

Projekt H2 goesRail

Zelená železnice, Praha, 3. 10. 2023

Jiří Pohl

Siemens Mobility, s.r.o.

Nevratné klimatické změny, způsobené spalováním fosilních paliv s důsledkem růstu koncentrace oxidu uhličitého v zemském obalu jsou realitou. Závislost střední roční teploty ovzduší na množství oxidu uhličitého v zemském obalu je velmi zřejmá:

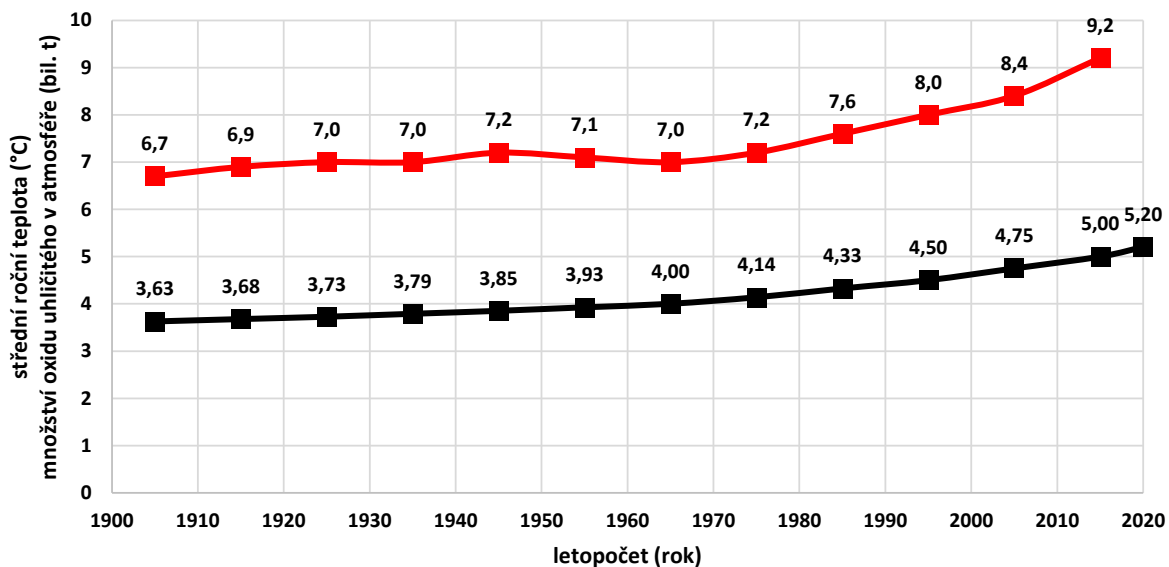
- mezi roky 1905 a 2015 došlo spalováním uhlí, ropy a zemního plynu ke zvýšení množství oxidu uhličitého v zemském obalu ze 3,63 bil. t na 5,00 bil. t, tedy o 1,37 bil. t,

- střední roční teplota v ČR vzrostla z hodnoty 6,7 °C v dekádě 1901 až 1910 na hodnotu 9,2 °C v dekádě 2011 až 2020, tedy o 2,5 °C.

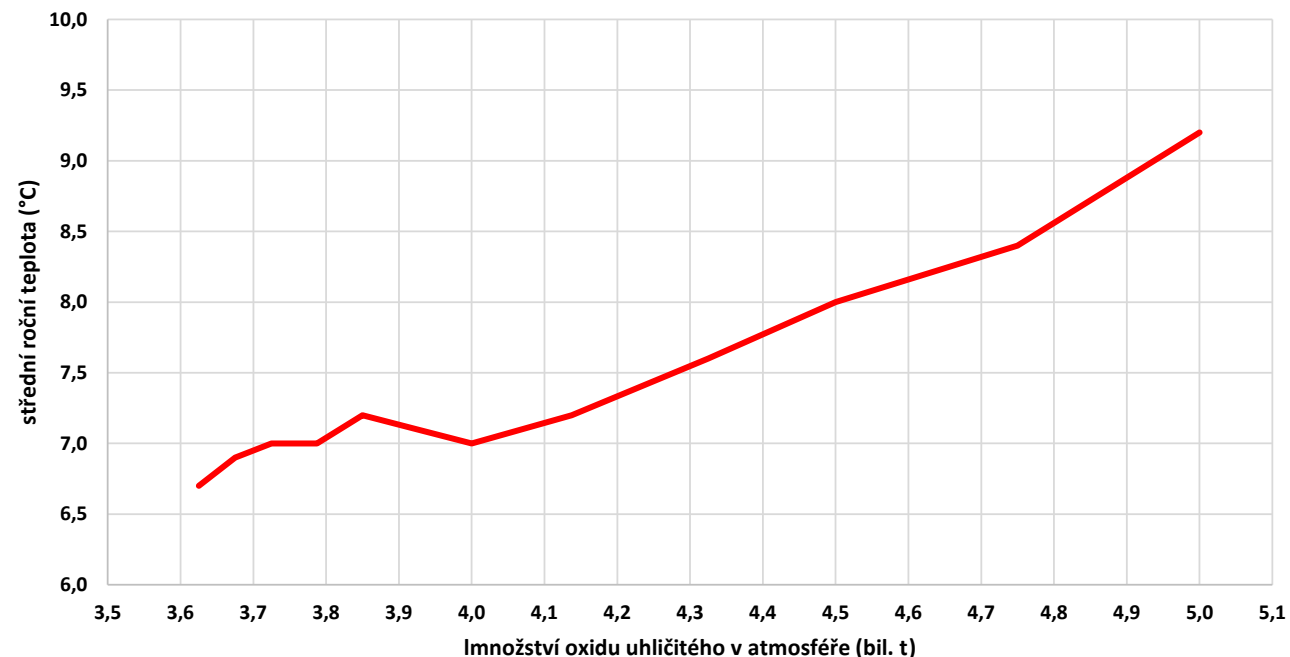
Příčina sucha, které Evropa zažívá, není nedostatek atmosférických srážek. V ČR ročně spadne i nyní v průměru zhruba 680 mm srážek ročně, stejně jako na začátku minulého století. Jen jejich odpařování je vlivem zvýšené teploty více intenzivní a jejich rychlý odtok řekami do moře je při náhlých deštích četnější.

střední roční teplota ovzduší v ČR po dekádách
(roční srážky se držely v celém období na průměrné úrovni kolem 680 mm/rok)

—■— střední roční teplota —■— množství oxidu uhličitého

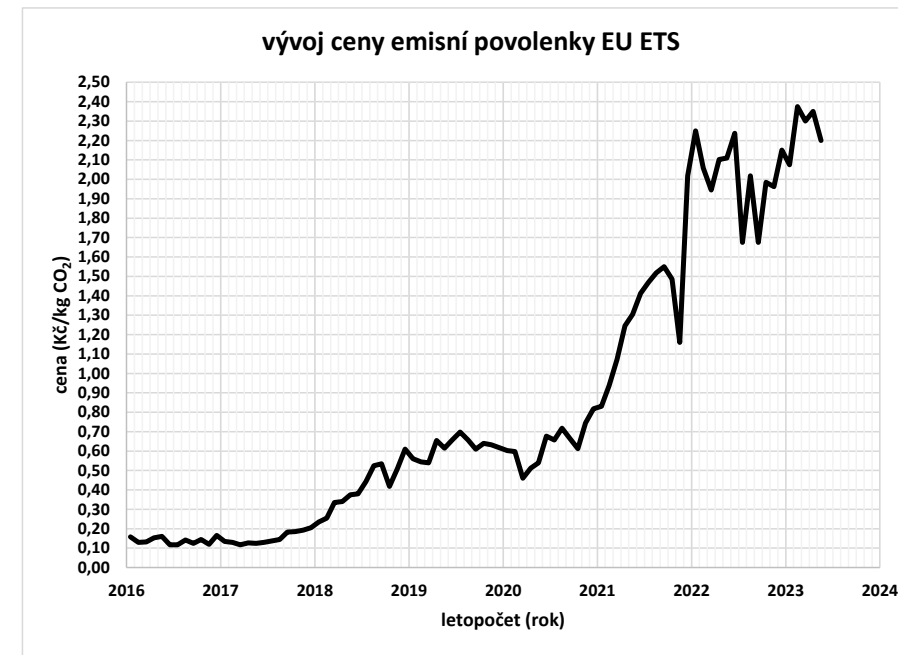
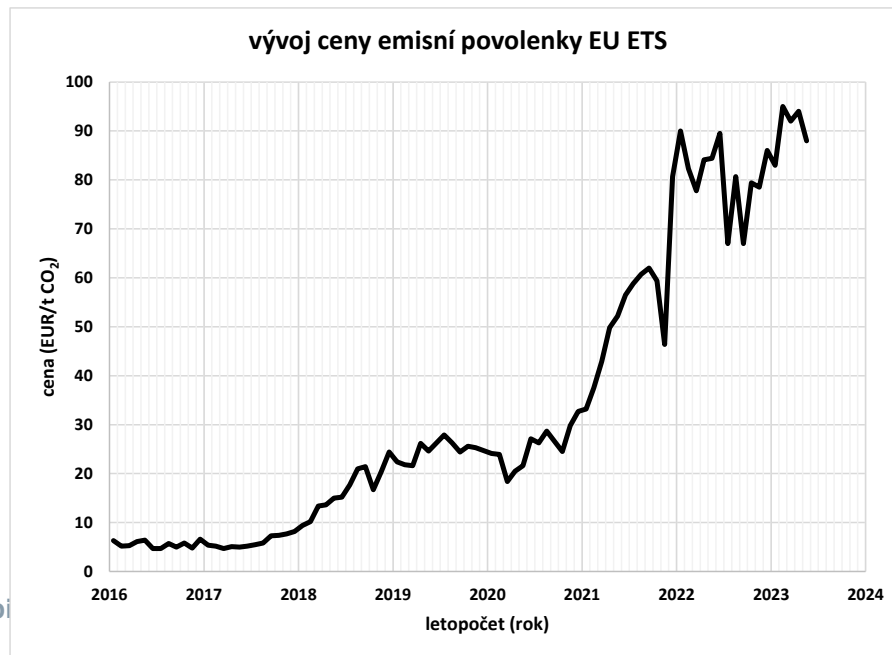


střední roční teplota ovzduší v ČR v závislosti na množství oxidu uhličitého v atmosféře



Nástrojem EU k dekarbonizaci je systém obchodování s emisemi oxidu uhličitého EU ETS:

- kdo potřebuje spalovat fosilní paliva (a spadá do emisními povolenkami regulované oblasti, což je v současnosti průmysl a energetika, nikoliv doprava a domácnosti) je povinen koupit si v odpovídajícím množství emisní povolenky,
- z výnosu z prodeje emisních povolenek mají být podle směrnice 2003/87/ES podporovány inovativní investice zaměřené k úsporám energie a emisí a to včetně „podněcování k přechodu na ty způsoby dopravy, které produkují nízké emise uhlíku, a na veřejnou hromadnou dopravu“. V ČR se tak dosud neděje většina výnosu z prodeje emisních povolenek není účelově vázána a je podobně jako výnos z daní neadresným příjmem státního rozpočtu. Řešením je novela zákona č. 383/2005 Sb., navržená MŽP, která dává zákon č. 383/2005 Sb. do souladu se zněním směrnice 2003/87/ES.
- cenu emisních povolenek určuje elasticita trhu, avšak je programově řízena snižováním vydávaného množství emisních povolenek lineárním redukčním faktorem (aktuálně o 2,2 %/rok). Tržní cena emisních povolenek jsou tak vysoká, jak je potřeba k tomu, aby jak vysokou cenou fosilních paliv, tak i podporou inovativních investic poklesla spotřeba fosilních paliv ke snížení produkce CO₂ o 2,2 %/rok.



Dekarbonizace výroby elektrické energie v ČR

Měrná emisivita výroby elektrické energie v ČR je programově radikálně snižována.

Důvody jsou ryze ekonomické. Elektrárny spalující uhlí s měrnou emisivitou 0,36 kg CO₂/kWh a s účinností 36 % produkují elektrickou energii s měrnou emisivitou 1 kg CO₂/kWh.

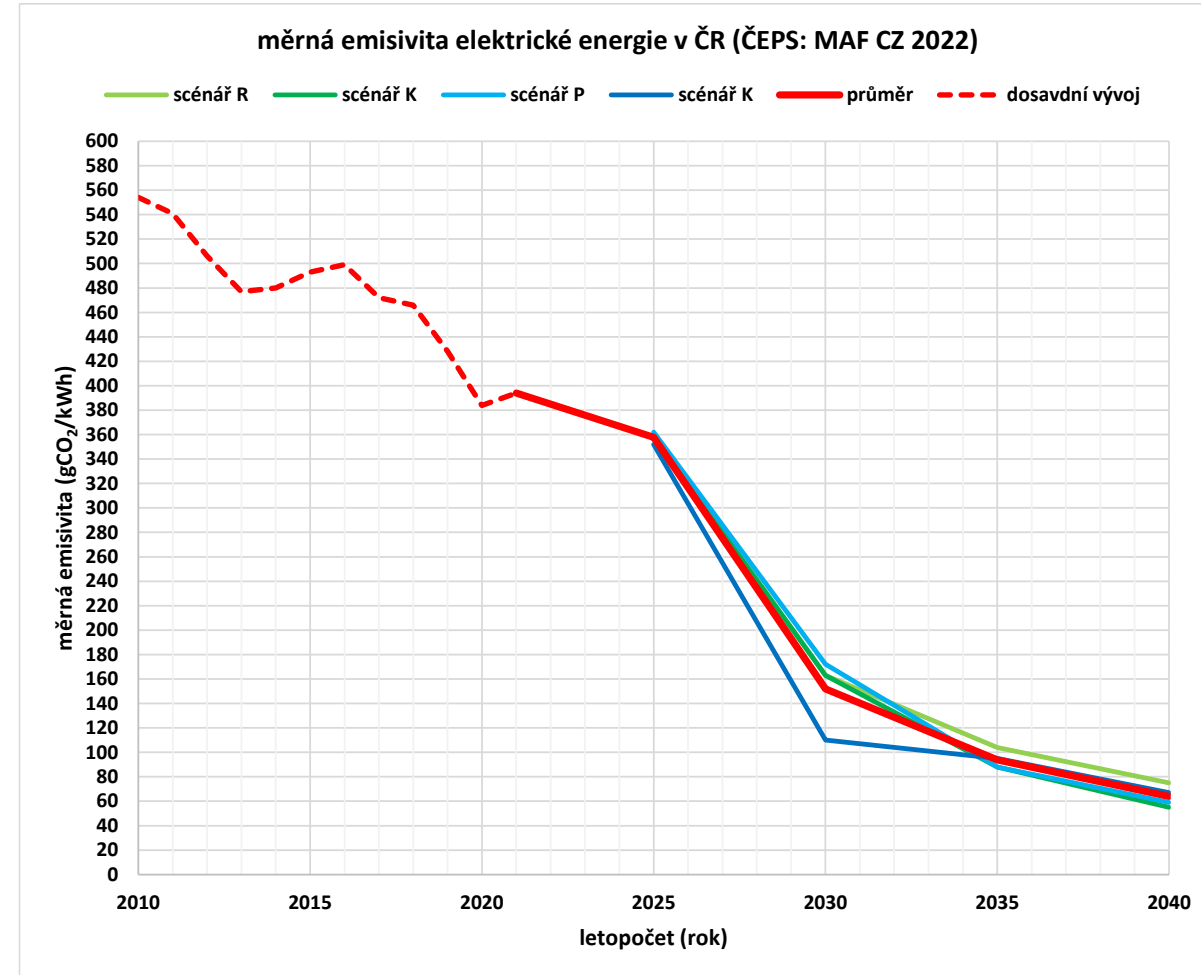
To pro uhelné elektrárny při aktuální tržní ceně emisní povolenky EU ETS v úrovni kolem 80 EUR/t CO₂ (cca 2 Kč/kg CO₂) zvyšuje náklady na výrobu elektrické energie zhruba na trojnásobek, což činí uhelné elektrárny nekonkurenceschopnými.

Navíc podle zásad taxonomie již banky nepodporují investice do rozvoje těžby uhlí a souvisejících aktivit.

Tyto ekonomické skutečnosti způsobují programový útlum uhelných elektráren. Ustává export elektrické energie (od dob vybudování jaderné elektrárny Temelín činil každoročně cca 14 TWh/rok) a nahrazují je obnovitelné zdroje energie v kombinaci s paroplynovými elektrárnami, nezbytnými pro vykrytí volatility obnovitelných zdrojů.

Poznámka:

Radikální pokles měrné emisivity elektrické energie významně snižuje výrobní i provozní emise CO₂ elektrických vozidel.



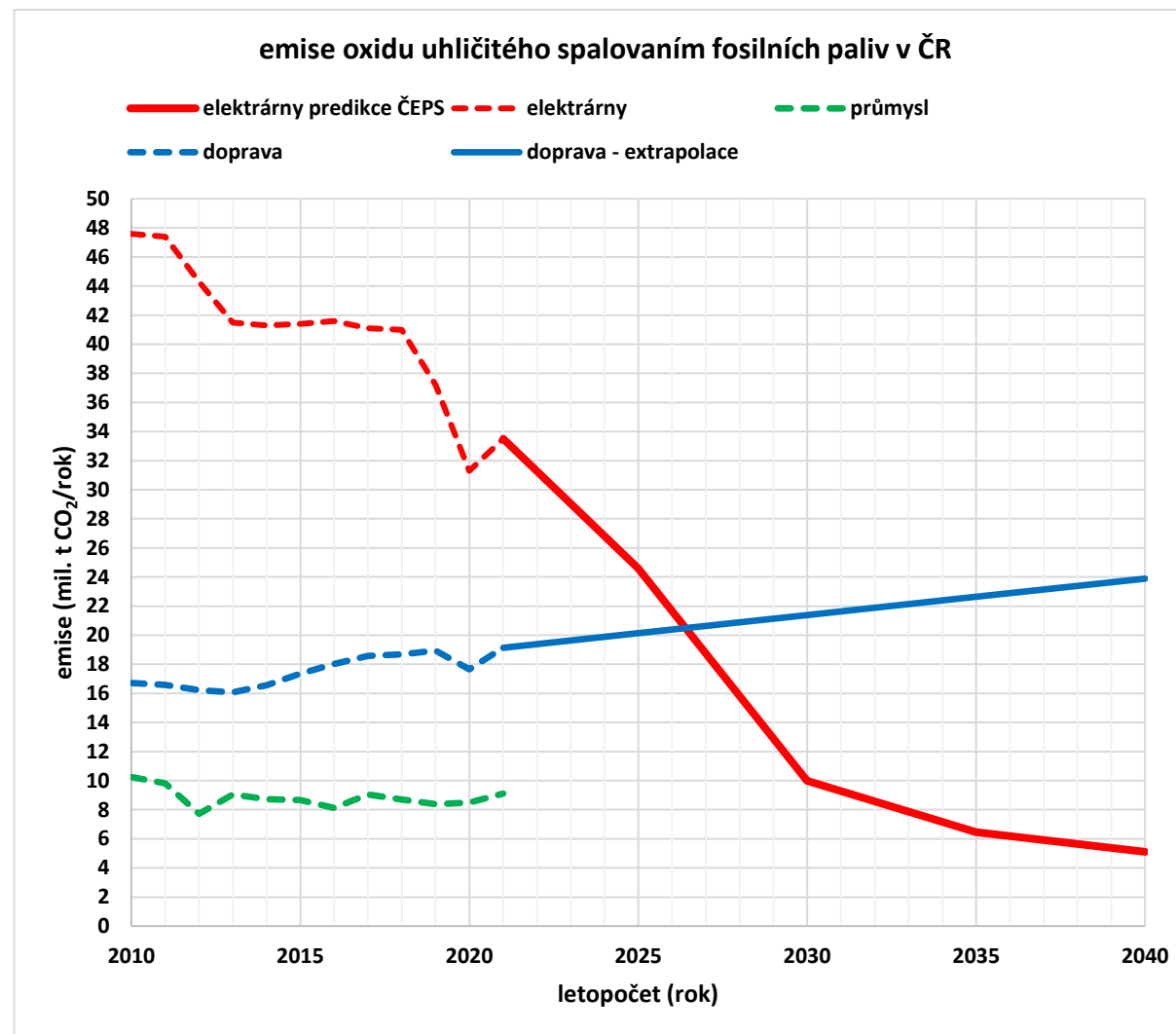
Dekarbonizace hospodářství ČR

Ve všech oborech lidské činnosti je cíleně snižována produkce emisí oxidu uhličitého spalováním fosilních paliv. Dekarbonizaci energetiky výrazně akceleruje ekonomika: platby za emisní povolenky činí výrobu elektrické energie ve fosilních elektrárnách nekonkurenceschopnou vůči bezemisním obnovitelným zdrojům.

Pokud by v dopravě nenastala radikální změna, a nadále by ve velkém rozsahu využívala fosilní paliva, stala by se zhruba v roce 2027 doprava největším producentem oxidu uhličitého v ČR.

To by bylo pro jakékoliv podnikání v ČR a zejména pro strategické investování v ČR velmi nepříjemné. Podle zásad nefinančního účetnictví ESG se bude již od roku 2025 započítávat uhlíková stopa dopravy do uhlíkové stopy organizace podle ISO 14 064 a do uhlíkové stopy produktu podle ISO 14 067.

V prostředí s vysokou uhlíkovou stopou vstupů (elektrické energie a dopravy) nelokalizují investoři své strategické investice a opouštějí je.



Dekarbonizace dopravy

Dekarbonizace dopravy dosud probíhá spíše intuitivně. Osoby a instituce přesvědčené o správnosti odklonu od spalování fosilních paliv se o své vůli orientují na bezemisní udržitelnou mobilitu, jiné osoby a jiné instituce nadále neomezeně využívají fosilní dopravní prostředky.

Tato situace se v zemích EU změní od roku 2027, kde bude již zavedený systém emisního obchodování EU ETS, který zpoplatňuje spalování fosilních paliv v energetice a v průmyslu, doplněn o systém emisního obchodování EU ETS 2, který zpoplatňuje spalování fosilních paliv v ostatních oblastech jejich užití, a to včetně dopravy.

To je pro dopravu zásadní změna, neboť již mnoho desetiletí jsou fosilní paliva dominantním zdrojem energie pro dopravu (v ČR mají importovaná fosilní paliva 93 % podíl na konečné spotřebě energie v dopravě), jejich spotřeba vytrvale roste (v ČR cca o 3 % ročně) a dosahuje značné výše (v ČR již zhruba 80 TWh/rok, což je 1,3 násobek konečné spotřeby elektrické energie v celé ČR).

Tempo každoročního snižování počtu vydávaných emisních povolenek (lineární redukční faktor) bude nastaven tak, aby do roku 2050 poklesla spotřeba fosilních paliv postupně na nulu, tedy v roce 2050 nebudou pro dopravu k dispozici žádná fosilní paliva.

K rozhodnutí přestat od roku 2050 spalovat fosilní paliva dospěli zástupci téměř 200 zemí z celého světa na konferenci v Paříži v roce 2015 na základě tří základních fakt:

- spalování fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn) zásadním způsobem poškozují zemské klima a toto poškození je v měřítku času lidského věku nevratné,
- energii, kterou dávají spalováním fosilní paliva lidstvu za celý rok, přinášejí k Zemi paprsky slunečního záření každých 40 minut,
- končící éra užití fosilních paliv umožnila lidem mimo jiných hodnot též takový rozvoj znalostí a dovedností, že dokáží využívat obnovitelné zdroje energie (přímou či přeměněnou energii slunečního záření) a nahradit jimi spalování fosilních paliv.

Trend dekarbonizace se týká všech oborů lidské činnosti včetně dopravy. Ta patří spolu s průmyslem a s domácnostmi ke třem největším konečným spotřebitelům energie v ČR.

Proces dekarbonizace dopravy

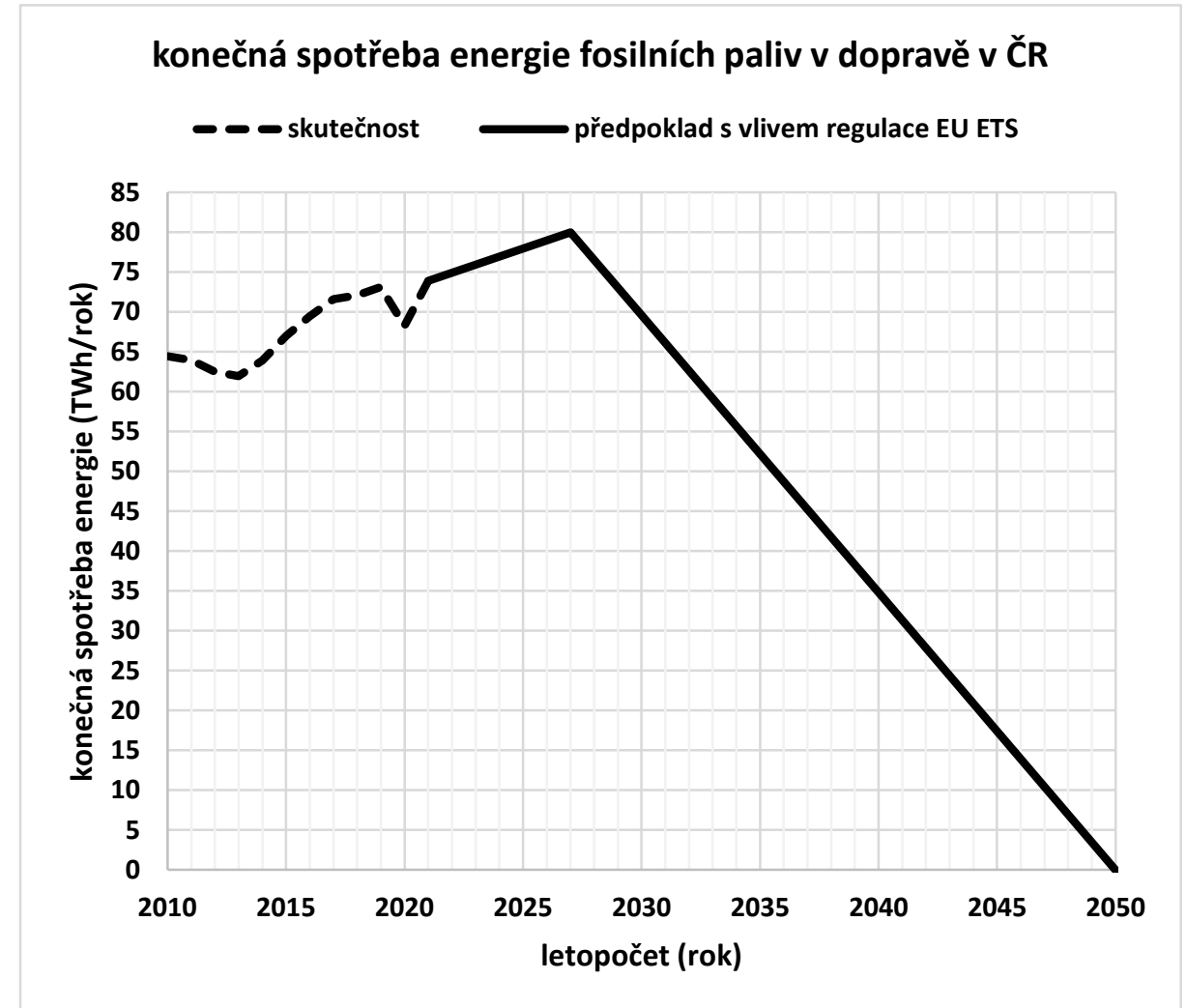
Proces dekarbonizace (odklon od používání fosilních paliv) je v zemích EU řízen systémem emisního obchodování EU ETS, do kterého budou (vytvořením subsystému EU ETS 2) zahrnuta od roku 2027 zahrnuta i fosilní paliva pro dopravu.

Množství na trhu obchodovatelných fosilních paliv je limitováno počtem ročně vydávaných emisních povolenek oxidu uhličitého.

Trajektorie poklesu množství na trhu obchodovatelných fosilních paliv je řízena lineárním redukčním faktorem, který určuje tempo snižování množství ročně vydávaných emisních povolenek oxidu uhličitého. A to cíleně k nule v roce 2050.

Je v zájmu spotřebitelů fosilních paliv se této trajektorii přizpůsobit svými inovačními aktivitami, které vedou k poklesu spotřeby energie cestou zvyšování energetické účinnosti a odklonem od používání fosilních paliv.

V opačném případě by byla elasticita trhu velmi malá a výsledkem by byla vysoká tržní cena emisních povolenek, restriktivně motivující spotřebitele k úspornému chování.



Cíle dekarbonizace dopravy

Základní cíl dekarbonizace dopravy je zřejmý: snížit spotřebu energie pro dopravu a fosilní paliva nahradit udržitelnými bezemisními zdroji.

Avšak cílem není jen environmentální udržitelnost, ale i ekonomická udržitelnost a sociální udržitelnost.

Velice potřebná je ekonomická udržitelnost, která je podmínkou i pro sociální udržitelnost.

Jsou hledána taková řešení bezemisní dopravy (tedy vozidel a infrastrukturního energetického zázemí pro jejich provoz), která jsou z hlediska nákladů životního cyklu (LCC) ekonomicky efektivní:

- rozumná úroveň pořizovacích nákladů,
- nízká úroveň provozních nákladů.

Mění se pohled na externality: v budoucí (bezemisní) dopravě ztrácí smysl hodnocení produkce emisí oxidu uhličitého v podobě měrné přepravní emisivity (kg CO₂/os km, kg CO₂/netto tkm) i hodnocení produkce emisí zdraví škodlivých látek, neboť všechny dopravní systémy budou globálně i lokálně bezemisní.

Základní externalitou bezemisní dopravy budoucnosti se stává, a je přísně sledována, měrná přepravní spotřeba energie (kWh/os km, kWh/netto tkm), neboť k dopravě potřebná energie je vytvářena někde jinde (mimo dopravní cestu) a zatěžuje přírodu.

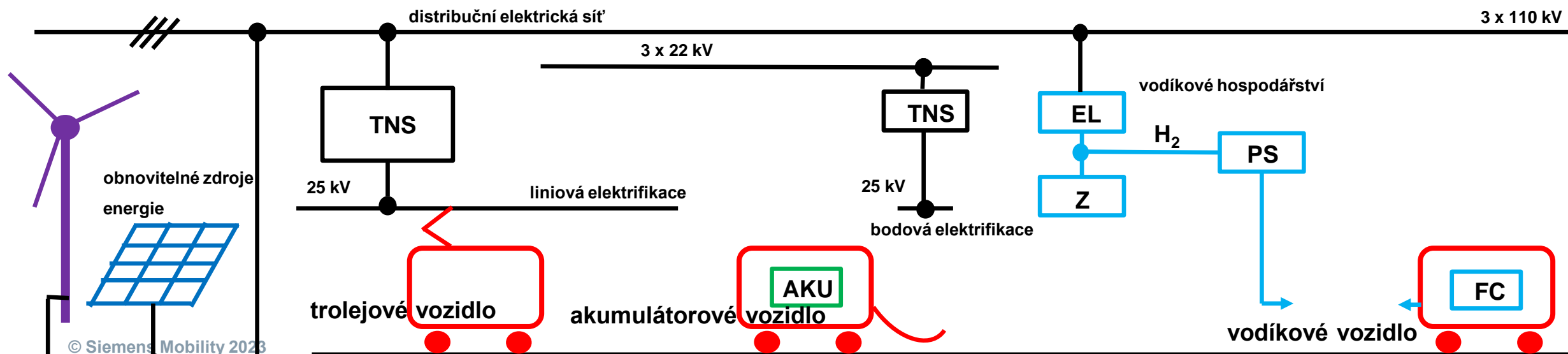
Z fyzikálního principu tepelného cyklu využívají spalovací motory k přeměně na mechanickou práci zhruba jen 30 až 40 % energie paliva, zbylých 60 až 70 % tvoří ztrátové teplo. Spalovací motory neumí rekuperovat brzdovou energii. Spalovací motory produkují zdraví škodlivé emise. Tyto vlastnosti je v éře energetické úspornosti vyřazují z mobilních aplikací.

Nahrazují je bezemisní elektrické trakční pohony s výrazně vyšší energetickou účinností a se schopností rekuperovat energii spádového i zastavovacího brzdění.

V současnosti se elektrická vozba profiluje do tří základních směrů:

- liniové elektrické napájení,
- vozidla se zásobníky energie v podobě elektrochemických akumulátorů (zpravidla lithiových),
- vozidla se zásobníky energie v podobě palivových článků (zpravidla vodíkových).

Ve všech třech případech jde o dopravně energetické systémy tvořené mobilní částí (vozidly) a stacionární částí (infrastrukturou).



Základem bezemisního vozidla je elektrický trakční pohon.

Každý druh bezemisního vozidla ke svému provozu nutně potřebuje infrastrukturní energetické zázemí:

- liniově napájená elektrická vozidla: liniová elektrifikace v celé délce trasy vlaku,
- dvouzdrojová vozidla trolej/akumulátor: blízkost liniové elektrifikace nebo napájecí body,
- vodíková palivočlánková vozidla: plnicí stanice a v jejich těsné blízkosti (minimalizace dopravy vodíku) elektrolyzéry napájené z obnovitelných zdrojů elektrické energie,

Technologická, časová a teritoriální koordinace investic do vozidel a infrastrukturního energetického zázemí pro jejich provoz je nutností.

Ve směrech silných přepravních proudů je nejefektivnějším řešením kolejová doprava s vysokonapětovou liniovou elektrizací 25 kV 50 Hz. Jejimi výhodami jsou vysoká výkonnost, vysoká účinnost, prakticky neohraničená dojezd, univerzálnost, investičně a provozně nejlevnější vozidla. Jde o vývojově vyvrážděný a široce zavedený systém. Investiční náklady jsou cca 10 mil. Kč/km/kolej, to je cca 10 % nákladů na celkovou modernizaci dráhy. Ve městech je z bezpečnostních důvodů používán systém 0,75 kV DC, a to ve třech modifikacích (vrchní trolejové vedení a kolej, přírodní kolejnice a kolej a dvoustopé vrchní trolejové vedení nad vozovkou).

Pokrok v oblasti elektrochemických akumulátorů (lithiová technologie) přináší jejich hromadné rozšíření v dopravních prostředcích. Ve srovnání s tradičními olovenými akumulátory (25 kWh/t) se vyznačují vyšší účinností, bezúdržbovostí a vyšší měrnou energií, tedy vyšším poměrem mezi dojezdem a podílem hmotnosti akumulátoru na celkové hmotnosti vozidla, plavidla či letadla:

- cca 100 kWh/t u lithiových článků typu HP (vysoký výkon) pro drážní aplikace (robustní, životnost desítky tisíc cyklů), například LTO,
- cca 200 kWh/t u lithiových článků typu HE (vysoká energie) pro automobily (životnost tisíce cyklů), například NMC.

Lithiové akumulátory jsou aplikovány jak u ryze akumulátorových vozidel, tak u dvouzdrojových vozidel trolej/akumulátor.

Pro využití přebytků jinak nepotřebné elektrické energie z volatelných zdrojů jsou vyvíjeny vodíkové dopravně energetické systémy.

Trakční a energetické vlastnosti bezemisních vozidel

- vozidlo s liniovým elektrickým napájením (elektrická vozba závislá): nevyšší účinnost, prakticky neomezená vytrvalost,
- vozidlo napájené sekundárním elektrochemickým (lithiovým) akumulátorem: mírně nižší účinnost (vliv akumulace v lithiovém akumulátoru), omezená časová vytrvalost (limitovaná energií lithiové akumulátorové baterie),
- vozidlo napájené primárním palivovým (vodíkovým) článkem s vyrovnávacím lithiovým akumulátorem: nízká účinnost (vliv přeměny elektrické energie na vodík a zpět), velmi omezená časová vytrvalost plné výkonnosti (limitovaná energií lithiové akumulátorové baterie), omezená dlouhodobá výkonnost (limitovaná výkonností palivového článku), omezená časová vytrvalost snížené výkonnosti (limitovaná energií uloženou v zásobníku vodíku).

elektrické vozidlo:

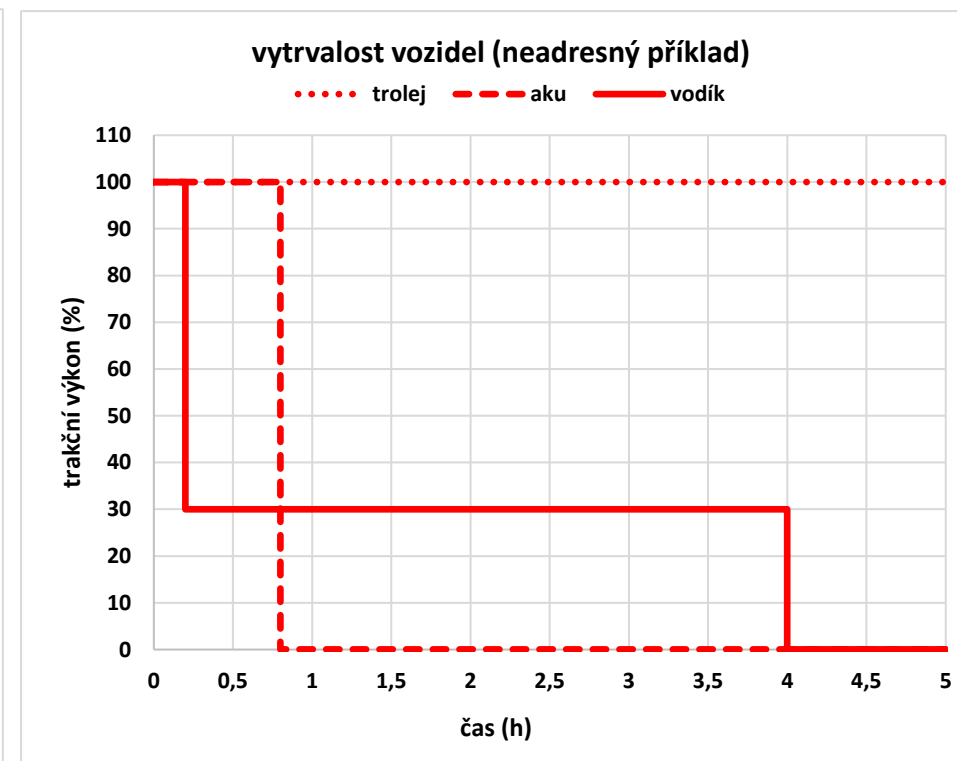
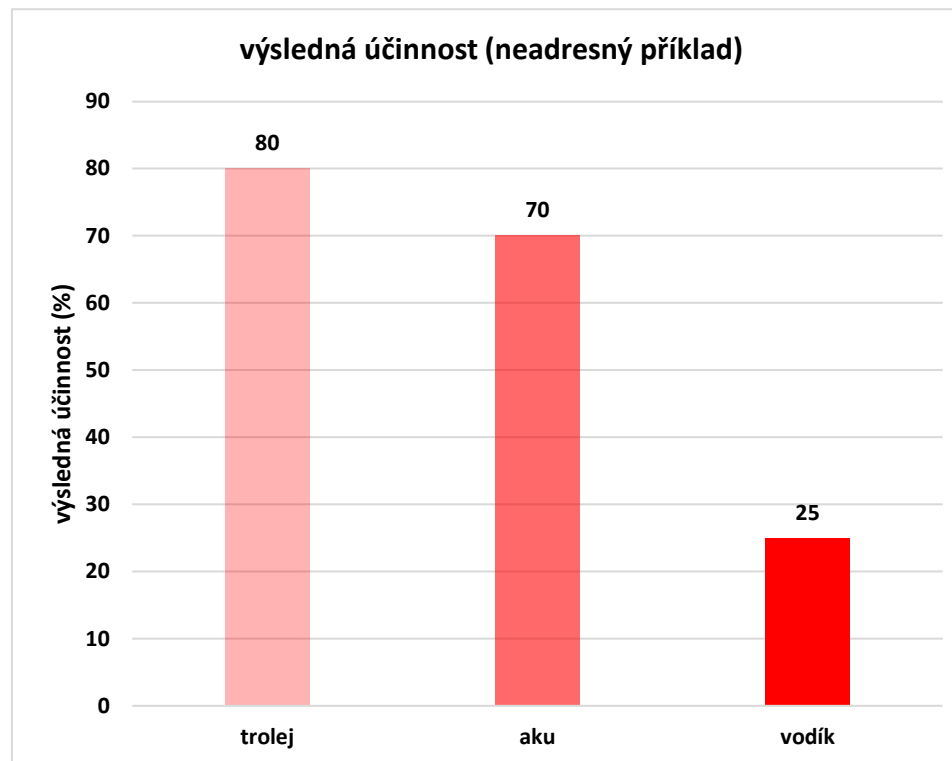
- trakční výkon

akumulátorové vozidlo:

- trakční výkon,
- energie akumulátoru

vodíkové vozidlo:

- trakční výkon,
- energie vyrovn. akumulátoru,
- výkon palivového článku,
- energie zásob vodíku



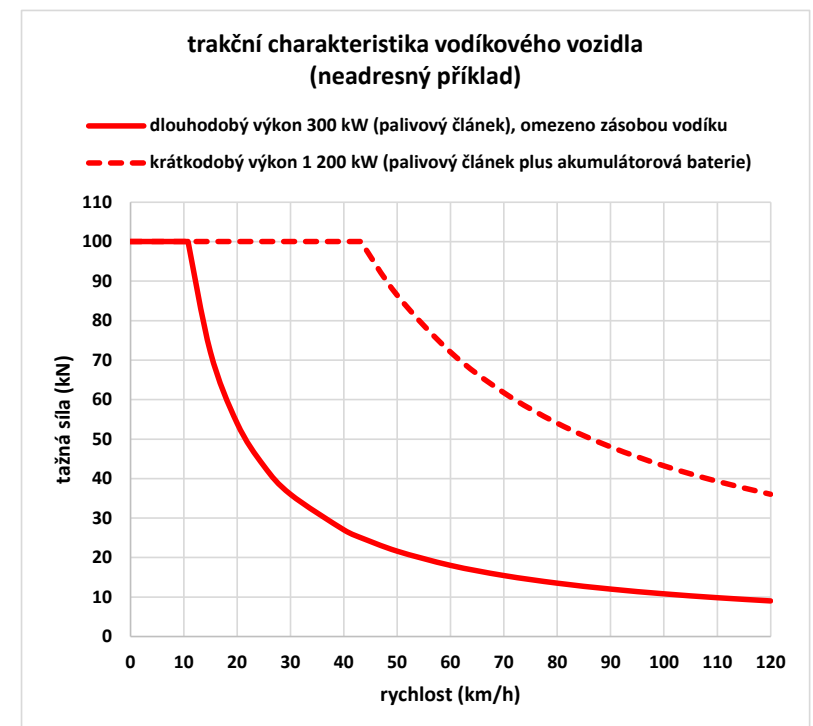
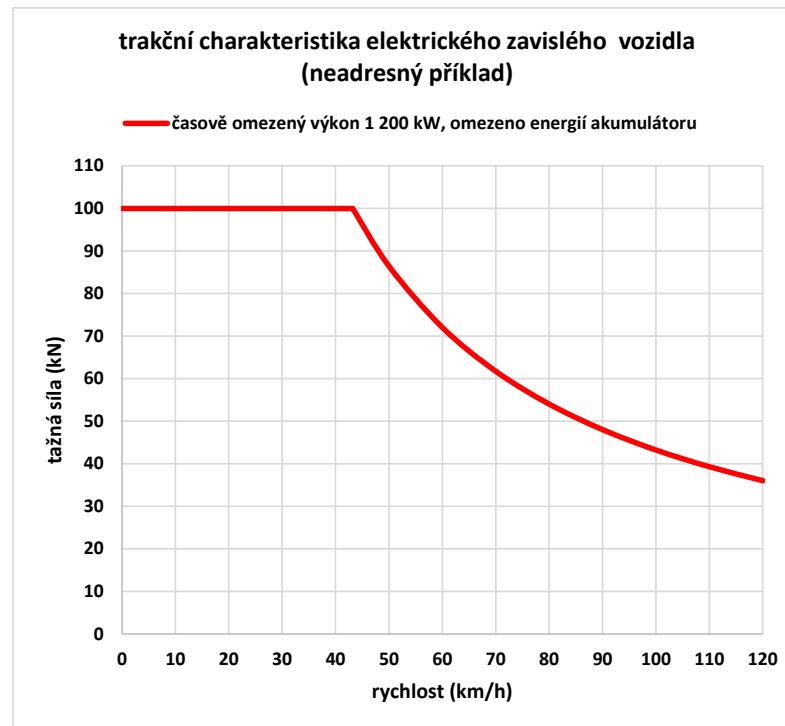
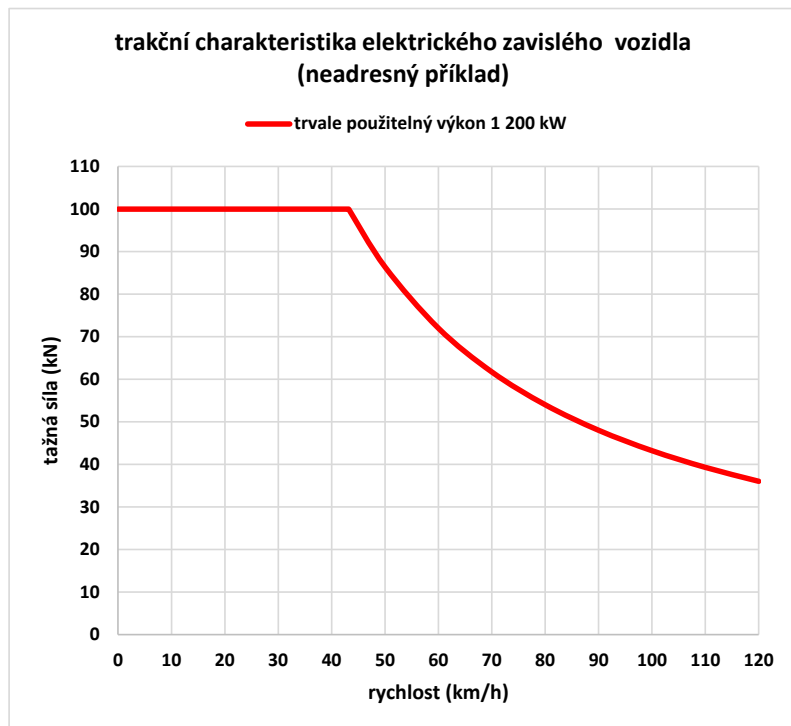
Vytrvalost trakční výkonnosti

Vozidlo s liniovým elektrickým napájením (elektrická vozba závislá): vytrvalost trakční výkonnosti není omezena vozidlem, limitem může být jen délka elektrifikované trati.

Vozidlo napájené sekundárním elektrochemickým (lithiovým) akumulátorem: limitem dojezdu je energie (hmotnost) akumulátoru.

Vozidlo napájené primárním palivovým (vodíkovým) článkem a vyrovnávacím akumulátorem: limitem dojezdu je velikost (hmotnost) zásob vodíku. Limitem plné trakční výkonnosti je energie (hmotnost) vyrovnávacího akumulátoru (zpravidla několik minut).

=> vodíková technologie je vhodná pro dynamickou zastávkovou (regionální) dopravu (plus efekt rekuperace), nikoliv pro dlouhodobou jízdu ustálenou rychlostí (dálková osobní doprava s velkou vzdáleností míst zastavení, nákladní vlaky).

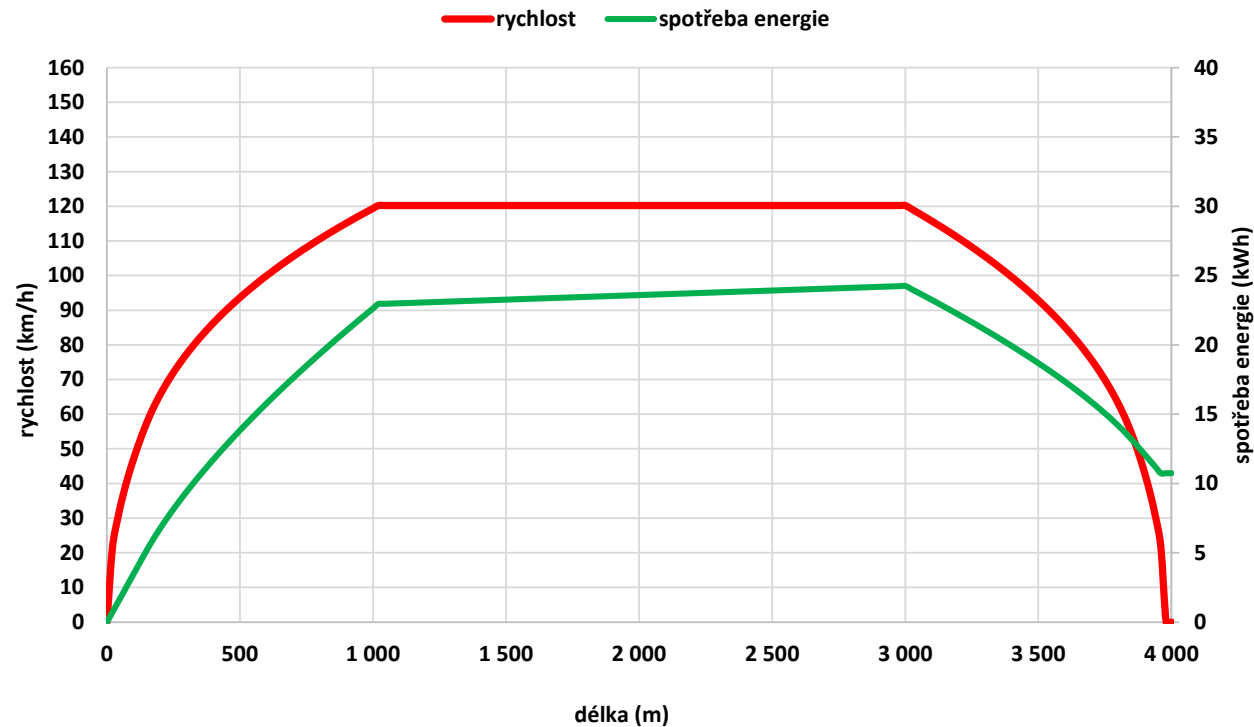


Vhodná aplikace vodíkové technologie v dopravě: zastávkový režim

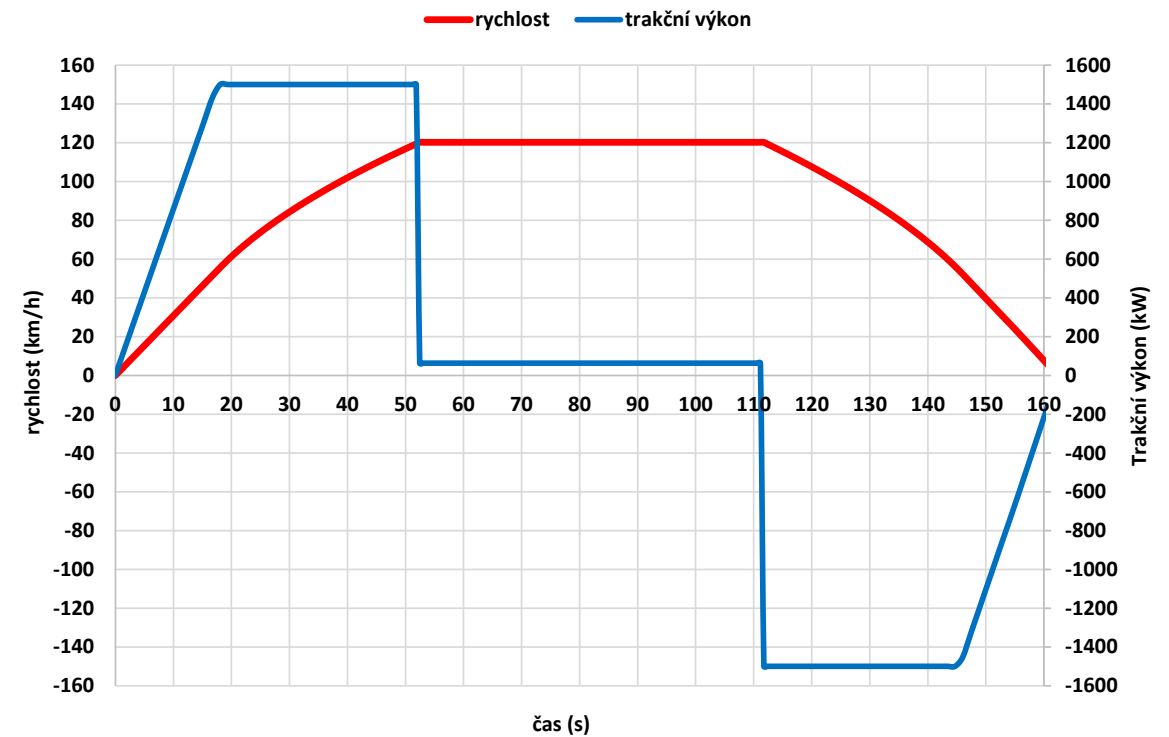


- krátká expozice plného výkonu, nízký střední výkon (postačuje nízký výkon palivového článku),
- významný efekt častého rekuperačního brzdění.

Dráhový tachogram jednoduše jízdy, rovina (ilustrativní obrázek, smyšlené vozidlo)



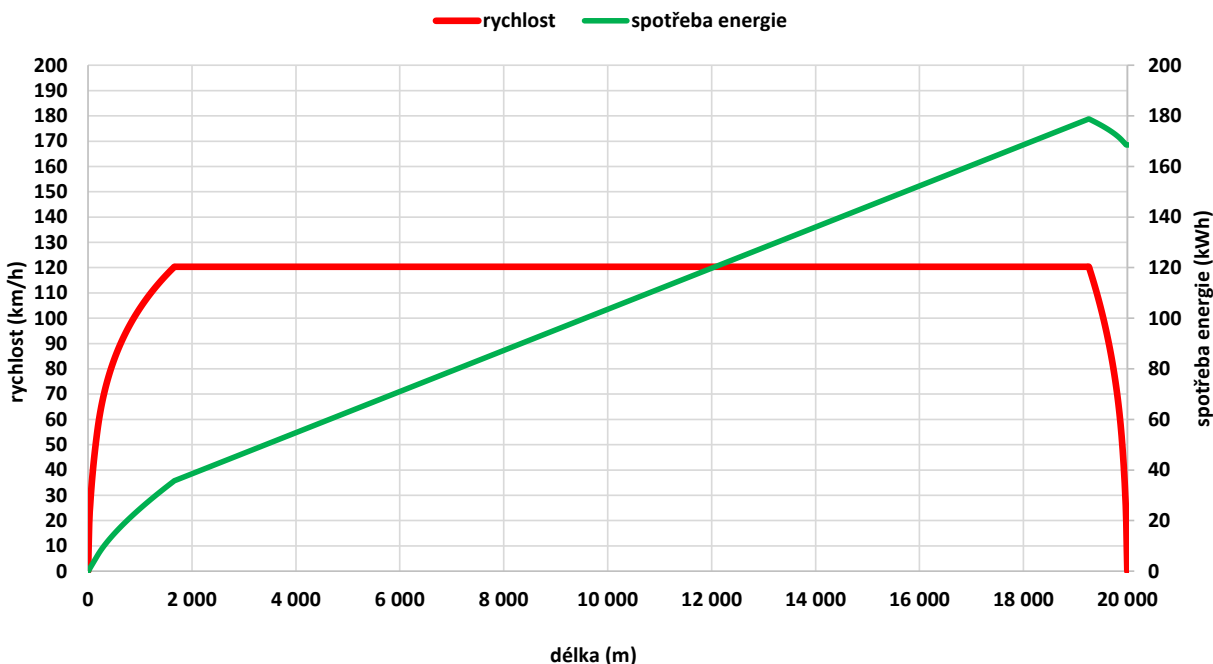
Časový tachogram jednoduše jízdy, rovina (ilustrativní obrázek, smyšlené vozidlo)



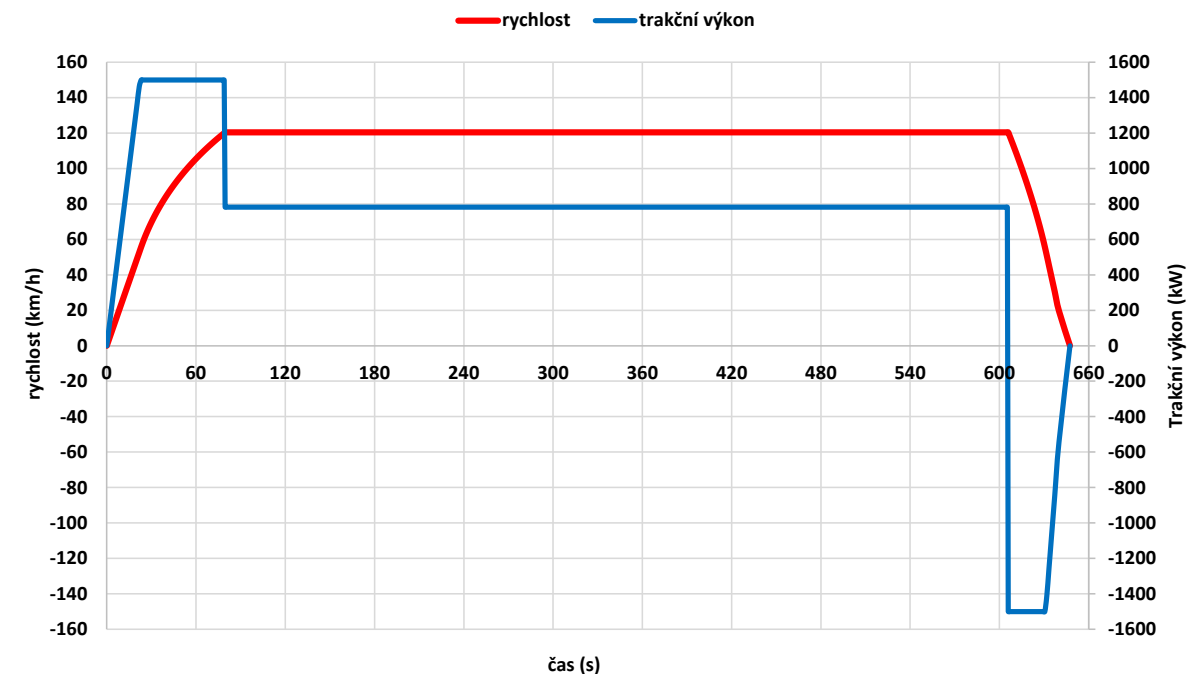
Nevhodná aplikace vodíkové technologie v dopravě: trvalá jízda do stoupání či vysokou rychlostí

- dlouhodobá expozice plného výkonu, vysoký střední výkon (je nutný vysoký výkon palivového článku – drahé vozidlo),
- nevýznamný efekt občasného rekuperačního brzdění (vysoká spotřeba energie)

Dráhový tachogram jednoduché jízdy, stoupání 10 ‰ (ilustrativní obrázek, smyšlené vozidlo)



Časový tachogram jednoduché jízdy, stoupání 10 ‰ (ilustrativní obrázek, smyšlené vozidlo)



Je objektivní fyzikální realitou, že dopravní systémy (vozidla a infrastrukturní energetické zázemí pro jejich provoz), využívající mobilní zásobníky energie, nejsou tak univerzálně použitelná, jako dopravní systémy s liniovým elektrickým napájením.

Do železniční dopravy navíc přicházejí vozidla se zásobníky energie v době, kdy se liniové elektrické napájení po 140 letech kontinuálního vývoje a teritoriálního rozšiřování stalo nedílnou součástí interoperabilní železnice (subsystém energie) a není investičně náročné (bez trakční napájecí stanice cca 10 mil. Kč/kolej/km, s trakční napájecí stanice cca 20 mil. Kč/kolej/km), což je cca 10 % celkových nákladů na modernizaci dráhy. Liniové elektrické napájení 25 kV 50 Hz je univerzálně použitelné všemi druhy vlakové dopravy (nákladní, osobní dálková, osobní regionální), které společně vyžívají jednotnou energetickou infrastrukturu 25 kV 50 Hz i pro nabíjení akumulátorových vozidel.

Vozidla s elektrochemickými akumulátory na bázi sekundárních článků (lithiových) jsou limitována omezeným dojezdem (prakticky kolem 100 km). Ve vazbě na dominantní pozici liniové elektrizace jsou řešena jako dvouzdrojová trolej/akumulátor a využívají již vybudovaná pevná trakční zařízení liniově elektrizovaných železnic 25 kV ke statickému (za stání v liniově elektrizované železniční stanici) či dynamickému (v průběhu jízdy po liniově elektrizované železniční trati) nabíjení, které je vysoce výkonné a levné. Nacházejí vhodné pole aplikace v regionální osobní dopravě na vedlejších tratích a v nákladní dopravě na posunu, jejich předností je snadná přestavba na čistě trolejová (ve vazbě na postupující liniovou elektrizaci).

Vodíková palivočlánková vozidla jsou z ekonomických důvodů řešena s palivovými články o nízkém výkonu, což limituje jejich použitelnost jen do provozních aplikací s cyklickým pracovním režimem (zastávkový způsob jízdy), tedy do osobní regionální dopravy. Nehodí se do nákladní dopravy a do dálkové osobní dopravy, neboť ty vyžadují dlouhodobou práci plným výkonem.

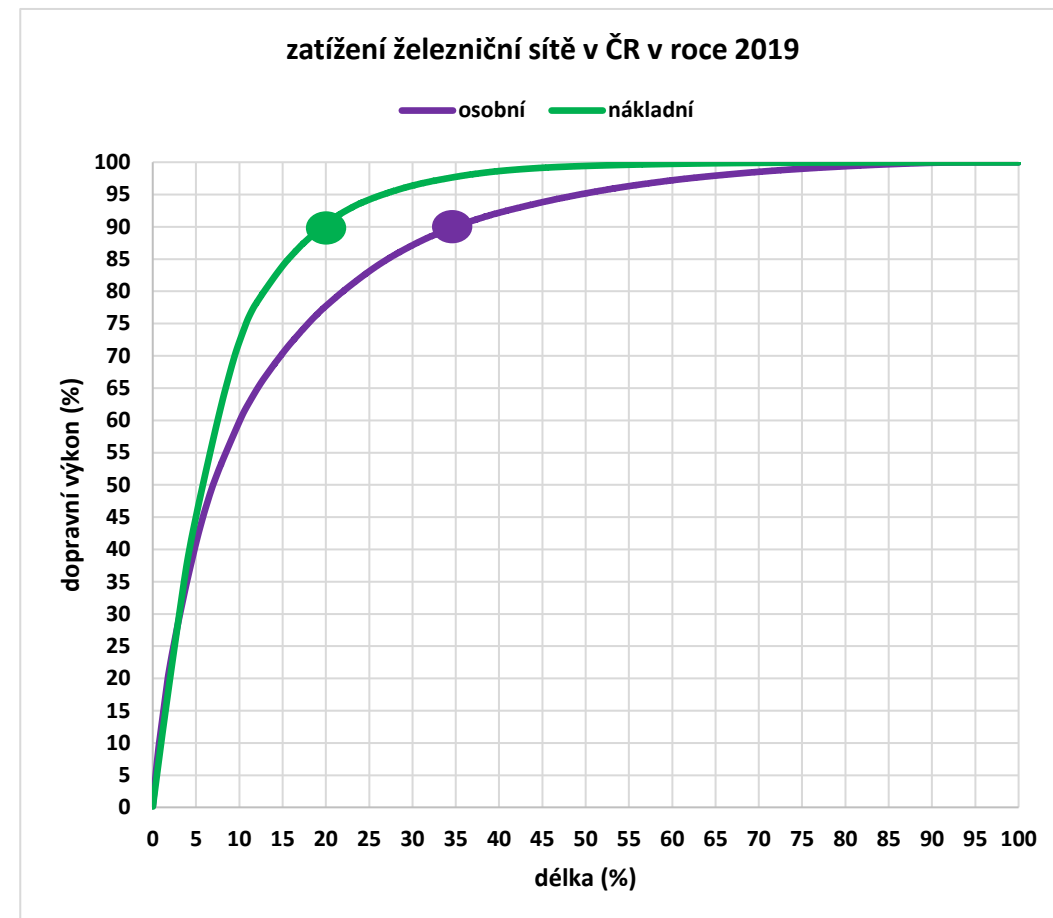
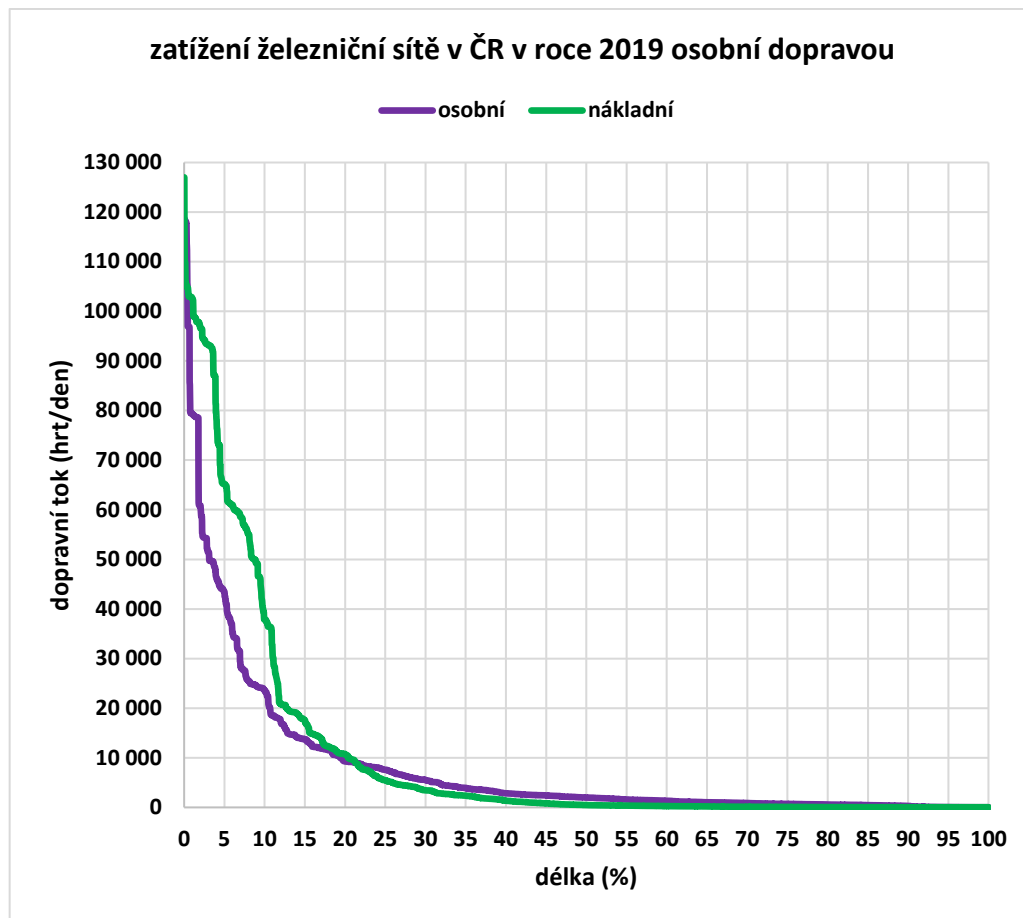
Nemožnost průběžného doplňování zásob energie v době pracovní směny je kompenzována jejich delším dojezdem (do cca 1 000 km).

Zatížení železniční sítě v ČR



Železniční síť je v ČR zatížena velmi nerovnoměrně. Menší část železniční sítě je dopravním tokem velmi silně zatížena, větší část železniční sítě je dopravním tokem velmi slabě zatížena:

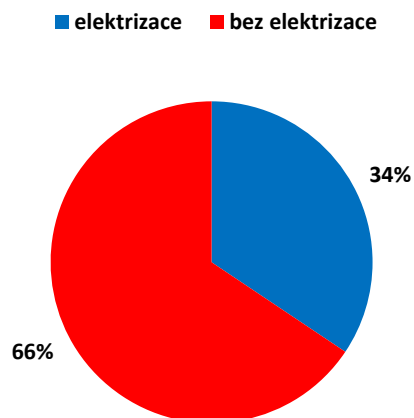
- 90 % osobních dopravních výkonů je soustředěno na 35 % délky sítě,
- 90 % nákladních dopravních výkonů je soustředěno na 20 % délky sítě.



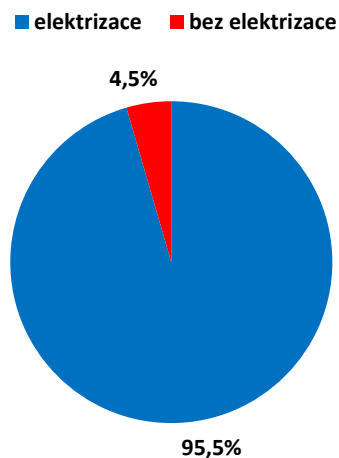
Prakticky veškeré (95,5 %) dopravní výkony železniční nákladní dopravy jsou v ČR soustředěny jen na liniově elektrizované železniční tratě, tedy na 34 % délky železniční sítě.

Zbývajících 66 % délky železniční sítě, tratě bez liniové elektrizace, zajišťuje jen 4,5 % dopravních výkonů železniční nákladní dopravy, tedy prakticky jsou bez nákladní dopravy (dopravní tok nákladní dopravy je na nich 40 krát nižší, než na liniově elektrizovaných železničních tratích).

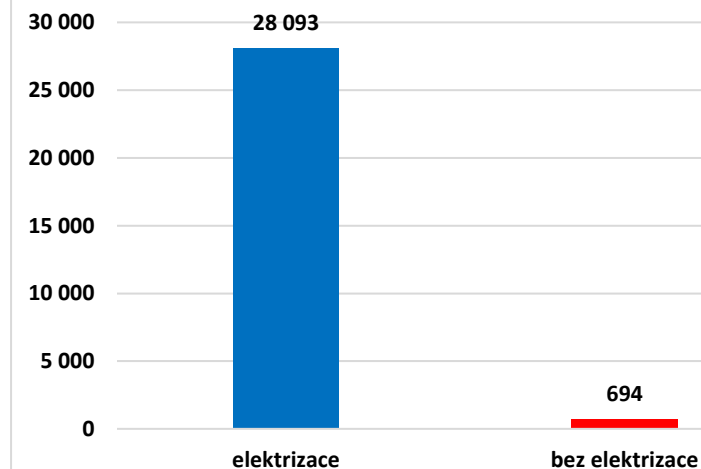
podíl tratí na délce sítě železnic v ČR v roce 2019



podíl tratí na dopravních výkonech železniční nákladní dopravy v ČR v roce 2019



střední dopravní tok železniční nákladní dopravy v ČR v roce 2019 (hrt/den)

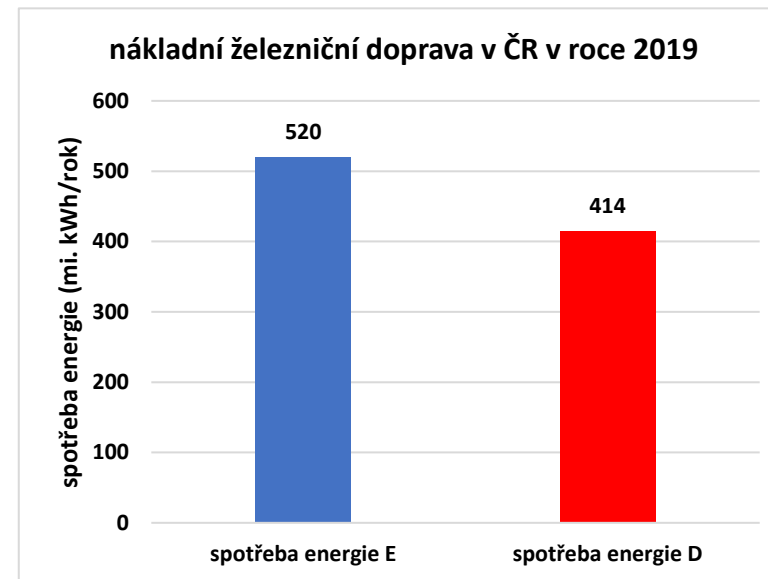
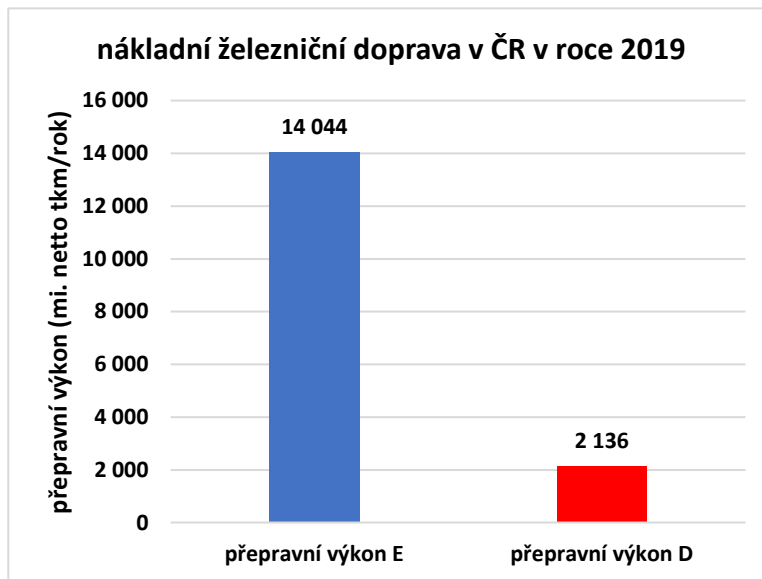


Plnohodnotně využívanou železniční síť tvoří liniově elektrizované tratě. Tratě bez liniové elektrizace jsou pro nákladní dopravu využívány jen minimálně, nejsou plnohodnotnou součástí síťově fungujícího systému. Důvody: vysoké provozní náklady, nízká produktivita vozidel a personálu (nutnost výměny lokomotiv).

Energetická náročnost nákladní železniční dopravy

Naftová vozba zajišťuje v ČR jen 13 % nákladní dopravy.

Z důvodu nízké účinnosti spalovacích motorů a chybějící rekuperace brzdové energie se však na spotřebě energie podílí 44 %.



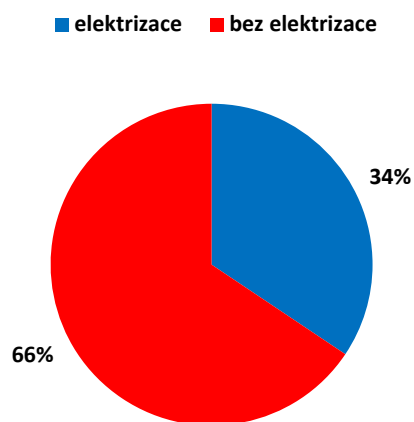
Prioritní zájem nákladních dopravců na rozvoj liniové elektrizace je z energetických i ekonomických důvodů logický.

Zatížení železničních tratí v ČR dopravním tokem osobní dopravy

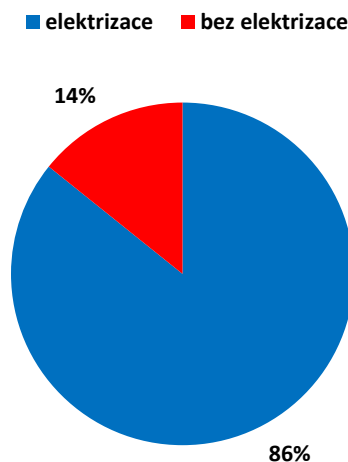
Rozhodující (86 %) dopravní výkony železniční osobní dopravy jsou v ČR soustředěny na liniově elektrizované železniční tratě, tedy na 34 % délky železniční sítě.

Zbývajících 66 % délky železniční sítě, tratě bez liniové elektrizace, zajišťuje jen 14 % dopravních výkonů železniční osobní dopravy, převážně jen regionální (dopravní tok osobní dopravy je na nich 11,5 krát nižší, než na liniově elektrizovaných železničních tratích).

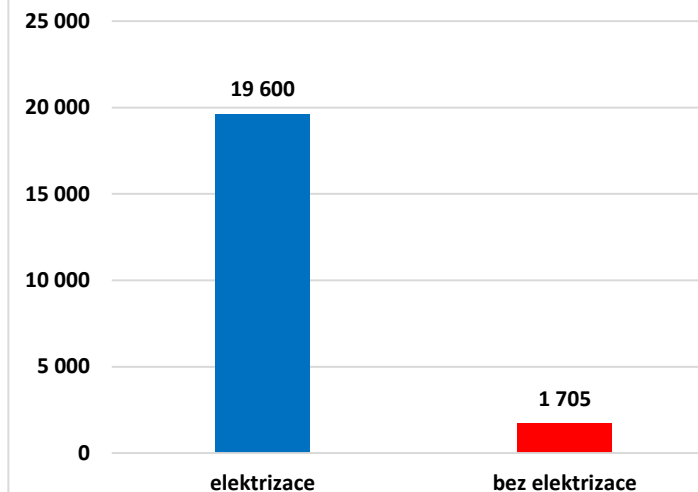
podíl tratí na délce sítě železnic v ČR v roce 2019



podíl tratí na dopravních výkonech železniční osobní dopravy v ČR v roce 2019



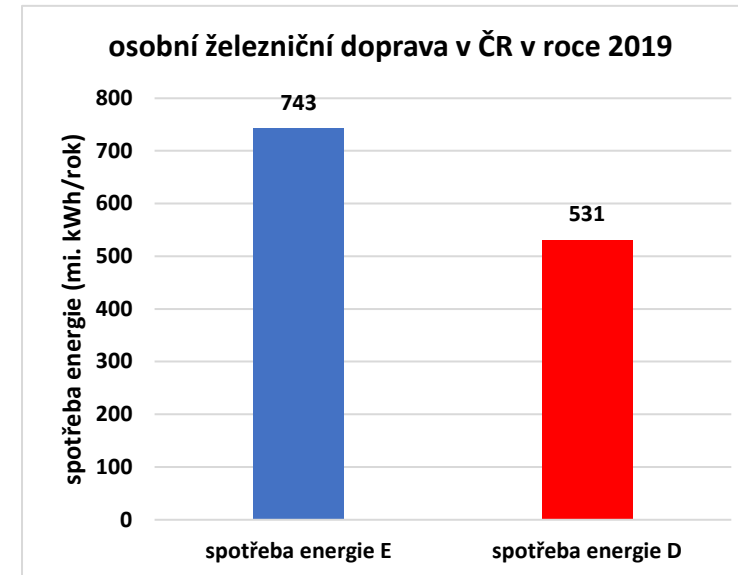
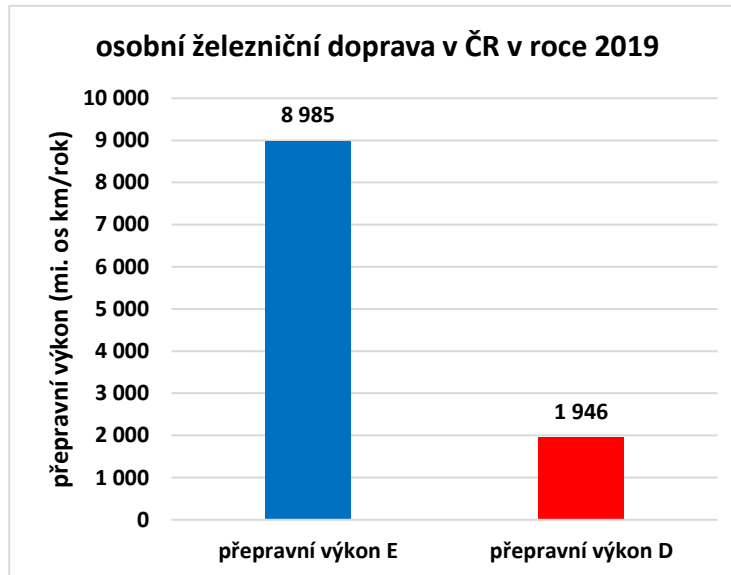
střední dopravní tok železniční osobní dopravy v ČR v roce 2019 (hrt/den)



Plnohodnotně využívanou železniční sítí tvoří liniově elektrizované tratě. Tratě bez liniové elektrizace jsou využívány jen pro regionální osobní dopravu, dálková osobní doprava na nich zpravidla není, nejsou plnohodnotnou součástí síťově fungujícího systému. Důvody: nízká rychlost, vysoké provozní náklady, nízká produktivita vozidel a personálu (nutnost výměny lokomotiv).

Naftová vozba zajišťuje v ČR jen 18 % osobní dopravy.

Z důvodu nízké účinnosti spalovacích motorů a chybějící rekuperace brzdové energie se však na spotřebě energie podílí 42 %.



Prioritní zájem osobních dopravců na rozvoj liniové elektrizace je z energetických i ekonomických důvodů logický.

Vodíková palivočláňková vozidla přicházejí do praktické aplikace o zhruba 140 let později než elektrická vozidla s liniovým napájením (Werner Siemens 1879), respektive o zhruba 120 let později než vozidla s elektrochemickými akumulátory (sekundárními články).

Logicky proto jsou technická řešení, vlastnosti a parametry vodíkových vozidel méně známá.

Motivem ke vzniku vodíkových palivočláňkových vozidel je vysoká měrná energie vodíku, charakterizovaná jeho výhřevností 33 200 kWh/t, která je téměř třikrát vyšší, než výhřevnost nafty (12 000 kWh/t). Vodík je však za atmosférického tlaku velmi lehký, 1 kg vodíku zaujímá prostor 11 m³ (měrná hmotnost vodíku je 0,09 kg/m³).

Proto je vodík pro mobilní aplikace stlačován (typicky na 350 bar). Ocelové zásobníky jsou cca 50krát těžší, než v nich obsažený vodík, což snižuje měrnou energii vodíku brutto na cca 650 kWh/t. Kompozitové zásobníky jsou cca 20krát těžší, než v nich obsažený vodík, což snižuje měrnou energii vodíku brutto na cca 1 580 kWh/t.

Po přeměně v palivovém článku s účinností 60 % na elektrickou energii je výsledná měrná energie cca 390 kWh/t při použití ocelových zásobníků a cca 950 kWh/t při použití kompozitových zásobníků.

To jsou, zejména při využití kompozitových zásobníků, ve srovnání se současnými komerčně využívanými lithiovými akumulátory (HE: 200 kWh/t, HP 100 kWh/t), násobně vyšší hodnoty. To má pochopitelně velmi příznivý dopad na poměr mezi dojezdem a podílem hmotnosti akumulátoru na celkové hmotnosti dopravního prostředku (Kummlerův vztah).

Avšak jak ukazuje příklad aplikace vodíkové technologie v osobních automobilech, který z komerčního hlediska v zásadě skončil dříve než začal, i některé další projekty, není aplikace vodíkové technologie v dopravních prostředcích jednoduchým tématem.

Vyžaduje velice uvážlivý přístup. Jde především o systémové řešení sledující širší téma výroby, přenosu a spotřeby elektrické energie, její přeměny na vodík, jeho skladování, distribuci až po koncepci vozidla, jeho technické řešení i jeho provozní aplikaci.

K tomu potřebné znalosti o vlastnostech vodíku a palivových článků nejsou o odborníků na dopravu a dopravní prostředky obvyklé. Podobně nejsou u odborníků na práci s technickými plyny obvyklé znalosti o elektroenergetice a dopravě. Součinnost napříč obory a vzdělávání jsou nutností.

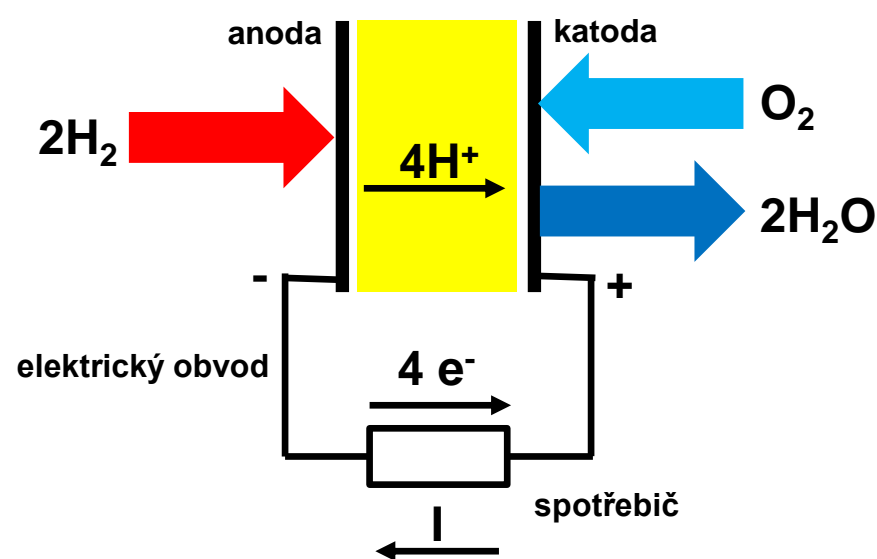
Vlastnosti vodíku:

- vysoké spalné teplo (39,4 kWh/kg), vysoká výhřevnost (33,2 kWh/kg), kondenzační ztráta 16 %,
- vodík je velmi lehký (měrná hmotnost 0,09 kg/m³, 1 kg vodíku má za normálního tlaku objem 11 000 litrů), proto je potřebné jej pro skladování silně stlačován,
- vodík nemá vlastnosti ideálního plynu ($p \cdot V = R \cdot T$), jeho kompresivita klesá, při tlaku 350 bar má 1 kg vodíku objem 42 litrů (ne 32),
- vodík má záporný Joule-Thompsonův koeficient, při expanzi se ohřívá a je nutno jej účinně chladit,
- ocelová válcová nádoba pro uskladnění 1 kg vodíku má (nezávisle na jmenovitém přetlaku) hmotnost cca 50 kg,
- kompozitová válcová nádoba pro uskladnění 1 kg vodíku má (nezávisle na jmenovitém přetlaku) hmotnost cca 20 kg,
- vodík je silně reaktivní, v přírodě není možno jej těžit, je nutno jej vyrábět:
 - a) z fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn) – neperspektivní, nízká čistota plynu (98,5 % až 99,0 %), nevhodné pro FC,
 - b) z elektřiny elektrolýzou (účinnost moderních elektrolyzérů cca 65 %), vysoká čistota plynu (až 99,999 %), vhodné pro FC,
- ve srovnání s metanem (13,9 kWh/kg . 0,68 kg/m³ = 9,45 kWh/m³) má vodík (33,2 kWh/kg . 0,09 kg/m³ = 3 kWh/m³) zhruba jen třetinovou objemovou výhřevnost. V zásobníku téže velikosti je ve vodíku uložena jen jedna třetina energie metanu,
- pro vodík (na rozdíl o metanu) není vybudována distribuční síť, spotřebiče a úložiště,
- vodík se obtížně dopravuje běžným potrubím a obtížně skladuje v běžných porézních zásobnících (jeho malá molekula uniká i velmi drobnými netěsnostmi), jediný skalní zásobník Háje je malý (z celku ČR 37 TWh metanu má jen 0,7 TWh metanu, tedy 0,2 TWh vodíku),
- vodík se obtížně a draze transportuje. Kamion o hmotnosti několika desítek t veze jen několik set kg vodíku a zpět jede prázdný. Vykonaná dopravní práce (brutto tkm) a jí úměrná spotřeba energie je cca 200 až 300krát větší než přepraví práce (netto tkm),
- nebezpečí výbuchu.

Vozidla s vodíkovými palivovými články

Vodíkový palivový článek pracuje na obráceném principu elektrolýzy, pomocí protonové membrány rozděljuje atomy vodíku na dvě části, na energii na hmotu:

- elektrony z vodíku odcházejí konat práci do elektrického obvodu,
- protony vodíku se slučují se vzdušným kyslíkem a vytvářejí vodu, respektive vodní páru.



Pro docílení potřebné životnosti palivového článku je nutné používat velmi čistý vodík, ISO 14 867-2 předepisuje čistotu 99,97 %. Vodík z běžné chemické výroby (parní reforming metanu či destilace ropných zbytků) s čistotou 98,5 až 99,0 % nelze pro palivové články použít, mají 30 až 50 krát více nečistot. Navíc jde o fosilní zdroje.

Pro palivové články se výborně hodí vodík získávaný elektrolýzou, zejména z moderních PEM elektrolýzérů, které dosahují čistoty vodíku 99,999 %.

Důležitým tématem je doprava vodíku. Vodík je velmi lehký, 1 kg vodíku má při atmosférickém tlaku objem 11 m^3 . Proto je stlačován, při přetlaku 35 MPa má 1 kg vodíku objem 42 litrů, příslušná ocelová nádoba má hmotnost 50 kg (netto 1 kg, brutto 51 kg). Proto je vhodné omezit transport vodíku na minimum, ideální je výroba elektrolýzou v těsné blízkosti použití vodíku.

Ve vozidlech jsou pro snížení hmotnosti k uskladnění vodíku používány lehčí kompozitové nádoby (netto 1 kg, brutto 22 kg). Výsledná měrná energie je tak při výhřevnosti vodíku 33 kWh/kg a při účinnosti palivového článku 60 % kolem 900 kWh/t, což je vyšší hodnota než u současných lithiových akumulátorů (HE: 200 kWh/t, HP: 100 kWh/t). Z této skutečnosti plyne zásadní výhoda vodíkových vozidel: násobně delší dojezd, než jaký dosahují vozidla s lithiovými akumulátory.

Využití vodíku k přeměně na elektřinu

Princip: slučování vodíku se vzdušným kyslíkem – protony prostupují membránou, elektrony protékají elektrickým obvodem

Nevýhody :

- nízká účinnost (60 %),
- drahé (platinová konstrukce),
- vyžaduje velmi čistý vodík 99,97 % viz ISO 14687-2 (ne z běžné chemické výroby),
- nízký výkon,
- obtížná regulace (optimálním režimem je trvalá práce stálým výkonem),
- neumí rekuperovat brzdovou energii.

⇒ vyžaduje vyrovnávací akumulátor (princip hybridního automobilu).

Řetězec elektrolýza – palivový článek lze vnímat jako akumulátor s otevřeným cyklem

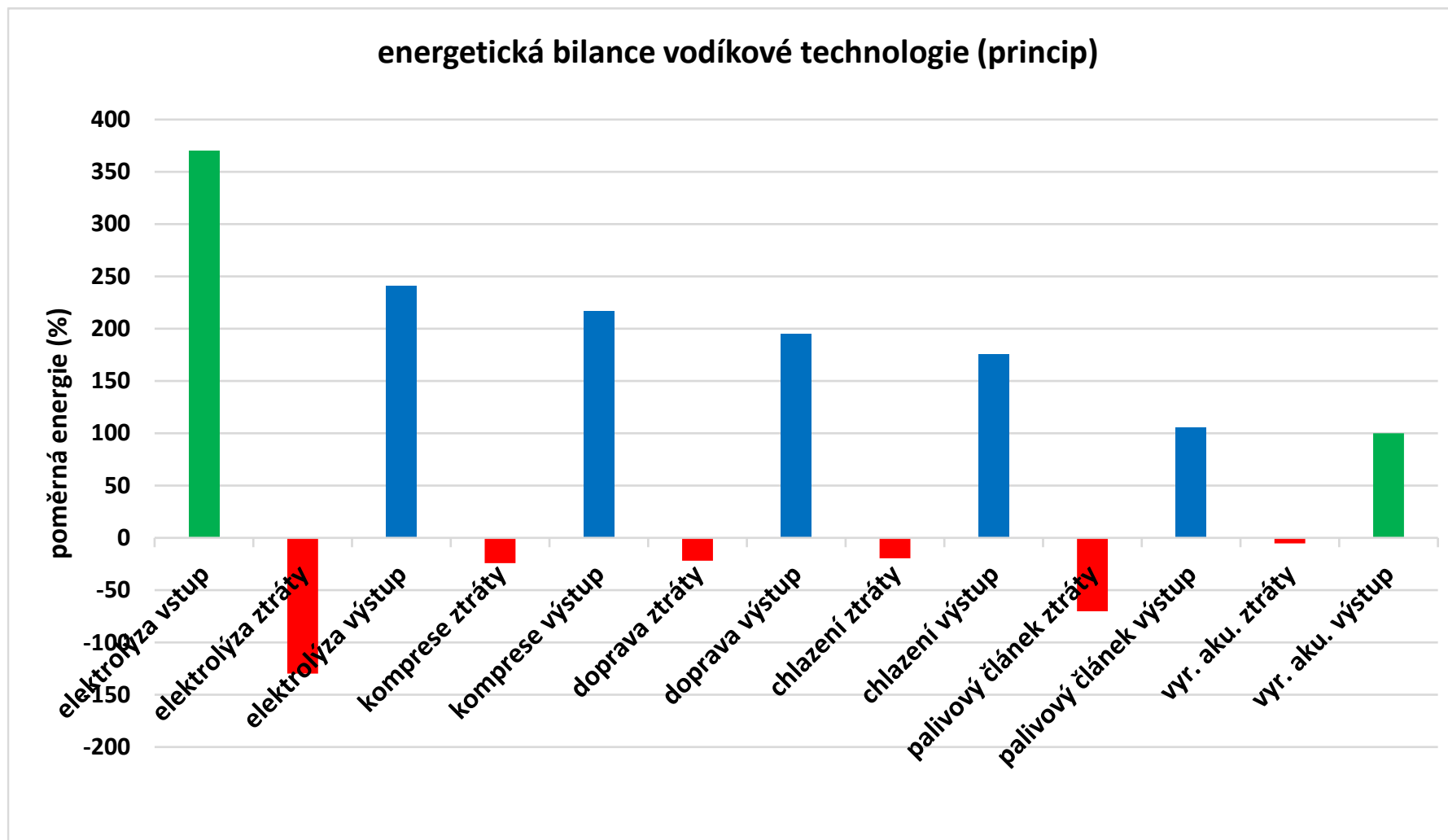
Nevýhodou je nízká výsledná účinnost (cca 30 %) celého řetězce energetických přeměn, ve kterém se kromě elektrolyzáru a palivového článku uplatňuje ještě i komprese, chlazení při expanzi a vyrovnávací akumulace :

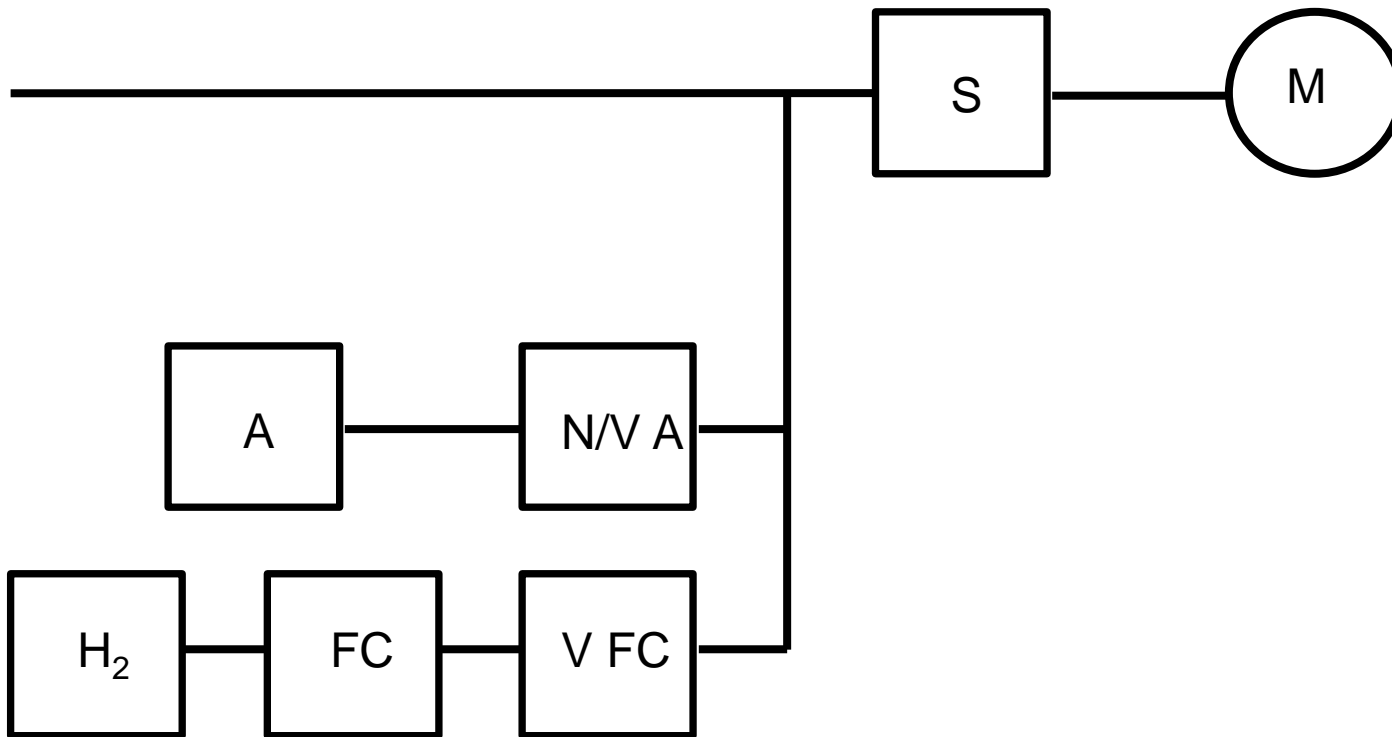
$$\eta = \eta_E \cdot \eta_K \cdot \eta_{Ch} \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_{VA} = 0,65 \cdot 0,93 \cdot 0,93 \cdot 0,60 \cdot 0,90 = 0,30$$

Tato hodnota ještě může být dále snížena spotřebou energie na dopravu vodíku mezi místem výroby vodíku a místem užití vodíku.

⇒ použití vodíkového cyklu zvyšuje spotřebu elektrické energie na 3 až 4 násobek.

Aplikace vodíkové technologie má proto logiku jen při využití jinak nepotřebných přebytků elektřiny z volatilních obnovitelných zdrojů elektrické energie, které jsou průvodním znakem přechodu z fosilních na obnovitelné zdroje.





Palivové články optimálně pracují stálým výkonem. Proto jsou na vozidle (podobně spalovací motor s generátorem u hybridních pohonů) doplněny zásobníkem energie v podobě lithiového akumulátoru.

Akumulátor slouží k vyrovnání energetické bilance vozidla včetně ukládání rekuperované energie při elektrodynamickém brzdění.

Vodík není zdrojem energie, vodík je nositelem energie. Ukládání elektrické energie do vodíku má výslednou účinnost jen kolem 30 %, tedy k výrobě vodíku je potřeba 3krát tolik elektrické energie, než se na vozidle z vodíku uvolní.

Aplikace vodíku v dopravě je proto bytostně spojena s přechodem energetiky od uhelných zdrojů elektrické energie k obnovitelným zdrojům elektrické energie.

Uhelné zdroje lze řídit tak, aby jejich výkon odpovídal aktuální spotřebě. Obnovitelné zdroje elektrické energie (větrné a sluneční elektrárny) řídit nelze, chovají se náhodně podle počasí, jsou volatilní.

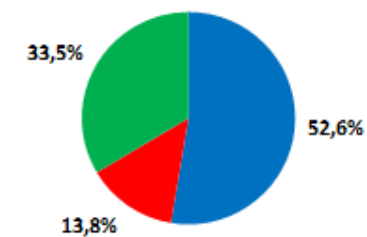
Za příznivého počasí (slunečno a větrno) mají obnovitelné zdroje elektrické energie vyšší výkon, než odpovídá aktuální spotřebě. Vznikají jinak nevyužitelné přebytky elektrické energie, které lze ukládat do vodíku.

Toto je typické pro přímořské státy s velkými a dále intenzivně budovanými of shore větrnými parky, například pro Německo.

V ČR dosud taková situace není, podíl volatilních obnovitelných zdrojů na výrobě elektrické energie je v ČR řádově menší než v Německu a roste pomalu.

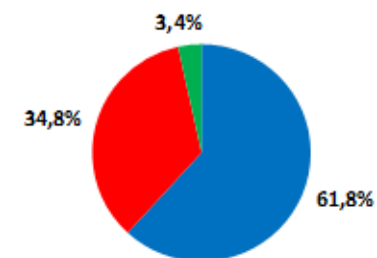
struktura zdrojů výroby elektrické energie v Německu v roce 2019

- říditelné (uhelné, plynové, vodní, ...)
- fixní (jaderné)
- náhodné (slunce, vítr)



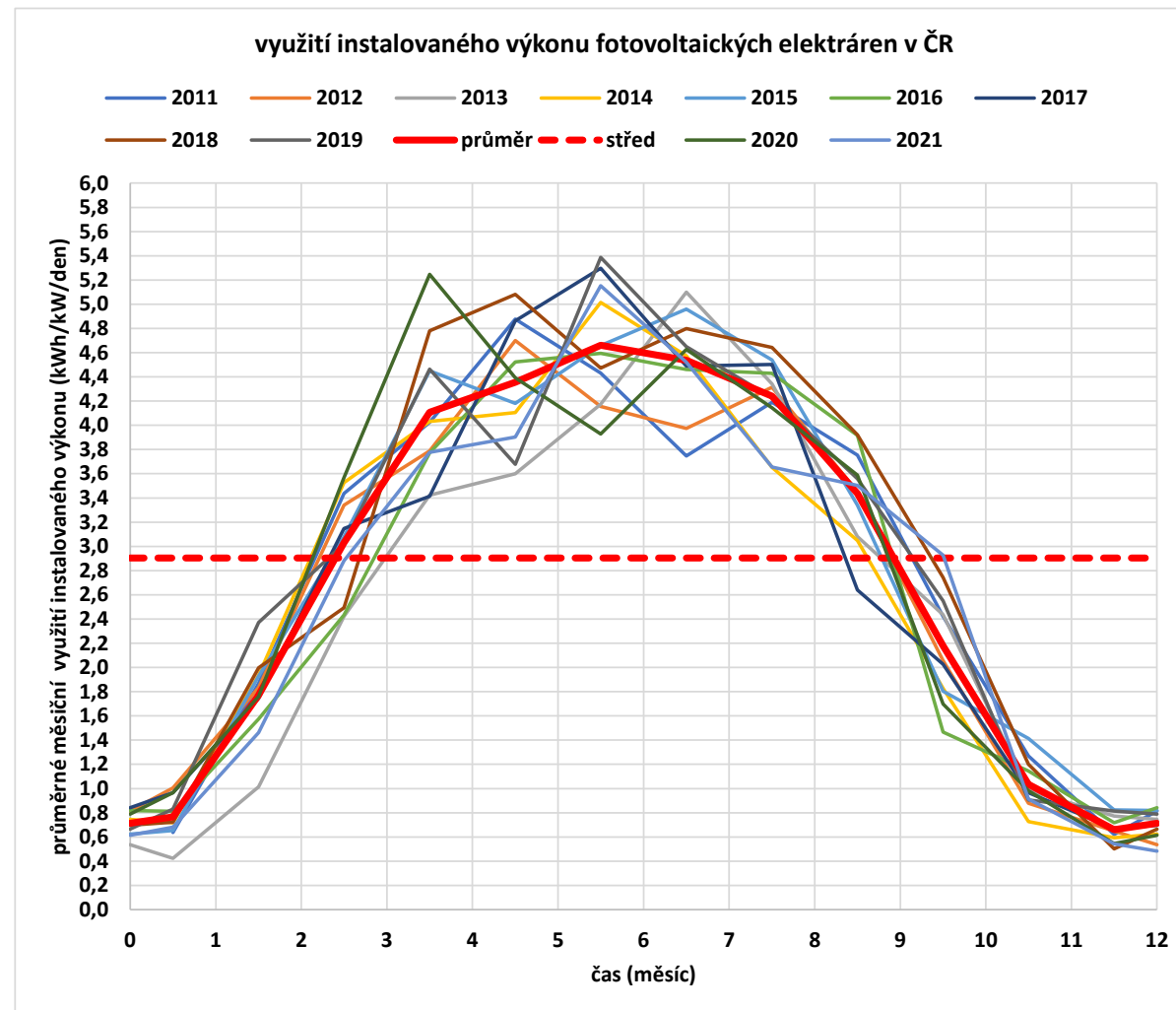
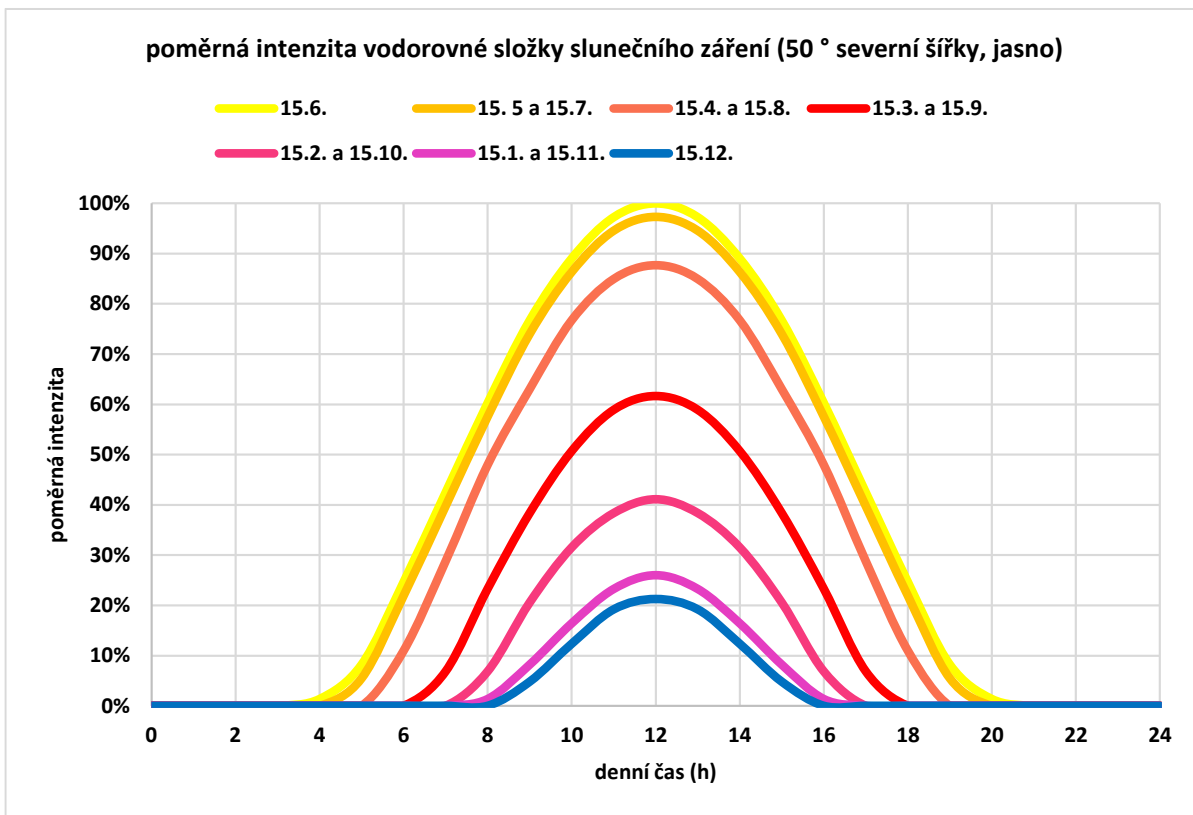
struktura zdrojů hrubé výroby elektrické energie v ČR v roce 2019

- říditelné (uhelné, plynové, vodní, ...)
- fixní (jaderné)
- náhodné (slunce, vítr)



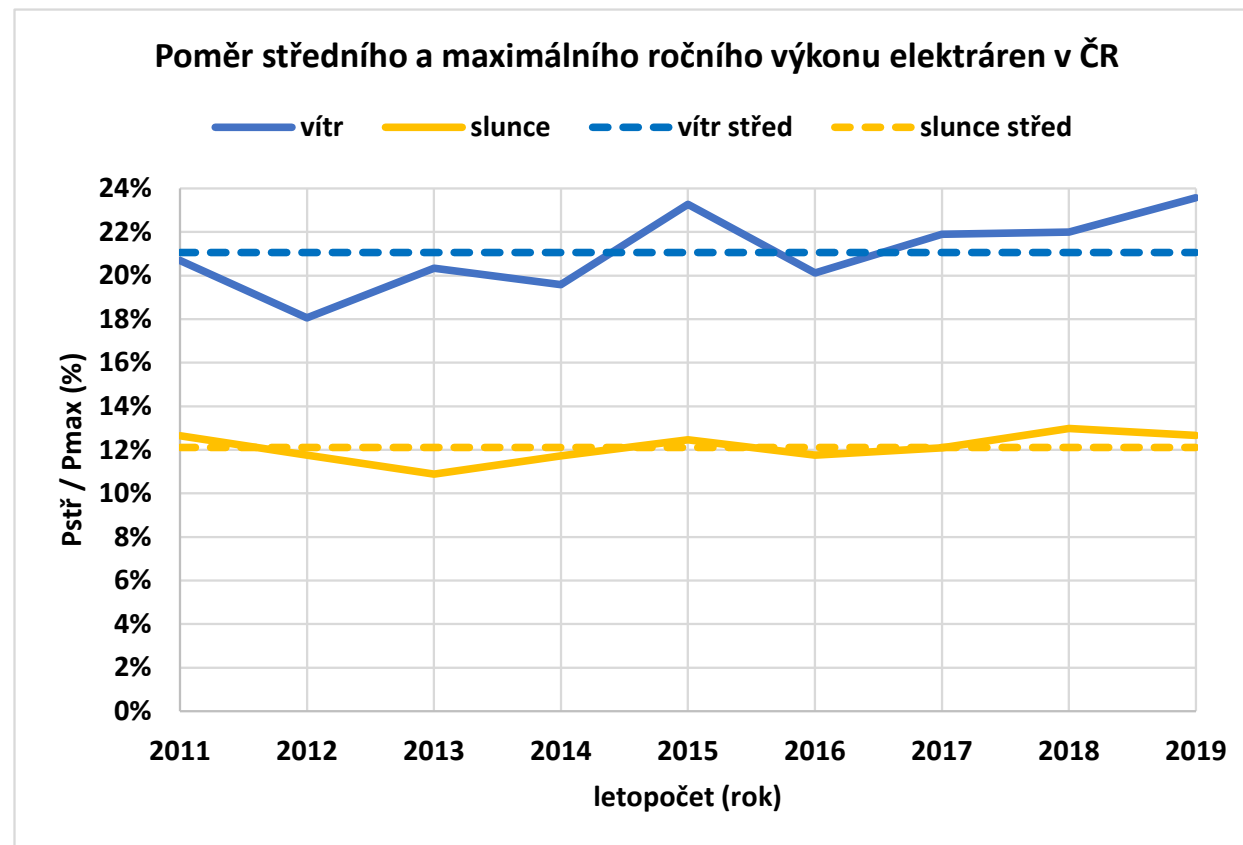
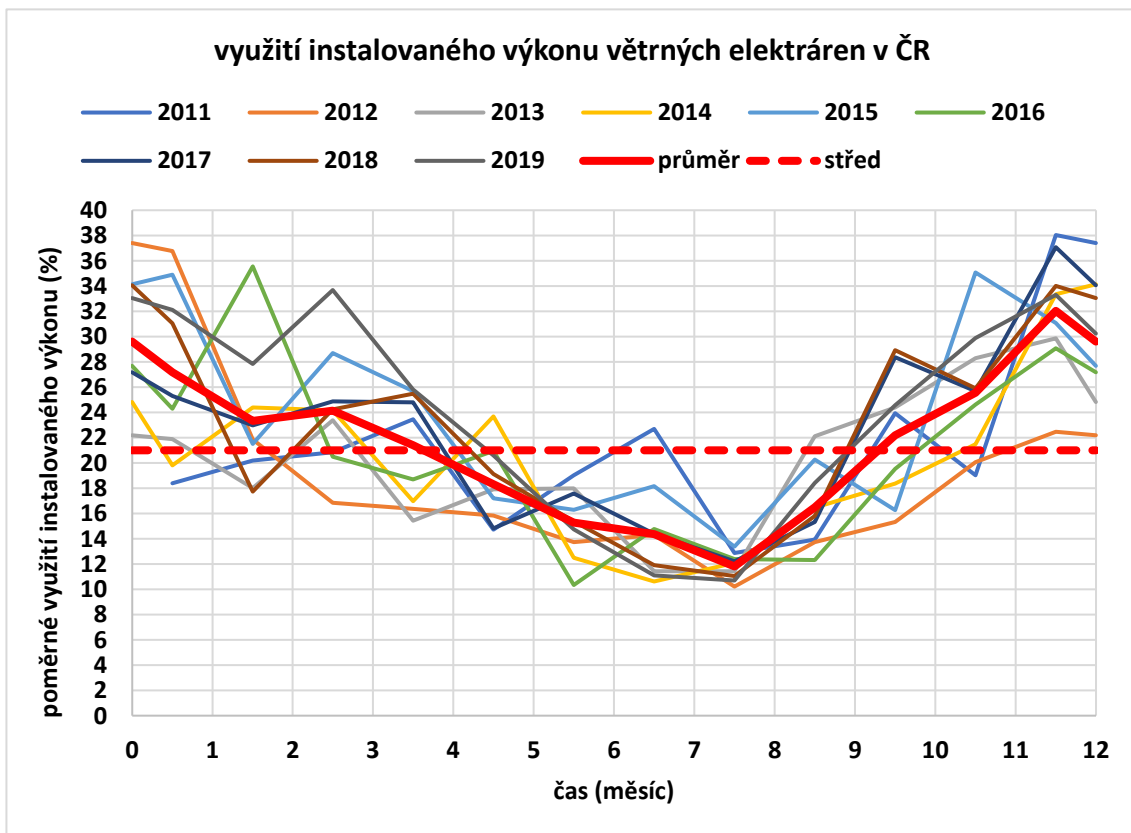
Volatilita obnovitelných zdroje elektrické energie

Denní a roční cyklus solárních zdrojů v ČR



Volatilita obnovitelných zdroje elektrické energie

Roční cyklus větrných zdrojů v ČR



Objektivní teritoriální výhody mořských pobřeží

Efektivita výroby vodíku z přebytků elektrické energie tím i výrobní náklady jsou dány produktivitou práce elektrolyzérů. Ta záleží na ročním časovém využití volatilního obnovitelného zdroje elektřiny.

Větrné elektrárny v pobřežních mořských mělčinách mají objektivní teritoriální výhody:

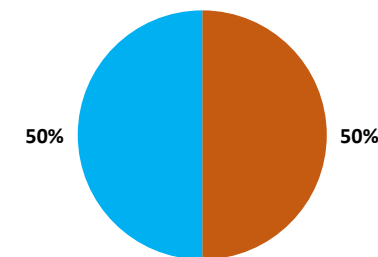
- vysoký střední roční využití instalovaného výkonu (cca 40 %, v ČR u větrných elektráren 21 % a u solárních 12 % elektráren) umožňuje dobře využít do technologií investovaný kapitál,
- celoročně relativně dobře vyrovnaný výkon (v ČR je u větrných elektráren nejsilnější měsíc 2,7krát lepší než nejslabší a u solárních elektráren nejsilnější měsíc 7,1 krát lepší než nejslabší),
- celodenně dosti vyrovnaný výkon (vítr může vanout 24 hodin denně, ale slunce svítí v průměru jen 12 h denně, cca 7 h v zimě a 17 h v létě) umožňuje dobře využít do technologií investovaný kapitál,
- možnost velké koncentrace výkonů elektrických zdrojů v nezastavěné ploše území (vodní hladina).

K tomu absence spotřeby elektrické energie na okolním území v úhlu cca 180° zvyšuje potřebu akumulace.

SIEMENS

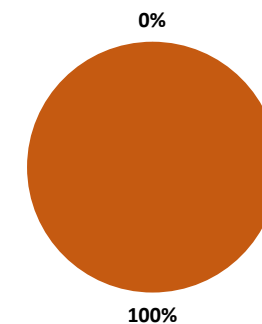
využití elektrické energie produkované větrnou elektrárnou na moři u břehu

■ území se spotřebou ■ území bez spotřeby

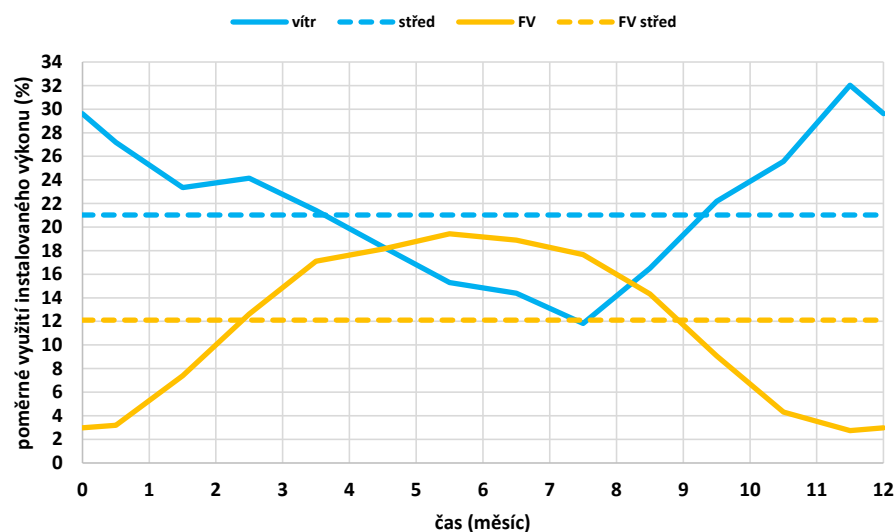


využití elektrické energie produkované větrnou elektrárnou na pevnině

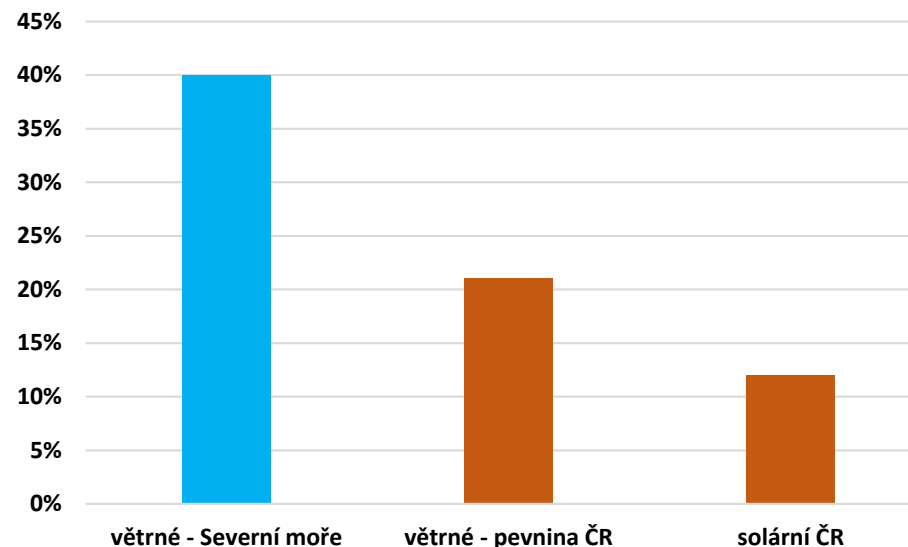
■ území se spotřebou ■ území bez spotřeby



využití instalovaného výkonu větrných a fotovoltaických elektráren v ČR (průměr let 2011 až 2019)



střední roční využití jmenovitého výkonu elektráren



Role obnovitelných zdrojů elektrické energie



Vodík není z důvodu jeho nízké měrné hmotnosti $0,09 \text{ kg/m}^3$, tedy $11 \text{ m}^3/\text{kg}$, snadné transportovat.

Místo výroby vodíku a místo využití vodíku musí být z ekonomických důvodů navzájem nepřiliš vzdálené.

Podmínky pro vhodnost aplikace vodíkové technologie v daném teritoriu neurčuje obor dopravy, ale obor energetiky. Podstatným faktorem je podíl volatilních zdrojů elektrické energie na celkové produkci elektřiny (energetický mix).

Česká republika

rok 2019 energeticky: vítr $0,7 \text{ TWh/rok}$, slunce $2,3 \text{ TWh/rok}$ z celkové produkce elektrické energie všemi elektrárnami v ČR 87 TWh , tedy dohromady 3 GWh což je $3,4 \%$ z celkové produkce elektrické energie,

rok 2019 výkonově: vítr max $0,34 \text{ GW}$, slunce max. $2,1 \text{ GW}$ vůči příkonu spotřeby, který kolísá mezi 5 GW (léto noc) a 12 GW (zima den).

Německo

V roce 2019 dodávaly větrné a solární elektrárny v Německu 34% elektrické energie, tedy desetkrát více než v ČR ($3,4 \%$). Další větrné a solární parky jsou v Německu stále intenzivně budovány, zatím co u nás zatím ne. Objektivně v ČR nemáme pobřežní mělčiny Severního moře kde je větrno (střední roční výkon větrné elektrárny činí 40% , jmenovitěho u nás jen 21%) a kde je nekonfliktní prostor pro budování velkých ofshore větrných parků.

Avšak ofshore větrné parky mají objektivní nevýhodu: jsou koncentrovány na jedno místo na okraji (pobřeží) Německa, spotřeba elektřiny není v okolí úhlu 360° prostoru, ale jen v úhlu cca 180° prostoru, tedy je problém je využít ke spotřebě. Výstavba elektrických přenosových vedení probíhá pomalu (viz téma průchodnosti liniové stavby územím), tedy zbývá akumulace do vodíku (elektrolýza).

Srovnávací úroveň

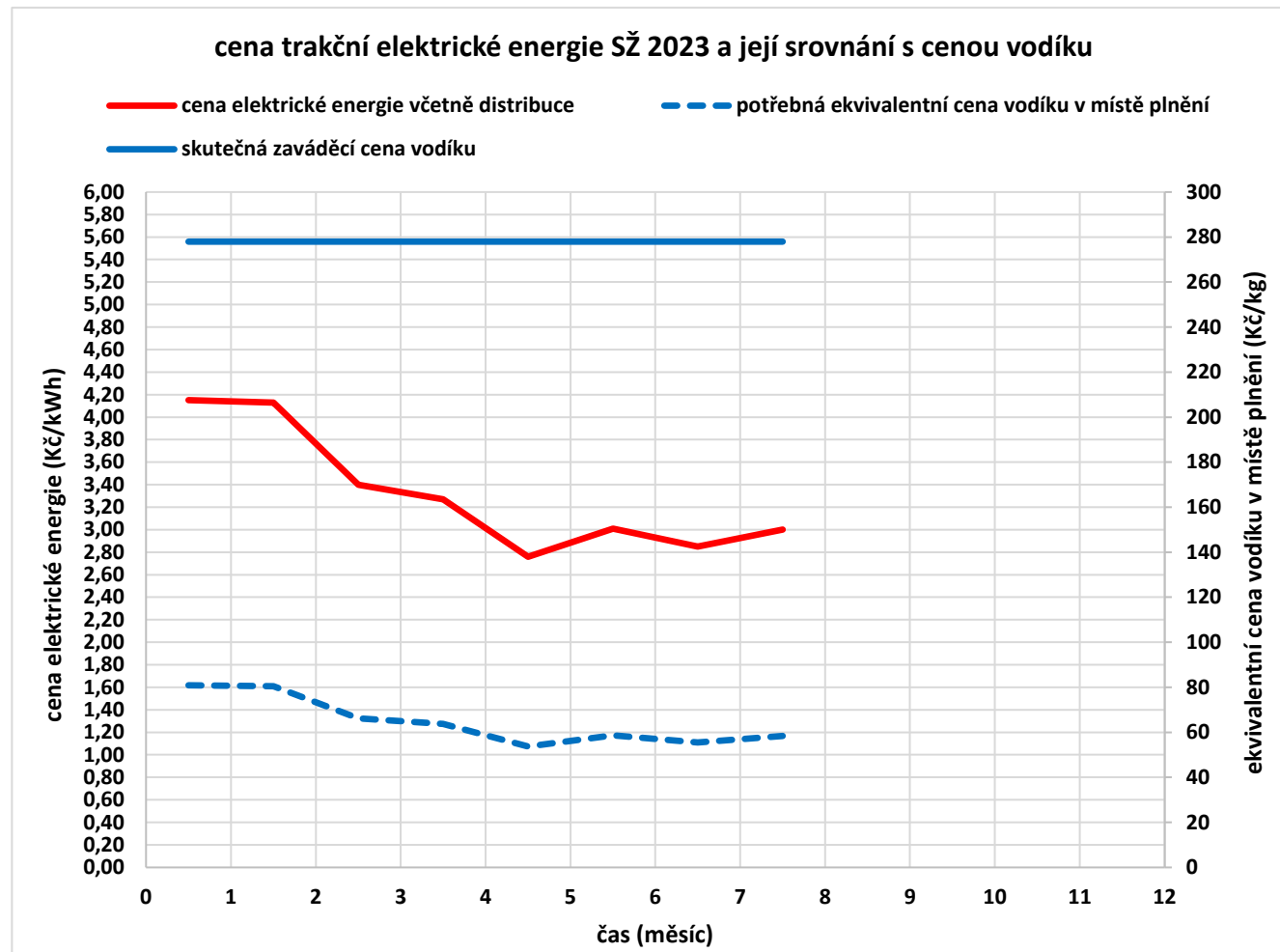
Základní současnou i budoucí orientací železniční dopravy i městské hromadné dopravy je liniová elektrizace. Vozidla se zásobníky energie jsou vnímána a hodnocena jako její (dočasný) doplněk pro dopravně méně zatížené tratě.

Pořizovací cena i provozní náklady vozidel se zásobníky energie na energii a na údržbu jsou proto logicky porovnávány s elektrickými vozidly.

Aktuální spotovou cenu silové elektrické energie určují uhelné elektrárny. Jejich výrobní náklady činí v současnosti cca 1 Kč/kWh plus 2 Kč/kWh emisní povolenky, tedy celkem 3 Kč/kWh. K tomu distribuční poplatky 0,50 Kč/kWh, tedy celkem 3,50 Kč/kWh. V letním období klesá při slunečním svitu vlivem činnosti FV elektráren cena si o 0,50 Kč/kWh na 3,00 Kč/kWh.

K docílení ceny elektrické energie v úrovni 3,00 až 3,50 Kč/kWh na výstupu palivového článku s účinností 60 % (20 kWh_e/kg) je potřebná cena vodíku v místě tankování 60 až 70 Kč/kg, tedy 2,40 až 2,80 EUR/kg. To není snadné zadání.

SIEMENS



K uplatnění vodíkové technologie v dopravě je kromě technické funkčnosti a bezpečnosti potřeba též zvládnout ekonomickou efektivnost, což je nutnou podmínkou ekonomické i sociální udržitelnosti bezemisní mobility.

Náklady na energii jsou podstatným faktorem a jejich minimalizace je nutná v celém řetězci:

- aplikace vozidla není vhodná v dálkové dopravě, kde by dlouhá jízda plnou rychlostí vyžadovala vysoký výkon (a tedy i vysokou cenu) palivového článku a úspora rekuperačním brzděním by byla malá, ale v zastávkové regionální dopravě, s cyklicky proměnným pracovním cyklem, kde postačuje levnější méně výkonný palivový článek, a kde je potenciál velkých úspor energie častým rekuperačním brzděním,
- zkrátit dobu tankování na minimum účinným chlazením vodíku a datovou komunikací o teplotě a tlaku vodíku v nádrži vozidla mezi vozidlem a plnicí stanicí, s cílem aby ztráta plněním byla minimalizována a nevyžadovala zařazení dalšího vozidla do oběhu.
- promyšlený koncepční návrh vozidla (nízká hmotnost, vysoká energetická účinnost, chytré řízení),
- nepřpravovat vodík po silnici, ale vyrábět jej elektrolýzou v místě plnicí stanice,
- k přenosu elektrické energie od zdroje k elektrolýzě využívat vysoce účinný vysokonapěťový přenos,
- k výrobě vodíku elektrolýzou používat výhradně přebytečnou elektrickou energii z volatilních obnovitelných zdrojů a to zejména v době, kdy pro ni není žádné jiné využití, tedy má nulovou tržní cenu,
- k elektrolýze nepoužívat elektrickou energii FV ale z větrných elektráren, pokud možno of shore, neboť ty dosahují 40 % roční využití instalovaného výkonu (on shore 21 %, FV 12 %) a pracují i v zimě (nejsou potřebné mohutné skladovací zásobníky stlačeného vodíku z letního období na zimní období, nutné u FV elektráren).

Ukládání přebytků elektrické energie do vodíku

SIEMENS

Podstatné je, že již v současnosti přesahuje v Německu jmenovitý výkon volatilních obnovitelných zdrojů elektrické energie (větrných a solárních elektráren) příkon spotřeby celé Německé spotřebitelské elektrické sítě zhruba dvojnásobně. Tedy v případě příznivých meteorologických podmínek (větrno, slunečno) vytváří Německo dvojnásobný elektrický výkon, než je schopno využít k okamžité spotřebě. Proto jsou snahy o skladování přebytků elektrické energie zcela logické. A to i s vědomím, že je z tohoto přebytku 70 % energie ztraceno a jen 30 % využito. Toto je nynější situace, s pokračující výstavbou dalších volatilních obnovitelných zdrojů elektrické energie, která je nutností (pro případ méně příznivých meteorologických podmínek), budou přebytky levné elektrické energie, vhodné k ukládání do vodíku, stále větší.

Přes tyto fyzikální skutečnosti je vodík v kvalitě pro palivové články i v Německu stále ještě poměrně drahý. To má objektivní příčiny, jen samotný elektrolyzér spotřebuje k výrobě 1 kg vodíku 51 kWh elektrické energie. Další energie je potřebná pro kompresi vodíku, pro dopravu vodíku a pro chlazení vodíku při expanzi. Podstatné jsou i investiční náklady, znásobené nepříznivě vysokým poměrem maximálního a středního výkonu přírodních volatilních obnovitelných zdrojů elektrické energie.

Obvyklá cena vodíku pro vozidla v Německu je 10 EUR/kg. Vodík má výhřevnost 33,2 kWh/kg a palivový článek účinnost cca 60 %, tedy z 1 kg vodíku lze získat 20 kWh elektrické energie, což vychází 0,50 EUR/kWh, což je asi 12 Kč/kWh elektřiny.

Vyšší investiční náklady lze překonat, ale vyšší provozní náklady nikoliv. Rozvoj vodíkových aplikací v dopravě proto není primárně otázkou dalšího vývoje dopravy, ale je především otázkou dalšího vývoje energetiky.

O růstu přebytků elektřiny z volatilních zdrojů není pochyb, ten již je v řadě zemí realitou. Tématem je, ve kterých teritoriích a ve kterých aplikacích bude řetězec energetických přeměn souvisejících s ukládáním přebytků elektrické energie do vodíku efektivní, a ve kterých aplikacích bude vhodné použít jiné systémy (liniové elektrické napájení či elektrochemické akumulátory).

Z důvodu limitů daných termodynamickými změnami při kompresi a expanzi, je výkonnost (kg/h) plnicích zařízení omezena přípustnými mezními teplotami vodíku.

Proto není snadné dosáhnout u vodíkových vozidel velké rychlosti obnovy zásob energie, intenzita plnění (kg/h má své limity). Aktuálně je v ČR budováno několik prvních vodíkových plnicích stanic pro silniční vozidla.

Mají jeden univerzální výdejní stojan s koncovkami jak pro 350 bar, tak i pro 700 bar.

Jejich výkonnost je kolem 30 kg/h, což v ekvivalentu elektrický výkon cca 600 kW.

Pro se železniční vodíkovou trakční jednotku (HMU) s gradientem spotřeby elektrické energie na výstupu palivového článku 3,6 kWh/km, tedy s gradientem spotřeby vodíku 0,18 kg/km, je při denním proběhu 500 km potřeba denně doplňovat 90 kg vodíku. Plnění této HMU by u stanice s výkonností 30 kg/h trvalo 3 hodiny.

vodíková plnicí stanice (ČR)		
určení		automobily
výkonnost plnění vozidla vodíkem	kg/h	30
výhřevnost vodíku	kWh/kg	33,2
výkon plnicí stanice tepelný	kW _t	996
účinnost palivového článku k výhřevnosti	%	60
měrná využitelná elektická energie	kWh _e /kg	20
výkon plnicí stanice elektrický	kW _e	598
cena plnicí stanice	mil.Kč	136
měrná cena plnicí stanice	mil. Kč/MW _e	228
střední účinnost naftového motoru	%	38
výhřevnost nafty	kWh/litr	10
vodíkový ekvivalent spotřeby nafty	kg/litr	5,2
ekvivalentní výkonnost plnicí stanice - nafta	litr/h	157
zaváděcí cena vodíku	Kč/kg	278
cena energie z vodíku	Kč/kWh	14

Většina technických plynů se vyznačuje kladným Joule – Thompsonovým koeficientem (K/MPa):

- uvolňuje teplo a zahřívá se při kompresi,
- odebírá teplo a ochlazuje se při expanzi.

Vodík se chová opačně, vyznačuje se záporným Joule – Thompsonovým koeficientem (K/MPa):

- uvolňuje teplo a zahřívá se při expanzi,
- odebírá teplo a ochlazuje se při kompresi.

Ve zásobní jímce vodíkové plnicí stanice je vyšší tlak (více než 35 Mpa, respektive 70 MPa), než v nádrži na vozidle (podle stavu zásob v rozmezí několika MPa až 35 MPa, respektive 70 MPa). Při průtoku vodíku z nádoby v plnicí stanici do nádoby ve vozidle dochází k expanzi. Z bezpečnostních důvodů nesmí být tato expanze prudká, to by bylo spojeno s nežádoucím růstem teploty vodíku.

Při tradičním postupu plnění je volen průtočný stálý průřez tak, aby při nízkém protitlaku na počátku plnění prázdné vozidlové nádrže nepřevýšil průtok stanovenou mez. To však vede, vlivem postupného růstu tlaku ve vozidlové nádrži, k jejímu pomalému plnění.

Rychlé plnění je založeno na vysoce výkonném chlazení vodíku a na datové komunikaci mezi zásobní nádrží na vozidle a plnicím zařízením. Průtok vodíku z plnicí stanice do nádrže vozidla je regulován podle okamžitých hodnot tlaku a teploty vodíku v nádrži vozidla s cílem zajistit bezpečný provoz a rychlé naplnění nádrží vozidla.

Struktura energetiky DB Energie

Na rozdíl od ČR, kde železnice nemá vlastní elektrárny ani vlastní přenosová a distribuční vedení, a proto při své trakční napájecí stanice využívá elektrickou energii odebíranou ze všeobecné třífázové distribuční sítě ČEZ, E.ON či PRE, je v Německu situace odlišná.

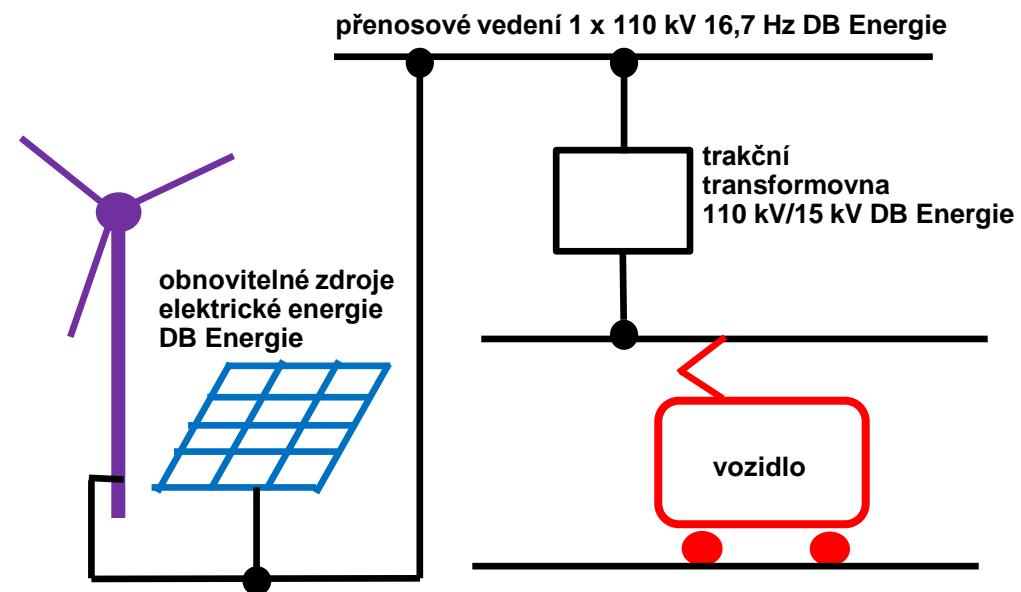
Německá železnice již od roku 1905 buduje a provozuje nejen železniční pevná trakční zařízení (trakční napájecí stanice a trakční vedení), ale i vlastní jednofázové elektrárny a vlastní jednofázová přenosová elektrická vedení, ze kterých jsou zásobovány trakční napájecí stanice 15 kV 16,7 Hz.

DB Energie

- 20 474 km železnic elektrifikovaných systémem 15 kV 16,7 Hz (62 % délky sítě),
- výroba ve vlastních elektrárnách (plus nákup) 12 TWh elektrické energie ročně,
- provoz 7 900 km přenosových jednofázových vedení 1 x 110 kV 16,7 Hz.

Vlastní elektrárny DB Energie byly historicky především uhelné a vodní o celkovém výkonu cca 1 600 MW. Aktuálně jsou uhelné elektrárny DB Energie intenzivně nahrazovány větrnými a solárními.

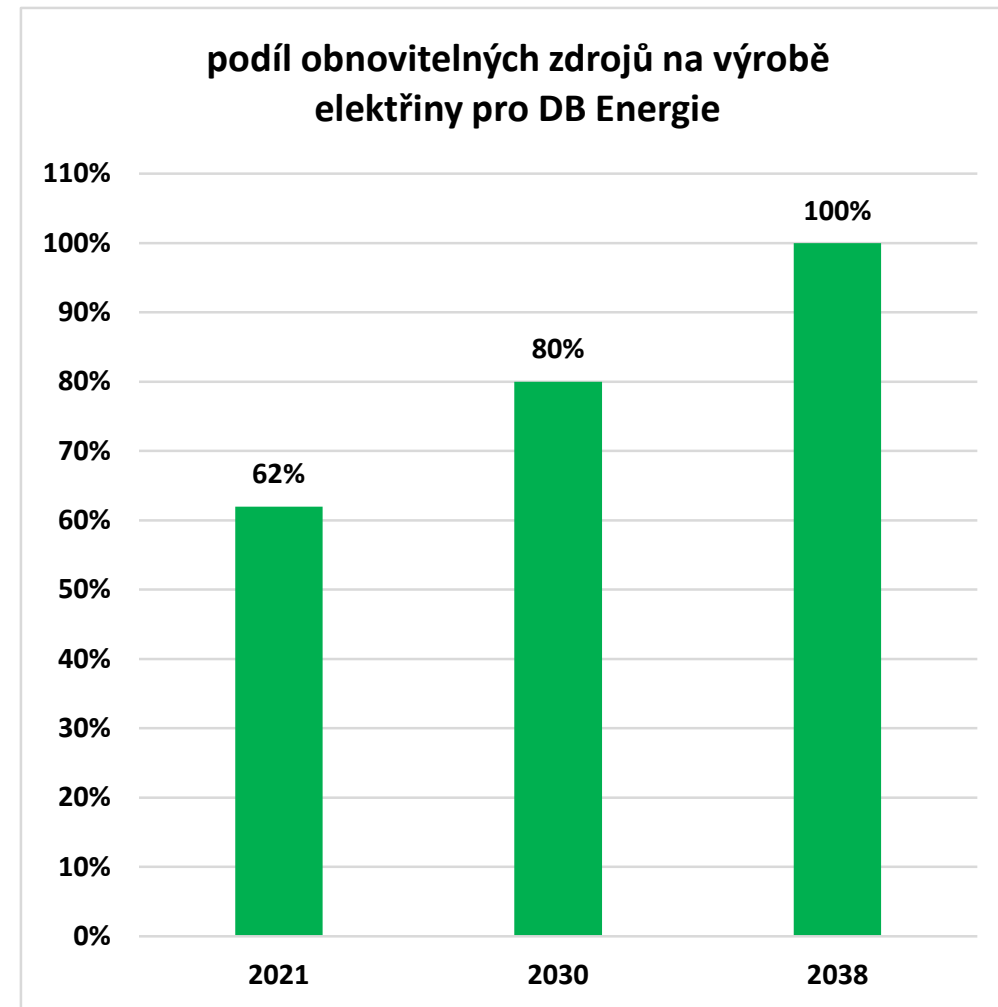
SIEMENS



Při postupné náhradě uhelných elektráren DB větrnými a solárními elektrárnami dochází vlivem volatility obnovitelných zdrojů energie v distribuční elektrické síti DB 1 x 110 kV 16,7 Hz k převisu výroby nad spotřebou, typicky v noci od větrných elektráren (kdy je navíc osobní železniční doprava velmi slabá) či v létě kolem poledne od solárních elektráren. Pravidelně vznikající přebytky jednofázové elektrické energie s třetinovým kmitočtem jsou nesnadno upotřebitelné mimo železnici.

Technicky by bylo možno využívat IGBT multilevel měniče 1 AC/3AC (viz Nürnberg Stein) a předávat přes ně přebytečný výkon z drážní elektrické distribuční sítě 1 x 110 kV 16,7 Hz do veřejné elektrické distribuční sítě 3 x 110 kV 50 Hz. Avšak i veřejná elektrická síť má v Německu velmi podobnou strukturu zdrojů, jako železniční síť, tedy v noci má též přebytky výkonu od větrných elektráren a v létě kolem poledne má též přebytky výkonu od solárních elektráren. Tudíž energetika logicky nemá zájem o nákup přebytků elektrické energie od železnice.

S postupným růstem podílu volatilních obnovitelných zdrojů ve struktuře elektráren DB jsou periodicky vznikající přebytky elektrického výkonu stále rozsáhlejší. Aktuálně již činí podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny po DB Energie 62 % a dále poroste až do 100 %.



Integrovaná vodíková výrobní a plnicí stanice DB - H2goesRail

SIEMENS

Projekt DB H2goesRail představuje racionální přístup k aplikaci vodíkových technologií.

Názorně ukazuje styl myšlení v zemích, ve kterých již instalovaný špičkový výkon obnovitelných zdrojů elektřiny po určitou dobu násobně překračuje okamžitý příkon spotřeby elektřiny.

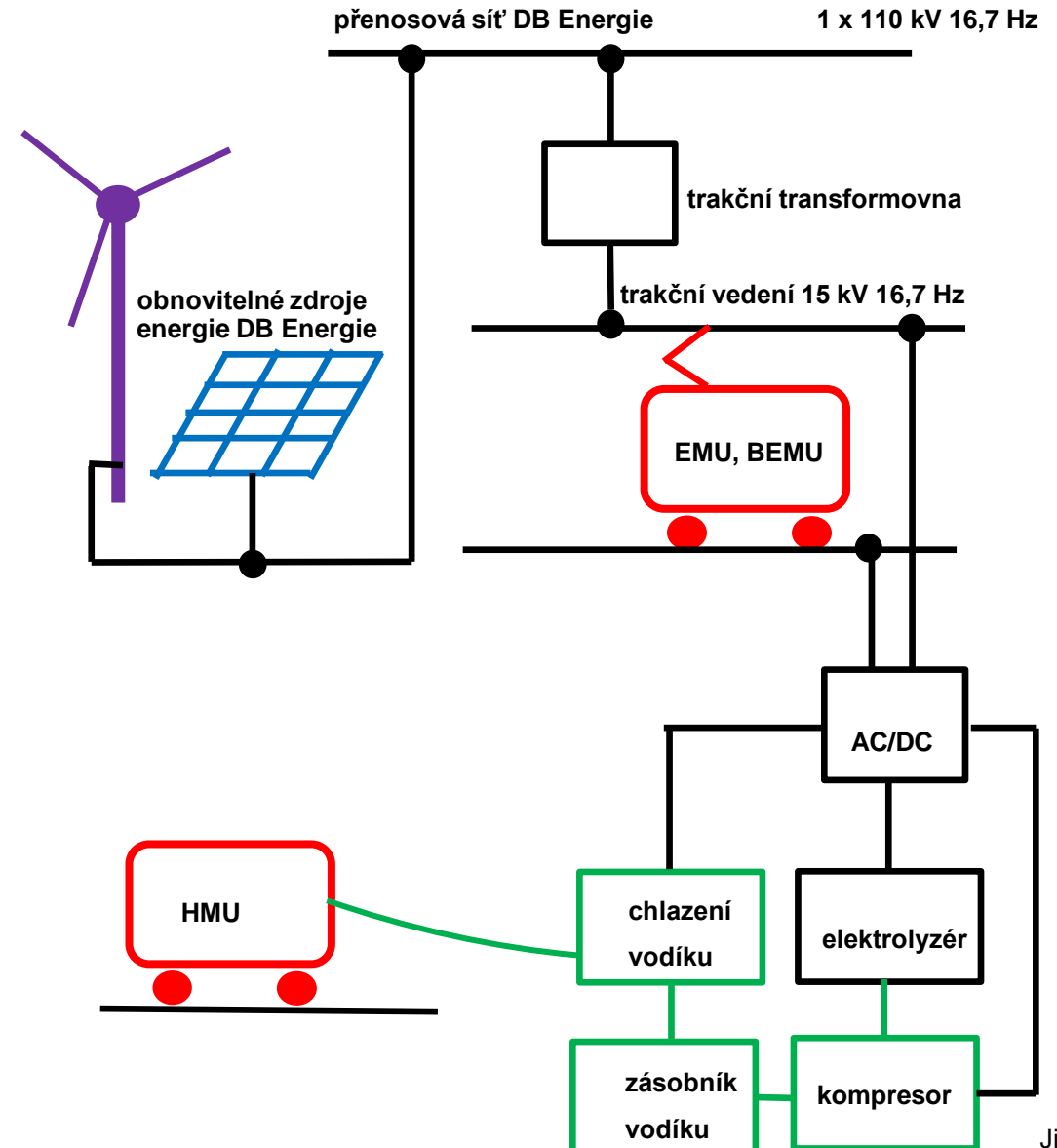
S ohledem na pomalu probíhající výstavbu náležitě výkonných přenosových vedení z of shore větrných parků od pobřeží do vnitrozemí je akumulace do vodíku smysluplným využitím přebytků elektrické energie.

Podstatou systému H2goesRail je, že nejde jen o plnicí stanici, ale o komplexní vodíkovou technologii včetně výroby vodíku.

Vodíková stanice je připojena k trakčnímu vedení 15 kV 16,7 kV.

Odebírá z něho v období, kdy dochází v elektrické síti DB Netz k převisu výroby elektřiny ve volatilibních obnovitelných zdrojích nad spotřebou, nadbytečnou elektrickou energii a ukládá ji prostřednictvím elektrolyzáru do vodíku.

Vyrobený vodík je ve vodíkové stanici komprimován a skladován pro plnění zásobníků vozidel.

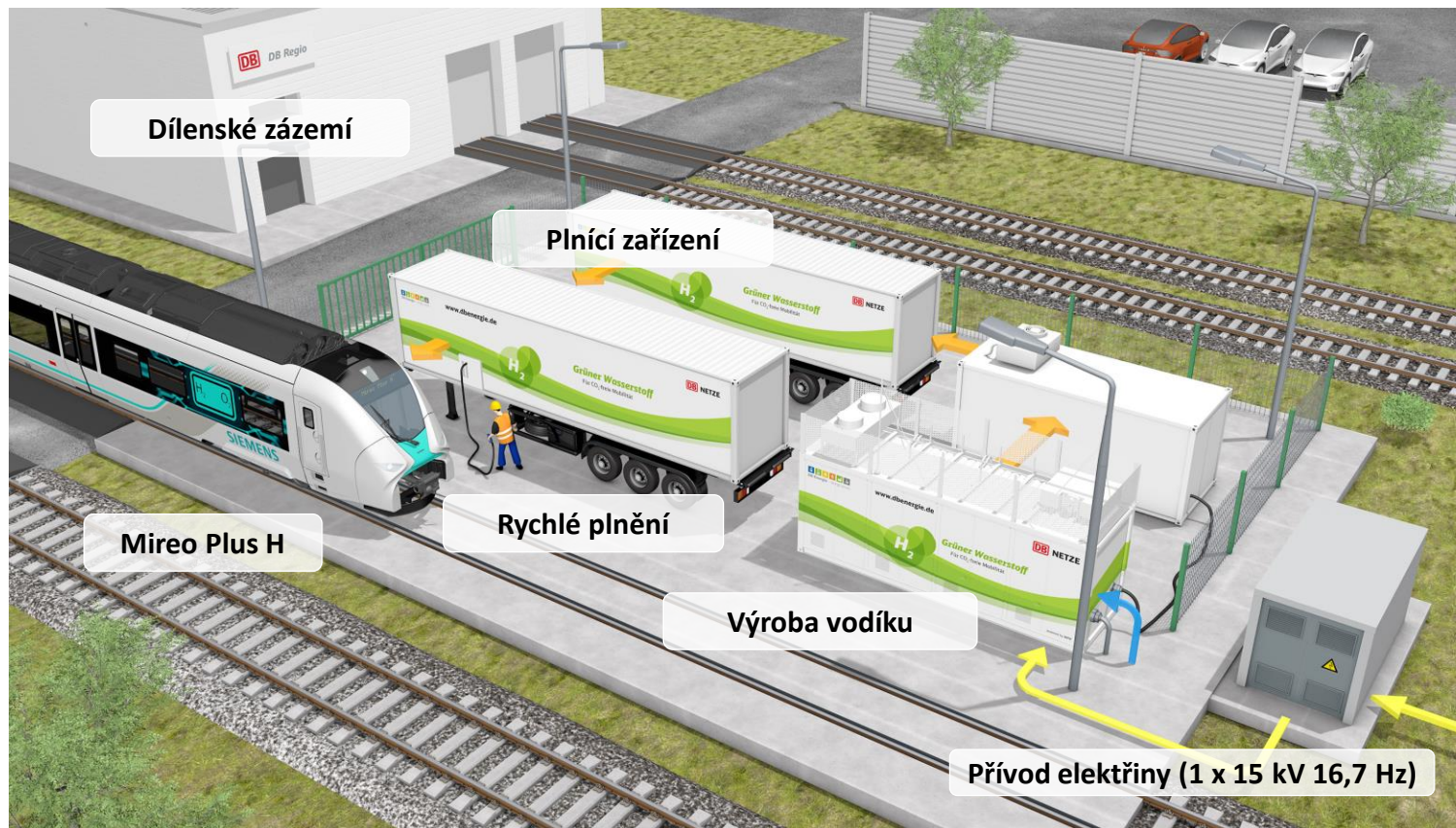


Integrovaná vodíková výrobní a plnicí stanice DB - H2goesRail

SIEMENS

Výdejní část plnicí stanice je převozná, může být v případě potřeby (mimořádná situace) kamkoliv převezena k vozidlu.

Pro všechny vysoce výkonné a energeticky náročné technologické operace (elektrolýza vody, komprese vodíku, intenzivní chlazení vodíku před expanzí pro umožnění rychlého plnění tlakových nádrží ve vozidlech) je používána levná přebytečná elektrická energie z jednofázové sítě 15 kV 16,7 Hz DB Energie.



Projekt H2goesRail je promyšleným komplexním řešením pro podmínky Německých železnic (DB), které mají vlastní elektrárny s velkým podílem volatilních obnovitelných zdrojů (vítr, slunce) a distribuční jednofázovou síť 1 x 110 kV 16,7 Hz pro centralizované napájení svých jednofázových trakčních transformoven 110 kV/15 kV.

Po pečlivé analýze se vedení DB rozhodlo uskutečnit ve spolupráci se Siemens Mobility v Tübingenu v Bádensku-Württenbersku pilotní projekt, jehož cílem je praktické ověření akumulace jinak nepoužitelných přebytků elektrické energie do vodíku pro vodíková palivočlánková vozidla. A to i s vědomím nepříliš vysoké účinnosti tohoto způsobu akumulace.

V rámci tohoto projektu je řešeno i téma minimalizace času plnění nádrží vozidel. Cílem je, aby zdlouhavý proces plnění nesnižoval produktivitu vozidel a tím nezvyšoval turnusovou potřebu vozidel a personálu.



Rychlé doplňování zásob vodíku

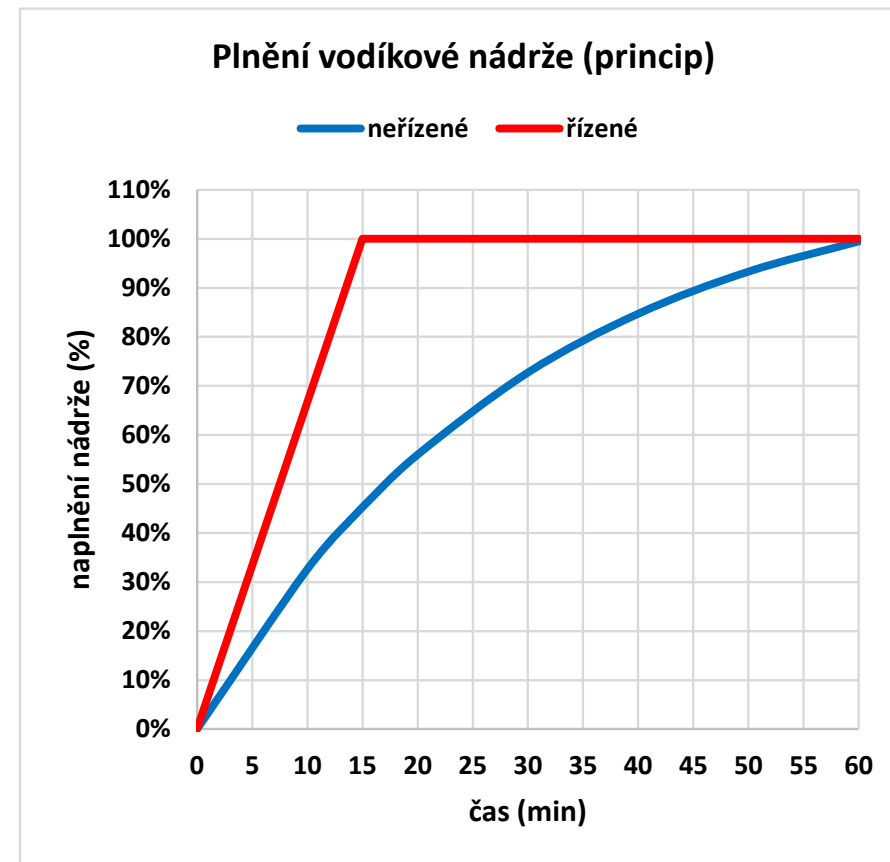
Jakkoliv panuje všeobecné přesvědčení, že doplňování zásob vodíku je rychlejší, než nabíjení lithiových akumulátorů, tak opak je pravdou.

Zatím co akumulátory BEMU lze z trakčního vedení 25 kV kdekoliv (i u nástupiště v železniční stanici) po zdvižení sběrače naplno nabít za 15 minut, je nutno s HMU odjet do plnicí stanice, připojit se a vlastní plnění vozidlových nádrží vodíkem na přetlak 350 bar tradiční technologií do plného stavu trvá 60 minut. To v praxi často znamená zařadit do oběhu další vozidlo navíc.

Důvodem jsou fyzikální vlastnosti vodíku, záporný Joule Thomsonův koeficient, vodík se na rozdíl od většiny ostatních plynů při expanzi ohřívá. Z bezpečnostních důvodů proto musí být plnění vodíkových nádrží přečerpáváním z vyššího tlaku na nižší pomalé. Při tradičním způsobu přečerpávání nemá plnicí zařízení informaci o skutečné aktuální teplotě a tlaku vodíku v nádrži vozidla a průtok vodíku je proto pomalý.

Cílem je plnicí proces optimalizovat, a to na bázi internetu věcí. Společně s DB vyvíjíme systém rychlého doplňování zásob vodíku do vozidla Mireo Plus H, založený na účinném chlazení vodíku před jeho expanzí a na kontinuální datové komunikaci vozidla se stacionárním plnicím zařízením (přenos informací o teplotě tlaku vodíku v mobilní nádrži) s cílem dosáhnou dobu úplného naplnění vozidlových nádrží za 15 minut a tím vyšší efektivitu provozu vodíkových vozidel. Jde o regulaci průtoku vodíku z plnicí stanice do nádrže vozidla podle okamžitých hodnot tlaku a teploty vodíku v nádrži vozidla.

S ohledem na bezpečnostní aspekty jde o velmi náročnou technickou úlohu.



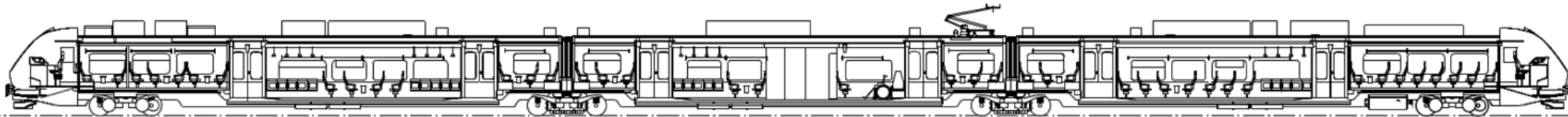
Použitý komplex řešení využívá řadu příznivých vlastností:

- jde o vodík čistoty 99,999 %, s rezervou splňující požadavky ISO 14 687-2 na čistotu vodíku pro palivové články (99,97 %), což má blahodárny vliv na jejich životnost,
- je výhradně využívána přebytečná levná elektřina z volatelných obnovitelných zdrojů energie, kterou nelze jinak využít,
- je využívána elektřina s nulovou uhlíkovou stopou,
- ke snížení spotřeby vodíku je použito velmi lehké vozidlo Miero Plus B (velmi lehké podvozky s vnitřním rámem, hmotnostně optimalizovaná skříň, Jakobsovo usprádnění pojezdu (úspora jednoho podvozku), energetický management, vysoce výkonná lithiová vyrovnávací akumulátorová baterie pro stabilizaci pracovního bodu palivových článků v optimu účinnosti, moderní palivové články Ballard, SiC měniče, SW optimalizace jízdy, vysoce výkonná rekuperační EDB působící na 2/3 dvojkolí, tedy při provozním brzdění není nutno používat mechanickou brzdu a vše lze rekuperovat, využití odpadního tepla z palivových článků k vytápění interiéru, ...),
- odpadá problematická energeticky i environmentálně nevýhodná finančně i personálně drahá doprava vodíku těžkými silničními vozidly mezi výrobnou vodíku a plnicí stanicí (kamion, který veze 300 kg vodíku, ze kterého lze získat jen 6 000 kWh elektrické energie, má hmotnost 40 t a zpátky jede prázdný a přesto má hmotnost 39,6 t).
- spolu s dopravou vodíku odpadá, respektive je redukována, i problematická energeticky, finančně i časově náročná kaskáda tlakových změn: kompresory i chladiče expanze): výroba – komprese na skladovací tlak – expanze na přepravní tlak (chlazení) – expanze na vstupní tlak plnicí stanice (chlazení) – komprese na výstupní tlak plnicí stanice – expanze do nádrží vozidla (chlazení),
- účinné chlazení a chytré řízení výstupního tlaku a průtoku plnicí stanice podle tlaku v nádrži vozidla (na principu vysoce zabezpečené digitální datové komunikace mezi vodíkovou stanicí a vozidlem) umožňuje bezpečné a rychlé plnění nádrže vozidla,
- v případě dopravních nepravidelností (výluka na trati a podobně, jednokolejky jsou snadno zranitelné) lze převoznou výdejní část odvézt k HMU kamkoliv.

Elektrická nízkopodlažní trakční jednotka Mireo (EMU)

SIEMENS

Koncepčním řešením (Jakobsovo uspořádání), optimalizovanou vozovou skříní a aplikací lehkých podvozků s vnitřním rámem se i při respektování pevnostních požadavků podle EN 12 663 a EN 15 527 a při pohodlném řešení interiéru podařilo dosáhnout velmi nízkou hmotnost – v přepočtu na sedadlo jen kolem 500 kg. To spolu s vysoce výkonnou elektrodynamickou rekuperační brzdou a s pečlivě řešenou aerodynamikou vytváří velmi nízkou energetickou náročnost vozby (plus minimalizace vedlejší spotřeby HVAC).



Dvouzdrojová elektrická trakční jednotka trolej/akumulátor Mireo Plus B (BEMU)

SIEMENS

- odvozena od standardní elektrické jednotky (vytvoření prostorové a hmotnostní rezervy pro zásobník energie),
- zachování funkcionality EMU (provoz pod trakčním vedením v režimu přímého napájení bez čerpání energie ze zásobníku),
- zachování trakčních a brzdých vlastností EMU (1 700 kW, 160 km/h) pod trakčním vedením (přímé napájení) i mimo trakční vedení (napájení ze zásobníku energie), pohon a elektrodynamické rekuperační brzdění 2/3 dvojkolí,
- i na tratích bez trakčního vedení disponují vysokým výkonem a vysokým zrychlením, jak je obvyklé na elektrifikovaných tratích. Tím zásadním způsobem zkracují jízdní doby a zvyšují kvalitu regionální osobní dopravy,
- možnost (i rychlého) nabíjení zásobníku energie dynamicky v průběhu jízdy na liniově elektrifikované trati 25 kV,
- možnost (i rychlého) nabíjení zásobníku energie staticky za stání v liniově elektrifikované železniční stanici 25 kV,
- možnost (i rychlého) nabíjení zásobníku energie staticky za stání v železniční stanici s napájecím bodem 25 kV,
- snadné a rychlé připojení sběračem k trakčními vedení, plné využití doby pobytu v železniční stanici k nabíjení,
- nabíjení je možné i ve veřejném prostoru na dopravních kolejích a i při obsazení cestujícími,
- dojezd na konci 15 leté životnosti akumulátoru (EOL): 80 až 100 km,
- čas pro plné nabití v rychlém režimu: 15 až 20 minut,
- možnost snadné přestavby BEMU na EMU po případné elektrifikaci linky.



Vodíková palivočlánková trakční jednotka Mireo Plus H (HMU)

SIEMENS

- odvozena od standardní elektrické jednotky (vytvoření prostorové a hmotnostní rezervy pro zásobník energie),
- zdrojem elektrické energie ve vozidle jsou vodíkové palivové články, vodík v zásobníku je plyný, tlak 35 MPa,
- hybridní princip trakčního pohonu: trakční výkon vozidla lze prostřednictvím vyrovnávacího akumulátoru krátkodobě zvýšit na několiknásobek výkonu palivového článku,
- zachování výborných trakčních a brzdových vlastností na úrovni EMU (1 700 kW, 160 km/h, vysoce účinná rekuperační elektrodynamická brzda, pohon a elektrodynamické rekuperační brzdění 2/3 dvojkolí),
- i na tratích bez trakčního vedení disponují vysokým výkonem a vysokým zrychlením, jak je obvyklé na elektrifikovaných tratích. Tím zásadním způsobem zkracují jízdní doby a zvyšují kvalitu regionální osobní dopravy,
- doplňování zásob stlačeného vodíku staticky za stání ve vodíkové plnicí stanici 35 MPa,
- připojení vysokotlakou hadicí,
- plnění probíhá v neveřejném prostoru plnicí stanice,
- dojezd: cca 600 km,
- čas pro plné naplnění: ve spolupráci s DB je vyvíjen systém rychlého plnění za 15 minut při řízení bezpečné teploty expanze na bázi intenzivního chlazení a datové komunikace mezi stacionárním a mobilním zásobníkem,
- není uvažována přestavba na EMU po případné elektrifikaci linky.



Vodík není levným nositelem energie, fyzikální zákonitosti snižují účinnost ukládání elektrické energie do vodíku na 1/3 a nádrže na vodík jsou těžké. Taková je realita.

Proto je velmi důležité, aby vodíkové vozidlo bylo energeticky nenáročné, tedy aby bylo velmi lehké a přitom aby mělo hmotnostní a rezervu na uložení vodíkové technologie. Plus aby bylo všestranně energeticky optimalizováno.

K minimalizaci spotřeby vodíku vychází vozidlo Mireo Plus H (HMU) z osvědčené platformy vozidel Mireo (EMU):

- velmi lehké podvozky s vnitřním rámem,
- hmotnostně optimalizovaná skříň,
- Jakobsovo usprádnání pojezdu (úspora jednoho podvozku),
- energetický management,
- vysoce výkonná lithiová vyrovnávací akumulátorová baterie pro stabilizaci pracovního bodu palivových článků v optimu účinnosti,
- moderní palivové články Ballard,
- SiC měniče s vysokou účinností,
- SW optimalizace jízdy,
- výkonná rekuperační EDB působící na 2/3 dvojkolí, při provozním brzdění je možno minimalizovat použití mechanického třecího brzdění a kinetickou i potenciální energii vlaku rekuperovat,
- využití odpadního tepla z palivových článků pro vytápění interiéru.

Výsledkem je lehké a přitom pro cestující atraktivní vysoce výkonné vozidlo Mireo Plus H (HMU) s výbornou dynamikou jízdy na úrovni moderních trolejových trakčních jednotek EMU.

Trakční jednotky Mireo Plus B (EMU) a Mireo Plus H (HMU)

SIEMENS

Cílem aplikace dvouzdrojových vozidel trolej / akumulátor (BEMU), respektive vodíkových palivočlánkových vozidel (HMU), není jen náhrada naftových vozidel bezemisními, ale též zvýšení rychlosti a tím i atraktivity energeticky a environmentálně výhodné železniční dopravy. Podstatným efektem je motivace obyvatelstva k preferenci energeticky a environmentálně výhodné železniční dopravy před individuální automobilovou dopravou – docílení velkých extramodálních úspor energie a emisí.

Proto disponují vozidla Mireo Plus B (BEMU) a Mireo Plus H (HMU) i na tratích bez trakčního vedení vysokým výkonem 1 700 kW, vysokým zrychlením přes 1 m/s^2 a nejvyšší provozní rychlostí 160 km/h, jak je obvyklé u EMU na elektrifikovaných tratích. Tím zásadním způsobem zkracují jízdní doby a zvyšují kvalitu regionální osobní dopravy.



Náhrada fosilních elektráren obnovitelnými zdroji elektrické energie, zejména fotovoltaickými a větrných elektrárnami, je spojena s jejich volatilitou, tedy časovou proměnlivostí. Řiditelné zdroje nahrazovány zdroji náhodně časově proměnlivými.

Rovnováhu mezi výkonem zdrojů a příkonem spotřeby je potřeba v elektrizační soustavě zajistit v každém okamžiku ročního času. Nástroji k tomu jsou akumulární vodní elektrárny, bateriová úložiště, pohotovostní paroplynové elektrárny, řízení/odložení spotřeby. A také předimenzování volatilních zdrojů tak, aby dodávaly dostatek energie nejen v období ideálních slunečných a větrných podmínek, ale i v případě poněkud zhoršených slunečných a větrných podmínek.

To nezbytné předimenzování volatilních zdrojů pochopitelně vede za příznivého počasí ke vzniku převisu nabídky výroby elektrické energie nad poptávkou po její spotřebě. Jednou z možností jak tyto přebytky elektrické energie smysluplně využít, je jejich ukládání do vodíku.

Technicky je tento proces logický, tématem k řešení je jeho ekonomická efektivnost.

Projekt DB H2goesRail představuje velmi šikovné využití specifik historicky vzniklého elektrického napájení německých železnic (vlastní větrné elektrárny, vlastní přenosové vedení 1 AC 110 kV 16,7 Hz, pravidelná nízká spotřeba trakční energie v období nočního sedala osobní dopravy, vysoká přenosová schopnost trakčního vedení 15 kV 16,7 Hz, holdingové usprádaní DB finančně propojující napájení železnic a provoz vozidel, ...) k minimalizaci investičních i provozních nákladů vodíkových vozidel.

Podmínky v české energetice a na české železnici jsou výrazně odlišné, komplexní systémový projekt DB H2goesRail nelze v podmínkách ČR uskutečnit. Je však nepochybně inspirativním příkladem cílevědomé snahy o vytvoření bezemisní mobility, udržitelné environmentálně, ekonomicky i sociálně.

Děkuji Vám za Vaši pozornost!

SIEMENS



Jiří Pohl
Senior Engineer
Engineering
Siemens Mobility, s.r.o.

Siemensova 1
155 00 Praha
Česká republika

Mobilit: +420 724 014 931

E-mail:

jiri.pohl@siemens.com