může působit velké potíže, projevující se nakonec v ekonomicko-sociální a tím i politické rovině.

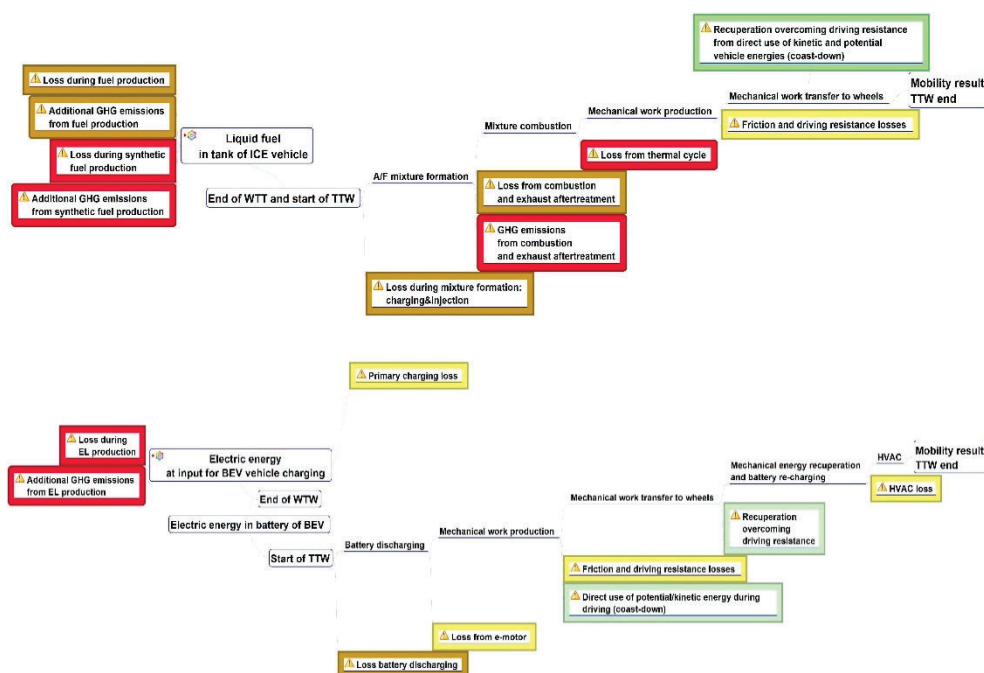
## 2 ZÁKLADNÍ DEFINICE

Ztráty v řetězci přeměny energie od primárního zdroje do využití přepravovaného nosiče energie je nutné pro jejich srovnatelnost normovat. Obvykle se jako vztažný parametr používá vstupní energie nosiče (palivo, elektrický náboj) v zásobníku, uvolnitelná při následných procesech, zahrnujících vždy výměny elektronů, tedy redukci a oxidaci zúčastněných látek. Např. při výrobě vodíku lze pro jednoduchost vyjít ze stejného základu a postupovat zpět k energii potřebné pro výrobu, např. na svorkách elektrolyzéro. Normující úroveň by měla být dána změnou volné entalpie mezi výchozím stavem, tedy volnou entalpií nosiče energie a oxidačního činidla, a volnou entalpií vzniklých produktů, které tvoří v případě chemických reakcí směs s příslušnou směšovací entropií, avšak pro obtíže s její jednoduchou aplikací se pro následné energetické výpočty využívá rozdíl prosté entalpie mezi palivem, oxidačním činidlem a produkty spalování. Lze použít jak spalné teplo, tak výhřevnost, neboť jde jen o smluvní referenční veličinu pro termodynamickou otevřenou soustavu. **V tomto článku používáme zásadně výhřevnost měřenou při 25 °C a korigovanou na výparné teplo vzniklé vody jako vztažný parametr pro paliva.**

Pro elektrochemické systémy s částečně vratnými změnami v akumulátorech elektrické energie je zapotřebí definovat, zda je výchozím stavem spotřebovaná elektrická energie na svorkách nabíječky, akumulátoru nebo dokonce jen energie potenciálně využitelná z náboje baterie, kterou často hlásí palubní systém sledování stavu nabití baterie (SoC) – **obr. 1**. Na rozdíl od vstupní výhřevnosti chemického paliva, která je prakticky stejná na vstupu do nádrže výdejního stojanu paliva jako na vstupu do motoru, vznikají u baterií nezanedbatelné ztráty, závislé navíc na rychlosti nabíjení a změnách SoC během něho. Tento faktor se při posuzování bateriových vozidel ne vždy bere správně v úvahu, ač se pohybuje mezi 5 až do extrémních 50 % při rychlonabíjení již skoro nabitě baterie!

Do ztrát při využití od „nádrže“ do místa spotřeby (trakční práce na kolech nebo do sítě dodávaná elektrická energie) je nutno započítat ztráty při plnění „nádrže“ („nabíjení“), ztráty i zisky rekuperace při vlastním využití v rozmezí od „nádrže“ na kola nebo zpět (Tank-to-wheel, TTW), eventuálně i přímou spotřebu akumulované energie na vyhřívání nebo klimatizaci (HVAC) prostoru vozidla. Naopak při výrobě nosiče energie je nutné započítat nejen vlastní příkon výrobního a akumulacího zařízení, ale i ztráty transportu primární energie na výrobu a ztráty při distribuci vyrobeného nosiče energie, tj. např. stlačení,

zkapalnění, doprava potrubím nebo rozvodnou elektrickou sítí včetně transformace napětí a energetické nároky i emise přídatných opatření na stabilizaci dodávky v síti (Well-to-Tank, WTT) – **obr. 1** a 0, 0 a 0.



**Obr. 1** Srovnání řetězce zpracování chemického paliva na vstupu do nádrže a elektrické energie na vstupu do nabíječky.

**Fig. 1** Comparison of chains for transformation of chemical energy in a fuel and electric charge of a battery from the inlet to storage system.

Samotný zásobník chemického nosiče energie je při plnění a odběru i v době jeho klidu prakticky bezztrátový, na rozdíl od bateriových akumulátorů se ztrátami při nabíjení, vybíjení i během samovybíjení. Při potřebě mechanické nebo elektrické energie na úpravu nosiče energie pro skladování (např. na pohon stlačovacího kompresoru plyných paliv) je ovšem nutno vzít v úvahu i účinnost pro získání této energie.

Vedle provozní spotřeby různých nosičů energie s různou měrou emise skleníkových plynů je však nutno rozpočítat na střední životnost vozidla dle 0 nebo 0 i energetické nároky a emise při výrobě samotného úložiště energie. Kromě toho vznikají v závislosti na zvoleném typu zásobníku přídatné účinky na transformaci energie do trakční práce, která je samozřejmě ovlivněna i hmotností vozidla se zásobníkem. Typ zásobníku tedy ovlivňuje i parametry TTW - 0.

Stejně by měl realitě odpovídající údaj WTT zahrnout i energii potřebnou pro výrobu elektrárny samotné, rozpočtenou na její životnost a na její podíl v době životnosti vozidla. **Ve skutečnosti vede tato analýza dříve či později k ekonomickým parametrům, neboť se musí vzít v úvahu i spotřeba materiálů, často vzácných, a ovšem i podmínky financování výroby i investic (úrokové sazby, vliv inflace, ceny podle poptávky na trhu, dotační a fiskální politika atp.). Tyto úvahy jdou však mimo rámec předložené studie. Omezíme se na WTT+TTW=WTW a na životní cyklus samotného vozidla.**

### 3 VLIV ZPŮSOBU AKUMULACE NA KONSTRUKCI A PROVOZNÍ PARAMETRY VOZIDLA OD VSTUPU PRO PLNĚNÍ ZÁSObNÍKU NA KOLA – TTW

Jaké jsou tedy současné možnosti variant ke klasickým dopravním prostředkům po jednotlivých kategoriích UN? Objektivní soupis možností musí být technologicky neutrální. Nebereme tedy v úvahu nekvalifikovaná politická rozhodnutí, typická, bohužel, pro současnou Evropu. Při jeho sestavování se dojde rychle k závěru, že některá řešení budoucích vozidel jsou kriticky závislá na investicích do infrastruktury, takže po posouzení vozidel je nutné zvážit realizovatelnost této související oblasti, tedy postupovat holisticky.

Současně je nutno analyzovat energetický a emisní dopad všech změn mobility v čase. Změny se budou realizovat desítky let, jak již bylo uvedeno, během nichž se mohou podstatně měnit i další okrajové podmínky - 0. Těmto souvislostem se budeme věnovat sice až stručně v dalších kapitolách, ale již při soupisu řešení je vhodné uvědomovat si je pro pozdější analýzu. V osobní dopravě je zřejmě možné zvážit následující potenciální řešení:

- ❑ Home-office (nerealizovaná doprava) je samozřejmě energeticky nejméně náročná, ale nemůže zajistit všechny potřebné aktivity.
- ❑ Elektrokola a elektroskútry kategorie UN L1 až L5 se stávají doplňkem nebo náhradou k malým motocyklům a skútrům.
- ❑ Elektromobily pro individuální dopravu na úrovni L6 a 7 a hlavně M1 (osobní automobily), tedy BEV, by měly soutěžit s nabíjecími hybridy PHEV i hybridy HEV s primárním zdrojem ve spalovacím motoru, používajícími různá paliva, v budoucnosti i s vodíkovými palivovými články PEMFC. Potřeba změn infrastruktury je známá, ale posouzení její náročnosti pro nerovnoměrný odběr nabíjecího výkonu se často přehlíží.
- ❑ Samotné spalovací motory ICE se přitom dále uplatní – určitě mimo Evropu a snad i na jejím území – v M1 jako hnací jednotky vedle hybridů i samostatně, s vodíkem - 0 i se syntetickými palivy (e-fuels) 0. V posledním případě není nutná změna infrastruktury a dostupná paliva lze použít prakticky v celém vozidlovém parku.
- ❑ Autobusy M2 a M3 budou řešeny se spalovacími motory na vodík, biometan nebo na syntetická paliva, v MHD mají velký potenciál dále elektrobuses nebo polozávislá trakce trolejbusů / elektrobuses (tzv. parciální trolejbusy).
- ❑ Elektrifikovaná hromadná kolejová doprava ve městech a jejich okolí i rychlostní do vzdálenosti cca 1 000 km je samozřejmostí, na vedlejších tratích budou soutěžit bateriová, palivočlánková i spalovacími motory poháněná vozidla.
- ❑ Nadějná, i když méně pohodlná a organizačně náročnější je kombinovaná přeprava založená na střídání dopravních prostředků, vyžadující ovšem plánování u zákazníka a přesné dodržování jízdních řádů u přepravce.
- ❑ Zatím ve zkušební verzi je sdílení vozidel, vyžadující pro energetickou efektivnost obsazení vozidla více cestujícími a jeho automatický návrat do místa poptávky (Mobility as a Service, Delivery as ... MaaS nebo DaaS).

V nákladní dopravě se pak nabízejí možnosti

- ❑ „Last-mile“ dodávky (N1, případně lehké verze N2) – velmi zajímavé z hlediska elektromobility vedle klasických řešení. Energeticky i organizačně je to proveditelné v městské dodávkové službě na rozdíl od fantazií s drony!
- ❑ Lokální komunální, stavební a důlní doprava je takto řešitelná i pro větší vozidla, u zemědělské dopravy není vyloučení ICE úplně jednoznačné.
- ❑ Dálková silniční doprava je na druhé straně stále doménou ICE, nepříliš vhodné je použití baterií, v budoucnu se může uplatnit i vodík v PEM FC.
- ❑ U BEV se mluví o průběžném bezkontaktním nabíjení pro dálkovou dopravu. Je to však velmi problematické cenově a údržbově (indukční smyčky těsně pod povrchem silnice!), nebezpečné (silná elektromagnetická pole) a přenos energie je

zatížen veľkými ztrátami. Také elektrifikace dálnic s trolejí představuje velmi drahé řešení, navíc vyžadující speciální jízdní pruh pro kamiony. Elektrické tahače by musely mít navíc dostatečnou kapacitou baterií pro dojezd mimo dálnici.

- Kombinovaná přeprava je zajímavá i mimo dnes používané oblasti, pokud by byl systém centrálně organizovaný pro zaručený termín dodání. V úvahu je však nutno vzít přídatnou přepravovanou hmotnost kontejnerů nebo návěsů. Zatím se naráží na nedostatečnou kapacitu železnic.

Pro rozhodnutí o volbě nejvhodnějších vozidel je nutno jednotlivá řešení hodnotit kvantitativně. K tomu vznikl program ČVUT-CVUM pro modelování základních vlastností vozidel – 0. Byl vyvinut pro vyhodnocení parametrů současných vozidel podle souhrnných údajů z veřejných statistik a meziročně interpolovaných podrobných údajů ze Stanic technické kontroly (STK) pro jednotlivé dílčí kategorie vozidel (např. pro osobní vozidla třídy mini-small-lower medium-medium-upper medium-SUV-luxury and sport class). Výsledky byly validovány srovnáním se spotřebou jednotlivých druhů energie (fosilních paliv, plynů i elektřiny) v různých sektorech dopravy. Souhlas je dobrý, i když z části vyžaduje doplnění o odhady. Jde o spotřeby v ČR neregistrovaných vozidel (tranzit přes území ČR) i např. o spotřeby motorové nafty v zemědělství, lesnictví a stavebnictví i v důlní činnosti. Na vyhodnocení s využitím rozsáhlé interní databáze různých pohonů včetně elektrických a palivočlánkových založené na vlastních měřeních i optimalizovaných simulacích - 0, 0, 0, navazuje pak předpověď spotřeby energie a skleníkových emisí pro příští období dle různých scénářů obnovy vozidlového parku pro osobní automobily M1 (kategorie dle UN), autobusy M2 a M3 se zmíněnými podkategoriemi, nákladní vozidla různých hmotnostních kategorií (lehká vozidla N1-I až III, těžká N2 a N3 podle celkové hmotnosti s krokem kolem 5 t), motocyklů a lehkých vozidel kategorie L i kolejových prostředků MHD a železničních.

Spojení databáze charakteristik účinností (resp. poměrných ztrát v motorech a v zásobnících energie, reprezentovaných pomocí nelineární regrese), ročních nájezdů vozidel a metodikou COPERT odhadnutých (a v případě zřejmých chyb korigovaných) spotřeb energie na ujetou dráhu lze řešením silně nelineární rovnice pro spotřebu paliva najít pro účely extrapolace na budoucí vozidla s odlišnými hnacími jednotkami energeticky charakteristickou rychlost

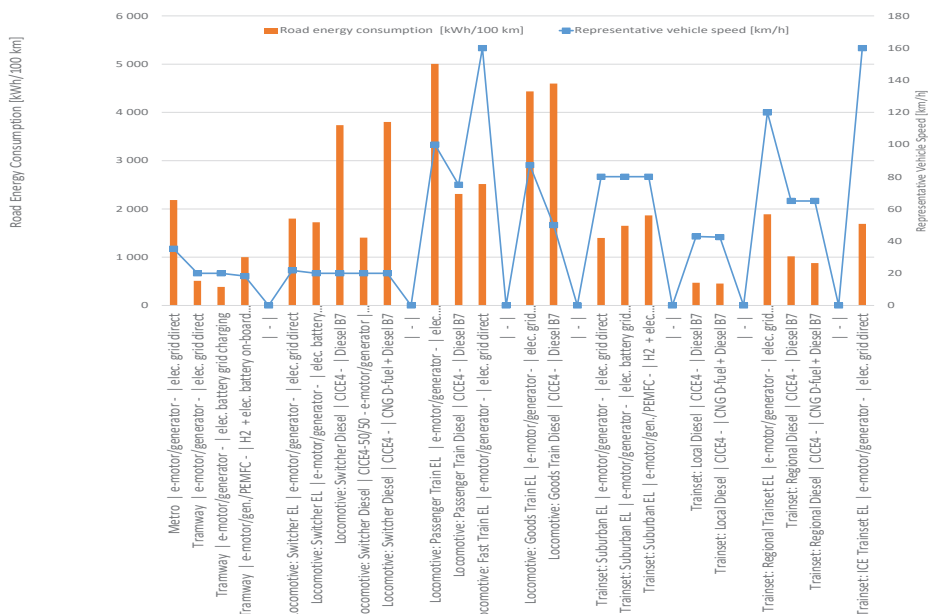
$$E_{road} = \frac{F_{av}(w_{av})}{36\eta_{trans}}(1 + L(w_{av})) \quad (1)$$

Trakční odporová síla závisí na hmotnosti vozidla a nákladu, přičemž se v úvahu bere i změna hmotnosti při přechodu k jinému pohonu a úložišti nosiče energie, a to podle požadovaného dojezdu. Zejména u akumulátorové baterie jde o celkovou hmotnost nejen samotných nízkonapěťových akumulátorových článků (dnes Li-ion), ale o proudové sběrnice, zařízení pro vnitřní chlazení s diagnostickými a odpojovacími prostředky a o obal článků, splňující požadavky na udržení provozní i nabíjecí teploty 5°C-55°C a na pasivní bezpečnost baterie při haváriích vozidel. Seznam označení je uveden v závěru článku.

Rekuperace mechanické energie vozidla závisí na „odporech“ setrvačnosti a stoupání a může být využita velmi účinně přímo (výběh – obr. 1) nebo s účinností obvykle menší než 50% uložena v zásobníku, případně vedena s poněkud vyšší účinností do sítě. Tyto složky jízdního „odporu“ lze zjednodušeně v trakční síle  $F_{av}$  zahrnout do jednoho členu s ekvivalentním zrychlením nebo fiktivním stoupáním. Jsou rozdílné podle typu provozu vozidla (např. osobní vlak – rychlík). Bez jejich respektování by reprezentativní rychlosti vycházely nereálně vysoké a nebylo by možné predikovat dodatečný účinek rekuperací do baterie nebo do sítě.

Je zřejmé, že nedostatky statistických údajů vedou k nutnosti iteračního výpočtu a konfrontaci zjištěných skutečností s dalšími dílčími údaji, jako jsou např. pro MHD autobusy průměrné spotřeby paliva a podle ujeté dráhy a času provozu dosahované průměrné

rychlosti podle interních údajů městských dopravních podniků. Systém je neustále vylepšován. Odhad nejistot jednotlivých dílčích kroků vedl k celkovému odhadu nejistoty predikce kolem 10% pro již hromadně používané, 15% pro nové hnací jednotky vozidel.



**Obr. 2** Dráhové spotřeby energie TTW v kWh/100 km a energeticky reprezentivní rychlost pro vybraná kolejová vozidla.

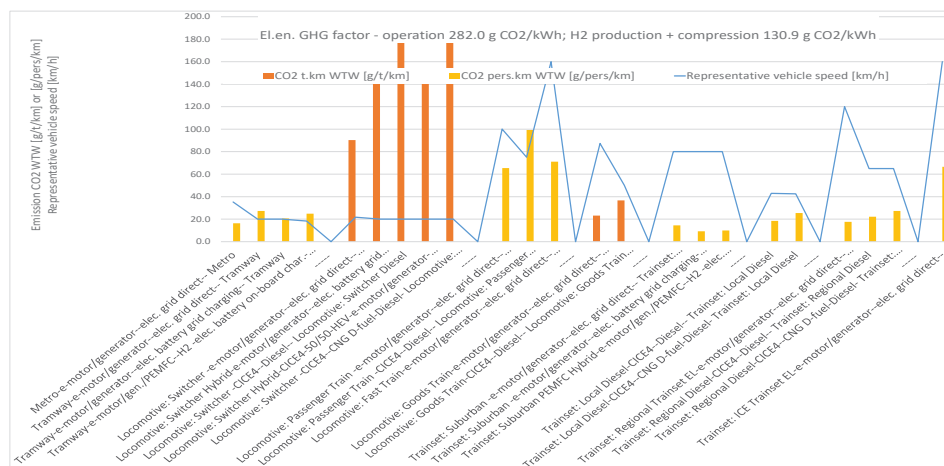
**Fig. 2** Road energy consumptions TTW in kWh/100 km and energy-averaged representative speed for the selected categories of rail vehicles

Nejistota rozhraní WTT a TTW přístupů s ohledem na nabíjení baterie je v tomto článku řešena přiřazením ztrát v nabíječce a baterii do TTW, na rozdíl od nabíjení baterie (**Obr. 1**). Příklady porovnání energetických (**Obr. 2**) a emisních (**Obr. 3**) dopadů u různých nosičů energie ukazuje pro vybrané příklady kolejových vozidel pro uvedené emisní faktory výroby elektřiny. V emisním faktoru pro fosilní paliva WTW jsou již započteny náklady na těžbu a zpracování paliva. Zde jsou v programu použity údaje WTW – včetně výroby paliva – dle evropského nařízení RED II - 0)). Z nich je podle zde neuvedených výsledků u osobních automobilů – viz např. 0 nebo 0 – patrná výhodnost biopaliv, u vodíku a elektrických vozidel záleží při WTW přístupu na energetickém mixu dané země.

Při komplexním posuzování důsledků zavádění nových hnacích jednotek je nutno brát v úvahu i zdánlivě méně podstatné provozní parametry, které u nových pohonů nejsou ještě dostatečně podchyceny zkušeností z jejich hromadného nasazení a budou se projevat i ve zdánlivě odlehklých oblastech, jako např. v pojistném. Jde o zajištění provozní bezpečnosti pasivní i integrované (požární bezpečnost baterií a jejich on-board diagnostika), životnosti (způsob nabíjení baterií, vliv hmotnosti vozidla na jeho součásti, vliv čistoty paliva a vzduchu na chemicky aktivní části FC) i spolehlivosti.

Poznamenejme s ohledem na rozsah příspěvku pouze, že u tramvají se síťovým napájením nebyla uvažována rekuperace do sítě, která však zlepšila u bateriových hybridních tramvajových vozidel v městském provozu a nízkých jízdních odporech měrné emise o cca 30 %.





**Obr. 3** M ern e emisie sklen kov ych plynů WTW na p repravni v ykon v g/os/km nebo g/t/km pro koľajov a vozidla dle obr. 2.

**Fig. 3** Specific greenhouse-gas emissions WTW, normalized by transport outputs in g/pers/km or g/t/km, for rail vehicles according to fig. 2.

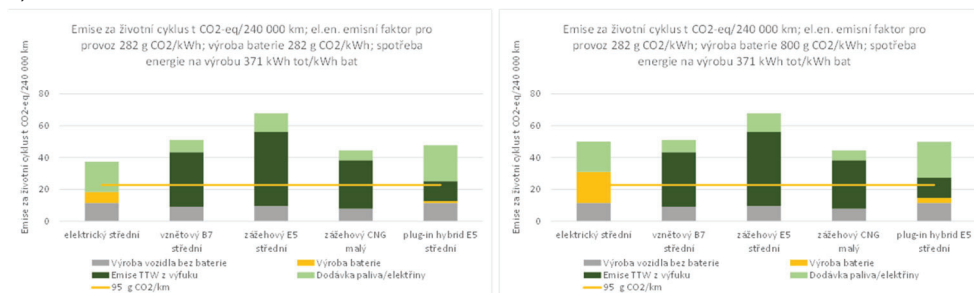
#### 4 V YROBA PALIVA A PARAMETRY WTT

Predpoklad a-li se občasny či obnoviteln y zdroj elektrickej energie (OZE) na vstupe s predpokladem, že u energie „zdarma“ není třeba brát v úvahu  uinnosť zpracování primárního zdroje, vycházejí z takového srovnání s fosilními nebo jadernými zdroji neobjektivn   isla. Obvykle se takto postupuje u výtěru a slune n ho z ren , až u vodn ch elektráren se (pom rn  vysok )  uinnosť vždy vyhodnocuje. Pokud se do výpočtu zahrne jednostrann  pom rn  n zk   uinnosť tepelných elektráren, ať uhelných ( uinnosťi mezi 35-45 % z výhřevnosti uhlí nebo topného oleje), jaderných (kolem 30% na vstupní tepeln  tok z reaktoru) nebo paroplynových (50-60% pokud pracuje jak spalov c , tak parn  turbina, ale jen kolem 35% v přechodových stavech typických pro po  atek náběhu v z alo n m režimu), je z ejmn , že takov  srovnání není  ueln .  uinnosťi FVE a VTE vzta en  na zpracov van  p fkon jsou mal . Ve skutečnosti by mělo porovnání vycházet z pořizovacích, odpisových a provozních nákladů, čemuž se provozovatel  dotovaných OZE raději vyhýbají i z důvodu malého časového vyu it  plného instalovaného v ykonu, jak uvedeno dále.

Jako p fklad výpočtu emisí WTW při optimistick m o ek van m emisním faktoru výroby elektřiny v Evropě kolem r. 2030 jsou uvedeny na **obr. 3** m ern  emisie vybraných koľajových vozidel s různými pohony. Je z ejmn , že velmi hromadn  módy dopravy (např. metro) jsou velmi v hodn , zatímco motorov  vlaky na regionálních tratích dorb  nevycházejí. Ani PEMFC není zvl st  v hodn  ve srovnání s hybridním bateriov  trolejov m vozidlem u p edm stsk  dopravy. I když v obrázku není výsledek pro region ln  dopravu, budou vz ajemn  porovnan  hodnoty podobn .

Zde je v sak nutno p ridat do analýzy také nároky na výrobu p fslu n ho zdroje prim rn  energie, kter  do zna n  míry ukáže, jak  je re ln  situace s ohledem na investicn  náklady (Life Cycle Analysis, LCA), velick  zejména u zpracování m lo intenzivních a  asov  proměnlivých energetických toků u výtěru a slune n ho z ren . Faktor ročního časového vyu it  fotovoltaiky v  R je kolem 12 % (tedy instalovat je nutno zhruba osmin sobn   p ikov  v ykon panelů), u výtěru asi 20 %. Samozřejmn  je nutné posuzovat nakonec náklady, ty se v sak v důsledku prom nliv  inflace,  urokov ch sazeb a v neposlední řadě v důsledku veřejných dotací nedaj  snadno porovnat mezi různými zeměmi a obdobími.

Pokud použijeme jen jakkoli vyrobenou elektrickou energii jako vstup do systému výroby a distribuce paliva, je pak možné srovnávat nosiče energie, vyrobené s její pomocí, a to s celými distribučními náklady až po naplněný zásobník. Spotřeba WTT se vstupem této elektrické energie až po získání trakční práce na kolech je samozřejmě nejlepší u přímého využití a akumulace elektřiny (nutno správně započíst ztráty při nabíjení, které leží mezi WTT a TTW), horší u vodíku a zejména veliká u syntetických uhlovodíků (zhruba v poměru účinnosti využití primární elektrické energie od baterií po syntetická paliva 70 %:30 %:1 5% - 0).



**Obr. 4** Emise skleníkových plynů za životnost vozidel s očekávaným evropským emisním faktorem elektřiny v r. 2030 (vlevo) a s výrobou baterie v Číně (vpravo).

**Fig. 4** Green-house gas emissions for the life cycle of vehicles, produced in Europe during 2030 (left) and the same with batteries from China (right).

U bateriových vozidel je však velmi náročné budování infrastruktury, od navýšení potřebné výroby v elektrárnách, které ovšem vyžadují všechny na elektřině závislé nosiče energie, až po nabíjecí stanice. Vcelku jednoduchý výpočet ukazuje, že pro rovnoměrně v čase rozložené nabíjení by bylo pro všechna dosud neelektrická osobní a dodávková vozidla v ČR zapotřebí 2.5 – 3 GW instalovaného stálého výkonu (1.25-1.5krát více než výkon jaderné elektrárny Temelín). Při nerovnoměrném rozložení nabíjení během dne, týdne a ročního období, zejména při případném využití baterií vozidel po zapojení na nabíječku jakožto dočasného stabilizátoru sítě, se však špičkově využitý čas nabíjení pro trakci proti celoročně průměrovaným hodnotám zkracuje na polovinu i méně (výhradně noční nabíjení poskytuje samo o sobě jen asi třetinový čas). Pak potřebný okamžitý výkon stoupá na dvojnásobek až trojnásobek.

Vodík a syntetická paliva se dají vyrábět v místě výroby elektřiny z OZE nebo jaderné energie, tedy beze ztrát v síti a ztrát při nabíjení baterií a hlavně bez neschůdných nákladů na pořízení velkých stacionárních baterií. I při nerealistickém optimistickém odhadu ceny 100 \$/kWh kapacity baterie by např. baterie pro zálohování pouhé hodinové průměrné spotřeby v síti ČR stála kolem 700 000 000 \$, ve skutečnosti několikanásobek. Syntetická paliva naproti tomu nepotřebují žádnou novou infrastrukturu a jsou použitelná pro všechna existující vozidla ve vozidlovém parku, což činí jejich použití při dekarbonizaci dopravy velmi zajímavým. Ani účinnost akumulace vyráběné elektrické energie ve vodíku totiž není vysoká, závisí na účinnosti elektrolýzy a nutno do ní zahrnout energetické nároky ukládání vodíku. K tomu přistupují náklady na novou infrastrukturu. Zde by byly nároky na přídavnou elektrickou energii ještě větší než u baterií. Pro náhradu motorové nafty v ČR vodíkovými pohony vozidel by byla zapotřebí roční výroba elektrické energie vyšší, než je současná spotřeba české sítě.

Z uvedených důvodů není možno na současném stupni poznání zavrhnout ani syntetická paliva, účinnostně vůči vstupní elektřině sice nejhorší, ale infrastrukturně naprosto nenáročná. Navíc se dají nasadit okamžitě, do všech existujících vozidel, a vyrábět v místech příznivých pro OZE – na rozdíl od Evropy.



## 5 OBJEKTIVN I HODNOCEN I POMOC I ANALÝZY ŽIVOTNÍHO CYKLU

Zat imco u standardních rešení s klasickými nosiči energie, pr ipadn  u vozidel na stla en  plyn, jsou celkov  externality výroby vozidel zn m , je zapotřebí zevrubn  posuzovat rešení nov . Vcelku energeticky i emisní m lo n ro n  výroba palivového článku samotného nep in   pr idavn e problémy (pokud nemluvíme o ceně, vycházející z nutnosti pou it drahou platinu v množství r adov e v   m n e je b e n  u katalyzátorů na v fukov e plyny), jsou hybridní a bateriov  vozidla zat i ena výrobou materi lov e n ro n e baterie. Hybridy s její malou velikostí nepredstavujú velk  navýšení vedle  ch  c nk , ale  ist e bateriov  vozidla s po adovan m větším dojezdem j  analýzu vyžadují. Jak bylo j  výše uvedeno, je nutno brát v úvahu celou baterii, nejen samotn  články.

Velmi podrobn e zd vodn n  rozbor publikovala nedávno nevl dn  organizace GreenNCAP - 0, a to na základě literárních pramen  i vlastních m ren  jednotlivých vozidel. Autoři tohoto pr isp vku proto měli možnost srovnat tyto výsledky s vlastními výpočty – 0 a 0. Souhlas se ukázal pr itom jako vyhovující. Navíc tato metodika umožňuje odd lit od sebe vliv emisních faktorů na výrobu a provoz vozidla a výrobu baterie samotn , kter  se ve v t  in  pr ipad  provádí s ohledem na environment ln e tolerantn  predpisy i n zk  ceny v   n . Důsledky tohoto pr stupu ukazuje **obr. 4**. Ani za 7 let nebude celkov  pr inos BEV s  n sk mi bateriemi lepší n e u srovnatelného vozidla stredn  t r dy na fosilní motorov u naftu. Za současného emisního faktoru, vztaženého na spotrebu v síti (pro Evropu pr em rn e asi 340g CO<sub>2</sub>/kWh el) je samozrejme automobil na fosilní palivo (zejména na motorov u naftu) daleko m n e  kodliv  klimatu n e BEV.

U koľajových vozidel není na závadu hmotnost bater , ale jejich cena a emise skleníkových plynů pr  jejich výrobě.

## 6  ASOV  ROZLO EN  PŘECHODU NA NOV  ZPŮSOBY MOBILITY

Během výměny vozidel za Evropu prosazovan  BEV se budou zlepšovat emisní faktory výroby elektrick  energie jak v  R, tak v celé EU. Simulace výměny vozového parku EU s cilov m stavem asi 280 000 000 ks BEV do r. 2070 ukazuje následující výsledky. Pr  posunut  zákazu prodeje nových vozidel se spalovacími motory z moment ln  v Evropsk m parlamentu schváleného roku 2035 na rok 2045 by se v EU ka doro n  v letech 2045 až 2063 vyrobilo za předpokladu p irozen  výměny vozidel o 34 miliony vozidel se spalovacími motory za každý rok navíc, ale stejn  množství BEV by se nevyrobilo - 0.

Provedeme-li podrobn   výpočet po létech s různými předpokládanými sc n ri náhrady existujících vozidel, zjistíme překvapující fakta. Předpokládáme-li, že po roce 2035 bude emisní faktor z výroby elektrick  energie v EU cca 100 g CO<sub>2</sub>eq/kWh – dnes je kolem 340 g CO<sub>2</sub>eq/kWh, pak pr  výrobě v ch vozidel v zemích EU by se p esunut m termínu zákazu z roku 2035 na rok 2045 v kritických přechodových roc ch 2045 a  2063 sn i ly emise v EU a ve světě o 17,2 milionů t CO<sub>2</sub>eq/rok. Pokud by v  ak výroba v ch vozidel probíhala v   n  s p edpokl dan m emisním faktorem 564 g CO<sub>2</sub>eq/kWh, sn i ly by se sv tov e ro n  emise p esunut m termínu zákazu z roku 2035 na rok 2045 v kritických přechodových roc ch 2045 a  2063 dokonce o 224,6 milionu t CO<sub>2</sub>eq/rok. Je zrejme, že pro hodnocení skutečných dopadů je zapotřebí zvažovat také tyto sc n re přechodu v čase, nikoli jen mechanicky s tat  isla. Obdobn e je  adouc  postupovat u koľajov  dopravy.

## 7 ZÁVĚR

Podrobn  analýzy prínosu emisí BEV pro nejbli  ch 30-40 let neukazují jejich velk  výhody pr   pln  náhradě v ch vozidel kategorií M1 a N1, jak nyní zam y l  EU. V oblasti koľajových vozidel nejsou jejich technick  nevýhody rozhodující, av  ak pr inos pro sn i en  emisí skleníkových plynů je zanedbateln . Nutno poznamenat, že další rozvinut  ekonomiky, jako USA a Japonsko, jsou v tomto směru daleko opatrn   a na rozdíl od WTW

metodiky posouzení emisí používají LCA a z ní plynoucí závěry. Kromě toho je praktický dopad omezení emisí v Evropě na svět nevýznamný s ohledem na její klesající podíl (asi 8% z celkových emisí). Přitom je však zřejmé, že elektrifikace některých sektorů dopravy je velmi přínosná, pokud se využijí zřejmé silné stránky elektromobilů, vynikající při přepravě osob i nákladů na malé vzdálenosti, tedy v hustě zalidněných oblastech.

Podrobné energetické a emisní bilance, založené na extrapolaci současných charakteristických parametrů, umožňují hodnotit výhody i problémy nových řešení. Zlepšené emise skleníkových plynů a spotřeby energie TTW ještě neznamenaají výhodu, i když v EU existují stále snahy tuto stránku hodnocení přeceňovat. Jedinou, byť složitou cestou je posouzení celého životního cyklu vozidel spolu s udržitelností potřebné infrastruktury a rozbor tím vzniklých závislostí, které vyvolává momentální cílené vytlačování „špinavého“ průmyslu za hranice EU spolu s iluzí o volném nákupu strategických materiálů ze zemí, které se stávají fakticky konkurenty zdrojů zatímního ekonomického úspěchu EU.

Výhodou použití chemického nosiče energie pro vozidla (e-paliva nebo vodík) může být akumulace elektrické energie z občasných zdrojů. Vodík představuje levnější alternativu ve srovnání s akumulátorovými bateriemi, a to zejména pro případy zvládnutých spalovacích procesů v hořácích nebo spalovacích motorech. Čerpání vodíku do vozidel umožňuje rychlé obnovení zásoby energie v protikladu proti bateriím, které i po (dosud teoreticky) možném navýšení nabíjecího výkonu budou představovat těžko zvládnutelné výkonové špičky pro lokální síť. Naproti tomu jsou účinnostně nejméně výhodná syntetická paliva naprosto nenáročná na budování infrastruktury a umožňují okamžité nasazení do existujících vozidel i snadný transport energie z jižněji položených zemí, kde je podstatně větší využitelnost fotovoltaiky.

Nutnost technologické neutrality nařízení a směrnic, umožňující racionální využití elektromobility je bohužel často respektována spíše slovy. Z hlediska zákazníka rozhoduje o užité hodnotě svoboda dojezdu, pohotovost k jízdě, bezpečnost i komfort obsluhy a samozřejmě cena. Z hlediska daňového poplatníka, přispívajícího na dotační a fiskální opatření, jde o viditelnost výsledků těchto dodatečných nákladů. Investoři se rozhodují podle doby návratnosti, kterou samozřejmě masivní dotace zvyhodňují při zanedbatelném riziku v případě neúspěchu, což však přináší reálné nebezpečí lobbingu ve prospěch takových řešení. Necitlivé zavádění elektromobility za každou cenu omezí konkurenceschopnost (nejen) evropské ekonomiky a může vést k vážným sociálním otřesům.

Posouzení dopadů z různých hledisek by mělo tedy předcházet jednostranným rozhodnutím. Tento příspěvek načrtl pouze část holistického přístupu, nemohl se zabývat např. zhodnocením problematických občasných zdrojů energie, jejichž role se často přeceňuje na základě průměrných hodnot roční výroby energie, aniž se bere v úvahu nutnost jejich adekvátního zálohování pro zimní období. Zálohy se často podporují státními investicemi pro síťové služby, neboť jejich zajištění je pro investory málo efektivní.

Na překážku postupnému zavádění environmentálně příznivých nosičů energie je fundamentalistický přístup současné politické reprezentace EU, prosazující extrémní „total zero“ řešení, navíc založená na rozhodnutích politiků, orientujících se přednostně podle průzkumů veřejného mínění a možná i ovlivněná lobováním potenciálních příjemců dotací.

Cestou k nápravě je technologická neutralita politických rozhodnutí, hledání nejvýhodnějšího kompromisu a podpora méně vyvinutých řešení nanejvýš na úrovni výzkumu a porovnávání výsledků pilotních projektů. Sliby sice nikoho nezarmoutí, ale nesprávná rozhodnutí mohou mít nenapravitelné ekonomicko-sociální dopady, které by po prozření veřejnosti mohly ohrozit i podstatu současného demokratického systému.

**Paralelní vývoj různých cest směřujících k obnovitelnosti, umožňující evoluci a srovnání všech dopadů, je nanejvýš namístě. Ideologizovaný přístup „jednoho jedině správného řešení“ je při současných neznalostech všech dopadů velmi riskantní a technicky nesmyslný.**

**Zkratky a symboly**

B7	standardní motorová nafta se 7% metylesteru mastných kyselin	PC	osobní automobil
B100	bionafta (100% metylesterů mastných kyselin)	PEMFC	vodíkový nízkoteplotní palivový článěk
BEV	bateriové elektrické vozidlo	PHEV	dobíjecí hybridní vozidlo (BEV+ICE)
CBG	stlačený biometan	RHEV	hybridní vozidlo s prodlužovačem dojezdu (BEV+téměř nepoužívaný ICE)
CNG	stlačený zemní plyn	TTW	spotřeba energie nebo emise vztažené na procesy mezi zásobníkem energie a koly vozidla
$E_{road}$	spotřeba energie v kWh/100 km	UN	Organizace spojených národů
E5	standardní benzin s 5% bioetanolu	VTE	větrná elektrárna
E85	bioetanol s 15% benzinových uhlovodíků	WTT	spotřeba energie nebo emise vztažené na procesy mezi zdrojem primární energie a zdrojem pro zásobník energie
$F_{av}$	síla jízdního odporu pro reprezentativní rychlost v N	WTW	spotřeba energie nebo emise vztažené na procesy mezi primárním zdrojem energie a koly vozidla
FVE	fotovoltaická elektrárna	$W_{av}$	energeticky reprezentativní rychlost vozidla v km/h
HD	střední nebo těžké nákladní vozidlo (N2 nebo N3)	$\eta_{trans}$	účinnost převodu
HEV	hybridní vozidlo		
ICE	spalovací motor		
L	poměrná ztráta v motoru vztažená na užitečný výkon [1]		
LCA	analýza životního cyklu výrobku		
LD	lehké nákladní vozidlo (N1)		
OZE	obnovitelný (občasný) zdroj energie		

**Poděkování**

Příspěvek by nevznikl bez podpory projektových prostředků z TA ČR projektů MOSUMO TK 0401 0099 a BOVENAC TN0200 0054, za což autoři děkují. Autoři dále děkují za významnou spolupráci Prof. Ing. Milanu Apetaurovi, DrSc., Doc. Ing. Josefu Kolářovi, CSc. a Prof. Ing. Milanu Pospíšilovi, CSc. (VŠCHT).

**Literatura**

[1] Green Deal for Europe, COM(2019) 640 final, EC 2021. [2] „Fit for 55“, CELEX 52021DC0550 EN TXT, 2021. [3] Doleček V., Macek J.: Simulation Modelling of Hydrogen Fuel Cell. In: LIII. International scientific conference, STU Bratislava, FSj, ISBN 978-80-227-5215-2, pp. [4] Macek, J., Morkus, J., Kolář, J. Model Of Surface Vehicle Fleet Energy Consumption Suitable For Climate-Energy Policy Assessment. L. Conference Of Internal Combustion Engines, Mendel University In Brno, 2019. pp. 110-123. [5] Vávra, J. - Bortel, I. - Takáts, M. A Dual Fuel Hydrogen - Diesel Compression Ignition Engine and its Potential Application in Road Transport. In WCX SAE World Congress Experience. Warrendale, PA: SAE International, 2019. p. 1-14. ISSN 0148-7191. [6] ReFuel 2021, Int. Workshop on Application of Carbon Neutral Fuels. IASTEC/KSAE, Karlsruhe Inst. of Technology 2021 <https://iastec.org/>. [7] Macek J.: Simple Comparison of Solutions for GHG Reduction in Transport. Global Gamma Conference 2021, GammaTechnologies Westmont IL, p. 1-32. [8]

**Macek J.:** Vodík v energetice a dopravě. Stavebnictví 03/2023, p. 50-55, ISSN 1802-2030. **[9]** Life Cycle Assessment (LCA): How Sustainable is Your Car (greenncap.com). The Consortium Members Archive - Green NCAP: New Car Assessment Program, 2022. **[10]** **Morkus J., Macek J.:** HOW ECOLOGICAL IS YOUR ELECTRIC CAR? In: LIII. International scientific conference of the Czech and Slovak universities research dealing with R&D of ICE, 7. – 9.9. 2022, STU Bratislava, FSj, ISBN 978-80-227-5215-2, pp. 15-22. **[11]** SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/2001 podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, CELEX\_32018L2001\_CS\_TXT. **[12]** **Apetaur M., Macek J.:** Co by znamenalo posunutí zákazu prodeje automobilů se spalovacími motory z roku 2035 na rok 2045? Otevřený dopis poslancům EP a ministrům Vlády ČR, Praha 2023.

### Resumé

*Přehled použitelných způsobů akumulace energie pro mobilní účely a jejich dopad na konstrukci vozidla i jeho dráhovou spotřebu. Hodnocení těchto způsobů pro pohon vozidel silničních i kolejových. Přístupy TTW, WTW a analýza životního cyklu pro chemické i elektrochemické způsoby akumulace energie. Nutnost holistického přístupu včetně ztrát při ukládání a využívání. Důležitost hodnocení nejen v cílovém stavu, ale i během časově náročného zavádění nových vozidel. Modely vyvinuté na ČVUT a návaznost na další dostupné programové vybavení.*

### Summary

*Overview of usable ways of energy storage for mobile purposes and their impact on vehicle design and energy consumption. Evaluation of these methods for propulsion of road and rail vehicles. TTW, WTW and life cycle analysis for chemical and electrochemical methods of energy accumulation. The need for a holistic approach including the efficiency of primary energy, including losses during storage and use. The importance of evaluation not only in the target state, but also during the time-consuming introduction of new vehicles. Models developed at CTU and links to other available software.*

