

Energetická náročnost a environmentální dopady výroby vodíku

Energy Demand and Environmental Impacts of Hydrogen Production



Autoři: Ing. Marek Carbol, Ing. Adam Poul, Ing. et Ing. Libor Špička

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Souhrn:

Článek se zabývá environmentálními dopady a energetickou náročností výroby vodíku technologií elektrolýzy vody elektrolýzérům typu PEM (proton exchange membrane). Zahrnuta je inventarizace vstupních dat pro výrobu PEM elektrolýzérů a jeho provozu. Elektrická energie potřebná pro elektrolýzu vody má nejvyšší podíl na dopady vzniklé během provozu elektrolýzérů. Analýza zahrnuje konec životnosti konstrukčních celků pro výrobu vodíku na základě materiálového složení. V analýze je zahrnut celý životní cyklus – výroba, provoz a konec životnosti – zařízení pro výrobu vodíku. Výsledky studie jsou vyjádřeny grafickým srovnáním na základě rozdělení dle složení energetického mixu ČR v letech 2024, 2030, 2040, tedy elektrické energie vstupující do elektrolýzy vody.

Summary:

The article deals with the environmental impact and energy consumption of hydrogen production by the PEM (proton exchange membrane) technology. The analysis deals with the inventarization of the PEM electrolyser production and its operation. The electrical energy required for the electrolysis of water is the largest share of the impacts generated during the operation of the electrolyser. The analysis includes end-of-life design assemblies for hydrogen production, based on material composition. The results of the study are expressed in a graphical comparison based on the distribution according to the year 2024, 2030, 2040 of the energy mix of the Czech Republic and thus of the electrical energy entering the electrolysis of water.

Klíčová slova

Vodík, energetická náročnost, posuzování životního cyklu, elektrolýza vody.

Key Words

Hydrogen, energy intensity, life cycle assessment, water electrolysis.

Úvod

V současné době existují v evropské legislativě pouze dva preferované druhy vodíku, obnovitelný a nízkouhlíkový. Nejvíce preferovaný je takzvaný obnovitelný vodík, na který mohou členské státy směřovat investiční a provozní podporu. Obnovitelný vodík je definován v návrhu Směrnice o obnovitelných zdrojích energie, označované RED III [1]. Obnovitelný vodík je vyráběn z plně obnovitelné elektřiny (vyjma biomasy) a je považován za obnovitelné palivo nebiologického původu (RFNBO). Druhým typem je nízkouhlíkový vodík, jehož definice je uvedena v návrhu Směrnice o společných pravidlech pro vnitřní trh pro plyny z obnovitelných zdrojů, se zemním plynem a s vodíkem [2].

Pro výrobu vodíku je uvažován elektrolyzátor s polymerní elektrolytickou membránou (PEM). Hlavní výhody PEM jsou vysoká účinnost a rychlá reakce na změny v zatížení.

Dle taxonomie EU musí o nízkouhlíkový vodík získávaný z neobnovitelných zdrojů splnit úsporu emisí 70 % oproti referenčnímu palivu, respektive dosahovat emisní stopy 3,38 kg CO₂ ekv na 1 kg vodíku. Nejrozšířenější způsob výroby vodíku je parní reforming zemního plynu, což je varianta, která do budoucna nebude podporována. Podle aktuálně platné legislativy bude podporována v EU pouze elektrolytická výroba vodíku z plně obnovitelné elektřiny a z nízkouhlíkové elektřiny.

Vodík je potenciální zdroj energie pro dopravu. Dále je z něj možné vyrábět syntetická paliva, například metan, metanol, amoniak, syntetický benzin a naftu. V tomto

článku je hodnocena spotřeba energie a uhlíková stopa výroby vodíku v závislosti na energetickém mixu ČR v letech 2024, 2030, 2040. Cílem je určit vliv elektro-energetického mixu na uhlíkovou stopu, energetickou náročnost vodíku a určit, který zdroj elektrické energie lze použít pro výrobu nízkouhlíkového vodíku.

Použitá metoda posuzování životního cyklu (LCA), daná standardy ČSN EN ISO 14040 a ČSN EN ISO 14044, zohledňuje reálné dopady výroby vodíku na životní prostředí a zabráňuje pouhému přesunu environmentální zátěže na jiné, méně viditelné místo životního cyklu.

Inventarizace dat výroby a provozu

Vzhledem k tomu, že technologie výroby vodíku jsou zatím relativně málo rozšířené, jsou zejména pro elektrolytickou výrobu vodíku provozní data obtížně dostupná. Inventarizace dat byla provedena na základě odborných článků komerční databáze Ecoinvent [3].

Výroba PEM elektrolyzátoru

Pro výrobu vodíku je uvažován elektrolyzátor s polymerní elektrolytickou membránou (PEM). Hlavní výhody PEM jsou vysoká účinnost a rychlá reakce na změny v zatížení. V konstrukci komerčních elektrolyzátorů s proton výměnnou membránou jsou obsaženy vzácné kovy titan, iridium a platina. Tyto vzácné kovy se používají kvůli jejich vysoké odolnosti vůči korozi, vodivosti a schopnosti pracovat v extrémně náročném chemickém prostředí [4]. Titan se často využívá jako materiál pro proudové kolektory a konstrukční části elektrolyzátoru. Iridium a platina se používají jako katalyzátory. Iridium hlavně na anodě a platina na katodě [5]. Dalšími kovy v PEM elektrolyzérech jsou hliník, ocel a měď. Hliník se však díky své nízké hmotnosti

Tabulka 1.Vstupní data výroby PEM elektrolyzátoru

Svazek PEM	
Spotřeba materiálu na výrobu 1 kg H ₂	[kg]
Titan	0,00024927
Hliník	1,27E-05
Ocel	4,72E-05
Měď	2,12E-06
Nafion	7,55E-06
Aktivovaný uhlík	4,25E-06
Iridium	1,77E-07
Platina	1,77E-08

Pomocné systémy	
Spotřeba materiálu na výrobu 1 kg H ₂	[kg]
Nízkolegovaná ocel	2,27E-06
Vysokolegovaná ocel	8,97E-07
Hliník	4,72E-08
Měď	4,72E-08
Plast	1,42E-07
Elektronika	5,19E-07
Beton	2,64E-06

a dobré tepelné vodivosti může uplatnit v pomocných nebo konstrukčních částech, například při krytování, chlazení nebo pro rámovou strukturu. Nerezová ocel se v PEM elektrolyzérech využívá především pro mechanické části, proudové kolektory a podpurné struktury. Měď se používá v PEM elektrolyzérech hlavně pro elektrické propojení a rozvod proudu, protože má vynikající elektrickou vodivost, přičemž je chráněna tenkou, vodivou a chemicky odolnou vrstvou. Mezi poslední materiály v konstrukci PEM elektrolyzérů patří aktivní uhlí a nafion. Nafion hraje klíčovou roli jako iontově vodivá membrána. Jeho hlavní funkcí je oddělit anodový a katodový prostor a zároveň umožnit selektivní transport protonů (H^+) ze strany anody na katodu, kde reagují za vzniku vodíku.

Mezi pomocné systémy elektrolyzérů patří senzory počítačové řídicí jednotky, které slouží monitoringu parametrů elektrolyzérů, jako je teplota, tlak, proud a výkon. Dále jsou uvažovány obvody a napájecí zdroje pro dodávání konstantního elektrického proudu. Také chladicí okruh a systém distribuce vody, jejichž materiály jsou odolné vůči korozi a tlakům. V neposlední řadě jsou zahrnuty materiály na bázi elastomerů určeny k těsnění částí elektrolyzérů a zabránění úniků plynů. Materiálové složení pomocných systémů se skládá z nízkolegované a vysokolegované oceli, hliníku, mědi, plastu, betonu a elektro materiálů [6, 10].

V době, kdy je nadbytek elektrické energie (z obnovitelných zdrojů), je typ elektrolyzérů PEM vhodný k výrobě vodíku, do něhož se akumuluje energie. Sekundární výhody jsou kompaktnost, vysoká čistota vodíku a nízká teplota provozu. Nevýhody PEM jsou vysoké pořizovací náklady související s materiálovým složením (nafion, iridium a jiné) a citlivost na nečistoty ve vstupní vodě. Inventarizace produkce vodíku je rozdělena na výrobu elektrolyzérů včetně jeho pomocných systémů a provoz elektrolyzérů. Je uvažován elektrolyzér o výkonu 1,25 MW, tedy výkon, jakého dosahují komerční elektrolyzéry Siemens Silyzer 200, Frames, Nel-MC200. Sběr dat pro inventarizaci probíhal na základě know-how řešitelského týmu a odborné literatury zabývající se konstrukcí PEM elektrolyzérů [7,8], doplněnou o data meta-analýzy dopadů výroby vodíku PEM [9]. Životnost celého elektrolyzérů je limitovaná životností svazku PEM, který má životnost kratší než pomocné systémy elektrolyzérů. Životnost svazku PEM je 114 000 provozních hodin. [10].

Model PEM elektrolyzy uvažuje pouze vstupy vody a elektrické energie, přičemž specifická spotřeba vody se v praxi pohybuje kolem 20–30 l na 1 kg vyrobeného vodíku. Odpadní toky, jako je teplo, koncentrát či kyslík, nejsou zahrnuty, protože dále neinteragují se životním prostředím a nemají charakterizovaný dopad.

Provoz PEM elektrolyzérů

Ze vstupních dat elektrolyzy vody je modelována voda a elektrická energie na vstupu. Odpadní teplo, koncentrát ani kyslík nejsou modelovány, protože jako výstup už dále neinteragují se životním prostředím a není jim charakterizovaný žádný dopad. Vstupní data provozu PEM elektrolyzérů vycházejí z dat orgánu EU pro čistý vodík (Clean hydrogen partnership) [10]. Pro úpravu vody je uvažována reverzní osmóza s typickým podílem permeátu a odpadního koncentrátu kolem 40–60 % [11]. Podle České vodíkové technologické platformy (HYTEP) se v praxi celková spotřeba vody pohybuje v rozmezí 20–30 litrů vody na 1 kg vyrobeného vodíku [12].

Tabulka 2. Vstupní data provozu PEM elektrolyzérů

Provoz na výrobu 1 kg H_2	
demineralizovaná voda [kg]	9
surová voda [kg]	20
elektrická energie [kWh]	56
odpadní koncentrát [kg]	11
kyslík (vedlejší produkt) [kg]	8

Konec životnosti

Na konci životnosti elektrolyzérů je uvažováno jeho doručení do zařízení k likvidaci odpadu. Kovové části elektrolyzérů (ocel, měď, hliník, titan) jsou modelovány s mírou recyklace 95 % a 5% zastoupením skládkování [13]. Pro vzácné kovy (platina, iridium) je uvažována míra recyklace 90 % a 10 % skládkování [14]. Dále je modelováno 85 % recyklace a 15 % energetické využití plastu, 80 % recyklace a 20 % skládkování betonu, 100 % skládkování černého uhlíku. Pro nafion je uvažována míra recyklace 96 % a 4 % skládkování, elektronika je recyklována z 90 % a 10 % skládkována [15].

Energetický mix ČR

Elektrická energie vstupuje do elektrolyzy vody a tedy výroby vodíku. Proto je nutné určit zdroj elektrické energie, který s sebou nese zatížení s uhlíkovou stopou. Je uvažován elektro-energetický mix ČR pro rok 2024 na základě reálné spotřeby dle Energetického regulačního úřadu a platformy ENTSO-E. Pro výpočty je dále uvažovaná predikce Státní energetické koncepce pro roky 2030 a 2040, zveřejněná v roce 2024 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR. Dle řešitelského týmu je predikce pro rok 2040 relativně optimistická, především pro jadernou energetiku a obnovitelné zdroje. Je proto nutné brát v úvahu, že tato predikce může do určité míry zkreslovat výsledné hodnoty. Zastoupení jednotlivých zdrojů energie v uvedených letech je uvedeno v tabulce 3.

Tabulka 3. Elektro-energetický mix ČR

Zdroj energie	2024	2030	2040
Uhlí a uhelné deriváty	34,50 %	10,00 %	0,00 %
Zemní plyn	5,10 %	7,00 %	3,00 %
Jaderná energetika	40,90 %	45,00 %	56,00 %
Obnovitelné zdroje	18,50 %	37,00 %	40,00 %
Biomasa	3,20 %	7,90 %	9,20 %
Bioplyn	2,60 %	9,00 %	8,40 %
Biologicky rozl. část TKO	0,90 %	1,00 %	0,80 %
Vodní elektrárny	5,01 %	6,20 %	5,00 %
Větrné elektrárny	1,00 %	3,90 %	4,50 %
Fotovoltaické el.	5,70 %	8,70 %	11,70 %
Geotermální energie	0,00 %	0,20 %	0,30 %
Ostatní	1,00 %	1,00 %	1,00 %

Dále je ve výpočtech uvažována ztráta 6 % při distribuci elektrické energie dle ERÚ 2019.

Uhlíková stopa a energetická náročnost vodíku

Výsledné hodnoty zahrnují výrobu celého systému elektrolyzérů, provoz elektrolyzérů (primárně spotřeba elektrická energie a s ní spojené dopady) a konec jeho životnosti. K výpočtu uhlíkové stopy a energetické náročnosti byl použit software openLCA 2.2.0.

Uhlíková stopa vodíku

Příčinou vytváření skleníkového jevu není pouze oxid uhličitý, ale celá řada dalších látek, přispívajících ke změně klimatu. Proto za jednotku uhlíkové stopy je uvažován ekvivalent oxidu uhličitého CO₂ ekv, hodnoty

jsou vizualizovány na obrázku 1. Z výroby jednoho kilogramu vodíku PEM elektrolyzérem vzniklo v roce 2024 32,46 kg ekvivalentu oxidu uhličitého při vstupu elektrické energie z elektro-energetického mixu ČR. S proměnou predikovaného energetického mixu klesá uhlíková stopa až k hodnotě 7,19 kg CO₂ ekv v roce 2040. Dále je vyjádřena uhlíková stopa vzniklá z výroby 1 kg vodíku při použití elektrické energie z neobnovitelných zdrojů (uhlí, zemní plyn, jádro) dle obr. 1.

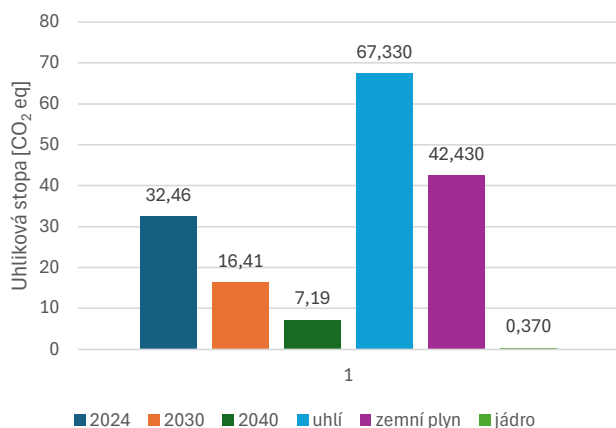
Energetická náročnost vodíku

Energetická náročnost je uvažována v celém životním cyklu, to znamená od výroby v elektrárně. Dle tabulky 2 do elektrolyzy vstupuje 56 kWh elektrické energie, v závislosti na účinnosti dané elektrárny se pak energetická náročnost mění. Energetická náročnost výroby 1 kg vodíku PEM elektrolyzou v roce 2024 dosahovala 189,08 kWh, zatímco v roce 2040 to bude 150,79 kWh, viz obrázek 2.

Závěr

Nejvíce preferovaný je obnovitelný vodík vyráběný pomocí elektřiny z OZE (vyjma biomasy) a splňující další dodatečná kritéria. Na obnovitelný vodík mohou členské státy EU směřovat investiční a provozní podporu. Druhý podporovaný je nízkouhlíkový vodík, který je v současné době a minimálně ve střednědobém horizontu podporován daňovým zvýhodněním.

Výroba 1 kg vodíku pomocí PEM elektrolyzérů v roce 2024 představuje 32,46 kg CO₂ ekv při použití českého energetického mixu. Při postupné transformaci mixu podle predikcí klesá tato hodnota do roku 2040 až na 7,19 kg CO₂ ekv.



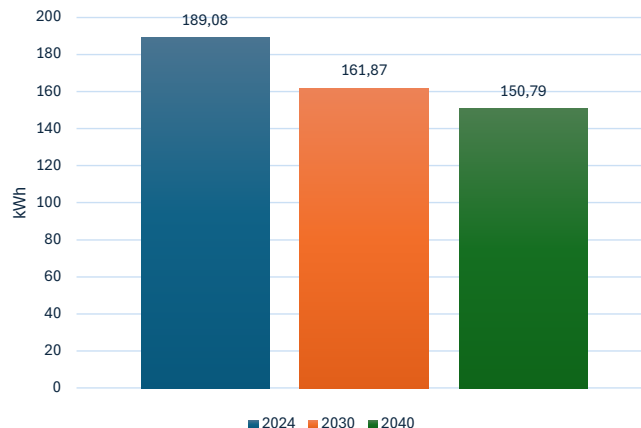
Obrázek 1. Uhlíková stopa výroby 1 kg vodíku

Pomocí metody LCA bylo zjištěno, že nejvyšší dopady při výrobě vodíku vznikají během fáze provozu elektrolyzátoru a jsou spojeny s elektrickou energií, která vstupuje do elektrolyzy vody. Vliv původu elektrické energie při výrobě vodíku je enormní a s transformací elektro-energetického mixu ČR dochází k postupnému snižování ekvivalentu oxidu uhličitého a energetické náročnosti. Největší vliv na snižování uhlíkové stopy výroby vodíku PEM elektrolyzou souvisí s použitím elektrické energie z obnovitelných zdrojů a jaderných elektráren. Ovšem elektrická energie z jaderných elektráren pro výrobu nízkouhlíkového vodíku není aktuálně podporována legislativou Evropské unie. Ke změně směrem k pozitivní podpoře jaderné elektrické energie pro výrobu nízkouhlíkového vodíku by mělo dojít dle návrhu doplnění směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2024/1788 nejdříve po roce 2026. Nízkouhlíkový vodík získávaný z neobnovitelných zdrojů musí splnit úsporu 70 % oproti referenčnímu palivu, tedy dosahovat 3,38 kg CO₂ ekv na 1 kg vodíku. Z výsledků vyplývá, že ani v roce 2040 nebude možné v ČR vyrábět nízkouhlíkový vodík pomocí elektřiny z energetického mixu. Podmínku uhlíkové stopy 3,38 CO₂ ekv na 1 kg vodíku splňuje pouze vodík, k jehož výrobě je použita elektrická energie z jaderných elektráren.

Tento článek byl vytvořen s finanční podporou Ministerstva dopravy v rámci programu dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumných organizací.

Zdroje

- [1] Směrnice o obnovitelných zdrojích energie (RED III), dostupná na: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:dbb7eb9c-e575-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0024.02/DOC_1&format=PDF.
- [2] Směrnice o společných pravidlech pro vnitřní trh pro plyny z obnovitelných zdrojů, dostupné: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2f4f56d-6-5d9d-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.0024.01/DOC_1&format=PDF.
- [3] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., et al. 2016, duben 21. The ecoinvent



Obrázek 2. Energetická náročnost výroby 1 kg vodíku ČR

database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment. Springer Science and Business Media LLC.

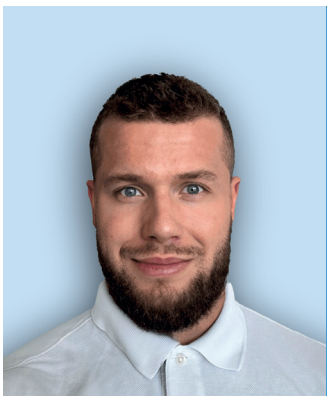
- [4] Baroutaji A., J.G. Carton, M. Sajjia, A.G. Olabi, Materials in PEM Fuel Cells, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2016, ISBN 9780128035818, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04006-6>.
- [5] Kumar S. Shiva, V. Himabindu, Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review, Materials Science for Energy Technologies, Volume 2, Issue 3, 2019, Pages 442-454, ISSN 2589-2991
- [6] Kay Bareiß, Cristina de la Rua, Maximilian Möckl, Thomas Hamacher, Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems, Applied Energy, Volume 237, 2019, Pages 862-872, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001>.
- [7] Kay Bareiß, Cristina de la Rua, Maximilian Möckl, Thomas Hamacher, Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems, Applied Energy, Volume 237, 2019, Pages 862-872, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001>.
- [8] Guangling Zhao, Mikkell Rykær Kraglund, Henrik Lund Frandsen, Anders Christian Wulff, Søren Højgaard Jensen, Ming Chen, Christopher R. Graves, Life cycle assessment of H₂O electrolysis technologies, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 43, 2020, Pages 23765-23781, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.282>.
- [9] Julian Wilkinson, Tim Mays, Marcelle McManus, Review and meta-analysis of recent life cycle assessments of hydrogen production, Cleaner Environmental Systems, Volume 9, 2023, 100116, ISSN 2666-7894, <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100116>.

- [10] FCH 2 JU – MAWP Key Performance Indicators (KPIs). Online. Clean Hydrogen Partnership. ©2025. Dostupné z: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/knowledge-management/strategy-map-and-key-performance-indicators/fch-2-ju-mawp-key-performance-indicators-kpis_en.
- [11] KOTAS, Jindřich. Základní funkce a princip reverzní osmózy (RO). Online. TZB-info. 2016. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/14589-zakladni-funkce-a-princip-reverzni-osmozy-ro>.
- [12] Základní informace k vodíku. Online. Česká vodíková technologická platforma. ©2025. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>.
- [13] Muhammad Haider Ali Khan, Tarun Sitaraman, Nawshad Haque, Greg Leslie, Serkan Saydam, Rahman Daiyan, Rose Amal, Sami Kara, Strategies for life cycle impact reduction of green hydrogen production – Influence of electrolyser value chain design, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 62, 2024, Pages 769-782, ISSN 0360 3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.081>.
- [14] Carmo, Marcelo & Keeley, Gareth & Holtz, Daniel & Grube, Thomas & Robinius, Martin & Müller, Martin & Stoltten, Detlef. (2019). PEM water electrolysis: Innovative approaches towards catalyst separation, recovery and recycling. International Journal of Hydrogen Energy. 44. 10.1016/j.ijhydene.2018.12.030.
- [15] UEKERT, Taylor. Electrolyzer and Fuel Cell Recycling for a Circular Hydrogen Economy. Online. ADVANCED SUSTAINABLE SYSTEMS. 2023. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adsu.202300449>.



Ing. Marek Carbol (*1994)

Absolvent VUT FSI v Brně. Od roku 2021 pracuji na výzkumných projektech v Centru dopravního výzkumu, v. v. i. Zabývám se environmentálními dopady a energetickou náročností během celého životního cyklu vozidel, paliv a konstrukčních celků metodou posuzování životního cyklu (life cycle assessment).



Ing. Adam Poul (*1994)

Absolvent oboru Řízení rizik technických systémů na Ústavu soudního inženýrství, VUT. V současné době se v CDV zabývá měřením emisí vozidel v reálném provozu, výzkumem v oblasti alternativních paliv a hodnocením životního cyklu vozidel a paliv.



Ing. et Ing. Libor Špička (*1975)

Absolvent VUT v Brně, obory Dopravní a manipulační stroje a Strojírenská technologie a průmyslový management. Od roku 2008 pracuje v Centru dopravního výzkumu, v. v. i., kde je garantem problematiky alternativních paliv a pohonů a problematiky měření emisí.