



Jan Macek
Centrum vozidel udržitelné mobility fakulty strojní ČVUT
v Praze

Výhledy vodíkových vozidel a jejich rizika (Hydrogen mobility, perspectives and the risks)



Obsah přednášky

- Úvod – motivace k vodíkovým technologiím v dopravě
- Podmínky provozu hnacích jednotek osobních i nákladních vozidel a jejich zkoušení
- Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel
- Aktivity Centra vozidel udržitelné mobility FS ČVUT v Praze ve vodíkových technologiích
- Provozní účinnosti různých hnacích jednotek
- Optimalizace provozu vozidel s alternativními hnacími jednotkami
- Poznámky k ekonomickým podmínkám provozu vodíkových vozidel
- Výhledy



Úvod – motivace k vodíkovým technologiím v dopravě

Nutnost čerpat rezervy surovin na Zemi trvale udržitelným způsobem.

Mobilita patří k výdobytkům svobodného života, přičemž se individuální svoboda střetává se svobodou dalších lidských bytostí.

Strach z klimatické změny v důsledku skleníkového efektu (zkušenost: geologické druhoohory) a víra v možnost jejího ovlivnění člověkem ve funkci jazýčku na vahách (lidský podíl na odhadované celkové produkci CO₂ cca 4%, doprava z toho cca 20%, celková evropská produkce skleníkových plynů z dopravy činí méně než 0.5 promile). **Jde o politické rozhodnutí, promítnuté do legislativy.**

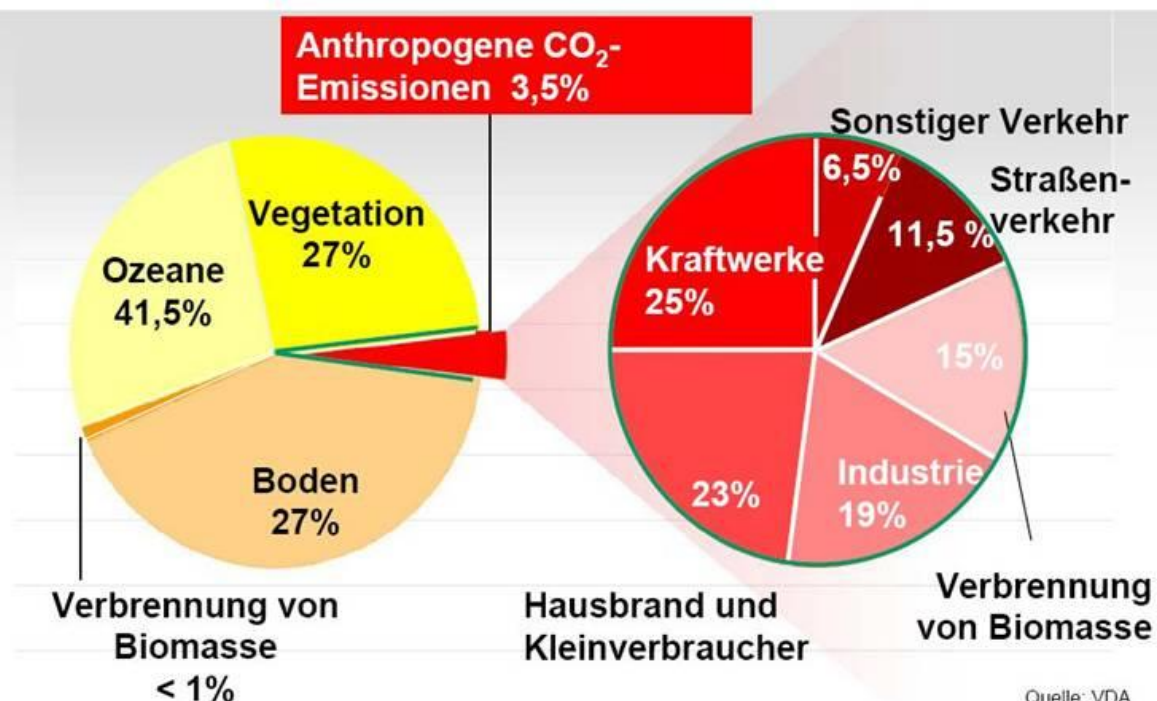
Připravované globální i evropské normy pro emise skleníkových plynů z dopravy (nejde o jedovatost zplodin hoření!!!)

Úvod – motivace k vodíkovým technologiím v dopravě

Doprava spolu s energetikou vytvářejí při použití fosilních paliv cca 45% veškerých antropogenních emisí CO₂.

Snížení je možné při využití velmi koncentrované jaderné energie nebo velmi rozptýlené energie z obnovitelných zdrojů, V obou případech je nutno sít doplnit buď drahými záložními zdroji nebo akumulací energie.

Vodík představuje použitelnou formu pro akumulaci chemické energie, zpracovatelné buď přímo na elektrickou energii nebo na další, lépe transportovatelnou formu chemické energie.



Quelle: VDA



Podmínky provozu hnacích jednotek osobních i nákladních vozidel a jejich zkoušení

Provoz hnacích jednotek vozidel je silně nestacionární, s velkým podílem trakčních sil záviselých na hmotnosti vozidla („odpory“ – valení, stoupání, setrvačnosti).

Provozní spotřeba paliva ($\text{dm}^3/100 \text{ km}$) závisí mj. na hmotnosti hnací jednotky a hmotnosti palivového systému a na účinnosti samotné hnací jednotky (Tank-to-Wheels, TTW).

Vliv rekuperace brzdě práce vozidla s akumulátorem energie musí být posouzen v tomto kontextu (dvojitá penalizace účinností – nabíjení a vybíjení a navíc vliv vyšší hmotnosti).

Odpadná energie na vozidle lze z části využít na topení, odmrazování atd. Pokud nejsou dostatečné, musí se nahradit primární akumulovanou energií.



Podmínky provozu hnacích jednotek osobních i nákladních vozidel a jejich zkoušení

Zkušební metody nestacionaritu odrážejí, testy emisí, škodlivin i spotřeby paliva se v poslední době dynamizují (NEDC = „New“ European Driving Cycle čili MVEG-B proti WLTC = World harmonized Light duty Testing Cycle, resp. WHTC). Není proto možné odhady dělat jen z maximálních účinností.

Zatím se vozidlo testuje pomocí měření účinků pomocí TTW, ale v pozadí norem stojí odhady Well-to-Tank, $WTW = WTT + TTW$.

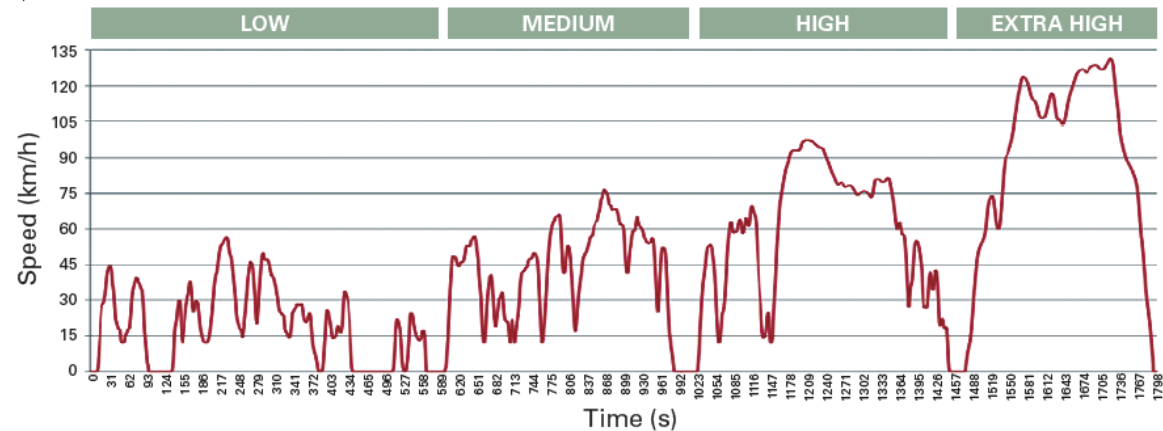
Prozatím se neberou v úvahu celoživotní vedlejší účinky technického zařízení (Cradle to Grave or Recycling), např. odpisy zařízení potřebných pro zajištění primární energie. Trh s energiemi je navíc silně deformovaný dotacemi (bez technologické neutrality). **Větší odpovědnost politiků za dlouhodobá rozhodnutí by byla žádoucí.**



Podmínky provozu hnacích jednotek osobních i nákladních vozidel a jejich zkoušení

Účinnost v provozu podle váhy provozních režimů a v reálných neustálených režimech (pro hybridy často jeden režim jmenovitého výkonu a on-off) – skutečnost a testy. Posuzování WTT (well-to-tank - primární zdroj – „nádrž“) a TTW (tank-to-wheel – nádrž – kola). Podobně posuzování emisí.

WLTC VERSION 5 (PROPOSAL)



	MVEG-B	WLTC
Length (s)	1.180	1.800
Length (km)	11,007	23,26
Idle time (%)	21,8	13
V_{max} (km/h)	120	131,6
$V_{average}$ (km/h)	33,6	46,3
$Accel_{max}$ (m/sec ²)	1	1,6



Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

Vodíkový pohon může být realizován nízkoteplotním palivovým článkem s protonově propustnou membránou (PEMFC) nebo spalovacím motorem.

PEMFC je odkázán na zdroj velmi čistého vodíku (např. CO při výrobě vodíku parním reformingem zemního plynu je katalyzátorovým jadem pro Pt dotované elektrody).

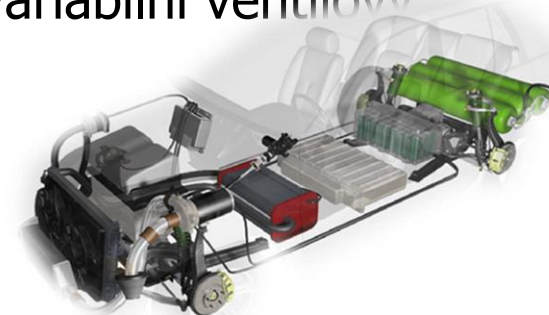
Má vysokou účinnost při nízkém zatížení, je rozměrný a drahý.

Spalovací motor může být palivově univerzálnější (CNG nebo vodík), je však méně účinný při nízkém zatížení. Jeho řízení a pomocný systém musí brát v úvahu emise oxidů dusíku ze spalování vodíku.



Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

- Možnosti - evoluce nebo revoluce. Neexistuje jedno řešení.**
- Konvenční hnací jednotky s alternativními palivy
 - Spalování - zážehový motor s chudou směsí
 - Přepřehování – downsizing
 - Maximálně pružné řízení se zpětnou vazbou a založené na modelu (spalování, kompresní poměr, variabilní ventilový rozvod, regulace plnicího tlaku)
 - Alternativní pohonné řetězce
 - Vodíkový spalovací motor
 - Palivový článek (přednostně PEM FC)
 - Plně elektrický pohon s akumulátorem
 - Hybridní uspořádání s různou měrou podílu SM/EM od mild hybrid k RE/plug-in hybrid
 - Hybridní uspořádání s PEM FC



Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

- Objem i hmotnost několikanásobně vyšší než u spalovacího motoru.
- Lze přizpůsobit prostoru v zástavbě

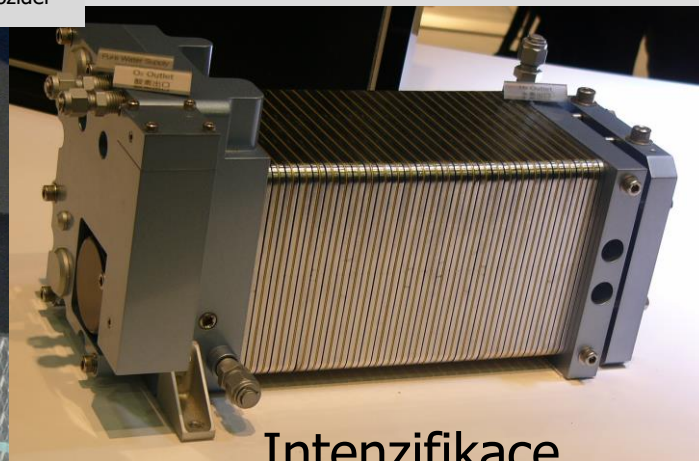


Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

Palivové články jsou stále menších rozměrů, ale stále se více než o řád odlišují cenově od spalovacích motorů a nejsou jednodušší. Nutno odlišovat vlastní článek (Toyota) od celého zdroje elektrické energie s úpravami tlaku, teploty a vlhkosti včetně chladičů (DAIMLER)

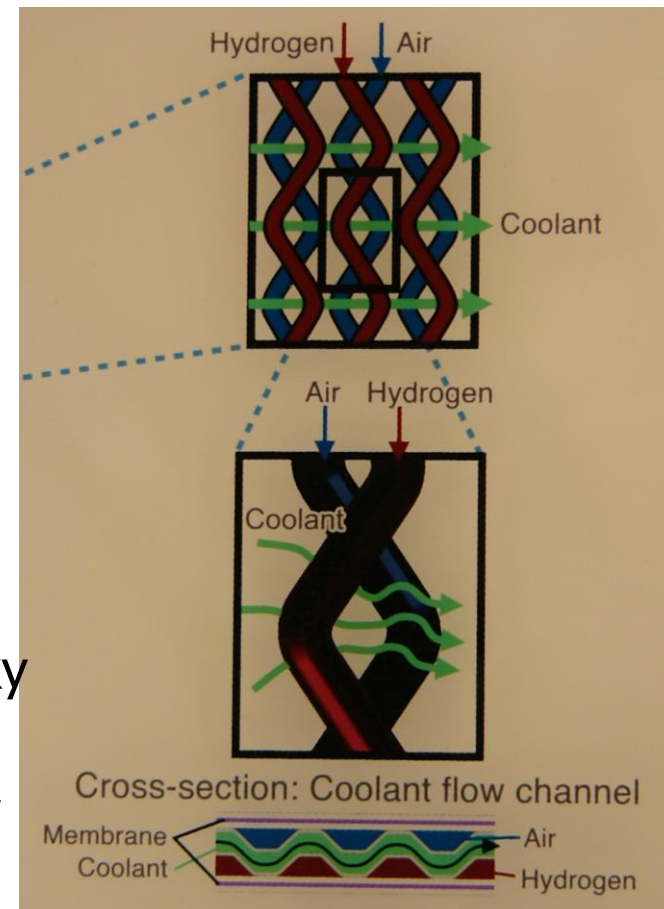


Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

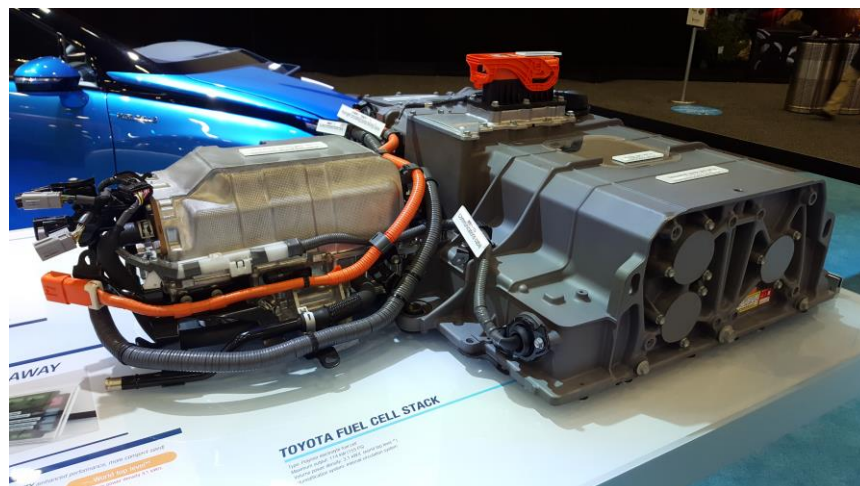


Intenzifikace přestupu látek a tepla v PEM FC Honda – inspirace deskovými výměníky Alfa Laval.

Současné problémy PEM FC jsou především fyzikálně-inženýrské povahy.

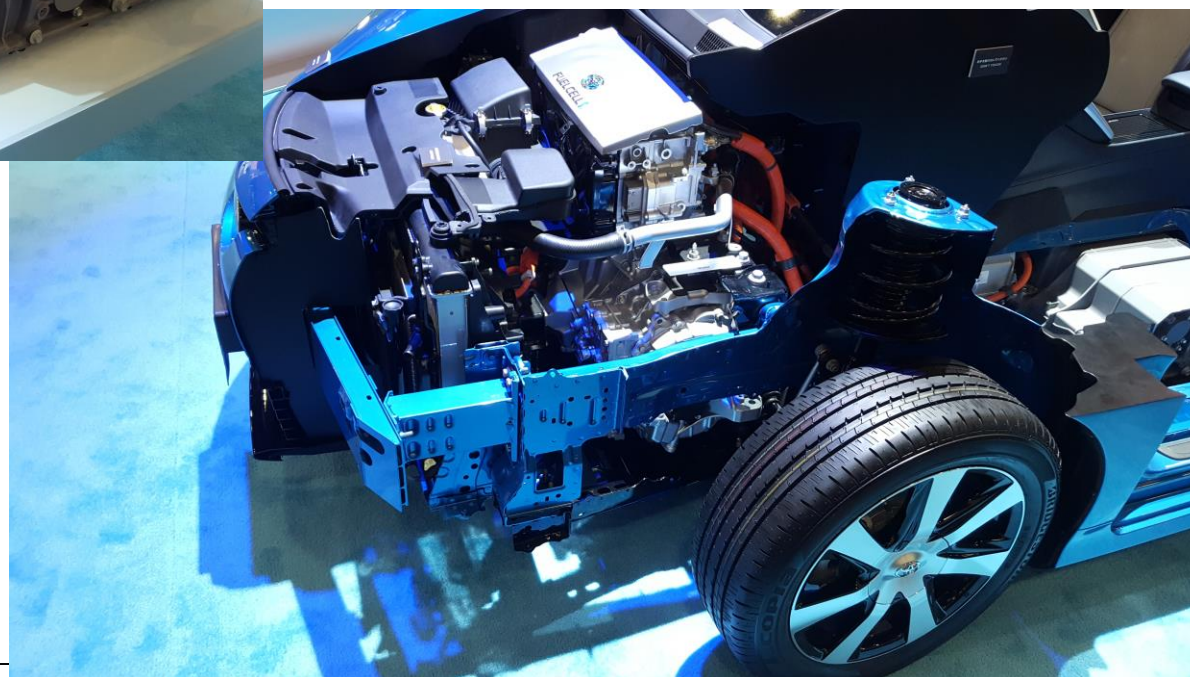


Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel



V menším vozidle je dispozice palivového článku s příslušenstvím, elektromotoru a frekvenčního měniče/převodníku napětí stále výzvou.

T A
Č R



Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

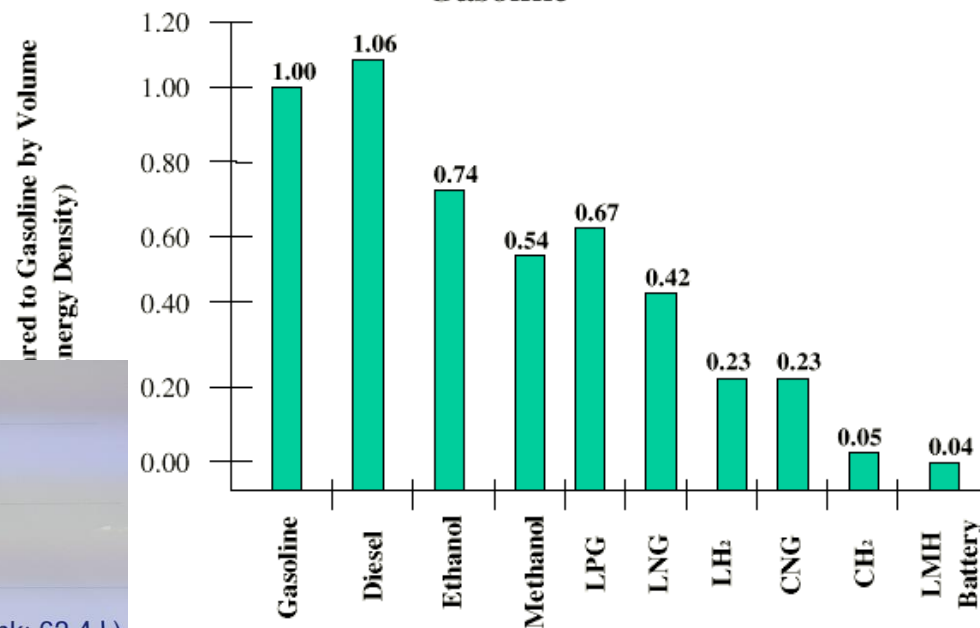
Řešení PEM FC a jejich příslušenství z poslední doby:

Cenově (a infrastrukturně) dostupná jsou řešení se stlačeným vodíkem přes jeho podstatně menší energetickou hustotu (Toyota)

HIGH-PRESSURE HYDROGEN TANK

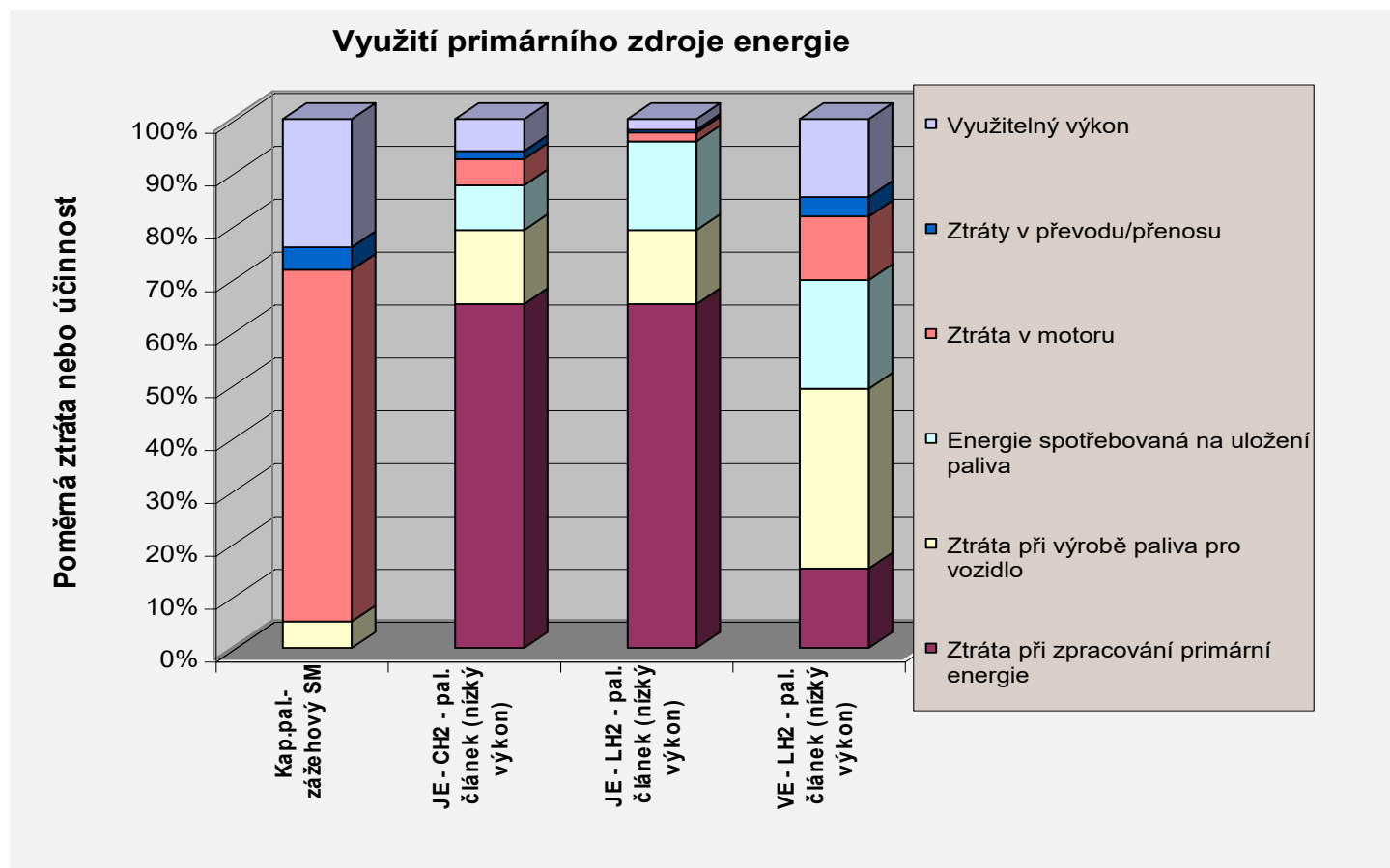
<i>Nominal working pressure</i>	70 MPa (approx. 700 bar)
<i>Tank storage density</i>	5.7 wt% (world top level ²)
<i>Tank internal volume</i>	122.4 L (front tank: 60.0 L, rear tank: 62.4 L)
<i>Hydrogen storage mass</i>	Approx. 5.0 kg

Figure 5-2
Energy Densities of Alternative Fuels Relative to Gasoline



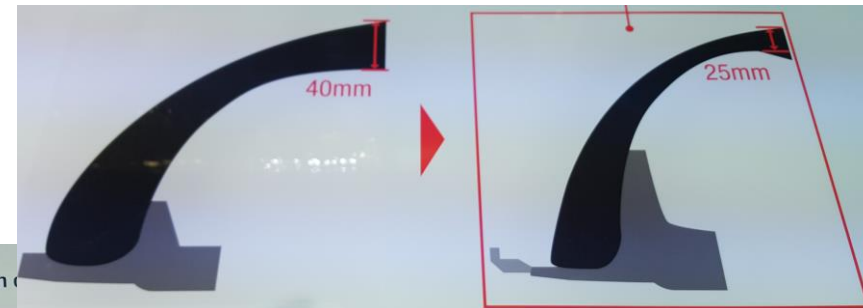
Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

- Energetické náklady na ukládání paliva v řetězci WTW



Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

Uložení zásoby vodíku je společné pro spalovací motor i palivový článek
Tlakové láhve – Toyota vyvíjí kompozit/Al láhve. Nevýhoda – křehké a drahé.
Ochrana proti kolizi vozidel nutná.
Víceplášťové kovové láhve s předpětím?

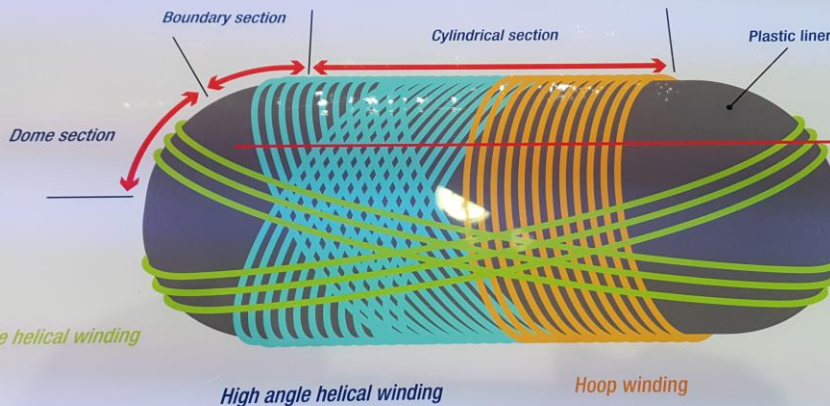


Conventional technology

New technology



Innovations to the plastic liner configuration and efficient layering pattern resulted in a reduction of approximately 40% in the amount of carbon fiber used





Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel

Vodíkové spalovací motory

- mohou řešit přípravu infrastruktury pro možnost vícepalivového provozu a velmi chudé směsi, např. se zapalovací komůrkou
- možnost použití vysoce zředěné směsi s nízkou teplotou plamene (nízké ztráty chlazením) - omezené klepání i pravé detonační spalování, možnost přepřehování i relativně vysokého kompresního poměru
- v důsledku přepřehování i dostatečně vysokého kompresního poměru dobrá účinnost ve srovnání s dalšími plynovými motory
- vhodné je vrstvit směs během sacího zdvihu pro zamezení zapálení směsi od výfukových plynů
- využití variability časování rozvodu, řízení plnicího tlaku i počátku spalování se zpětnou vazbou na klepání, kompresního poměru atd.

11. konference STROJÍRENSTVÍ OSTRAVA 2017

Teplotní, rychlostní a koncentrační pole

$$\frac{d C_A}{d t} = - k \cdot T^{-b} \cdot e^{-\frac{T_a}{T}} C_A^x \cdot C_B^y$$

Úvod
 Podmínky provozu hnacích jednotek
 Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel
 Aktivita CVUM ČVUT v Praze ve vodíkových technologiích
 Provozní účinnosti různých hnacích jednotek
 Optimalizace provozu vozidel s alternativními hnacími jednotkami
 Ekonomické podmínky provozu vodíkových vozidel
 Výhledy

Palivo

Vázání dusíku pomocí uhlíku palivu – NH, HCN, H₂CN, CN a rozpad na radikály s N

Rychlá tvorba oxidu dusnatého NO

Potřebná vysoká teplota >≈1700K, přítomnost dusíku i kyslíku (rychlá disociace T>2500K) a dostatečný čas

Chemie vzniku oxidů dusíku

Teplota >≈1700 K: aktivace kyslíku i dusíku za přítomnosti -OH:

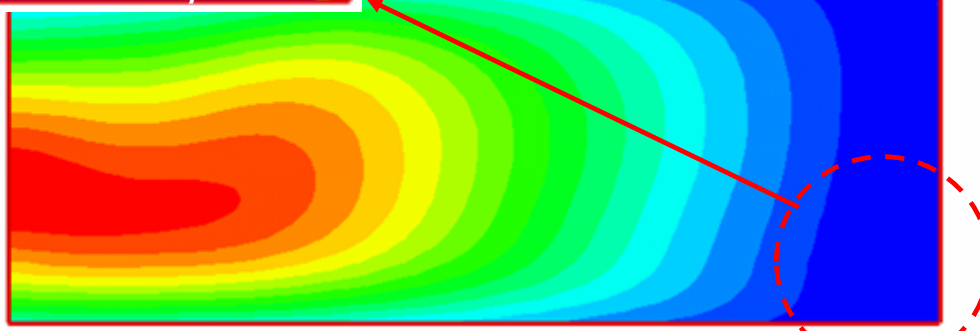
$N_2 + O \leftrightarrow NO + N$
 $O_2 + N \leftrightarrow NO + O$
 $-OH + N \leftrightarrow -H + NO$

a např. rovnováhy rozpadu N₂, O₂, H₂O, CO+H₂O

Vysoký tlak – N₂O a jeho rozpad na NO

Poloha fronty plamene: NO se pozdí!

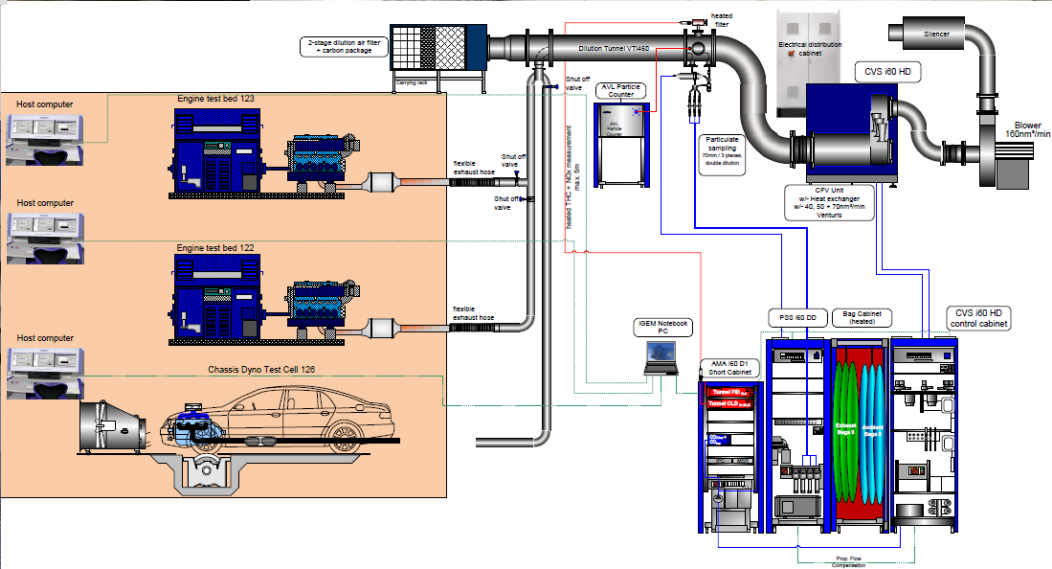
Vznik NO₂ další oxidací přebytkovým O₂ (aktivace O₂ nespálenými uhlovodíky)





Aktivity Centra vozidel udržitelné mobility FS ČVUT v Praze ve vodíkových technologiích

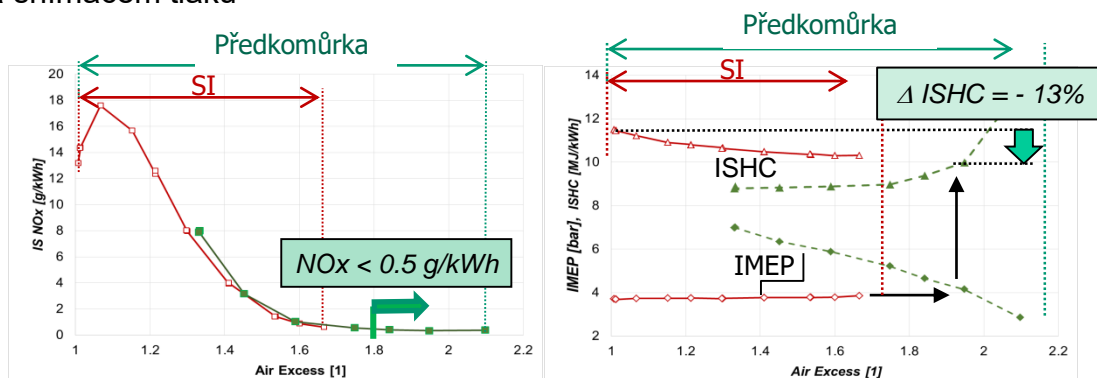
- Rozbory provozní účinnosti vozidel kalibrované pomocí Portable Emission Measurement System PEMS a měřeními na vozidlovém dynamometru.
- Spalování vodíku v plynových motorech jako čistého paliva i ve směsích se zemním plynem.
- Komůrkový zážeh extrémně chudých směsí pro plynové motory s vysokou účinností.
- Vývoj vysoce pevných kompozitů i kovových tlakových nádob.



Aktivity Centra vozidel udržitelné mobility FS ČVUT v Praze ve vodíkových technologiích

Plynový motor G432 s vyplachovanou zapalovací předkomůrkou (4 x $\phi 102/120$ mm, CNG, KP = 12:1)

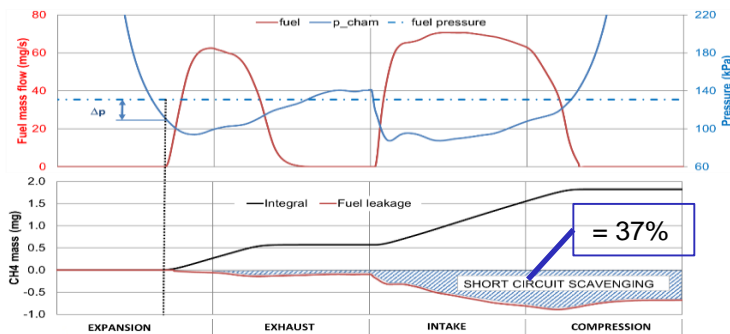
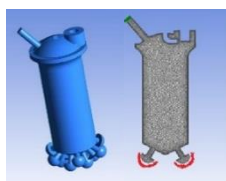
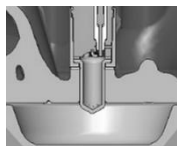
Předkomůrka s přívodem paliva, zapalovací svíčkou a snímačem tlaku



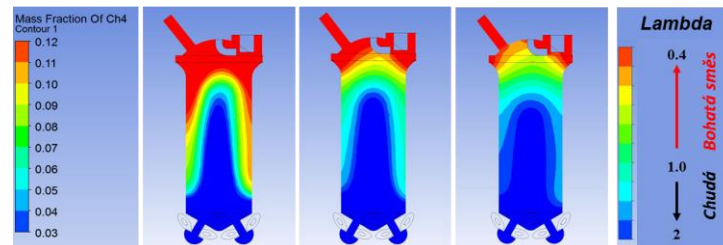
Vyplachovaná komůrka přináší:

- nízké emise NOx v surových spalínách v nízkém zatížení, široký rozsah přebytku vzduchu ($1 \leq \lambda \leq 2.2$), netřeba škrťací klapky
- spalování extrémně chudé směsi vede až k **13% snížení spotřeby paliva** v porovnání s konvenčním spalování stechiometrické směsi

CFD Simulace pro popis dějů v předkomůrce - aktivity ve spolupráci s WP05 - zhodnocení výtoku paliva do válce – směrnice pro nastavení přetlaku přívodu paliva nad zpětným ventilkem

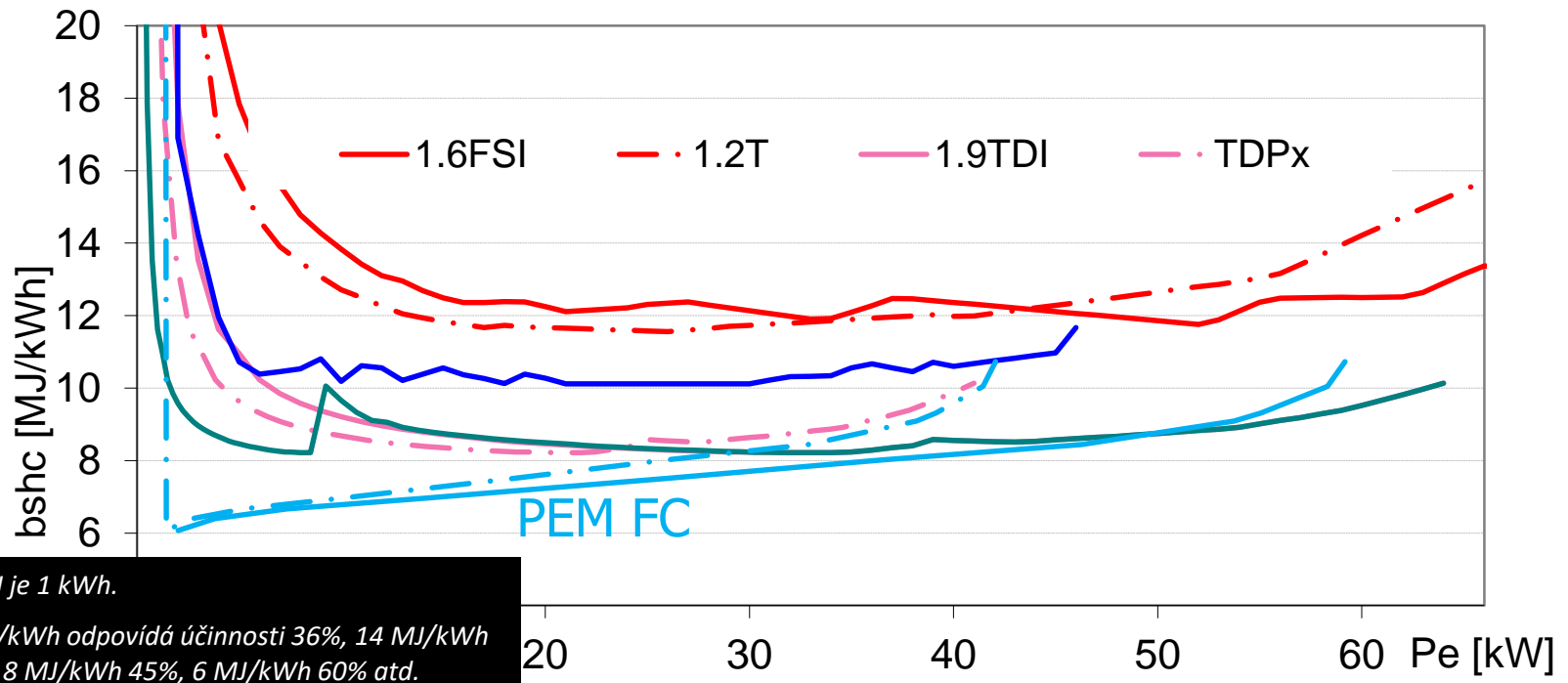


Zhodnocení rozvrstvení směsi



Provozní účinnosti různých hnacích jednotek

Porovnání křivek optimální měrné spotřeby chemické energie v závislosti na požadovaném výkonu pro různé primární zdroje – od zážehového nepřepřehňovaného motoru přes vznětový přepřehňovaný po palivový článek (FC) – výhodný zejména pro nízký výkon – a dvumotorový pohon vozidla.

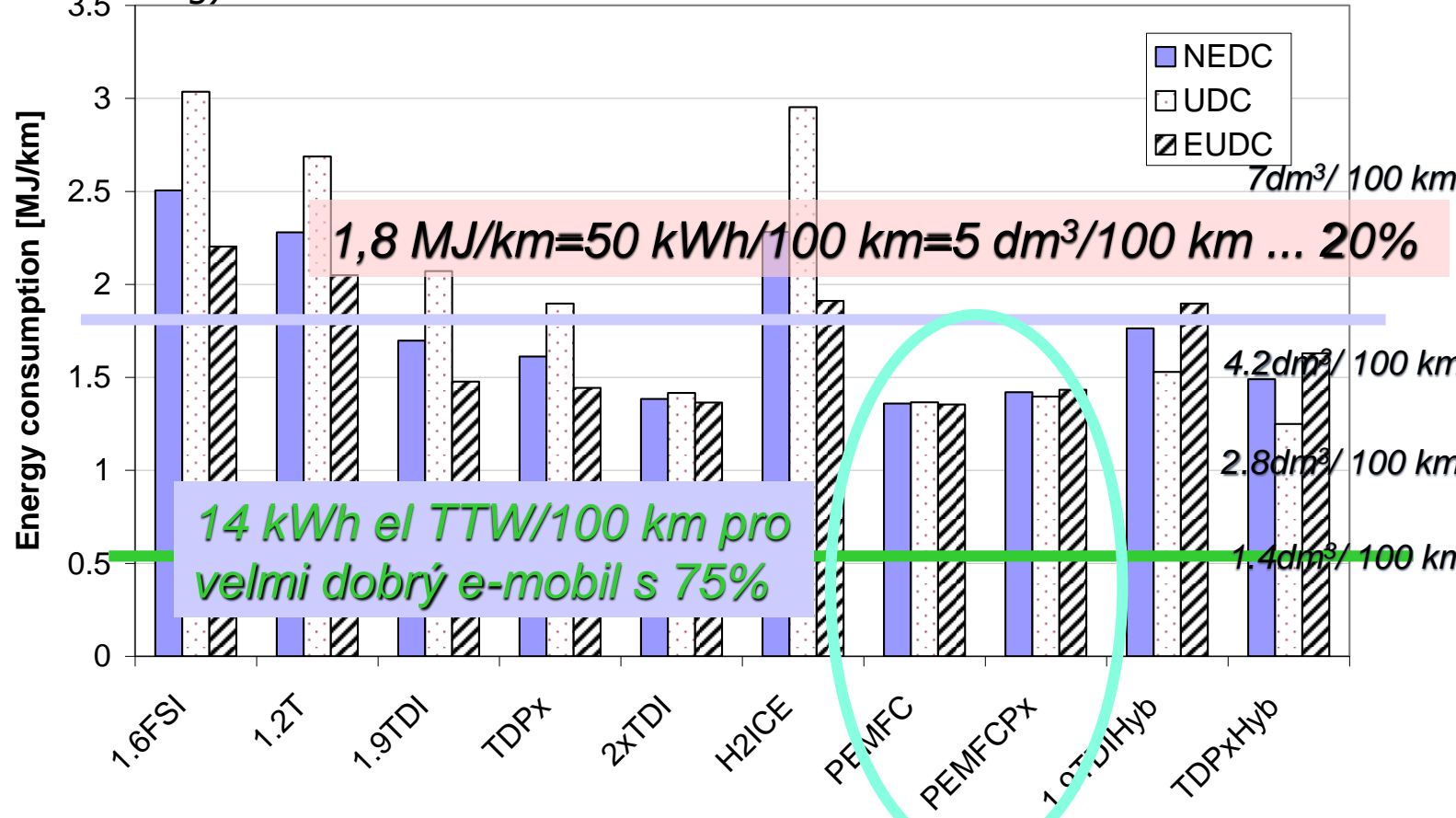


3.6 MJ je 1 kWh.
10 MJ/kWh odpovídá účinnosti 36%, 14 MJ/kWh 26%, 8 MJ/kWh 45%, 6 MJ/kWh 60% atd.
Velmi hrubě: 1 dm³ nafty odpovídá cca 36 MJ nebo 10 kWh při hustotě 0,84kg/dm³.
90 MJ/100 km jsou 2.5 dm³/100 km

Provozní účinnosti různých hnacích jednotek

Porovnání spotřeby energie v „nádrži“ TTW pro různé pohonné jednotky v testu NEDC s uvažováním hmotnosti vozidla

- Velmi hrubě: NEDC test vyžaduje na kolech vozidla cca 10 kWh/100 km (podle hmotnosti, počítáno pro cca 1450 kg)



Provozní účinnosti různých hnacích jednotek

efficiencies

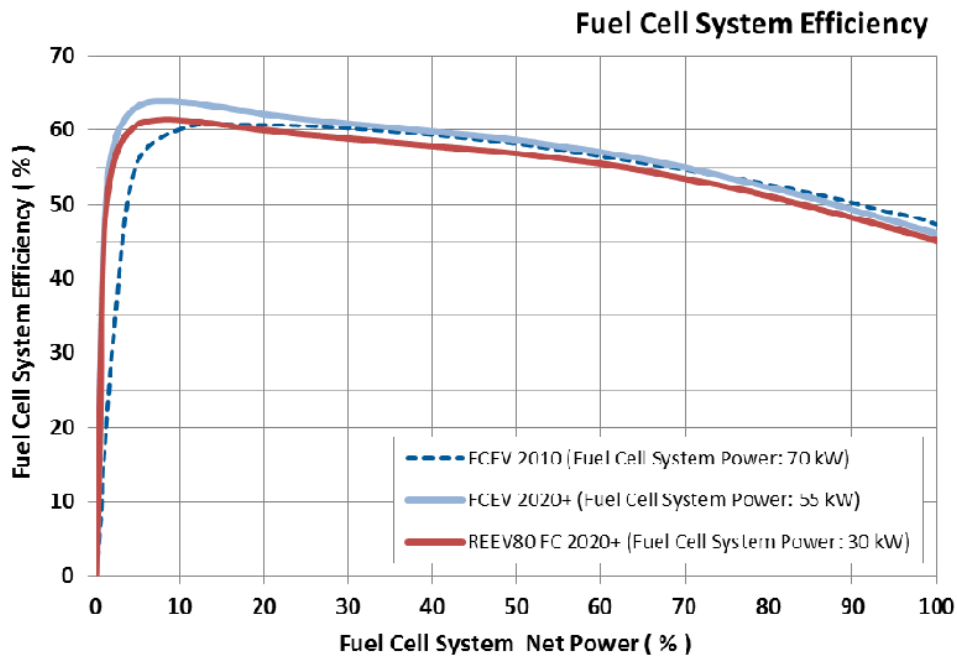
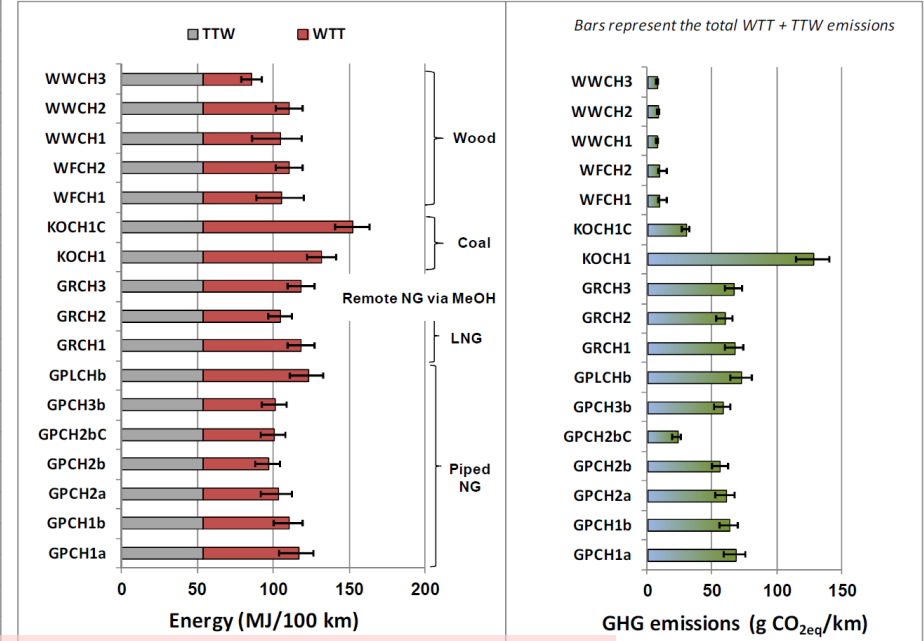


Figure 5.4-2a/b WTW total energy expended and GHG emissions for 2020+ FCEV using compressed hydrogen via thermal process pathways



1,8 MJ/km=50 kWh/100 km=5 dm³/100 km

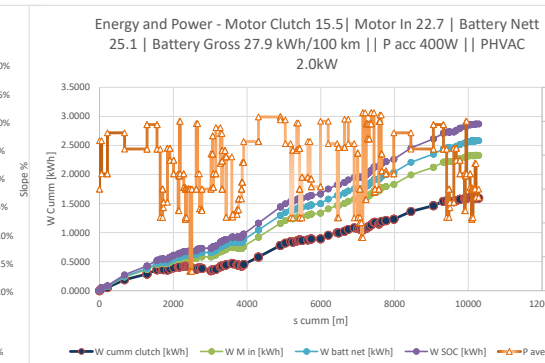
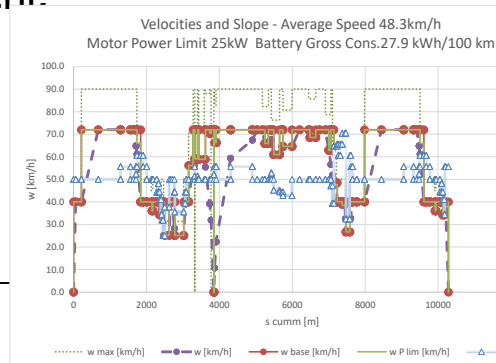
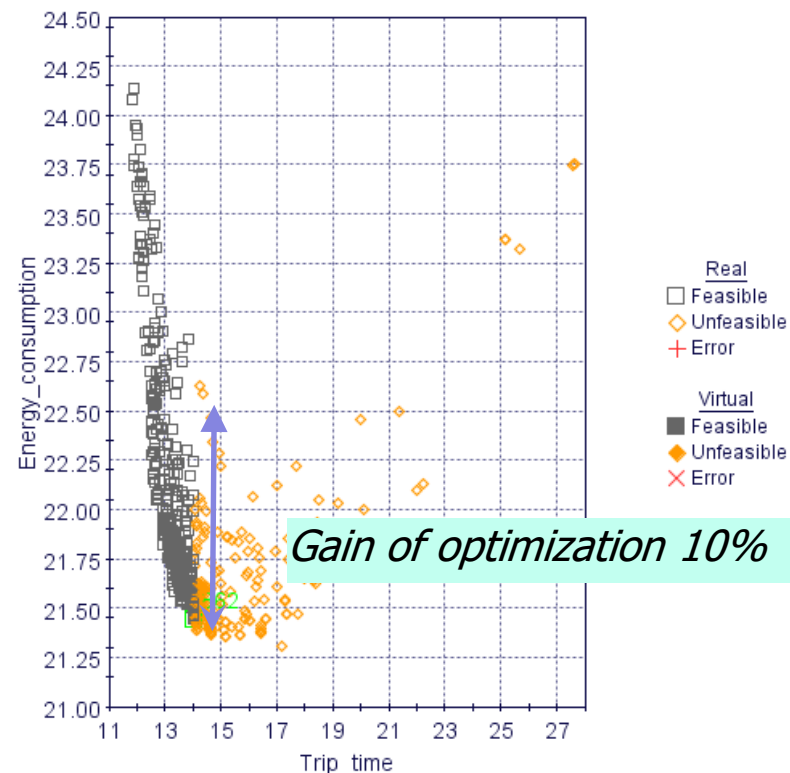
Účinnost palivového článku (bez přídavných zařízení) je při vyšších zatíženích srovnatelná se spalovacími motory, ale při nízkých zatíženích je podstatně lepší (seriově řazený vnitřní odpor na rozdíl od paralelního odporu – ztrát při volnoběhu – u SM)

- Vozidla s palivovými články na vodík FCEV
- REEV s bateriemi při použití palivového článku jako prodlužovače dojezdu (range-extender)



Optimalizace provozu vozidel s alternativními hnacími jednotkami

- Nabízí se on-line adaptivní a prediktivní optimalizace.
- Tč. zvládnuta na základě zobecnění výsledků podrobných modelů ve formě vhodné pro opakované optimalizační výsledky pro elektromobily a vozidla se spalovacími motory (v obou případech se řaditelnou převodovkou).
- V přípravě je obecný systém pro hybridy.
- PPEM FC možno implementovat, budou-li k dispozici kalibrační měření, a to včetně kondicionování podmínek pro správnou činnost FC (např. udržování vlhkosti PEM).



Úvod
 Podmínky provozu hnacích jednotek
 Specifika hlavních typů vodíkových pohonů vozidel
 Aktivity CVUM ČVUT v Praze ve vodíkových technologiích
 Provozní účinnosti různých hnacích jednotek
 Optimalizace provozu vozidel s alternativními hnacími jednotkami

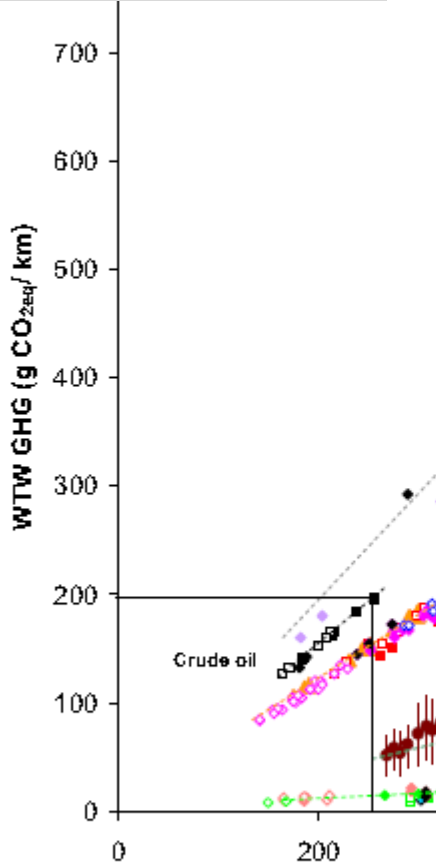
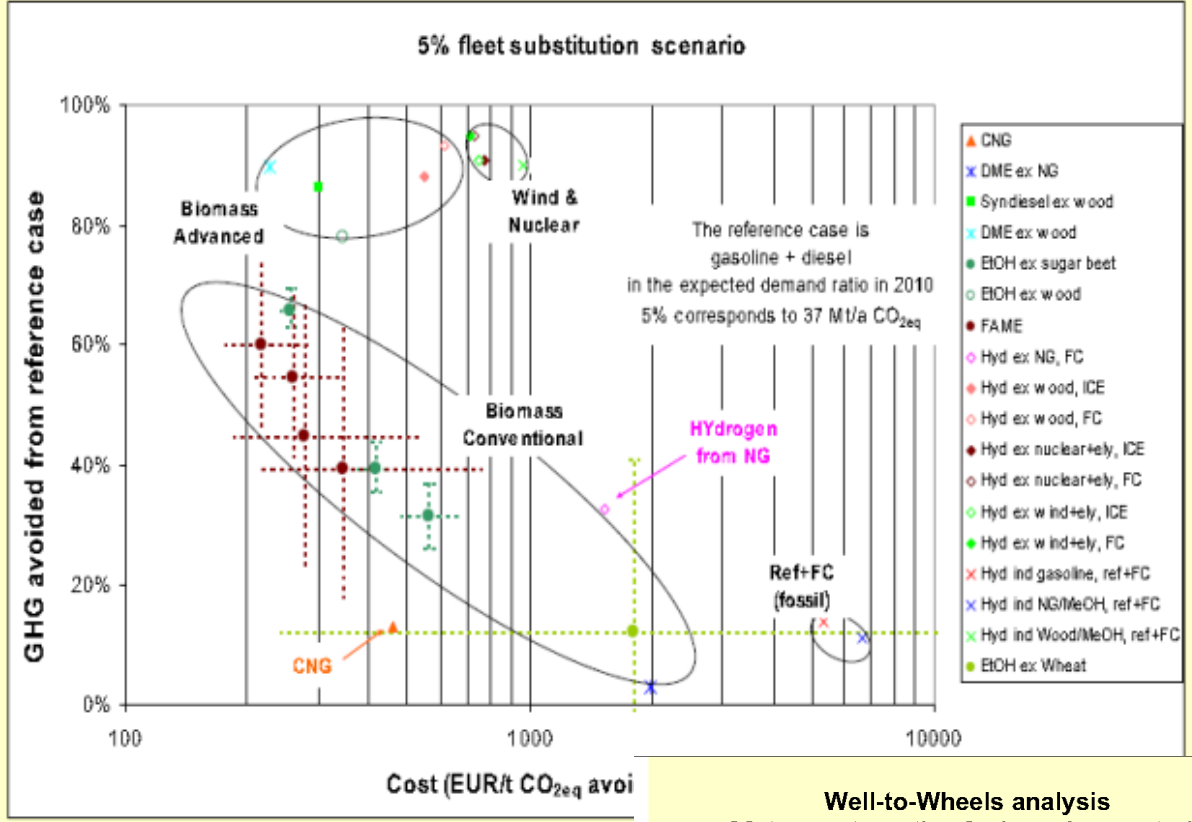
Ekonomické podmínky provozu vodíkových vozidel

Výhledy

Poznámky k ekonomickým podmínkám provozu vodíkových vozidel



Overall Results – Costs of CO₂ avoided



$180 \text{ MJ}/100 \text{ km} = 50 \text{ kWh}/100 \text{ km} = 5 \text{ dm}^3/100 \text{ km}$

Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context

The study report is available on the WEB:
<http://ies.jrc.ec.eu.int/Download/eh>

For [questions / inquiries / requests / notes](#) to the consortium,
 please use the centralised mail address:
infoWTW@jrc.it



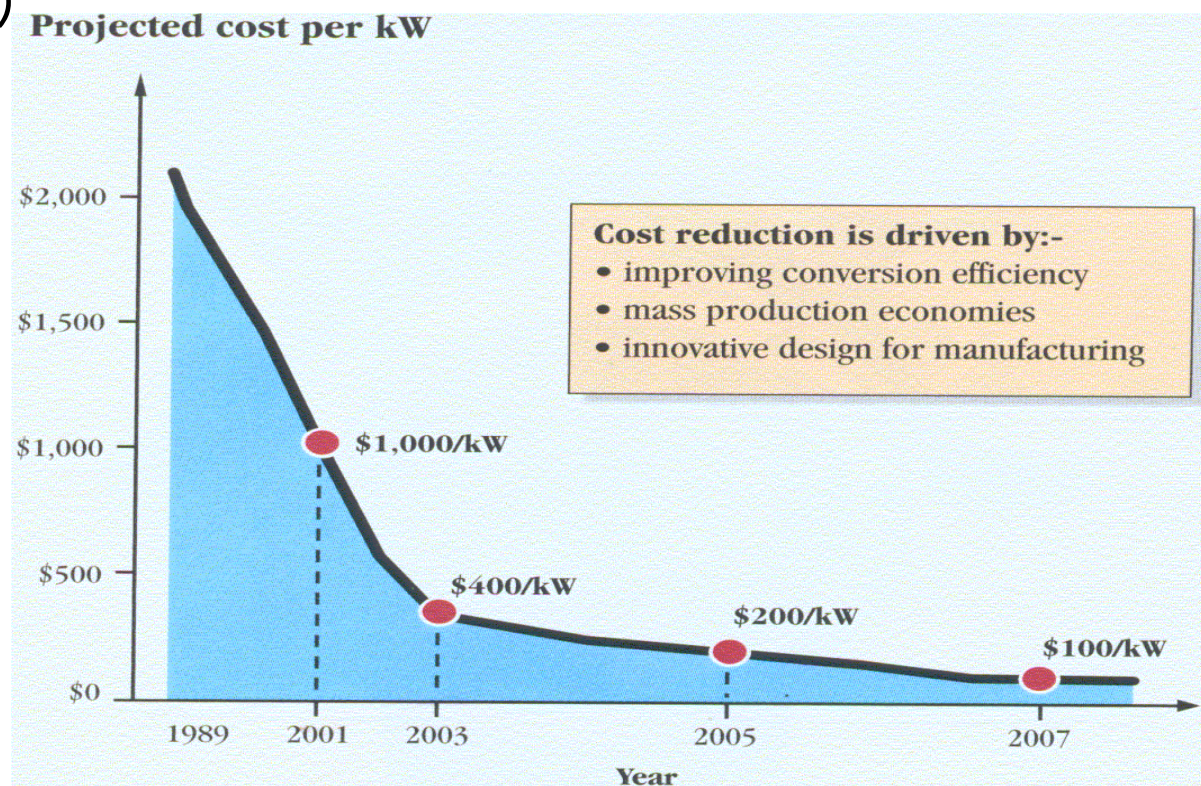


Poznámky k ekonomickým podmínkám provozu vodíkových vozidel

- Odhady jsou poplatné momentálním cenám surovin (spíše rostou, zejména u Pt nebo prvků vzácných zemin), technologií (spíše klesají) a seriovosti výroby (podíl fixních nákladů bude klesat).
- Stav r. 2000 s odhadem výrobních nákladů PEM FC při seriové výrobě na cca 1000 \$/kW s předpokladem poklesu do r. 2010 na méně než 200 \$/kW se nesplnil. Spalovací motor má cca 50-100 \$/kW.
- Neodhadnutelná deformace cen po fiskální podpoře.
- Mnoho optimistických výhledů se často vynáší v logaritmické stupnici.
- Existují oprávněné naděje na pokles sycení platinou (v ČR prof. Matolín – CeO₂, MFF KU v Praze), ale problém s přenosem z malých měřítek do proudových hustot do 0.006 - 0.01 A/mm² při celkových proudech v řádech malých kA.
- Totéž, ale méně podloženo experimenty, pro uhlíkové nanotechnologie.

Poznámky k ekonomickým podmínkám provozu vodíkových vozidel

- Příklad odhadu vývoje cen z r. 2001 (realizované ceny byly ovšem řádově vyšší – např. dle údajů DAIMLER - Ballard, šlo o odhad pro sériovou výrobu)





Výhledy – srovnání vodíkových hnacích jednotek

- Účinnost palivového článku (bez přídavných zařízení) je při vyšších zatíženích srovnatelná se spalovacími motory, ale při nízkých zatíženích je podstatně lepší (sériově řazený vnitřní odpor na rozdíl od paralelního odporu – ztrát při volnoběhu – u SM). Handicap pro hybridy PEM FC/akumulátor, ale výhoda pro hybrid SM/PEM FC.
- SM vhodný jako přechod k budování infrastruktury
- Možnost uplatnění přebytků vodíku v zemním plynu NG (příznivě podporuje účinnost spalovacího motoru při spalování NG), ovšem při infrastruktuře bez nebezpečí vodíkové křehkosti.
- Cenově zatím neporovnatelné – SM kolem 50-100 \$/kW, PEM FC > 700 \$/kW.

Obecně z hlediska uložení energie na vozidle:

- Nízká objemová hustota energie ve srovnání s benzinem, nutnost vysokých tlaků pokud CH₂.
- Materiály odolné proti vodíkové křehkosti a korozi kondenzovanou vodou.
- Vysoké energetické nároky na zkapalnění a přepravu LH₂.



Výhledy – analýza výhod a nevýhod a z nich plynoucích rizik

- vysoká účinnost TTW zejména u automobilu v městském provozu s malým zatížením hnací jednotky a nulové emise v místě použití (s výjimkou vodní páry);
- akční radius, topení a klimatizace bez problémů;
- možnost akumulace elektrického výkonu (u obnovitelných zdrojů při použití domácího elektrolyzéru jako kogenerační jednotky kdykoli, u jaderných zdrojů v sedlových obdobích);
- možnost přímé konverze chemické energie nebo jaderné primárního zdroje do chemické energie vodíku bez elektrického mezistupně se ztrátou účinnosti;
- politicky atraktivní – pracovní příležitosti (vyžaduje velké investice do nových výrob), zlepšení životního prostředí ve městech atp.
- možnost postupného budování infrastruktury a ověřování bezpečnosti s dvojpalivovými spalovacími motory, případně hybridy SM/PEM FC.

- nízká účinnost WTW s ohledem na výrobu a skladování vodíku – snížení spotřeby fosilního paliva emise fosilního CO₂ závisí na primárním energetickém mixu;
- nižší energetická hustota zásob na vozidle;
- omezený výkon vozidla a ztráta účinnosti při využití plného výkonu (nevýhoda u hybridů FC-akumulátory, špatně použitelné pro nákladní dálkovou dopravu);
- legislativní a fiskální podpora řádově dražších hnacích jednotek a paliva je nutná.
- velké investice do infrastruktury i do vozidel – časově není možné zvládnout v krátkém termínu – podstatnější výhledy pro 2025+
- zatím neznámé environmentální důsledky havárií;
- intenzivní fiskální podpora nutná současně se získáním fiskálního zdroje pro silniční infrastrukturu – pokud odpadá spotřební daň na paliva.

Není proveditelné bez dlouhodobé státní energetické a dopravní politiky.

Racionální řešení pro hledání vhodného systému je v této fázi diverzifikace a porovnání výsledků výzkumu – tedy jednostranná řešení představují nutně riziko.

Děkuji za pozornost.

Dotazy?

Jan.Macek@fs.cvut.cz
<http://www.cvum.eu>

