

METODIKA PRO PASPORTIZACI ŽELEZNIČNÍCH TRATÍ URČENÝCH PRO VLAKY S ALTERNATIVNÍMI POHONY



VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

SPRÁVA ŽELEZNIC, státní organizace

Metodika pro pasportizaci železničních tratí určených pro vlaky s alternativními pohony

Autoři:

prof. Ing. Stanislav MIŠÁK, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš PROKOP, Ph.D.

Ing. Jiří PAVEL, Ph.D.

Ing. David SEIDL, Ph.D.

Ing. Jiří CIGÁNEK, MBA

Ing. Mgr. Petr KOZEL, Ph.D.

doc. Mgr. Ing. František ZAPLETAL, Ph.D.

Oponenti:

prof. Ing. Václav CEMPÍREK, Ph.D., DBA

Ing. Dušan TYLICH

VŠB TECHNICKÁ
UNIVERZITA
OSTRAVA

CENTRUM ENERGETICKÝCH
A ENVIRONMENTÁLNÍCH
TECHNOLOGIÍ

CENTRUM
ENET



Tato Metodika pro pasportizaci železničních tratí určených pro vlaky s alternativními pohony byla vytvořena se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu THÉTA.

Stanislav Mišák

Centrum energetických a environmentálních technologií (CEET)

VŠB – Technická univerzita Ostrava (VŠB-TUO)

17. listopadu 2172/15

708 00 Ostrava-Poruba

Jiří Svoboda

Správa železnic, státní organizace

Dlážděná 1003/7

110 00 Praha 1

Název: Metodika pro pasportizaci železničních tratí určených pro vlaky s alternativními pohony

Autor: Stanislav Mišák a kol.

9370 – Centrum ENET, VŠB-TUO

Ostrava, 2024, 1. vydání

Počet stran: 67

Vydala: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Tisk: Tiskárna v Dubí s.r.o.

Náklad: 100 ks

Neprodejné

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-4743-6 (print)

ISBN 978-80-248-4744-3 (on-line)

Dedikace

Metodika je výstupem projektu TK04010081 „*Snížení energetické náročnosti a negativních vlivů na životní prostředí u železniční dopravy prostřednictvím přípravy infrastruktury pro vlaky na alternativní pohon*“. Tento projekt byl řešen Vysokou školou báňskou – Technickou univerzitou Ostrava ve spolupráci se Správou železnic v rámci Programu na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje Technologické agentury ČR, THÉTA.

Metodika byla schválena Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR dne 12.03.2024 na základě osvědčení č. j.: MPO 27597/2024.

Obsah

Obsah	1
Seznam obrázků.....	3
Seznam tabulek.....	4
Seznam zkratk.....	5
Seznam symbolů.....	6
Předmluva	7
Úvod	8
Vymezení základních pojmů	9
Charakteristika alternativních pohonů	10
3.1. Bateriový pohon.....	10
3.2. Vodíkový pohon.....	11
3.3. Omezující parametry alternativních pohonů	14
Metodika	19
Rozhodující faktory pro nasazení alternativního pohonu	21
Požadavky na infrastrukturu.....	26
6.1 Infrastruktura pro bateriový pohon	26
6.2 Infrastruktura pro vodíkový pohon	28
Aplikace metodiky na modelové trati	31
Aplikace postupu na vybrané trati.....	34
8.1. Výpočet celkové denní spotřeby energie	35
8.2. Výpočet průměrné spotřeby vodíku a elektrické energie	35
8.3. Výpočet celkového denního počtu ujetých kilometrů.....	36
8.4. Podrobný rozbor oběhů hnacích vozidel	36
8.5. Sumární zhodnocení jízdních řádů.....	36
8.6. Vodíkový pohon	37
8.7. Bateriový pohon.....	40
8.8. Diesellový pohon.....	40
8.9. Srovnání jednotlivých pohonů	41
8.10. Shrnutí aplikace metodiky pro trať č. 310	42
8.11. Orientační výpočet nákladů na vlakokilometr pro trať č. 310.....	43
8.12. Souhrn vstupních a výstupních proměnných	44
Doporučení	46
Závěr.....	47
Přílohy.....	48

Analýza nákladů a přínosů.....	48
1. Finanční analýza	49
2. Vstupní data pro finanční analýzu.....	49
3. Výstupní ukazatele finanční analýzy	52
4. Ekonomická analýza.....	53
5. Výstupní ukazatele ekonomické analýzy	54
6. Hodnocení rizik	55
Webová aplikace	58
Literatura	61

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma bateriové jednotky	11
Obr. 2 Schéma vodíkové jednotky	14
Obr. 3 Rozhodovací diagram I.	22
Obr. 4 Rozhodovací diagram II.	23
Obr. 5 Rozhodovací diagram III.	24
Obr. 6 Rozhodovací diagram IV.	25
Obr. 7 Příklad dobíjení vozidla pod pevnou trakční trolejí.....	27
Obr. 8 Příklad temperování baterií ze sítě 3x400 V.....	28
Obr. 9 Příklad plnící vodíkové stanice včetně infrastruktury	29
Obr. 10 Příklad mobilní plnící stanice	30
Obr. 11 Železniční vozy pro přepravu vodíku.....	30
Obr. 12 Investiční náklady pro jednotlivé druhy pohonů.....	31
Obr. 13 Provozní náklady pro jednotlivé druhy pohonů	32
Obr. 14 Odhad nákladů na vlakokilometr pro jednotlivé druhy pohonů	33
Obr. 15 Srovnání investičních nákladů pro jednotlivé uvažované varianty	42
Obr. 16 Srovnání denních provozních nákladů pro jednotlivé uvažované varianty.....	42
Obr. 17 Odhad nákladů na vlakokilometr pro jednotlivé druhy pohonu	44
Obr. 18 Schematické znázornění struktury finanční analýzy	49
Obr. 19 Porovnání reálné a simulované energetické náročnosti jízdy vlaku	58
Obr. 20 Energetická náročnost vlakového provozu (Plánovač provozu).....	58
Obr. 21 Energetická náročnost vlakového provozu (Vodík – S elektrolyzérem)	59
Obr. 22 Energetická náročnost vlakového provozu (Vodík – S dovozem vodíku).....	59
Obr. 23 Energetická náročnost vlakového provozu (Elektřina – Dobíjení pod trolejí 25 kV AC).....	60
Obr. 24 Energetická náročnost vlakového provozu (Výsledný výpočet).....	60

Seznam tabulek

Tab. 1 Energetické hustoty vodíku při různých tlacích a při teplotě 25 °C.....	13
Tab. 2 SWOT analýza prostá elektrizace v kombinaci s BEMU.....	16
Tab. 3 SWOT analýza BEMU bez možnosti dobíjení pod trakčním vedením (jízda vlaku mimo trakční vedení).....	16
Tab. 4 SWOT analýza HMU, HEMU	18
Tab. 5 Ceny za výměru pozemků v uvažovaných lokalitách.....	37
Tab. 6 Celkové investiční náklady pro výstavbu plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů	38
Tab. 7 Nejbližší zdroje vodíků pro uvažované lokality a jejich vzdálenosti	38
Tab. 8 Srovnání nákladů na přepravu vodíku v závislosti na zvoleném druhu dopravy.....	39
Tab. 9 Celkové investiční náklady pro výstavbu stanice lokální výroby vodíku	40
Tab. 10 Celkové denní náklady na nákup surovin pro lokální výrobu požadovaného množství vodíku.....	40
Tab. 11 Shrnutí dieselového pohonu	43
Tab. 12 Shrnutí výstavby plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů.....	43
Tab. 13 Shrnutí lokální výroby vodíku s jeho přepravou na bezprostřední vzdálenost	43
Tab. 14 Vstupní proměnné.....	45
Tab. 15 Výstupní proměnné	45
Tab. 16 Pravděpodobnost výskytu nežádoucích událostí Pj	56
Tab. 17 Závažnost dopadů nežádoucích událostí Sj.....	57
Tab. 18 Závažnost dopadů nežádoucích událostí Sj.....	57

Seznam zkratek

AC	střídavý proud	(Alternating Current)
B/C	poměr přínosů a nákladů	(Benefit-Cost Ratio)
CK	Centrální komise	
BEMU	bateriová elektrická jednotka	(Battery Electric Multiple Unit)
BMU	dvouzdrojová jednotka	(Bi-mode multiple unit)
HEMU	vysokorychlostní elektrická vícezdvořová jednotka	(Highspeed Electric Multiple Unit)
CBA	analýza nákladů a přínosu	(Cost-Benefit Analysis)
DC	stejnoseměrný proud	(Direct Current)
ED	elektro dispečink	
EHV	elektrické hnací vozidlo	
ENPV	ekonomická čistá současná hodnota	(Economic Net Present Value)
ERR	ekonomické vnitřní výnosové procento	(Economic Internal Rate of Return)
ERTMS	evropský systém řízení dopravy	(European Rail Traffic Management System)
FNPV	finanční čistá současná hodnota	
FRR	finanční vnitřní výnosové procento	(Financial Internal Rate of Return)
GVD	grafikon vlakové dopravy	
HDP	hrubý domácí produkt	
HMU	vozidlo s palivovými články na vodík	(Hydrogen Multiple Unit)
KSU	koordinační schéma ukolejení	
MD	Ministerstvo dopravy	
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu	
NN	nízké napětí	
OZE	Obnovitelný zdroj energie	
R	rychlík	
SEE	správa elektrotechniky a energetiky	
TC	trať celostátní	
TEN-T	transevropská dopravní síť	(Trans-European Network)
TNS	trakční napájecí stanice	
TP	trakční propojení	
TSI	technické specifikace pro interoperabilitu	
TTP	tabulky traťových poměrů	
TV	trolejové vedení	
UIC	mezinárodní železniční unie	(International Union of Railways)
VN	vysoké napětí	

Seznam symbolů

C	násobek kapacity baterie
CDP	celkový dopad projektu
Hrtkm	hrubý tunový kilometr, ukazatel hrubého výkonu hnacích vozidel
NB	náklady varianty bez projektu
NP	náklady projektové varianty
VB	výnosy varianty bez projektu
Vlhod	vlakohodina, hodina provozu vlaku
VP	výnosy projektové varianty

Předmluva

Předložená metodika „*Metodika pro pasportizaci železničních tratí určených pro vlaky s alternativními pohony*“ je jedním ze závěrečných výstupů projektu TK04010081 „*Snížení energetické náročnosti a negativních vlivů na životní prostředí u železniční dopravy prostřednictvím přípravy infrastruktury pro vlaky na alternativní pohon*“. Tento projekt byl řešen v období let 2022 až 2024 na VŠB-TUO na pracovišti Centra energetických a environmentálních technologií (CEET) ve spolupráci se Správou železnic. Projekt byl podpořen Programem na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje Technologické agentury ČR, THÉTA.

Metodika je koncipována pro využití v rozhodovacích oblastech nasazení alternativních pohonů na tratích spravovaných státní organizací Správa železnic. Metodika splňuje požadavky popsané v dokumentu [1] v aktuálním znění, zveřejněné Technologickou agenturou České republiky. Obsah metodiky navazuje na již zveřejněné metodiky dostupné na webových stránkách Ministerstva dopravy ČR [2].

Autory metodiky jsou **prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.**, hlavní řešitel projektu a členové řešitelského týmu:

doc. Ing. Lukáš Prokop, Ph.D.
VŠB-TUO

Ing. Jiří Pavel, Ph.D.
SŽ, úsek generálního ředitele,
ředitel odboru oddělení koncepce a strategie

Ing. David Seidl, Ph.D.
VŠB-TUO

Ing. Jiří Cigánek, MBA
SŽ, odbor strategie

Ing. Mgr. Petr Kozel, Ph.D.
VŠB-TUO

doc. Mgr. Ing. František Zapletal, Ph.D.
VŠB-TUO

Pro účely schválení byla metodika předložena k oponentnímu řízení. Oponentní posudky vypracovali:

prof. Ing. Václav Cempírek, Ph.D., DBA
Vysoká škola logistiky, o.p.s.
Palackého 1381/25
750 02 Přerov

Ing. Dušan Tylich
ČD DKV Olomouc
U podjezdu 1
73 01 Olomouc

Kapitola 1

Úvod

Česká republika patří mezi země s nejrozsáhlejší železniční sítí v Evropě. Celková délka tratí, které jsou v České republice ve správě státní organizace Správa železnic, činila na konci roku 2022 9 355 km [3]. Z této délky jsou téměř dvě třetiny tratí neelektrizovaných a na těchto tratích je v současnosti dominantně provozována vozba nákladních i osobních vlaků s využitím diesellových lokomotiv.

Během Klimatické konference v Paříži roku 2015 byla schválena všemi 195 stranami Pařížská dohoda, která má za úkol omezit emise skleníkových plynů po roce 2020. Tato dohoda vstoupila v platnost 4. listopadu 2017 i pro Českou republiku. Mezi jeden z nástrojů plnění této dohody patří nízkemisní strategie do roku 2050, pod které spadají i alternativní pohony vozidel.

Z dlouhodobého hlediska je provoz nezávislé trakce pomocí hnacích vozidel s diesellovým pohonem neudržitelný. Důvodů je více, přičemž nejvíce vnímaným je ekologie provozu. Diesellový pohon, byť moderního provedení, se totiž neobejde bez exhalací výfukových plynů. Moderní spalovací motory sice umí redukovat plyny vypouštěné do okolí do té míry, aby na své okolí působily co nejméně škodlivě, avšak sebelepší diesellový motor bude vždy vypouštět oxid uhličitý. Oxid uhličitý je sice netoxický plyn, nicméně, je to plyn způsobující skleníkový efekt, a tedy jeho uvolňování do volné přírody není z dlouhodobého hlediska udržitelné.

Stejně jako se v první polovině 20. století začalo na železnici přecházet z dominujícího parního pohonu na pohony elektrický a diesellový, bude i nyní nutné přenést se technologicky na jinou úroveň a hledat vhodné alternativy pro nový druh pohonu. Stejně jako se v první polovině 20. století mohly jevit nové elektrické lokomotivy, v porovnání s parními lokomotivami, jako slabé a nedokonalé, postupem času získaly svou dominanci a parní vozba se přesunula do historie.

Při rozhodování o novém typu pohonu(ů) je nutné zohlednit mnoho aspektů a rozhodování v tomto směru lze označit jako multikriteriální. Jedno z kritérií již bylo jmenováno, a to nutnost použít pohon vykazující nejnížší uhlíkovou stopu. Tedy nejnížší emise oxidu uhličitého do atmosféry. Při tomto rozhodování, ale nemůžeme brát v potaz pouze emise oxidu uhličitého při samotném provozu hnacího vozidla. Pro správnou kalkulaci musíme zohlednit emise skleníkových plynů v celé době životnosti vozidla a také při celém procesu výroby a převozu pohonných hmot. Problematika pojatá v této šířce sice již bude schopna detailněji kvantifikovat vliv jednotlivých uvažovaných variant, nicméně zpracování problematiky bude velmi náročné.

Mezi kritéria, která je nutno zohlednit nepatří jen hledisko environmentální. Další kritéria, která budou muset být uvažována, jsou například náročnost na zavedení nové infrastruktury, náročnost provozu vozidel, jejich oprav, revizí a údržby, vhodnost použití daného pohonu z hlediska dostupnosti potřebné energie, ať již chápáno lokálně v rámci České republiky, nebo globálně, tedy dostupností na světovém trhu. Nikoli nevýznamné je hledisko ekonomické, které bude rozhodující z pohledu financování a udržitelnosti.

Cílem předložené metodiky je stanovit postupy, které jsou nutné pro optimální rozhodování o nasazení vhodného alternativního pohonu na vybrané železniční trati.

Kapitola 2

Vymezení základních pojmů

V rámci této kapitoly budou představeny základní pojmy, které jsou nutné pro následný popis problematiky a bude na ně v textu metodiky dále odkazováno.

Alternativní pohon

Alternativní pohon je pohon vozidel za pomoci jiných než běžně používaných zdrojů energie, často za účelem snížení ekologické zátěže.

Běh hnacího vozidla

Jízdní řád pro konkrétní hnací vozidlo, včetně přesunů vozidla mezi stanicemi, servisními jízdami a podobně.

Demineralizovaná voda

Demineralizovaná voda je voda zbavená všech iontově rozpustných látek a křemíku.

Nabíjecí a vybíjecí proud

Nabíjecí a vybíjecí proud je proud při nabíjení nebo vybíjení akumulátorů, často udávaný v jednotkách „C“, kdy baterie o kapacitě 100 A·h dobíjená proudem 100 A odpovídá dobíjení 1C.

Rekuperace

Rekuperace je proces přeměny kinetické energie dopravního prostředku zpět na využitelnou elektrickou energii při brzdění.

Trakce

Trakce označuje způsob pohonu železničních kolejových vozidel po dráze.

Vozba

Vozba je specifický výraz pro tažení vozidla po dráze.

Dráha

Dráha je soustava dopravních zařízení, která vozidlo vedou a na nichž je závislé (např. kolejové vedení).

Kapitola 3

Charakteristika alternativních pohonů

V předcházející kapitole 2 bylo uvedeno, že alternativní pohon je pohonem vozidla, využívajícím jiný než běžně používaný zdroj energie, a to často za účelem snížení ekologické zátěže. V kontextu uvedeného je však vhodné doplnit, že v rámci předložené metodiky budou těmito alternativními pohony železničních vozidel chápány dvě základní varianty, a to:

- pohon využívající jako zdroj energie akumulátorový blok – dále jen „*bateriový pohon*“,
- pohon využívající jako zdroj energie palivové články – dále jen „*vodíkový pohon*“.

Zároveň je vhodné doplnit, že přestože tzv. prostá elektrizace není v přesném slova smyslu vnímána jako samostatná varianta alternativního pohonu, její realizace rovněž může významně přispět ke snížení uhlíkové stopy, resp. ke snížení ekologické zátěže. Prostou elektrizaci je možné provozovat v kombinaci s bateriovým pohonem pro zajištění větší dojezdové vzdálenosti bateriově napájených jednotek.

Každá z výše jmenovaných variant, které jsou považovány za varianty alternativního pohonu železničních vozidel, má své výhody, ale také svá úskalí, kterými je třeba se detailněji zabývat. Následující text je proto věnován základní charakteristice obou variant.

3.1. Bateriový pohon

Provoz vlaku na bateriový pohon není novinkou, tento způsob pohonu se minoritně využíval i v minulosti, například pro pohyb lokomotiv v depu [4], [5]. Pro traťovou vozbu vlaků se prozatím bateriový pohon nevyužíval. Bylo to dáno především malou kapacitou baterií a jejich značnou hmotností. S rozvojem obnovitelných zdrojů a elektromobility se vývoj baterií značně agregoval a v současnosti využívané technologie pro výrobu baterií umožňují dosahovat takový poměr hmotnosti a akumulované energie, která bez větších komplikací umožní provoz bateriových osobních vlaků na vybraných traťových úsecích.

3.1.1. Nabíjení baterií

Pro dobíjení baterií v elektrických jednotkách lze primárně využívat systém trakčního vedení na straně dopravní infrastruktury a sběrače na straně železničního vozidla. Technicky možné je dobíjení baterií pomocí kabelového připojení ze silnoprůdého zařízení, které se používá například pro předtápění souprav, třífázového stojanu 400 V AC apod. Využití trakčního vedení pomocí trolejového drátu a pevného vedení umožňuje dobíjení baterií za jízdy vozidla pod tímto vedením i při pobytech ve stanicích. Výhodou je vysoký dostupný výkon a žádné dodatečné personální a organizační nároky na obsluhu. Dobíjení pomocí kabelového připojení je vhodné v případě nočního odstavení, kdy se zpravidla provádí servisní úkony na vozidlech a není nutný takový elektrický výkon (delší čas pobytu BEMU ve stanici), jako v případě denního dobíjení, kdy je nutná určitá rychlost dobíjení (kratší čas pobytu BEMU ve stanici). Na síti Správy železnic lze dle stávajícího rozsahu elektrizace využít trakční vedení střídavé napájecí soustavy AC 25 kV, 50 Hz nebo stejnosměrné napájecí soustavy DC 3 kV, kde je ale nutné počítat s omezeným nabíjecím proudem dle EN 50367.

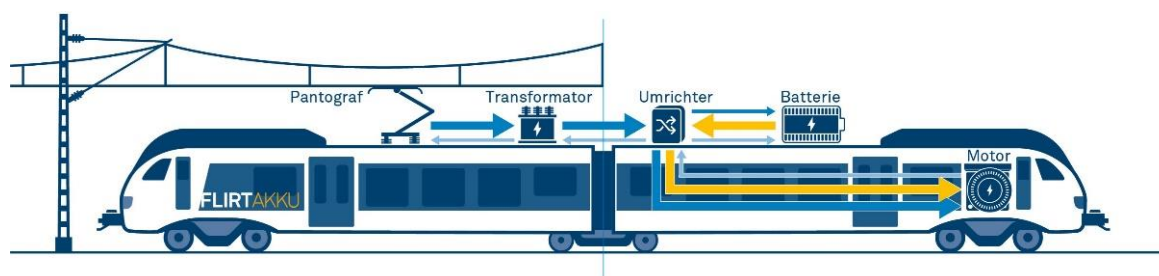
3.1.2. Dojezdová vzdálenost

Výrobci železničních vozidel uvádějí tzv. parametr dojezdové vzdálenosti s využitím uložené elektrické energie v bateriích. V současné době mají dostupné bateriově poháněné jednotky

hodnotu dojezdu přibližně mezi 60 až 80 km. Tento parametr je dán při 100 % využití energie uložené v bateriích. Z důvodu neohrožení bezpečnosti cestujících v železničním vozidle je potřeba počítat s nižší dojezdovou vzdáleností, spotřebou netrakční energie železničního vozidla (klimatizace, topení, svícení), počty nabíjecích cyklů baterií, které snižují jejich kapacitu a v neposlední řadě sklonové poměry na trati. Z údajů vyplývá, že parametr dojezdové vzdálenosti pro typové bateriové jednotky lze brát jen velmi orientačně s omezenou vypovídací schopností pro konkrétní traťové úseky. Zásadními faktory, které mají vliv na praktickou dojezdovou vzdálenost s využitím baterií, jsou sklonové poměry na trati, maximální traťová rychlost, počet zastavení na trati, rozsah rychlostních propadů, možnosti rekuperace elektrické energie a celková jízdní doba od začátku takového úseku až po jeho konec. Uváděnou teoretickou dojezdovou vzdálenost je nutné brát pouze orientačně. Dojezdovou vzdálenost v režimu aktivního využití baterií je vždy nutné vypočítat samostatně pro konkrétní trať a směr jízdy se zohledněním vzorového jízdního řádu.

3.1.3. Netrakční spotřeba

Do celkové spotřeby elektrické energie je nutné započítat i tzv. netrakční spotřebu, kdy se jedná o energii pro vytápění, klimatizaci, osvětlení, pomocné pohony apod. Dle předběžných zjištění je očekávaný příkon netrakčních odběrů pro jednu dvouvozovou jednotku v rozmezí 80 až 100 kW. Konkrétní netrakční spotřeba bude v praktickém provozu velmi variabilní vzhledem k výkyvům počasí a bude v praxi nutné podrobněji posoudit spotřebu pro jednotlivé linky. Netrakční spotřeba se může na celkové spotřebě energie podílet i více jak dvaceti procenty a není tedy rozhodně zanedbatelnou veličinou.



Obr. 1 Schéma bateriové jednotky

Zdroj: [6]

Na Obr. 1 je schematicky zachycena bateriová jednotka Flirt Akku. V levé části Obr. 1 je znázorněn sběrač (Pantograf), transformátor, konvertor (Umrichter), baterie a trakční motor. Zároveň jsou barevně zaznačeny toky energií. Tmavě modrá barva představuje tok energie odpovídající napájení z trakčního vedení. Žlutá pak představuje tok energie odpovídající napájení z baterie. Světle modrá pak odpovídá rekuperačnímu toku energie.

3.2. Vodíkový pohon

Pohon vlaků na vodík patří rozhodně k nejnovějším přírůstkům do portfolia možných uvažovaných druhů pohonu vlaků. Důvodů, proč byl právě vodík zvolený jako vhodné médium pro uložení energie, je hned několik. Především se jedná o chemický prvek, který se v přírodě velmi hojně vyskytuje, a to nejčastěji ve vazbě s jinými chemickými prvky, ve formě vody, uhlovodíků, v organických sloučeninách a dalších. Pro uvolnění vodíku z vazby s jiným prvkem je zapotřebí dodat energii. Tuto dodanou energii je možné zpětně získat při opětovném slučování vodíku. Toto je základní princip, jak je možné využít vodík pro ukládání energie.

Plynný vodík je možné značně stlačit, což zvýší množství skladované energie připadající na jednotku objemu. Výroba vodíku a také opětovné využití energie v něm uskladněné, je možná bez

mechanických částí, což je výhodné z pohledu opotřebení. Samozřejmě, každá mince má dvě strany, a tak i vodíkový pohon má své nevýhody. Především se jedná o náročnou technologii z pohledu použitých materiálů a procesů. Chceme-li tvrdit, že je vodík ekologickým palivem, musíme zajistit jeho ekologickou výrobu, a to při zachování všech klíčových parametrů. [7]

3.2.1. Výroba vodíku

Vodík jako plyn se dá průmyslově vyrábět více způsoby mezi které patří následující: [8]

- parní reforming zemního plynu,
- termochemická konverze (pyrolýza, plazmové zplyňování),
- elektrolýza vody.

Parní reforming zemního plynu

Parní reforming zemního plynu je nejběžnější metodou průmyslové výroby vodíku. Zemní plyn, methan (CH_4) reaguje s vodní párou za vysokých teplot a tlaku v přítomnosti katalyzátoru, což vede k tvorbě vodíku (H_2) a oxidu uhličitýho (CO_2). Tento proces produkuje vodík s vysokou čistotou, ale současně vytváří oxid uhličitý, což je skleníkový plyn, a proto bývá výsledný produkt (H_2) nazýván jako tzv. „hnědý vodík“. Standardní parní reforming zemního plynu může produkovat vodík s čistotou v rozmezí 95 % až 99 %. To znamená, že vodík získaný touto metodou bude obsahovat 95 % až 99 % čistého vodíku a zbytek tvoří různé plyny, jako je oxid uhličitý (CO_2), oxid uhelnatý (CO), methan (CH_4), vodní pára (H_2O) a další nečistoty. Takto vyrobený vodík se musí pro použití v palivových článcích užívaných v dopravních prostředcích dočistit.

Termochemická konverze (pyrolýzní proces, plazmatické zplyňování)

Pyrolýza, stejně jako plazmové zplyňování, je proces, při kterém se organický materiál rozkládá za vysokých teplot bez přístupu kyslíku (O_2), což vede k uvolnění vodíku (H_2). V praxi bývá čistota vodíku vyrobeného termochemickou konverzí nižší než u vodíku vyrobeného jinými metodami, jako je například parní reforming. Čistota vodíku závisí na účinnosti procesu oddělování nečistot a na kvalitě surovin použitých pro pyrolýzu. Protože se pyrolýza používá velmi často pro spalování odpadu, je zajištění kvalitních surovin v tomto procesu velmi obtížné, a proto je i výsledná kvalita vodíku velmi volatilní. Pyrolýzní proces je z hlediska získávání vodíku nejméně účinný.

Elektrolýza vody

Metoda výroby vodíku pomocí elektrolýzy vody (H_2O) je metodou, kterou lze vyrobit vodík o nejvyšší čistotě. Pro výrobu vodíku touto metodou jsou zapotřebí v zásadě dvě komodity, a to je voda a elektrická energie. Má-li být vodík označován jako „zelený“, musí být elektrická energie vyrobena z obnovitelných zdrojů, což není mnohdy možné. Pokud je pro výrobu vodíku využita elektřina z energetického mixu dané země, většinou již nelze mluvit o zeleném vodíku, tedy o vodíku vyrobeném čistě z obnovitelných zdrojů energie. Další potřebná komodita je demineralizovaná voda. Tedy voda o velmi velké čistotě, která je zbavena všech minerálních látek a iontů, jako jsou vápník (Ca), hořčík (Mg), sodík (Na), chloridy, sírany a další anorganické soli. Na kvalitě této vody přímo závisí čistota výsledného vodíku. Výroba demineralizované vody se nejčastěji děje za pomoci tzv. reverzní osmózy, což je proces, kdy se voda protlačuje membránou, která propustí pouze molekuly vody, ale ne minerální látky. Kvalita procesu výroby demineralizované vody je tedy úzce spjata s kvalitou použité membrány. Proces reverzní osmózy vyžaduje použití tlakového čerpadla, které vytváří dostatečný tlak na překonání osmotického tlaku a umožní průchod vody skrze membránu. Minerální látky a nečistoty zůstávají za membránou a jsou odtahovány do odpadního proudu, zatímco čistá voda prochází membránou a je zachycena v čistém proudu. Pro účely výroby vodíku, který se následně spaluje v palivových článcích za vzniku elektrické energie a vody se nejčastěji využívá metody elektrolýzy vody, kdy je možné

dosáhnout požadovanou čistotu výsledného produktu, bez nutnosti dalšího dočišťování. Navíc, pokud je zajištěn ekologicky šetrný zdroj elektrické energie, je možné takto vyrobený vodík označit jako „zelený“.

Prozatím jediný způsob, jak využít vodík, coby ekologického paliva, je jeho výroba v elektrolyzérech, které budou napájeny z ekologicky šetrných zdrojů. Ideálně z energie pocházející z větrných a solárních elektráren. Využití odpadního vodíku z jiných technologických procesů je také možné. Vzniká zde ale problém s čistotou vodíku, která je v těchto případech nedostačující a takový vodík je nutné dočišťovat, což opět zvedá technologickou náročnost.

3.2.2. Skladování vodíku

Vodík se při běžném tlaku a teplotě vyskytuje jako plyn. Jeho uskladnění je tedy v první řadě možné v tlakových nádobách. Je zřejmé, že čím bude v tlakové nádobě vyšší tlak vodíku, tím bude uskladnění efektivnější, tedy ve stejném objemu bude uskladněno více vodíku. To samozřejmě klade velmi velké nároky na kvalitu provedení tlakových nádob. Běžně se využívá tlaku až 1000 barů, tedy tisícinásobný tlak, než je tlak atmosférický.

Další metodou, jak vodík uchovávat, je změna jeho skupenství z plynného na kapalně. Tento proces je energeticky náročný, ale umožňuje tak značně navýšit hodnoty uchované energie na jednotku objemu. Velká nevýhoda této metody je, že kapalný vodík má teplotu zhruba -253 °C a při běžných teplotách se velmi rychle vypařuje.

Existuje i teoretická možnost skladovat vodík v pevné fázi, kde by bylo dosaženo ještě větší energetické objemové hustoty. Zde je ale výzkum stále ve svých počátcích, a reálné aplikace lze očekávat za velmi dlouhou dobu. Energetická hodnota kapalného vodíku při teplotě -253 °C , resp. 33 K a při hustotě $70,85\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ činí $2784,4\text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{l}^{-1}$. Energetické hustoty plynného vodíku při různých tlacích a při teplotě 25 °C jsou pak uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Energetické hustoty vodíku při různých tlacích a při teplotě 25 °C

Tlak (bar)	Hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Energetický obsah ($\text{W}\cdot\text{h}\cdot\text{l}^{-1}$)
1	0,081	3,2
10	0,8081	31,8
100	7,671	301,5
350	23,351	917,7
700	38,256	1503,5

Zdroj: Vlastní zpracování s využitím [9]

3.2.3. Přeprava vodíku

Jelikož je vodík za běžných tlaků v plynné fázi, je proto jeho přeprava pomocí potrubí efektivním způsobem, který se používá jednak v průmyslu pro přepravu mezi jednotlivými provozy, jednak pro dálkovou přepravu vodíku pomocí plynovodů. S dopravou vodíku potrubím jsou dlouhodobé zkušenosti a jde o nákladově efektivní a bezpečný způsob přepravy. Pro přepravu vodíku není ale možné používat armatury a kompresory užívané pro zemní plyn, protože molekula vodíku je menší, než molekula zemního plynu a vodík má také jiné fyzikálně-chemické vlastnosti. V souvislosti s vodíkem se také mluví o vodíkové křehkosti, která se týká atomárního vodíku, proto není problémem při přepravě vodíku za běžných podmínek, kdy je vodík pevně vázán v molekulách. Vodíková křehkost se projevuje hlavně při zpracování ocelí (moření, svařování, styk s elektrolytem apod.), kdy samostatné vodíkové atomy pronikají do krystalické mřížky oceli, kde se pak spojují do vodíkové molekuly, která má větší objem a tím narušuje krystalickou mřížku.

Dalším způsobem je přeprava vodíku jako vázaného prvku v jiné sloučenině, například v uhlovodících. Proces navázání a uvolnění vodíku z nosného média je technicky i finančně náročný a má negativní vliv na čistotu produktu. Přeprava vodíku v tlakových lahvích ve vlacích a nákladních automobilech je zřejmě nejčastější způsob přepravy, nicméně jeho velké úskalí je neefektivita přepravy, kdy přepravovaný vodík má jen zanedbatelnou hmotnost v porovnání s hmotností železničního vozu nebo nákladního automobilu. Za předpokladu, že je v místě spotřeby k dispozici dostatečné množství energie a zdrojů, může jít o efektivní způsob, jak vyrobit vodík na místě a eliminovat, tak náklady na přepravu vodíku. Cena elektrické energie v konkrétním místě závisí na připojovacích podmínkách a poplatcích příslušného distributora v daném místě připojení. Podrobněji to bude řešit Technicko-ekonomická studie.

3.2.4. Efektivita konverze vodíku

Velmi diskutovaným parametrem u vodíkových technologií je celková účinnost. Výroba vodíku elektrolyzou má účinnost zhruba 55 % [10], podobně je účinný i proces přeměny vodíku zpět v elektrickou energii. Pokud se do celkové bilance započítají i energie nutné pro ostatní procesy jako je komprese, čištění, ohřev a podobně, pohybuje se výsledná účinnost kolem 20 %. Je nutné také kalkulovat s tím, že technologie výroby vodíku pro pohon vlaků a automobilů je ve svých prvopočátcích a je pravděpodobné, že se efektivita celého procesu bude zvyšovat. Například tím, že se bude využívat vznikající nízkopotenciálové teplo, nebo generovaný kyslík. Taktéž, pokud prvotní elektrická energie využitá pro výrobu vodíku bude například energie vznikající ve špičkách výroby fotovoltaických elektráren, dá se očekávat, že taková energie bude mít nulovou nebo dokonce „zápornou cenu“.

Výroba vodíku se tedy může významným způsobem podílet na stabilizaci elektrorozvodné sítě, což může být další benefit, který může přispět k masovějšímu rozvoji této technologie.



Obr. 2 Schéma vodíkové jednotky

Zdroj: [11]

Obr. 2 schematicky popisuje vodíkovou jednotku Flirt H₂. Na obrázku je znázorněna vodíková nádrž (Wasserstoff-tank), palivový článek (Brennstoff-zelle), baterie, konvertor (Umrichter) a trakční motor. Barevně jsou zaznačeny toky energií. Žlutá představuje tok energie z vodíkového zdroje přes palivový článek a baterii směrem k trakčnímu motoru. Světle modrá pak odpovídá rekuperačnímu toku energie.

3.3. Omezující parametry alternativních pohonů

3.3.1. Bateriový pohon

Omezení je v tomto případě dáno samotnou baterií. Pro jednoduchost uvažujme s lithium-železo-fosfátovou baterií, která je v dnešní době na železnici dominující technologií a je označována jako LiFePO₄. Tento typ baterií nemá sice největší poměr hmotnosti ke kapacitě, má ale jednu významnou vlastnost, která je v technickém využití velmi důležitá. Tato baterie je nehořlavá, a to i při její destrukci, což zajišťuje její provozní bezpečnost i při vážných nehodách. Cyklovatelnost těchto baterií se může pohybovat okolo 8000 a více cyklů při úbytku kapacity zhruba 20 %. Pro

zachování životnosti LiFePO_4 baterie se doporučuje nabíjet ji pouze do 80 % její kapacity a nevybíjet ji pod 20 % její kapacity. Krátkodobé překročení těchto hodnot nemá na životnost velký vliv, nicméně dlouhodobé časté překračování těchto hodnot se negativně projeví na životnosti baterie. Energetická hustota LiFePO_4 baterie může být až $135 \text{ W}\cdot\text{h}$ na 1 kg hmotnosti. Tedy, pokud například budou baterie ve vozidle vážit 10 t , bude maximální dostupná kapacita až $1,35 \text{ MW}\cdot\text{h}$. Vybíjecí proudy mohou být až 10C , tedy desetinásobek hodnoty své kapacity. Nabíjecí proudy se doporučují udržovat do 3C . Tyto parametry se ale mohou u různých výrobců lišit. [12]

Kapacita baterií je omezujícím parametrem z hlediska dojezdu vlaku. Další omezující parametr pro vlakovou soupravu bude vždy hmotnost. Maximální hmotnost železničního vozidla je dána především parametry tratě, její přechodností. Není tedy možné navyšovat celkovou kapacitu baterií v železničním vozidle bez omezení. Jedním z hlavních omezujících parametrů bude celková dosažená hmotnost vozidla, lépe řečeno jeho nápravový tlak, což je právě limitující parametr pro provoz vozidla na konkrétní trati. [13]

Do celkové spotřeby elektrické energie je nutné započítat i netrakční spotřebu. Do výpočtů byla uvažována spotřeba $40 \text{ kW}\cdot\text{h}$ na vůz příslušné vlakové jednotky. Tuto hodnotu lze považovat za minimální. Do provedených výpočtů trakční i netrakční spotřeby nejsou zohledněny ztráty, které zpravidla vznikají při dobíjení baterií, kdy se přenáší velké množství energie do baterie a při přenosu dochází ke ztrátám, které se projevují většinou ve formě tepla. Konkrétní hodnoty těchto ztrát nebylo možné ověřit, a tedy ani zahrnout do výpočtů. SWOT analýza prosté elektrizace v kombinaci s BEMU je uvedena Tab. 2.

Hlavním parametrem pro použití BEMU vozidel je dojezd. Výrobci BEMU většinou uvádějí dojezd při plně nabitě baterii okolo 80 km . Pokud budeme počítat, že netrakční spotřeba z tohoto dojezdu ubere cca 20 %, tak ve výsledku vychází reálný dojezd BEMU na 64 km . Provoz BEMU bez liniové trakce je tedy značně omezen jeho dojezdem, a tudíž se dá předpokládat jeho využití na přípojných regionálních tratích. BEMU je možno nabít jak pod stávajícím trakčním vedením z odbočné tratě, tak i ze stacionární nabíjecí stanice na konci traťového úseku. SWOT analýza BEMU, kde není možnost dobíjet pod trakčním vedením (jízda vlaku mimo trakční vedení), je uvedena v Tab. 2.

Tab. 2 SWOT analýza prostá elektrizace v kombinaci s BEMU

Silné stránky	Slabé stránky
• Existence trolejového vedení napájeného střídavou trakcí. • Provozně levnější než vodíková vozba. • Elektrická trakce je již v ČR odzkoušena. • Po elektrizaci možnost provozu i nákladních vlaků trakce-diesel (např. Siemens Vectron AC DPM). • Dojde ke snížení emisí CO₂ v závislosti na čistotě energetického mixu.	• Při neexistenci části trati s trolejovým vedením ve střídavé trakci nutná úprava a vybudování infrastruktury. • Nutné odizolování kolejnic. • Investičně druhá nejdražší varianta (po plné elektrifikaci). • Kratší dojezd BEMU oproti HMU. • V současné době není vyvinuté BEMU pro těžké nákladní vlaky. • Nutná výměna zabezpečovacího zařízení a sdělovacích kabelů. V průběhu životnosti soupravy je nutné několikrát vyměnit baterie, které tvoří velkou část celkové ceny soupravy.
Příležitosti	Hrozby
• Při plánované konverzi možnost mřížového napájení (zálohovaného napájení). • Možný rozvoj nákladní dopravy na nově elektrifikovaných tratích.	• Při vybudování ostrovního provozu napájení trolejového vedení při výpadku vysokofrekvenčního měniče zastavený provoz. Při vzniku mimořádné události možné uvážnutí vozidla bez dostatečné dojezdové rezervy na neelektrifikovaném úseku trati.

Zdroj: Vlastní zpracování

Tab. 3 SWOT analýza BEMU bez možnosti dobíjení pod trakčním vedením (jízda vlaku mimo trakční vedení)

Silné stránky	Slabé stránky
• V době tvorby dokumentu provozně levnější než vodíková vozba. • Provozem BEMU za staré motorové vozy dojde ke snížení CO₂. • Při dojezdu z odbočné elektrizované tratě do 30 km není nutné budovat stacionární dobíjecí stanice. • Při nebudování stacionární dobíjecí stanice investičně nejlevnější varianta, co se týče infrastruktury.	• Limitovaný dojezd vozidla daný výrobcem vlakové jednotky a technickými možnostmi použité technologie na vlakové jednotce. • V současné době není vyvinuté BEMU pro těžké nákladní vlaky. • V průběhu životnosti soupravy je nutné několikrát vyměnit baterie, které tvoří velkou část celkové ceny soupravy.
Příležitosti	Hrozby
• Možné nahrazení starých motorových vlaků novými jednotkami šetrnějšími k životnímu prostředí. • Rozvoj BEMU v rámci oblastí krajů.	• Při vzniku mimořádné události možné uvážnutí vozidla bez dostatečné dojezdové rezervy. • Při zastavení provozu z důvodu nepříznivých povětrnostních vlivů (např. pádů stromů na trať) možné uvážnutí vozidla bez dostatečné dojezdové rezervy.

Zdroj: Vlastní zpracování

3.3.2. Vodíkový pohon

V současnosti se zdá, že hlavním problémem provozu vlakových souprav s vodíkovým pohonem je ekologicky šetrná výroba vodíku. Vodíkový pohon má významnou výhodu oproti čistě bateriovým

variantám díky schopnosti akumulovat velké množství energie v malém objemu. To umožňuje provoz vlaku s vodíkovým pohonem podobným způsobem jako u diesellových vlaků. Dojezd vodíkem poháněných souprav se pohybuje kolem tisíce kilometrů, což je dostatečné pro denní provoz většiny hnacích vozidel.

Z technického pohledu je provoz vlaků s vodíkovým pohonem náročný. Výroba vodíku ve velkém množství a s požadovanou čistotou je technologicky náročný úkol, vyžadující nejen vysoké náklady na pořízení technologických zařízení, ale také jejich pravidelnou údržbu. Při plnění nádrží se používají velmi vysoké tlaky, dosahující hodnot v řádu stovek barů, a tlak ve stacionárních zásobnících může dosahovat až tisíců barů. Tyto údaje naznačují, jak náročný proces správa vodíkového hospodářství je. Pro výrobu vodíku v elektrolyzáru je nezbytné zajistit dodávku elektrické energie, ale stejně důležitá je i kvalita demineralizované vody, která ovlivňuje výslednou kvalitu produktu. Celý tento proces vyžaduje pečlivé zajištění vhodných zdrojů energie a vody, což představuje další technické výzvy.

Z pohledu hnacích vozidel je provoz vozidla poháněného vodíkem podobný provozu vozidla na baterie. Vodíkem poháněná vozidla jsou vybavena vyrovnávacími trakčními bateriemi, které slouží jako akumulátory energie. To je nezbytné, protože vodíkové palivové články nedokážou poskytnout dostatečný okamžitý špičkový výkon pro rozjezd vozidla, a proto je nutné energii předem akumulovat. Díky vyrovnávacím bateriím lze také dosáhnout vysoké míry rekuperace energie, což přispívá ke zlepšení ekonomiky provozu.

Klíčovým prvkem pro provoz vozidla s vodíkovým pohonem je kvalita dodávaného vodíku. Použití nekvalitního zdroje vodíku může mít za následek zanášení membrán palivových článků, což vede k jejich postupné degradaci, a dokonce k jejich zničení. Palivový článek je jednou z finančně náročných součástí vodíkového pohonu. Aby vodík mohl být opravdu považován za čistý zdroj energie a aby byl použitelný pro palivové články, musí splňovat standard ISO 14 687-2 a dosahovat minimálně 99,97 % chemické čistoty. Vodík vyrobený elektrolyzou dosahuje této vyšší čistoty, zatímco méně čistý vodík není vhodný pro palivové články a mohl by je poškodit, proto je nutné jej dočišťovat.

Budeme-li uvažovat přepravu vodíku v tlakových nádobách o přetlaku 35 MPa, bude mít 1 kg vodíku objem 42 litrů, a ocelová tlaková nádoba k jeho uskladnění bude vážit 51 kg. Automobil, použitý k přepravě vodíku, je zhruba 100krát těžší než samotná hmotnost přepravovaného vodíku. Navíc, při jízdě prázdného automobilu zpět, je jeho hmotnost téměř stejná, což znamená, že dopravní práce a spotřeba energie jsou zhruba 200krát větší, než je práce při přepravě. Je tedy patrné, že přeprava vodíku s využitím silniční nebo železniční dopravy značně snižuje ekonomiku provozu. Z těchto důvodů je nejvýhodnější vyrábět vodík přímo v blízkosti místa jeho použití. Důvodem je, že technologie dopravy a skladování čistého vodíku přináší různorodé náklady a vyžaduje opatření pro bezpečnost a provozní podmínky. Tyto procesy také spotřebovávají energii, což znamená další snižování účinnosti celého energetického řetězce.

Orientačně můžeme stanovit jaké množství energie je možné uložit pomocí vodíku do zásobníku v hnacím vozidle. Jako modelový příklad si stanovíme, že vozidlo bude vybaveno kompozitní nádrží na vodík o hmotnosti 22 kg, kde bude možné uložit přibližně 1 kg vodíku. Budeme-li počítat s tím, že 1 kg vodíku obsahuje 33 kW·h energie, bude při účinnosti palivového článku 60 % možné do jedné tuny hmotnosti vodíku a tlakové nádoby uskladnit zhruba 900 kW·h. U lithiových baterií je tato hodnota v současnosti 100 až 200 kW·h/t. Je tedy zřejmé, že vodík umožní na jednotku hmotnosti akumulovat daleko větší množství energie. Do úvah však musíme zohlednit také to, že účinnost přenosu energie elektrina – vodík – elektrina je zhruba 30 %. Kdežto účinnost řetězce elektrina – lithiová baterie – elektrina je zhruba 90 %, tedy 3krát větší. Je zřejmé, že výroba vodíku

je energeticky a ekonomicky velmi neefektivní. Jednou z variant, jak proces výroby vodíku zlevnit, je využití přebytků elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Zde zatím narážíme na relativně malý podíl obnovitelných zdrojů v českém energetickém mixu. Dá se ale očekávat, že tento podíl se bude zvyšovat, což v budoucnu může přidat této variantě výroby vodíku na aktuálnosti. SWOT analýza HMU, HEMU je uvedena v Tab. 4.

Tab. 4 SWOT analýza HMU, HEMU

Silné stránky	Slabé stránky
• Možnost nasazení HMU bez úpravy infrastruktury. • Zajištěná přechodnost na trati. • Existující HMU v pravidelném provozu v Německu. • V době tvorby metodiky jsou investiční náklady na plnicí infrastrukturu levnější než elektrizace. • Vodíkové jednotky mají větší dojezd než BEMU. • Použitím vodíku z OZE dojde ke snížení emisí CO₂.	• V ČR nedostatečná vodíková infrastruktura. • Nutnost vybudování plnicí infrastruktury. • Pro lehké nákladní vlaky zatím jedna posunovací lokomotiva (PESA SM42-6Dn-Hydrogen). • Provozně dražší než elektrický provoz. • Požadovaná kvalita a čistota vodíku. • Nutné užití obnovitelného/nízkouhlíkového vodíku. • Cena za plnicí infrastrukturu je závislá na objemu vodíku. • Nutný dovoz vodíku do místa plnění.
Příležitosti	Hrozby
• Možnost propojení s veřejnou vodíkovou autobusovou dopravou v kraji. • Možný sklad elektrické energie.	• Plnicí infrastruktura může být možný cíl teroristického útoku. • Závislost na firmě řešící dovoz a výrobu vodíku, dokud nebude vytvořen konkurenční trh s vodíkem.

Zdroj: Vlastní zpracování

Kapitola 4

Metodika

Pro nasazení vlaků na alternativní pohon pro konkrétní trať bude vždy nutné specifikovat, zdali vlaky s daným systémem pohonu bude možné na trati spolehlivě provozovat. V této souvislosti bude vždy nutné detailně se zabývat konkrétní tratí nebo jejím úsekem. U bateriově poháněných vlaků bude nejčastěji limitujícím faktorem jejich dojezd. U vodíkem poháněných vlaků zase přítomnost vodíkové plničky s dostatečnou volnou kapacitou.

Společným hlediskem pro obě varianty bude netrakční spotřeba energie. Ta bude limitující především pro bateriově poháněné vlaky, jelikož množství energie, které mají tyto vlaky k dispozici je menší oproti vlakům vodíkovým. Mezi netrakční spotřebu se počítá například energie potřebná pro vytápění či chlazení, pomocné pohony, pro řídicí a sdělovací techniku a podobně. Množství energie potřebné pro netrakční spotřebu je závislé na více faktorech. Mezi tyto faktory patří například, počasí, délka pobytu vlaku na trati, počet zastávek, mimořádnosti na trati a podobně.

Dominantní konzumentem energie u vlaku bude vždy trakce. Tedy energie nutná k uvedení vlaku do pohybu a energie nutná k udržení požadované rychlosti. Množství této energie je opět závislé na konkrétní trati, především na sklonových poměrech, počtu oblouků a jejich poloměru, počtu zastávek, traťové rychlosti, hmotnosti soupravy a dalších.

Jeden z rozhodujících faktorů pro určení vhodnosti provozu vlakových souprav na alternativní pohon, bude tedy určení potřeby energie pro jízdu vlaku na dané trati. Ve velmi zjednodušené podobě by bylo možné vyjít ze specifikace spotřeby energie konkrétní vlakové jednotky na kilometr jízdy udávané výrobcem, toto je ale velmi hrubý odhad a je možné jej použít pouze pro orientační náhled s vědomím toho, že tento odhad bude zatížen velkou mírou nepřesnosti. Pro detailní definici potřeby energie pro jízdu konkrétního vlaku bude nutné tuto energii přímo změřit při jízdě vlaku, což není vždy možné. Nebo tuto energii vypočítat ze známých fyzikálních vztahů a sestavit tak rovnici, která bude specifikovat potřebu energie pro jízdu konkrétního vlaku.

Doporučený postup při určení potřeby energie pro provoz vlakových souprav na dané trati je následující:

- Určení řazení všech zamýšlených vlakových souprav.
- Definice potřeby energie pro jízdu konkrétní soupravy na zamýšleném traťovém úseku.
- Specifikace netrakční spotřeby soupravy.
- Dle grafikonu oběhu určit potřebu energie pro každou jízdu konkrétního vlaku.
- Určení celkové potřeby energie pro jednodenní provoz na dané trati.

Výsledkem činnosti v předchozích bodech budou dvě klíčové hodnoty. A to potřeba energie na jednu jízdu vlaku a dále celková potřeba energie na provoz vlaků na dané trati za jeden den.

Budeme-li uvažovat o bateriově poháněných vlacích, bude vždy limitujícím parametrem dojezd vlaku. U bateriově poháněných vlaků bude nutné určit, zdali konkrétní bateriový vlak bude schopen za specifických podmínek pro konkrétní trať danou trasu ujet. Také zde bude zapotřebí přihlídnout k nutnosti provozovat tyto vlaky nikoli na hranici kapacity svých baterií, ale naopak zachovat při provozu jistou rezervu, která umožní dojezd vlaku v případě mimořádných událostí na trati.

Pro vodíkově poháněný vlak nebude limitujícím faktorem dojezd, jelikož dojezd vodíkem poháněných vlaků bývá velmi podobný dojezdu vlaků s diesellovým pohonem. Limitujícím faktorem pro provoz vodíkem poháněných vlaků bude přítomnost vodíkové plničky a další potřebné infrastruktury.

Kapitola 5

Rozhodující faktory pro nasazení alternativního pohonu

Množina faktorů, které rozhodují o tom, zda je pro danou trať výhodné či nevýhodné použít některý z výše uvedených alternativních pohonů, tvoří multikriteriální rozhodovací model. V rámci rozhodovacího procesu bude v souladu se zadáním analyzována možnost alternativních pohonů, tj. bateriový a vodíkový.

Rozhodovací diagram je pro přehlednost a pro potřeby jeho popisu rozdělen na více částí. Jednotlivé části diagramu jsou uvedeny na Obr. 3, Obr. 4, Obr. 5 a Obr. 6.

Na první části rozhodovacího diagramu, uvedeném na Obr. 3, je nutné rozhodnout, zdali je uvažovaná trať vůbec vhodná pro provoz vlaků na alternativní pohon. Základním kritériem je to, zdali se na dané trati uvažuje o elektrizaci [1].

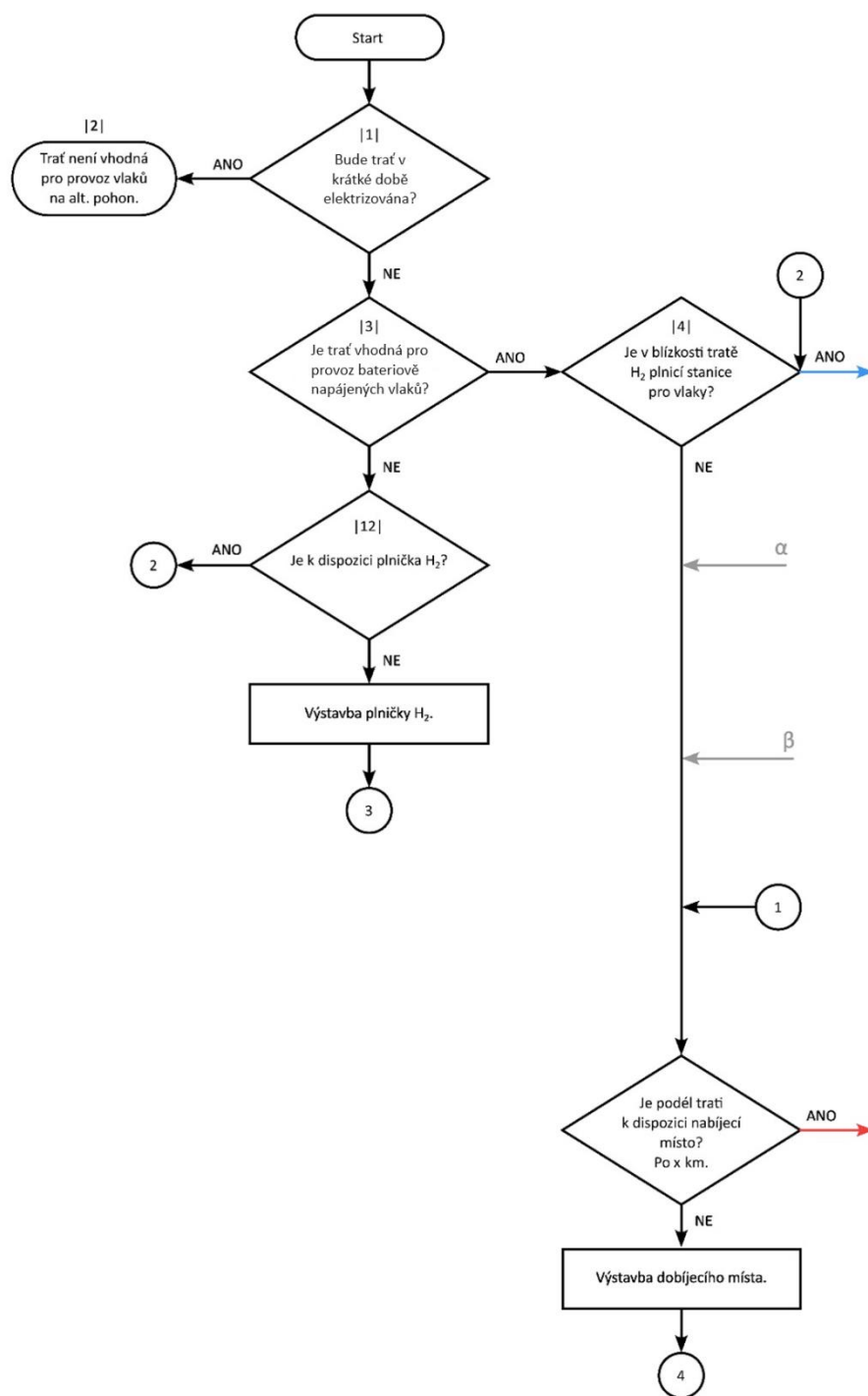
Pokud ano, nejsou již další úvahy třeba [2]. Pokud nebude elektrizace v dohledné době realizována, je nutné se dotázat, zdali délka tratě je delší nebo kratší, než je v danou dobu aktuální běžný dojezd bateriově napájených vlaků [3]. I přesto, že by uvažovaná trať svou délkou vyhovovala pro provoz bateriových vlaků, je stále nutné se dotázat, zdali v blízkosti uvažované tratě existuje plnička vodíku, která byla vybudována pro provoz jiné trati, nebo bude v krátké budoucnosti zbudována. V případě přítomnosti plničky vodíku v blízkém okolí tratě by bylo vhodné využít tuto plničku a zefektivnit tak její provoz, který je po technické a investiční stránce velmi náročný [4].

V druhé části rozhodovacího diagramu, uvedeném na Obr. 4, je znázorněna větev, která reprezentuje část, ve které se bude uvažovat o provozu bateriového vlaku. Základní dotaz je, zdali se v místě, kde se bude vlaková souprava dobíjet, je možné vybudovat elektrickou přípojku pro napájení dobíjecí stanice (dostatečná kapacita pro připojení) [5]. V případě že není, bude nutné uvažovat o navýšení množství disponibilního napájecího výkonu a to buď posílením vedení z distribuční sítě, nebo zbudováním nových zdrojů elektrické energie [6].

Vodíková část rozhodovacího diagramu se ve svém začátku dotazuje, zdali je v blízkosti tratě k dispozici vodíková plnička již dříve vybudovaná pro jinou trať, a to s dostatečnou volnou kapacitou [4] a [7]. Pokud tomu tak není, existují v zásadě dvě možnosti, a to vodík dovážet, nebo vodík na místě vyrobit [8].

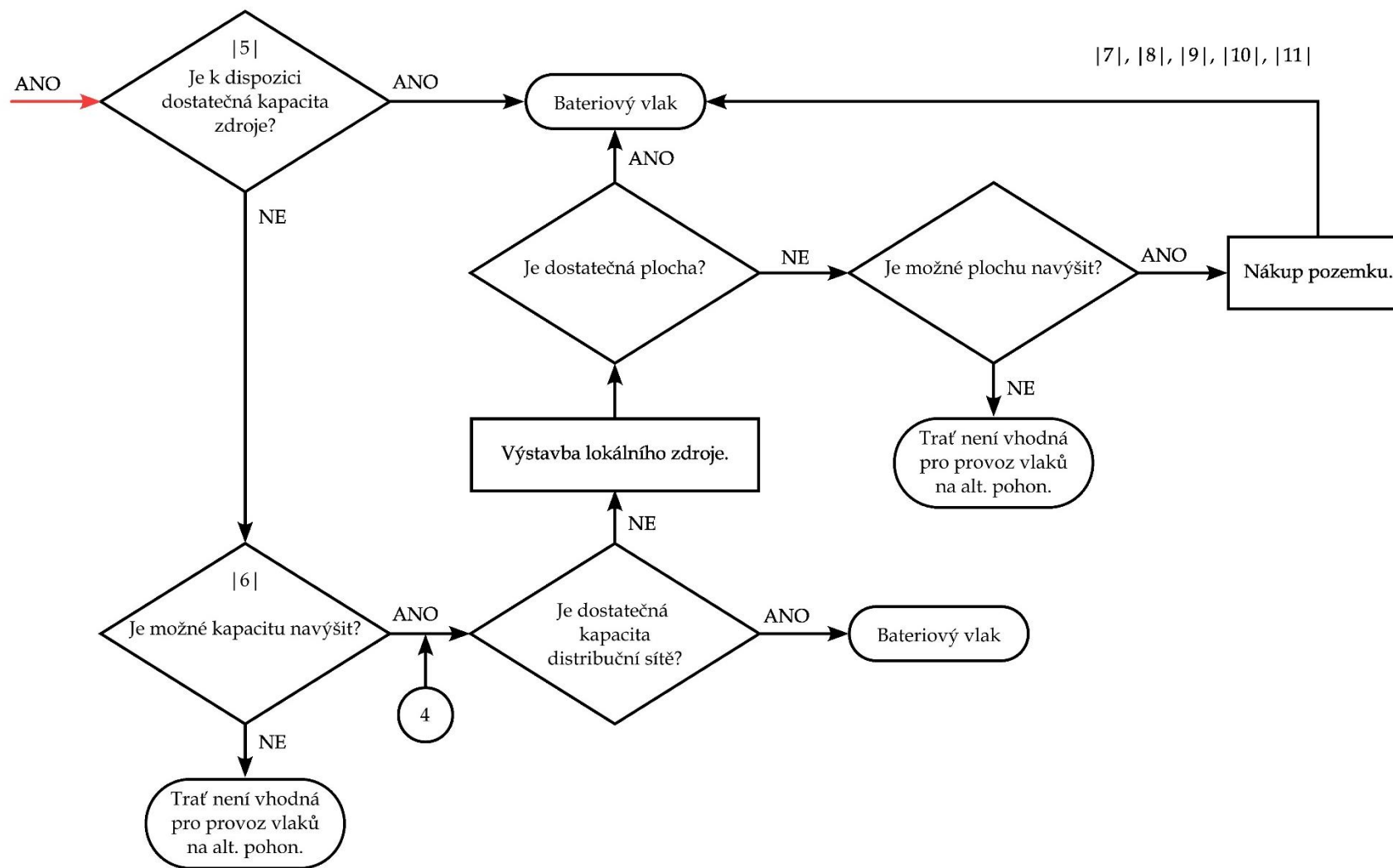
Pro dovoz vodíku je možné zvolit jednu z možností případně kombinaci dvou nebo všech tří možností [9].

Poslední čtvrtá část rozhodovacího diagramu určuje, zdali bude možné vyrábět vodík lokálně a co je třeba pro lokální výrobu zajistit [10]. V zásadě se jedná o pozemky pro výstavbu technologií, vodu a elektrickou energii [11]. Kapacitu zdrojů elektrické energie je možné navýšit za pomoci nově vystavěného lokálního zdroje obnovitelné energie.

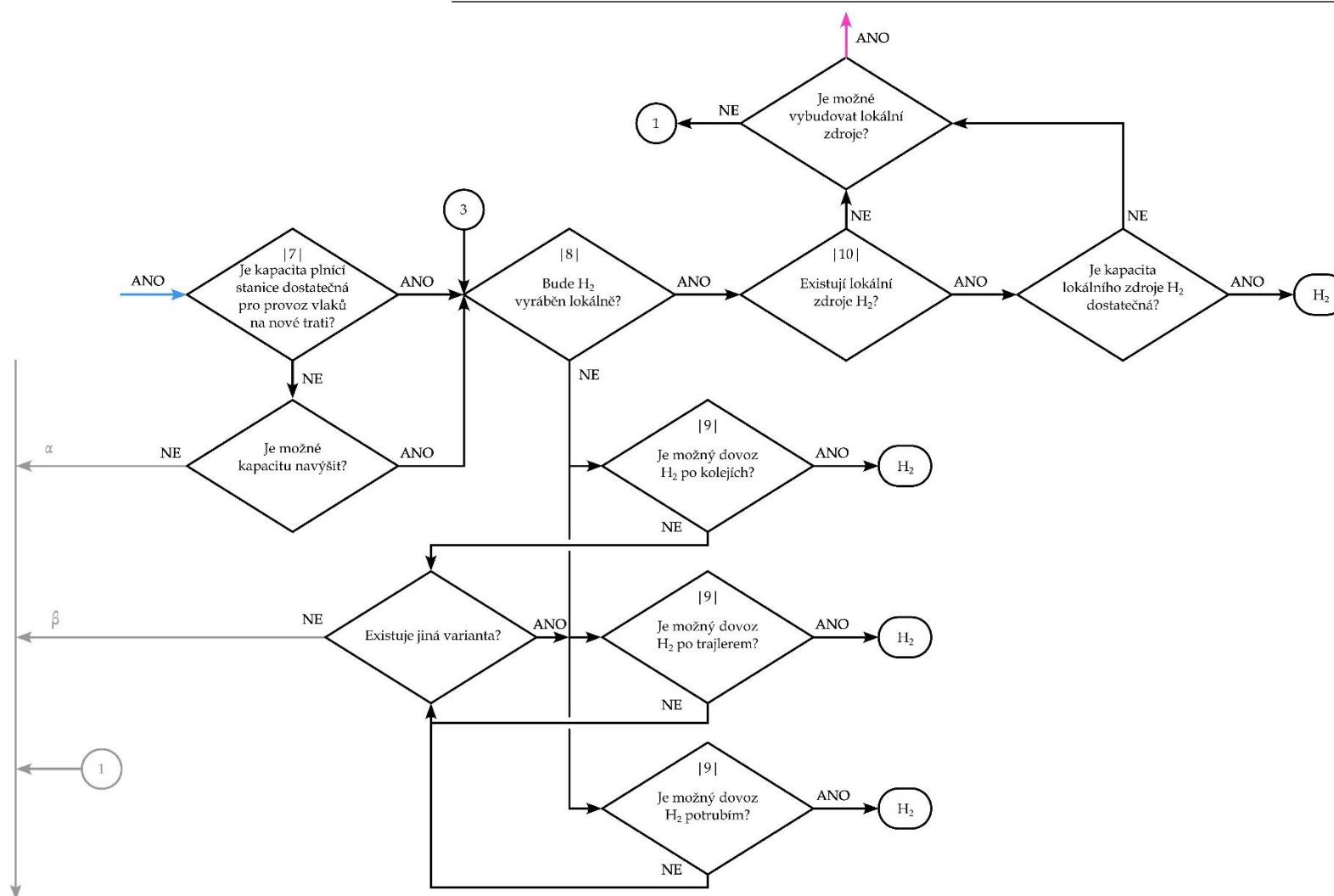


Obr. 3 Rozhodovací diagram I.

Zdroj: Vlastní zpracování

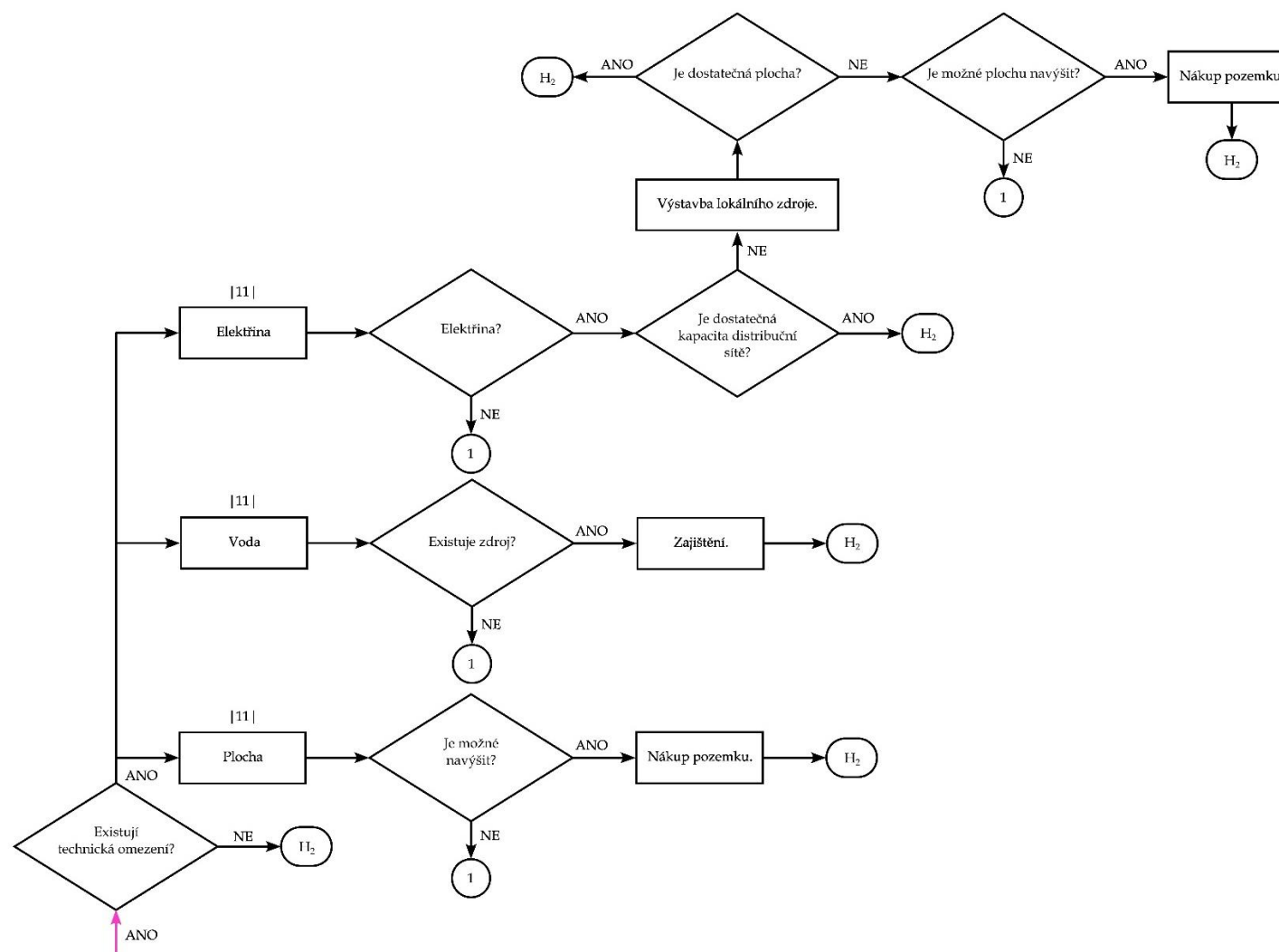


Obr. 4 Rozhodovací diagram II.



Obr. 5 Rozhodovací diagram III.

Zdroj: Vlastní zpracování



Obr. 6 Rozhodovací diagram IV.

Zdroj: Vlastní zpracování

Kapitola 6

Požadavky na infrastrukturu

V České republice je Ministerstvem dopravy schválený plán elektrizace tratí se sjednocením na jednotný trakční napájecí systém střídavé trakce 25 kV, 50 Hz. Obecně je cílem sjednocení napájecí soustavy, naplnění politiky v oblasti dopravy, energetiky, životního prostředí. Na základě těchto stanovených cílů je Správou železnic zpracován Návrh výhledové elektrizace, avšak ne všechny tratě jsou plánovány elektrizovat. Pokud trať nebude elektrizována, tak je nutné prověření tratě k vhodnému nasazení alternativního pohonu.

6.1 Infrastruktura pro bateriový pohon

Při budování infrastruktury pro bateriový pohon je nutné vycházet z dojezdových vzdáleností jednotlivých vozidel a ze vzorového jízdního řádu. V ideálním případě je dojezd bateriového vlaku 60 až 80 km. Tento dojezd je garantován výrobcí vozidel a zahrnuje 100 % vybití baterie. Z důvodu zachování bezpečnosti železniční dopravy musíme uvažovat s nižším dojezdem cca 40 km, kdy bude v baterii zbývat 40 % energie na pokrytí netrakční spotřeby. Dále musíme uvažovat, zda je v zamýšleném místě dobíjení volná kapacita na vedení od distributora.

Dobíjecí bod může být vyveden z veřejné distribuční sítě na napěťové hladině vysokého napětí, nebo nízkého napětí. Pokud je v místě nabíjení trakční napájecí stanice, která má dostatečný rezervovaný příkon, může být nabíjecí bod vyveden z trakční napájecí stanice. Zařízení dobíjecí stanice pro BEMU je stavba na dráze a podléhá schvalovacímu procesu v oblasti dráhy.

BEMU je možné nabíjet čtyřmi způsoby, poslední způsob je možné využít pouze k temperování baterií:

- z trolejového vedení 3 kV – vztah k EN 50367, stejnosměrná trakce
- z trolejového vedení 25 kV, 50 Hz, střídavé trakce,
- z pevné troleje při stání vozidla,
- z „*topné spojky*“ dle UIC 550/UIC 552–3 kV DC/1,5 kV, 50 Hz AC (pouze při dlouhodobější odstávce vozidla),
- ze sítě 3x400 V AC přes jistič 125 A, nebo 63 A, nebo 32 A (temperování baterií).

Dobíjení vozidel z trolejového vedení 3 kV, stejnosměrná trakce

Dobíjení vozidel z trolejového vedení 3 kV stejnosměrné trakce se většinou provádí při jízdě vozidla z důvodu nemožnosti odběru větších výkonů z trolejového vedení při stání vozidla. Pokud by bylo nutné dobíjet vozidlo z trolejového vedení 3 kV při stání vozidla, je nutné omezit velikost dobíjecího proudu dle EN 50367, případně je možné provést dodatečné úpravy na trakčním vedení, které by umožnily odběr větších proudů i za stání vozidla. Dobíjení z trakčního vedení 3 kV je tedy vhodné především za situace kdy vozidlo jede část své trasy pod tímto vedením, a to takovou dobu, při které je možné akumulátor dobít pro další jízdu, případně pro dobíjení při delším odstavení vozidla. V těchto případech je hlavní výhodou absence dalších nákladů na dobíjecí infrastrukturu.

Dobíjení vozidel z trakčního vedení střídavé trakce na napěťové hladině 25 kV

Dobíjení vozidel z trakčního vedení střídavé trakce na napěťové hladině 25 kV je efektivnější než dobíjení pod stejnosměrnou trakcí. Toto dobíjení se může provádět za jízdy i při stání vozidla pod trakčním vedením bez omezení přenášeného výkonu. Pokud bateriový vlak zajíždí pod traťový

úsek elektrizovaný soustavou 25 kV, je možné provádět dobíjení vlaku bez dalších dodatečných nákladů na infrastrukturu. Samozřejmě za předpokladu, že pobyt pod zatrolejovaným vedením bude dostatečně dlouhý pro nabití akumulátorů na takovou kapacitu, která umožní další jízdu.



Obr. 7 Příklad dobíjení vozidla pod pevnou trakční trolejí

Zdroj: Prezentace VOLTAP, SŽ 23. 5. 2023

Dobíjení z pevné troleje při stání vozidla

Na Obr. 7 je znázorněna konstrukce parazitní troleje určené pro dobíjení jedné jednotky BEMU v místech, kde není k dispozici standardní trolejové vedení. Toto dobíjení může být použito pro jednu i dvě jednotky. Toto řešení je finančně velmi nákladné a pro jeho provedení je nutné zpracování projektu, který celý proces zesložituje.

Dobíjení z topné spojky

U Správy železnic existují předtápěcí stojany pro drážní vozidla. Tyto stojany v této době slouží pro předtápění vlakových souprav v zimních měsících. Po legislativních a technických úpravách by se tyto stojany mohly použít pro nabíjení (temperování) baterií při nočním odstavení jednotky ve stanici. Pravidelné dobíjení z topné přípojky není pro provoz vhodné, vzhledem k relativně malým přenášeným výkonům. Použít by šel pouze při dlouhodobější odstávce vozidla.

Dobíjení ze sítě 3x400 V AC

Tento způsob dobíjení se dá použít při nočním odstavení jednotek při využití levnějšího nočního proudu. Jedná se o temperování baterií. Na stojanu je k dispozici nižší výkon než na hladině vysokého napětí.

Pro každou výše zmíněnou variantu dobíjení doporučujeme, aby byla vypracována Technicko-ekonomická studie posouzení všech variant (elektrizace, motorový provoz, prostá elektrizace, vodíkový provoz, bateriový provoz) a koordinace s MD, objednavateli a dopravci. Součástí zpracování Technicko-ekonomické studie je CBA. Na základě výsledků z této Technicko-ekonomické studie je vypracován Záměr projektu, který je předložen na schválení CK MD. Záměr projektu řeší jak administrativní dokumenty, tak i technické požadavky na dobíjecí infrastrukturu. Mezi administrativní dokumenty, které dobíjecí stanice musí splňovat v době tvorby tohoto projektu patří:

- Dokumentace v záměru projektu musí být členěna dle Směrnice Ministerstva dopravy V-2/2012 v platném znění.
- Pro zpracování se musí postupovat dle směrnice SŽ SM011 v platném znění.
- Je nutná součinnost zhotovitele a objednavatele při projednávání záměru projektu na Centrální komisi Ministerstva dopravy.
- Ekonomické hodnocení projektu je nutné zpracovat podle platné Rezortní metodiky pro

hodnocení ekonomické efektivnosti projektů dopravních staveb.

- Zpracována dopravní dokumentace se vzorovým jízdním řádem.

V záměru projektu musí být definovány tyto technické podmínky:

- umístění stavby, lokalita,
- základní charakteristika tratě,
- místo připojení na veřejnou distribuční síť,
- provedení samotné dobíjecí stanice,
- definování dobíjecích bodů, například dobíjení formou pevné troleje, 25 kV, 50 Hz, AC,
- délka pevné troleje s ohledem na délky dobíjených vozidel,
- výkon dobíjecí stanice na základě nabíjecího proudu vozidel,
- průřez profilu pevné troleje včetně trolejového drátu,
- bezpečné izolační vzdušné vzdálenosti.

Dále je potřeba zpracovat energetické výpočty v návaznosti na vzorový jízdní řád, doplnit systémy dálkové řídicí techniky. V neposlední řadě, pro místo dobíjecího bodu v návaznosti na navržený rozsah trakčního vedení, musí být provedena úprava zabezpečovacího a sdělovacího vedení a zpětné trakční cesty. Dále je nutné zpracování koordinačního schéma ukolejnění. Přesné požadavky bude řešit samotný projekt na konkrétní dobíjecí bod v železniční stanici. Obr. 8 zobrazuje příklad temperování baterií ze sítě 3x400 V např. při nočním odstavení jednotek.



Obr. 8 Příklad temperování baterií ze sítě 3x400 V

Zdroj: Správa železnic

6.2 Infrastruktura pro vodíkový pohon

Vodíkový pohon na železnici není v době tvorby této metodiky v České republice realizován. V rámci projektu TAČR TH 02020395 byla vytvořena Metodika výstavby a provozu plnicích stanic stlačeného vodíku pro mobilní zařízení. Tato metodika řeší obecně požadavky na plnicí stanice vodíku. Nezabývá se drážním prostředím. Proto je nutné při přípravě plnicí stanice vodíku na železnici zpracovat záměr projektu, který bude definovat, požadavky na plnicí stanici vodíku, a to především předpokládanou denní potřebu vodíku. V této dokumentaci je nutné definovat místo stavby plničky vodíku. Také bude nutné určit, zdali bude vodík vyráběn lokálně nebo bude dopravován ze vzdáleného zdroje pomocí silniční nebo železniční dopravy. Příklad mobilní plnicí stanice je zobrazen na Obr. 9 a Obr. 10. Možná výroba v místě spotřeby vychází i ze strategického materiálu MPO, kde v první etapě je využití vodíku v místě výroby, tzv. lokální ostrovy [28]. Jediným rizikem je, že tento vodík nemusí být vyrobený z OZE.

Záměr projektu řeší jak administrativní dokumenty, tak i technické požadavky na plnicí infrastrukturu. Mezi administrativní dokumenty, které plnicí stanice musí splňovat v době tvorby dokumentu patří:

- Dokumentace v záměru projektu musí být členěna dle Směrnice Ministerstva dopravy V-2/2012 v platném znění.
- Pro zpracování se musí postupovat dle Směrnice SŽ SM011 v platném znění.
- Je nutná součinnost zhotovitele a objednavatele při projednávání záměru projektu na Centrální komisi Ministerstva dopravy.
- Ekonomické hodnocení projektu zpracovat podle platné rezortní metodiky pro hodnocení ekonomické efektivity projektů dopravních staveb.
- Dopravní dokumentace se vzorovým jízdním řádem.

V záměru musí být definovány tyto technické podmínky:

- umístění stavby, lokalita,
- základní charakteristika tratě,
- požadavky na množství vodíku vycházející ze vzorového jízdního řádu,
- místo připojení na veřejnou energetickou distribuční síť,
- místo připojení na vodovodní řád při lokální výrobě vodíku,
- provedení bude samotné plnicí stanice,
- příjezdová cesta při zavážení vodíku kamionovou dopravou,
- dopravní obslužnost místa (jak po železnici, tak po silnici),
- zábor pozemků dotčených stavbou,
- technické definice kompresorů, chladicí části a potřebné technologie,
- požadavky na technické objekty,
- požadavky na železniční svršek a spodek včetně zabezpečovacího zařízení,
- bezpečné vzdálenosti plnicí stanice vodíku od železniční infrastruktury a od obydlené části.



Obr. 9 Příklad plnicí vodíkové stanice včetně infrastruktury

Zdroj: Prezentace VOLTAP, SŽ 23. 5. 2023



Obr. 10 Příklad mobilní plnicí stanice

Zdroj: Prezentační jízda vodíkového vlaku, SŽ

Konkrétní řešení a dimenzování plnicí stanice v místě plnění bude řešit projekt. Projekt by měl zahrnovat i systémové krizové řízení.

6.2.1 Lokální výroba vodíku

Pro výrobu vodíku v místě plnění je nutné zajistit především vhodnou lokalitu, kde bude umístěna technologie. Tato lokalita by měla být v bezprostřední blízkosti plnicí stanice vodíku. Dále budeme uvažovat o výrobě vodíku pouze pomocí elektrolýzy. Především proto, že tato technologie umožňuje výrobu vodíku s požadovanou čistotou. Pro provoz elektrolýzérů je nutné zajistit dvě základní komponenty: demineralizovanou vodu a zdroj elektrické energie. Demineralizovanou vodu je možné vyrábět také na místě z běžné pitné vody z vodovodního řádu. Při výběru lokality, kde bude umístěna technologie, je tedy nutné zajistit kapacitně vhodně dimenzovaný zdroj elektrické energie a také zdroj pitné vody. Také bude nutné zajistit likvidaci zbytkové vody po demineralizaci, která obsahuje vyšší množství minerálů a není jí možné likvidovat běžným způsobem.

6.2.2 Přeprava vodíku z nejbližších zdrojů

Přeprava vodíku je v tomto případě zajišťována buď kamionovou dopravou po silnici, nebo může být zajišťována nákladní dopravou po železnici Obr. 11. V případě vybudování infrastruktury je nutné postupovat stejně jako v kapitole 6.2. Je potřeba vybrat vhodnou lokalitu pro plnění. Doporučuje se, aby tato lokalita měla dobrou dopravní obslužnost jak po silnici, tak po železnici. Při budování plnicí stanice na vodík včetně technologií musí být zpracován záměr projektu, kde bude definováno místo stavby. Je nutné vzít v úvahu, že plnicí vodíková stanice je vyhrazené technické zařízení.



Obr. 11 Železniční vozy pro přepravu vodíku

Zdroj: NPROXX

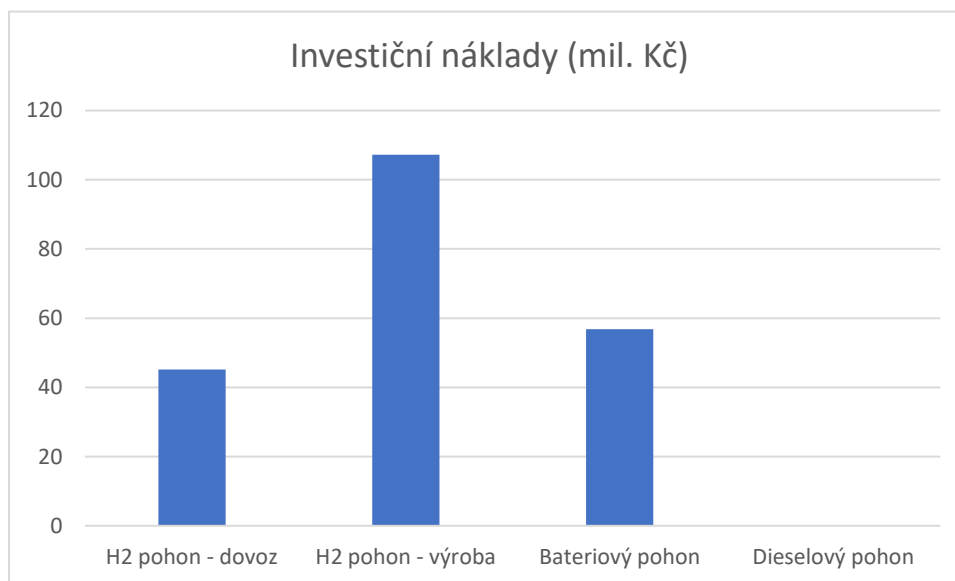
Kapitola 7

Aplikace metodiky na modelové trati

Pro porovnání všech uvažovaných variant pohonů, mějme hypotetickou situaci kdy se budou v jedné stanici sbíhat čtyři tratě, každá o délce 22,5 km, což v hrubém pohledu umožní uvažovat o provozu vlaků na bateriový pohon na každé z uvažovaných tratí. Pro dobíjení bateriově poháněných vlaků na zmíněných tratích bude vždy v jedné z úvratových stanic vystavěna dobíjecí stanice. Jako alternativu můžeme pro dané tratě také zpracovat možnost provozu vlaků na vodíkový pohon s lokální výrobou vodíku pomocí elektrolyzéru. Provoz vodíkem poháněných vlaků s variantou dovozu vodíku bude v této hypotetické modelové situaci uvažován s možným dovozem vodíku ze vzdálenosti 100 km.

Dále budeme počítat v naší modelové situaci s jízdou vlaku v hodinovém taktu na každé trati. Za jednu hodinu provozu tedy vlaky ujedou $(2 \cdot 22,5) \cdot 4$, což odpovídá 180 km. Celodenní provoz tedy znamená ujetí $24 \cdot 180 = 4320$ km.

Níže uvedené grafy na obrázcích Obr. 12 až Obr. 14, byly v excelovské tabulce, která je přílohou tohoto dokumentu. Vstupními parametry této tabulky jsou ceny jednotlivých komodit a potřebného technického vybavení pro každou variantu.



Obr. 12 Investiční náklady pro jednotlivé druhy pohonů

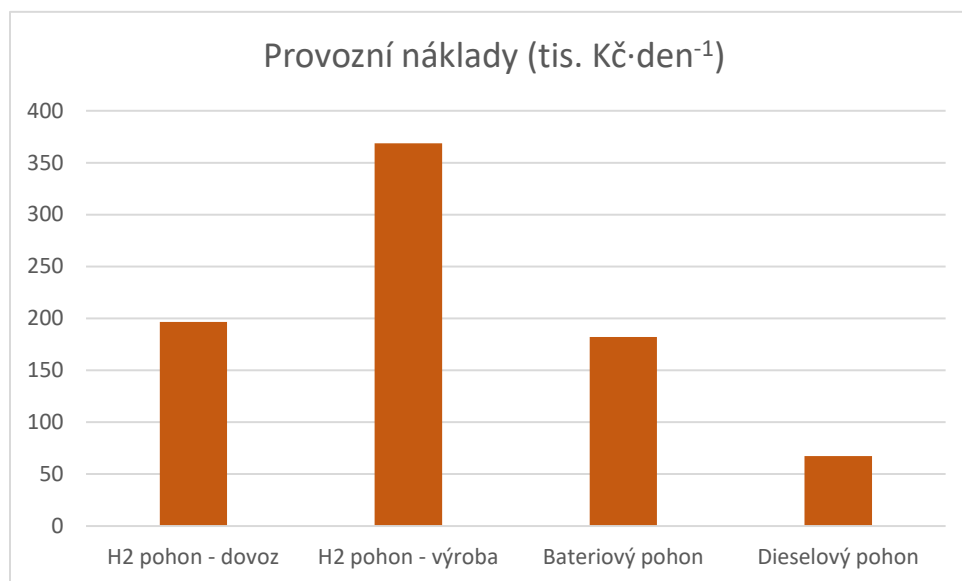
Zdroj: Vlastní zpracování

Investiční náklady jsou nejvyšší u varianty lokální výroby vodíku, což je dáno především cenou elektrolyzéru. V budoucnu se dá očekávat, že se ceny elektrolyzéru budou snižovat vzhledem k očekávané zvyšující se poptávce.

Relativně vysoké pořizovací náklady u bateriového pohonu jsou dány především nutností výstavby dobíjecích stanic. Situace by se výrazně změnila, pokud by bylo možné bateriově poháněné vlaky dobíjet pod již existující trolejí s napájením 25 kV AC.

Provoz vodíkem poháněných vlaků s dovozem vodíku z blízkých zdrojů vychází v tomto modelovém případě levněji než provoz vlaků bateriových. Diesellový pohon, coby zástupce

základního stavu, představuje z hlediska investičních nákladů nulové náklady.



Obr. 13 Provozní náklady pro jednotlivé druhy pohonů

Zdroj: Vlastní zpracování

Z provozního hlediska je opět nejdražší varianta provoz vodíkem poháněných vlaků při lokálně vyráběném vodíku. Nutno ale podotknout, že pro výpočet byla použita tržní cena elektřiny. Výhodou lokální výroby vodíku může být to, že je možné výrobu spouštět v době nízkých cen na spotovém trhu.

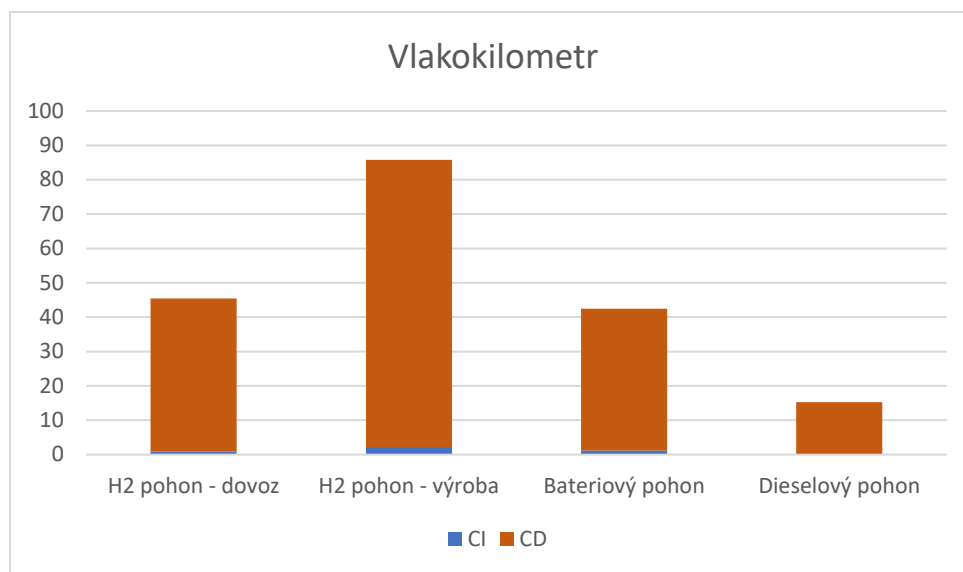
Varianta s dovozem vodíku je velmi závislá na ceně nastavené dodavatelem. Ta je v současnosti obtížně predikovatelná. Vodík vyráběný v průmyslu většinou nedosahuje potřebných parametrů a pro použití v dopravě by se musel dočišťovat. Proto lze v současnosti cenu takto dodávaného vodíku pouze odhadovat.

Náklady na provoz bateriových vlaků jsou dány především náklady na elektřinu. Nevýhodou této varianty je nutnost rezervovat si v místě dobíjení relativně velký příkon, který by umožnil dobíjení všech vlaků ve stejný čas. Tento rezervovaný příkon bude ale využit jen zhruba 15 minut za hodinu, tedy z jedné čtvrtiny.

Náklady na vlakokilometr Obr. 14, jsou dány součtem dvou hodnot. Hodnota „CI“, která reprezentuje investiční náklady rozpočtené na dobu životnosti zařízení a ujetý kilometr vlaku. Hodnota „CD“ je dána cenou komodit, tedy především cenou elektřiny a nafty.

Do budoucna se dá očekávat, že hodnoty „CD“ budou pro variantu lokální výroby vodíku klesat. Naopak, pro provoz dieselových vlaků bude tato hodnota s velkou pravděpodobností růst. Cena vlakokilometru pro bateriový pohon a variantu dovozu vodíku je dominantně závislá na ceně nakupované komodity a ta je v současnosti obtížně predikovatelná.

Detaily výpočtu budou podrobněji diskutovány v kapitole 8 popisující aplikaci metodiky pro trať č. 310 Olomouc – Opava Východ.



Obr. 14 Odhad nákladů na vlakokilometr pro jednotlivé druhy pohonů

Zdroj: Vlastní zpracování

Kapitola 8

Aplikace postupu na vybrané trati

Tato kapitola je věnována aplikaci metodikou navrhovaného postupu na konkrétní železniční trati, přičemž je v textu zvláštní pozornost věnována vyčíslení investičních a provozních nákladů u jednotlivých druhů alternativních pohonů.

Jako vzorová trať, na které budeme demonstrovat užití popsané metodiky byla vybrána trať č. 310 Opava východ – Olomouc. Jedná se o neelektrizovanou železniční trať, která je spravována státní organizací Správa železnic. Trať vede z Olomouce hlavního nádraží přes Valšov, Bruntál, Milotice nad Opavou a Krnov do Opavy. Celková délka tratě je 116 km¹. Trať je vedena ve sklonově náročném terénu, nejvýše položená stanice Dětrichov nad Bystřicí leží v nadmořské výšce 620 m n. m. Nejnižší položená stanice je Olomouc hlavní nádraží s nadmořskou výškou 215 m n. m. [24]

Pro základní technické zhodnocení vhodnosti konkrétního alternativního pohonu pro vybranou trať využijeme diagramu popsaného v kapitole 5.

Věnujme nyní pozornost části diagramu vyobrazeném na Obr. 3. První rozhodovací blok |1| se dotazuje, zdali má být uvažovaná trať v krátké budoucnosti elektrizována. V současné době se o elektrizaci této tratě neuvažuje, proto je možné v diagramu postoupit dále.

Další blok |3| se zabývá délkou tratě. V našem vzorovém případě se jedná o délku 116 km. Rozhodovací blok obsahuje proměnnou označenou jako „ x “, kde x je běžný dojezd bateriově napájených vlakových jednotek, kdy je vhodné od této hodnoty odečíst i provozní rezervu. V současnosti dostupné bateriově napájené jednotky disponují dojezdem zhruba 80 km, pokud ale odečteme požadovanou provozní rezervu, bude reálný dojezd bateriových vlaků zhruba 60 km. Trať je tedy delší než běžný dojezd bateriových vlakových souprav, proto je nutné v rozhodovacím diagramu |3| postupovat v negativní větvi do části věnované provozu vlaků na vodíkový pohon.

Následující dotaz |12| je, zdali již v okolí tratě existuje vodíková plnička. Jelikož v okolí tratě č. 310 plnička v současnosti není, bude nutné tuto plničku vybudovat. V diagramu se přesuneme do části 3, která pokračuje na Obr. 5.

V rozhodovacím bloku |8| je nutné specifikovat, zdali se bude vodík vyrábět lokálně nebo se bude dovážet. Toto rozhodnutí je již nutné opřít o znalost místní situace. Také je nutné kvalifikovaně odhadnout spotřebu vodíku na základě předpokládaných denních výkonů vlakových souprav. Také je nutné znát možné dodavatele vodíku ve vzdálenějším okolí tratě, jejich volnou kapacitu a vzdálenost, na kterou by se vodík musel dopravovat. Do kontrastu by se také měla uvést varianta lokální výroby vodíku. Díky znalosti místních poměrů na trati bylo možné určit, že plničku vodíku by bylo vhodné vystavět ve stanici Krnov a Olomouc. V obou lokalitách jsou možné obě varianty. Tedy jak dovoz vodíku, tak jeho lokální výroba. Předpokládáme ale, že lokální výroba je technicky vhodnější varianta, budeme tedy dále uvažovat, že vodík se bude vyrábět v obou lokalitách přímo na místě.

¹ V současnosti je zpracována studie proveditelnosti elektrizace úseku Krnov – Opava východ, která sníží délku neelektrizovaného úseku o 29 km.

V rozhodovacím bloku [8] se tedy vydáme pozitivní větví. Jelikož ani v jedné lokalitě prozatím lokální zdroje vodíku neexistují, bude další postup v části [10] po negativní větví. Vybudování lokálního zdroje vodíku je v obou lokalitách možné, dále se přesuneme na Obr. 6.

Jak v lokalitě Olomouc, tak v lokalitě Krnov nejsou žádná technická omezení, která by zamezila výstavbě elektrolyzérů s dostatečnou výrobní kapacitou pro výrobu vodíku pro provoz vlaků na trati č. 310.

Díky diagramu se podařilo jednoznačně určit, že trať č. 310 není vhodná pro provoz vlaků bateriových. Vodíkem poháněné vlaky je možné na této trati využít, protože v zamýšlených lokalitách Krnov a Olomouc je možné vybudovat lokální zdroje vodíku pro zásobení zamýšlené tratě.

Pro možnost srovnání budou pro právě popsanou trať č. 310 v textu popsány a vyčísleny i alternativy bateriového pohonu coby druhé varianty alternativního pohonu a dieselového pohonu, coby stávající varianty.

8.1. Výpočet celkové denní spotřeby energie

Dříve než budou popsány a vyčísleny konkrétní položky investičních a provozních nákladů u jednotlivých variant řešení, je nutné stanovit způsobu výpočtu celkové denní spotřeby elektrické energie G při využití vybraného alternativního pohonu na vybrané trati.

Celková denní spotřeba elektrické energie G^E v kW·h, resp. celková denní spotřeba vodíku G^H v kg, budou určovány na základě triviálních vztahů:

$$G^H = d \cdot g^H \quad (1)$$

$$G^E = d \cdot g^E \quad (2)$$

kde d km představuje celkový denní počet ujetých kilometrů na vybrané trati, g^H kg·km⁻¹ představuje průměrnou spotřebu vodíku připadající na 1 km ujeté vzdálenosti a g^E kW·h·km⁻¹ představuje průměrnou spotřebu elektrické energie připadající na 1 km ujeté vzdálenosti.

S ohledem na výše uvedené, je pro stanovení celkové denní spotřeby elektrické energie nutné pozornost zaměřit na:

- výpočet průměrné spotřeby vodíku a elektrické energie připadající na jednotku ujeté vzdálenosti,
- výpočet celkového denního počtu ujetých kilometrů na vybrané trati.

8.2. Výpočet průměrné spotřeby vodíku a elektrické energie

Průměrná spotřeba vodíku a elektrické energie je stanovena na základě experimentální jízdy vodíkového vlaku, kterou realizovala společnost ALSTOM a která zpřístupnila data z testovací jízdy řešitelskému týmu. Jedná se o hodnoty $g^H = 0,2$ kg·km⁻¹ a $g^E = 6,6$ kW·h·km⁻¹, se kterými bylo dále v rámci výpočtů pracováno.

8.3. Výpočet celkového denního počtu ujetých kilometrů

V rámci výpočtu celkového denního počtu ujetých kilometrů na vybrané trati je možné využít dvojici výchozích přístupů. Těmito přístupy jsou:

- podrobný rozbor oběhů hnacích vozidel (OHV),
- sumární zhodnocení jízdnicích řádů (JŘ).

8.4. Podrobný rozbor oběhů hnacích vozidel

Při výpočtu celkového denního počtu ujetých kilometrů je možné zaměřit pozornost na hnací vozidla, která zabezpečují provoz jednotlivých spojů na vybrané trati v příslušných dnech. S ohledem na skutečnost, že tentýž spoj je běžně v rámci jednoho kalendářního týdne zabezpečován množinou hnacích vozidel, je nutné podrobně zkoumat oběhy celé množiny těchto vozidel. Oběhy jednotlivých hnacích vozidel mají navíc různou periodu opakování. Přestože je tento způsob stanovování celkového denního počtu ujetých kilometrů relativně přesný, při reálném zavedení alternativních druhů pohonů, budou oběhy vozidel optimalizovány. Z praktického hlediska je tento způsob výpočtu zdoluhavý, velice pracný a z tohoto důvodu se nejeví být efektivní.

Při použití podrobného rozboru oběhů hnacích vozidel bylo v tomto ukázkovém řešení nutné zpracovat celkem 12 turnusových skupin, čítajících 42 listů grafických záznamů. Na základě tohoto rozboru byl vyčíslen denní počet ujetých kilometrů d km na trati č. 310 $d = 4608$ km.

8.5. Sumární zhodnocení jízdnicích řádů

Při výpočtu celkového denního počtu ujetých kilometrů je dále možné zaměřit pozornost na jízdnicí řád vybrané trati jako na celek. V tomto případě není suma ujetých kilometrů odvozována od jednotlivých hnacích vozidel, ale pouze z délek tras jednotlivých spojů, které jsou v příslušném jízdnicím řádu vybrané tratě nasazený. Všechny přejezdy a případné další jízdy hnacích vozidel mimo uvažovanou trať jsou v tomto přístupu zanedbány a je možné je kompenzovat příslušnou provozní rezervou. Za předpokladu, reálného nasazení alternativních druhů pohonů do praxe bude zcela jistě nutně vhodným způsobem nově nastavit oběhy hnacích vozidel tak, aby bylo zajištěno optimální doplňování zdrojů energie.

Při výpočtu celkového denního počtu ujetých kilometrů na základě sumárního zhodnocení jízdnicích řádů je nutné:

- vyhledání všech spojů, které jsou v jízdnicím řádu na vybrané trati v příslušných dnech nasazený,
- sečtení délek tras všech těchto spojů.

Tato varianta se z hlediska časového i organizačního jeví jako výrazně efektivnější a je použita v rámci dalších výpočtů. S využitím sumárního zhodnocení jízdnicích řádů tedy činí celkový denní počet ujetých kilometrů d km na trati č. 310 $d = 4416$ km. Při srovnání s výše uvedeným podrobným rozбором oběhů hnacích vozidel bylo zjištěno, že rozdíl v počtu ujetých kilometrů d je menší než 5 %. Tento rozdíl bude kompenzován příslušnou provozní rezervou, jak je uvedeno níže.

Celková denní spotřeba vodíku G^H v kg s využitím vztahu (1) tedy činí 883,2 kg vodíku. Celková denní spotřeba elektrické energie G^E v kW·h s využitím vztahu (2) pak činí 29 145,6 kW·h.

8.6. Vodíkový pohon

Z hlediska technologického řešení nasazení alternativního vodíkového pohonu lze uvažovat dvě základní varianty navrhovaných řešení:

- výstavba plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů,
- lokální výroba vodíku s jeho přepravou na bezprostřední vzdálenost.

V obou výše uvedených variantách jsou vyčísleny dvě kategorie nákladů. Jedná se o investiční náklady spojené technologickou realizací zvolené varianty a provozní náklady vztažené k celkové denní spotřebě vodíku G^H v kg.

8.6.1. Výstavba plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů

Investiční náklady

Z hlediska investičních nákladů je pozornost zaměřena na dvě základní položky:

- náklady na pořízení disponibilní plochy pro výstavbu plnicí stanice,
- náklady na pořízení samotného plnicího zařízení a zásobníků s adekvátními provozními parametry, včetně nákladů na instalaci.

Plocha

Plocha pro výstavbu plnicí stanice zahrnuje dostatečný prostor pro umístění zásobníků a plnicího zařízení, dostatečný manipulační prostor pro obsluhu plnicího zařízení nákladními vozidly a doplňkový prostor pro instalaci potřebné infrastruktury. Odhadovaná výměra podložená konkrétními situačními výkresy a obdobnými řešeními se pohybuje v rozmezí 1800 až 2000 m².² Tuto plochu je nutné zajistit ve všech stanicích, ve kterých bude k plnění docházet. Konkrétně se jedná o lokality Olomouc a Krnov. Při průzkumu vhodných pozemků v daných lokalitách je nutné v první řadě hledat vhodné pozemky Správy železnic pro umístění plnicí stanice. Pokud v daných lokalitách nejsou vhodné pozemky Správy železnic, uvažuje se o dalších vhodných pozemcích jiných vlastníků. V těchto lokalitách jsou pozemky ČD, a.s. a Správa železnic je bude muset v rámci staveb odkoupit. Ceny za výměru pozemků v uvažovaných lokalitách jsou v níže uvedené Tab. 5.

Tab. 5 Ceny za výměru pozemků v uvažovaných lokalitách

Lokalita	(Kč·m ⁻²)
Olomouc, Hodolany	4000,-
Krnov, Pod Bezručovým vrchem	1800,-

Zdroj: [25]

Plnicí zařízení

Náklady na pořízení samotného plnicího zařízení a zásobníků s adekvátními provozními parametry včetně nákladů na instalaci jsou odhadovány na 38.000.000,- Kč.³ S ohledem na výše uvedené odhady parametrů jsou celkové investiční náklady vyčísleny v Tab. 6.

² Zdroj: Elektrolyzery Genfel, Stonava. Situační zakres – Krnov.

³ Zdroj: Vlastní zpracování.

Tab. 6 Celkové investiční náklady pro výstavbu plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů

Lokalita	Náklady na pořízení disponibilní plochy (Kč)	Náklady na pořízení plnicího zařízení (Kč)	Σ (Kč)
Olomouc	7.200.000,-	38.000.000,-	45.200.000,-
Krnov	3.240.000,-	38.000.000,-	41.240.000,-
Σ			86.440.000,-

Provozní náklady

Z hlediska provozních nákladů je primární pozornost věnována nákladům na:

- nákup požadovaného množství vodíku,
- dopravu vodíku z nejbližších zdrojů.

Nákup požadovaného množství vodíku

Na základě sumárního zhodnocení jízdních řádů, bylo zjištěno, že celkový denní počet ujetých kilometrů na vybrané trati č. 310 činí 4416 km. Na základě vztahu (1) lze snadno vyčíslit celkovou denní spotřeba vodíku G^H v kg, která činí $G^H = 883,2$ kg. K tomuto množství je dále připočtena provozní rezerva ve výši 10 % zohledňující případné přejezdy hnacích vozidel a případné další jízdy. Po započtení této rezervy a zaokrouhlení, činí celková denní spotřeba vodíku $G^H = 972$ kg. S ohledem na oběhy hnacích vozidel a jejich plnění je uvažováno, že toto množství vodíku bude rovnoměrně rozděleno mezi obě stanice, ve kterých bude k plnění docházet. Za předpokladu, že cena vodíku činí 278,- Kč·kg⁻¹ ⁴, lze denní náklady na nákup požadovaného množství vodíku vyčíslit na 270.216,- Kč.

Doprava vodíku z nejbližších zdrojů

V rámci vyčíslení nákladů na dopravu vodíku z nejbližších zdrojů jsou porovnávána dvě řešení, odpovídající silniční a železniční dopravě vodíku, přičemž, ve výsledku je zohledněna ekonomicky výhodnější varianta. Pro obě uvažované lokality byly vyhledány nejbližší zdroje vodíku a jsou zachyceny v níže uvedené Tab. 7.

Tab. 7 Nejbližší zdroje vodíků pro uvažované lokality a jejich vzdálenosti

Lokalita	Nejbližší zdroj vodíku	Vzdálenost (km)
Olomouc	DEZA, a.s., Valašské Meziříčí	77
Krnov	BC MCHZ, s.r.o., Ostrava	62

Při stanovení provozních nákladů připadajících na dopravu vodíku z nejbližšího zdroje, je v první řadě nutné určit minimální počty jízd vybraných vozidel r_s a r_z , které budou obsluhu zajišťovat. Za předpokladu, že v rámci silniční nákladní dopravy lze jednou jízdou přepravit 250 kg nákladu (vodíku) a v železniční nákladní dopravě 1000 kg (vodíku), lze tyto minimální počty jízd určit na základě vztahů:

$$r_s = \left\lceil \frac{G^H / 2}{250} \right\rceil \cdot 2 \quad (3)$$

$$r_z = \left\lceil \frac{G^H / 2}{1000} \right\rceil \quad (4)$$

⁴ Zdroj: Orlen Unipetrol včetně vlastního zpracování.

Kde $G^H/2$ představuje celkovou denní spotřebu vodíku pro jednu lokalitu po započtení provozní rezervy. Počet jízd je u silniční dopravy započten 2krát s ohledem na neproduktivní zpáteční jízdu. U železniční dopravy je neproduktivní zpáteční jízda zahrnuta již v samotné ceně přepravy. Po zohlednění výše uvedených parametrů a zaokrouhlení činí $r_s = 4$ jízdy a $r_z = 0,5$ jízdy (resp. 1 jízda obden). Za předpokladu, že odhadované náklady na přepravu vodíku v silniční nákladní dopravě činí $300 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1}$ a v železniční nákladní dopravě pak $230 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1}$, lze odpovídající provozní náklady připadající na přepravu vodíku vyčíslit následujícím způsobem. Srovnání nákladů na přepravu vodíku v závislosti na zvoleném druhu dopravy je uceleně uvedeno v Tab. 8 a shrnutí nákladů na výstavbu plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů nalezneme v Tab. 12.

Tab. 8 Srovnání nákladů na přepravu vodíku v závislosti na zvoleném druhu dopravy

Lokalita	Silniční nákladní doprava (Kč)	Železniční nákladní doprava (Kč)
Olomouc	92.400,-	8.855,-
Krnov	74.400,-	7.130,-

Při zohlednění výše uvedeného činí denní náklady na přepravu vodíku 15.985,- Kč. Pokud nyní shrneme náklady na nákup a přepravu vodíku, činí celkové denní provozní náklady u varianty výstavba plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů 286.201,- Kč.

8.6.2. Lokální výroba vodíku s jeho přepravou na bezprostřední vzdálenost

Investiční náklady

Z hlediska investičních nákladů je pozornost, obdobně jako u předchozí varianty, zaměřena na dvě základní položky:

- náklady na pořízení disponibilní plochy pro výstavbu stanice pro lokální výrobu vodíku,
- náklady na pořízení samotného elektrolyzérů s adekvátními provozními parametry a příslušenstvím, včetně nákladů na instalaci.

Plocha

Plocha pro výstavbu stanice pro výrobu vodíku zahrnuje dostatečný prostor pro umístění vlastního elektrolyzérů, demineralizační jednotky a zásobníků. Dále pak tato plocha zahrnuje dostatečný manipulační prostor pro případnou obsluhu zásobníků nákladními vozidly, doplňkový prostor pro instalaci potřebné infrastruktury. Odhadovaná výměra podložená konkrétními situačními výkresy a obdobnými řešeními se pohybuje v rozmezí 1800 až 2000 m².⁵ Tuto plochu je opět nutné zajistit ve všech stanicích, ve kterých bude k plnění docházet. Opět se jedná o lokality Olomouc a Krnov. Ceny za výměru pozemků v uvažovaných lokalitách jsou v Tab. 5.

Plnicí zařízení

Náklady na pořízení samotného elektrolyzérů s adekvátními provozními parametry včetně nákladů na instalaci jsou odhadovány na 100.000.000,- Kč.⁶ S ohledem na výše uvedené odhady parametrů jsou celkové investiční náklady vyčísleny v Tab. 9.

⁵ Zdroj: Elektrolyzery Genfel, Stonava. Situační zakres – Krnov.

⁶ Zdroj: Vlastní zpracování.

Tab. 9 Celkové investiční náklady pro výstavbu stanice lokální výroby vodíku

Lokalita	Náklady na pořízení disponibilní plochy (Kč)	Náklady na pořízení elektrolyzéro (Kč)	Σ (Kč)
Olomouc	7.200.000,-	100.000.000,-	107.200.000,-
Krnov	3.240.000,-	100.000.000,-	103.240.000,-
Σ			210.440.000,-

Provozní náklady

Z hlediska provozních nákladů je primární pozornost věnována nákladům na nákup vstupních surovin pro výrobu vodíku. Jedná se o:

- demineralizovanou vodu,
- elektrickou energii.

Jak již bylo u předchozí varianty podrobně popsáno, celková denní spotřeba vodíku po započtení provozní rezervy činí $G^H = 972$ kg. S ohledem na oběhy hnacích vozidel a jejich plnění je opět uvažováno, že toto množství vodíku bude rovnoměrně rozděleno mezi obě stanice, ve kterých bude k plnění docházet. Z technické dokumentace konkrétního elektrolyzéro H-TEC PEM 10 MW HCS bylo zjištěno, že průměrná spotřeba demineralizované H_2O pro výrobu 1 kg H_2 činí 16 l. A dále, že průměrná spotřeba elektrické energie pro výrobu 1 kg H_2 činí 60 kW·h [10].

Pro přípravu 1 l demineralizované vody je nutné disponovat 1,2 l vody dodávané vodovodním řadem a současně je pro výrobu 1 litru demineralizované vody nutné vynaložit 20 W·h elektrické energie. Za předpokladu, že cena vody činí 0,12 Kč·l⁻¹ [26] a cena elektrické energie činí 5,81 Kč·kW·h⁻¹, lze vyčíslit celkové denní náklady na nákup surovin pro lokální výrobu požadovaného množství vodíku. Ty jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Celkové denní náklady na nákup surovin pro lokální výrobu požadovaného množství vodíku

G^H (kg)	H_2O demin (l)	H_2O demin (Kč·l ⁻¹)	Σ (Kč)
972	16	0,26	4.043,52
G^H (kg)	el. en. (kW·h)	el. en. (Kč·kW·h ⁻¹)	Σ (Kč)
972	60	5,81	338.839,2
Σ (Kč)			342.882,72

Tab. 10 uvádí celkové denní náklady na nákup surovin pro lokální výrobu požadovaného množství vodíku. Shrnutí lokální výroby vodíku s jeho přepravou na bezprostřední vzdálenost je uvedeno v Tab. 13.

8.7. Bateriový pohon

V současné době není na trhu k dispozici bateriově poháněné vozidlo, které by bylo schopné na jedno nabití ujet celou zamýšlenou trasu. Proto je pro trať č. 310 varianta bateriového vlaku jednacího v celém neelektrizovaném úseku v současnosti nerealizovatelná.

8.8. Diesellový pohon

Poslední varianta pohonu, která bude pro účely výsledného srovnání popsána a vyčíslena, je varianta diesellového pohonu. Přestože se nejedná o variantu alternativního pohonu, může tato

varianta zastupovat variantu stávajícího stavu.

Investiční náklady

Vzhledem ke skutečnosti, že dieselový pohon je na tratích Správy železnic běžně zastoupen a je k dispozici úplná infrastruktura zabezpečující fungování tohoto druhu pohonu, není nutné z hlediska investičních nákladů vynakládat žádné prostředky.

Provozní náklady

Z hlediska provozních nákladů je pozornost věnována nákladům na nákup požadovaného množství motorové nafty G^D v litrech. Pro určení tohoto množství bude uplatněn vztah (5), který logicky koresponduje s výše uvedenými vztahy (1) a (2).

$$G^D = d \cdot g^D \quad (5)$$

kde d km představuje celkový denní počet ujetých kilometrů na vybrané trati a g^D l·km⁻¹ představuje průměrnou spotřebu motorové nafty připadající na 1 km ujeté vzdálenosti.

Nákup požadovaného množství motorové nafty

Jak již bylo výše uvedeno, na základě sumárního zhodnocení jízdních řádů, bylo zjištěno, že celkový denní počet ujetých kilometrů na vybrané trati č. 310 činí 4416 km.

Za předpokladu, že průměrná spotřeba motorové nafty v současnosti provozovanými jednotkami na trati č. 310 činí 0,45 l·km⁻¹ ⁷, pak lze na základě vztahu (5) snadno vyčíslit celkovou denní spotřebu motorové nafty G^D v litrech, která činí $G^D = 1987,2$ l. Za předpokladu, že tržní cena motorové nafty činí 34,62,- Kč·l⁻¹ lze denní náklady na nákup požadovaného množství motorové nafty vyčíslit na 68.796,9,- Kč. Pro konzistenci ve srovnání s výše uvedenými variantami předpokládejme, že množství motorové nafty bude rovnoměrně rozděleno mezi obě stanice. Shrnutí dieselového pohonu je uvedeno v Tab. 11.

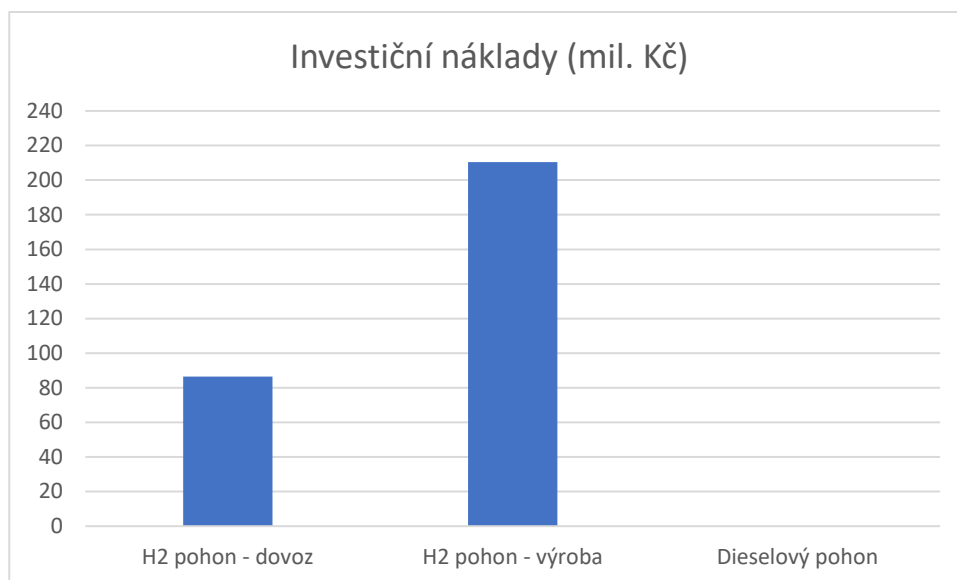
8.9. Srovnání jednotlivých pohonů

Ve výše uvedeném textu byly popsány a z hlediska rámcových investičních a provozních nákladů vyčísleny varianty, které budou nyní porovnány. Jedná se o varianty:

- výstavba plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů (H₂ pohon – výroba),
- lokální výroba vodíku s jeho přepravou na bezprostřední vzdálenost (H₂ pohon – dovoz),
- dieselový pohon.

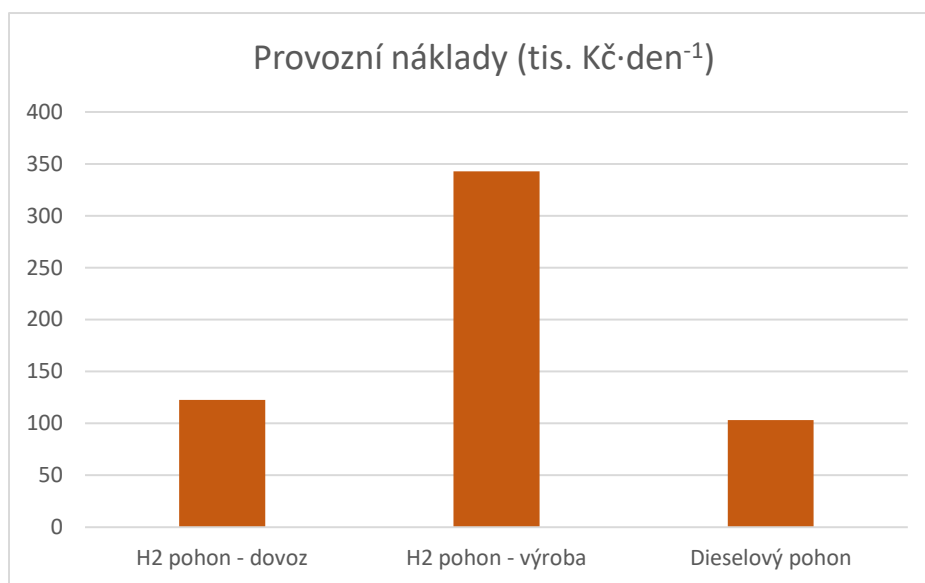
Obr. 15 zachycuje porovnání celkových investičních nákladů napříč všemi uvažovanými variantami. Investičně nejnákladnější je varianta lokální výroby vodíku. Naopak řešení, které nevyžaduje žádné investiční náklady, je varianta dieselového pohonu, která odpovídá současnému stavu na trati č. 310. S variantou bateriového pohonu se na této trati neuvažuje, proto je tato varianta vynechána.

⁷ Zdroj: Informace ČD, a.s.



Obr. 15 Srovnání investičních nákladů pro jednotlivé uvažované varianty

Obr. 16 zachycuje porovnání denních provozních nákladů opět napříč všemi uvažovanými variantami. Nejvyšší zátěž z hlediska provozních nákladů vykazuje varianta lokální výroby vodíku, zatímco nejnižší provozní náklady vykazuje varianta odpovídající stávajícímu stavu na trati č. 310, tedy diesellový pohon.



Obr. 16 Srovnání denních provozních nákladů pro jednotlivé uvažované varianty

Obě výše uvedená srovnání jsou založena na rámcových vyčísleních investičních a provozních nákladů. Pro případ reálného rozhodování o nasazení konkrétního druhu alternativního pohonu na příslušné trati je nutné zohlednit celou škálu dalších faktorů, které jsou podrobně popsány v příloze věnované analýze nákladů a přínosů. Vyčíslení těchto faktorů je však netriviální záležitostí a je vázáno na zpracování detailních projektových dokumentací jednotlivých uvažovaných variant včetně detailního zhodnocení výchozí stavu.

8.10. Shrnutí aplikace metodiky pro trať č. 310

Pro trať č. 310 byla nejdříve vypracována analýza vhodnosti alternativního pohonu na základě

technických specifikací tratě. Z této analýzy vyplývá, že pro tuto trať je po technické stránce vhodný pouze vodíkový pohon. Především z důvodu délky neelektrifikovaného úseku, který by v současnosti neumožnil provoz vlaků bateriových. V úvahu dále připadaly varianty výroby vodíku v místě plnění, případně dovozu vodíku z již existujících zdrojů prostřednictvím železniční nebo silniční dopravy. Jako nejvhodnější varianta se zde jeví dovoz vodíku po železnici, který vychází ekonomicky nejvýhodněji. Rozdíl v provozních nákladech při lokální výrobě vodíku a při jeho dovozu již ale není velký a je velmi závislý na ceně elektřiny použité pro výrobu vodíku a ceně nakupovaného vodíku.

Přestože alternativa bateriového pohonu nebyla z technického hlediska pro trať č. 310 vhodná, byla kalkulována i tato varianta, čistě z důvodů porovnání investičních a provozních nákladů. Identicky byla spočtena i varianta zachování současného stavu, tedy diesellového pohonu. Jednotlivé shrnutí investičních nákladů a provozu lze vidět uceleně v Tab. 11, Tab. 12 a v Tab. 13.

Tab. 11 Shrnutí diesellového pohonu

Diesellový pohon	
Celkové investiční náklady	0,- Kč
Celkové denní provozní náklady	68.797,- Kč

Tab. 12 Shrnutí výstavby plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů

Výstavba plnicí stanice s následnou dopravou vodíku z nejbližších zdrojů	
Celkové investiční náklady	86.440.000,- Kč
Celkové denní provozní náklady	286.201,- Kč

Tab. 13 Shrnutí lokální výroby vodíku s jeho přepravou na bezprostřední vzdálenost

Lokální výroba vodíku s jeho přepravou na bezprostřední vzdálenost	
Celkové investiční náklady	210.440.000,- Kč
Celkové denní provozní náklady	342.883,- Kč

8.11. Orientační výpočet nákladů na vlakokilometr pro trať č. 310

Náklady na vlakokilometr se skládají z provozních nákladů, které je nutné vynaložit na jeden kilometr jízdy vozu. Výpočet je dán celkovými denními provozními náklady D podělenými denní ujetou vzdáleností d . Pro trať č. 310 je to 4416 km.

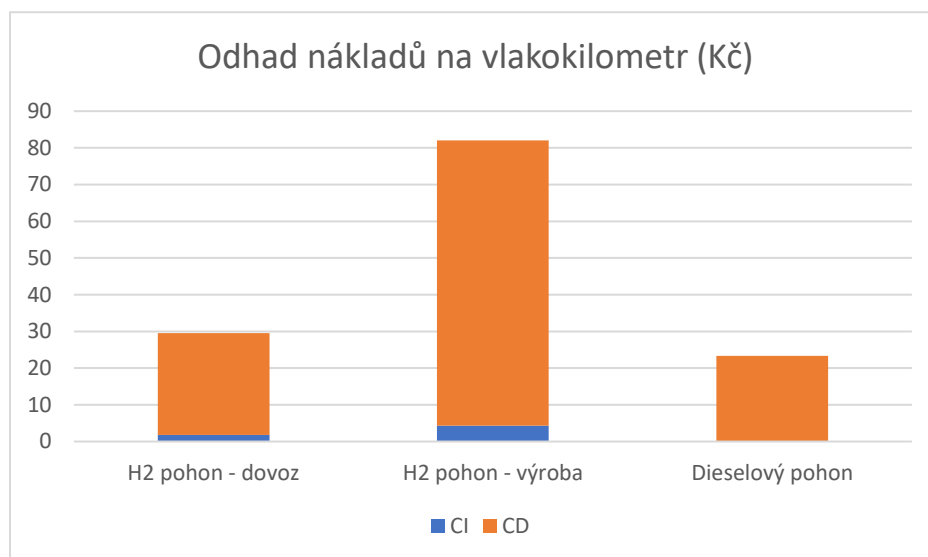
$$c_D = \frac{D}{d} \quad (6)$$

Aby bylo možné zohlednit do nákladů na vlakokilometr pro jednotlivé typy pohonů také investiční náklady, budou tyto náklady převedeny do odpisů, které se rozloží na celou dobu životnosti investice. Takto přepočtené náklady nutně zvýhodní diesellový pohon, pro který už infrastruktura existuje a počítáme zde pro jednoduchost s nulovými vstupními investicemi. Dalším zjednodušením je skutečnost, že budeme uvažovat životnost všech investic totožnou ($T = 30$ let). Při realizaci investičních nákladů I na tuto dobu pak dojde k navýšení nákladů na jeden vlakokilometr o částku c_I , kterou lze vypočítat následujícím způsobem:

$$c_I = \frac{I}{T \cdot d \cdot 365} \quad (7)$$

Konstantou 365 se investice dělí kvůli rozmělnění nákladů na jeden den provozu.

Pro případ dovozu vodíku do místa plnění je hodnota $c_D(H_{2d}) = 64,81$ Kč a $c_I(H_{2d}) = 1,79$ Kč. V případě vodíkového pohonu, kdy by byl vodík vyráběn v místě plnění pomocí elektrolýzy, se náklady na vlakokilometr skládají z částek $c_D(H_{2v}) = 77,65$ Kč a $c_I(H_{2v}) = 4,35$ Kč. V našem zjednodušeném případě nejsou pro dieselový pohon uvažovány žádné investice, tedy hodnota $c_I(D) = 0$. Hodnota $c_D(D) = 15,58$ Kč. Tento zjednodušený výpočet zanedbává náklady na údržbu, které nebudou zanedbatelné, ale v tuto chvíli je lze jen stěží odhadnout. Pojmem vůz se rozumí jedna ucelená dvouvozová jednotka.



Obr. 17 Odhad nákladů na vlakokilometr pro jednotlivé druhy pohonu

8.12. Souhrn vstupních a výstupních proměnných

Závěrem je možné stručně shrnout klíčové vstupní a výstupní proměnné napříč všemi srovnávanými variantami. Toto shrnutí je zachyceno v Tab. 14 a v Tab. 15.

Níže uvedená ekonomická zhodnocení jednotlivých alternativních variant pohonu na vybrané trati, reflektuje základní klíčové parametry, po jejichž zpracování byly vyčísleny odpovídající investiční a provozní náklady a slouží k prvotnímu srovnání v rámci rozhodovacího procesu. V této souvislosti je vhodné doplnit, že pro plnohodnotné porovnání jednotlivých variant, je nutné použít postup, který detailně zpracovává Rezortní metodika pro hodnocení ekonomické efektivity projektů dopravních staveb [16]. Vzhledem ke skutečnosti, že samotná rezortní metodika je velmi komplexní a rozsáhlá, je v příloze tohoto dokumentu (Příloha – Analýza nákladů a přínosů) předložen velmi intuitivní přehled a popis všech parametrů a vstupních zdrojů, které musí mít rozhodovatel k dispozici, pokud by chtěl toto detailní vyhodnocení realizovat.

Tab. 14 Vstupní proměnné

celkový denní počet ujetých kilometrů na vybrané trati	km
průměrná spotřeba vodíku připadající na 1 km ujeté vzdálenosti	kg·km ⁻¹
průměrná spotřeba elektrické energie připadající na 1 km ujeté vzdálenosti	kW·h·km ⁻¹
průměrná spotřeba motorové nafty připadající na 1 km ujeté vzdálenosti	l·km ⁻¹
cena za jednotku vodíku	Kč·kg ⁻¹
cena za jednotku elektrické energie	Kč·kW·h ⁻¹
cena za jednotku motorové nafty	Kč·l ⁻¹
cena za jednotku vody	Kč·l ⁻¹
cena za jednotku demineralizované vody	Kč·l ⁻¹
disponibilní plocha pro výstavbu plnicí stanice s potřebnou infrastrukturou	m ²
disponibilní plocha pro výstavbu technologie lokální výroby vodíku s potřebnou infrastrukturou	m ²
disponibilní plocha pro výstavbu nabíjecí stanice s potřebnou infrastrukturou	m ²
cena za výměru pozemku v příslušné lokalitě	Kč·m ⁻²
vzdálenost k nejbližším zdrojům vodíku	km
cena za přepravu vodíku v silniční nákladní dopravě	Kč·km ⁻¹
cena za přepravu vodíku v železniční nákladní dopravě	Kč·km ⁻¹
množství vodíku, které je možné přepravit jednou jízdou nákladního vozidla v silniční dopravě	kg
množství vodíku, které je možné přepravit jednou jízdou nákladního vozidla v železniční dopravě	kg
náklady na pořízení plnicí stanice s potřebnou infrastrukturou	Kč
náklady na pořízení nabíjecí stanice s potřebnou infrastrukturou	Kč
náklady na pořízení elektrolyzéru s potřebnou infrastrukturou	Kč

Tab. 15 Výstupní proměnné

investiční náklady odpovídající vybrané variantě alternativního pohonu	Kč
denní provozní náklady odpovídající vybrané variantě alternativního pohonu	Kč·den ⁻¹

Kapitola 9

Doporučení

Metodika navrhuje postupy, které jsou nutné pro optimální rozhodování o nasazení vhodného alternativního pohonu na vybrané železniční trati. Před tím, než se objednavatel vlakové dopravy rozhodne, který pohon je vhodný na danou trať, je nutné zpracování Technicko-ekonomické studie, kde budou posuzovány jednotlivé použité pohony na této trati. Technicko-ekonomická studie je prováděna z důvodu přínosů modernizace a elektrizace a její oceňování vychází ze stránek SFDI, kde jsou každý rok aktualizovány cenové databáze pro investiční přípravu dopravních staveb. Ve Sborníku pro oceňování železničních staveb ve stupni studie (SPOŽES) schváleným Ministerstvem dopravy jsou uvedeny položky pro jednotlivá zařízení [29]. Z důvodu důkladného porovnání elektrizace, prosté elektrizace, výstavby vodíkových technologií, výstavby dobíjecí infrastruktury by bylo vhodné doplnit tento Sborník pro oceňování železničních staveb o chybějící položky k vodíkové a dobíjecí infrastruktuře. Tímto krokem by se jednoznačně stanovily zadávací podmínky pro jednotlivé novodobé technologie.

Kapitola 10

Závěr

Metodika s názvem „Rozhodování o nasazení alternativních pohonů na tratích ve Správě železnic“ je jedním z výsledků projektu TK0410081 s názvem „Snížení energetické náročnosti a negativních vlivů na životní prostředí u železniční dopravy prostřednictvím přípravy pro vlaky na alternativní pohon“.

Cílem předložené metodiky je stanovit postupy, které jsou nutné pro zjednodušené a rychlé rozhodování o nasazení vhodného alternativního pohonu na vybrané železniční trati.

Metodika je nezbytná pro prvotní rozhodování hlavně v rezortu dopravy, zejména Ministerstva dopravy, Krajských, Správ železnic a dalších organizací zabývajících se provozem dopravy na provozovaných tratích.

Úvodní část metodiky se zabývá charakteristikou jednotlivých druhů alternativních pohonů, a to bateriových a vodíkových. Jejich základní vlastnosti jsou shrnuty v kapitole 3. V části popisující využití bateriový pohon jsou specifikovány základní vlastnosti, omezující podmínky pro nasazení v provozu a také problematika nabíjení.

V části popisující vodíkový pohon jsou podrobně popsány vlastnosti vodíku jako takového, jeho výroba, skladování, přeprava a také je diskutována účinnost procesu uskladnění energie do vodíku.

Kapitola 3 je shrnuta ve SWOT analýze znázorněné v Tab. 2, Tab. 3 a v Tab. 4, ve kterých jsou uvedeny silné stránky, slabé stránky, příležitosti a hrozby použití, což umožňuje rozhodovateli orientovat se a posoudit použití konkrétního řešení.

V kapitole 5 této metodiky je detailně popsán rozhodovací proces, který si klade za cíl stanovit technické limity pro jednotlivé druhy alternativního pohonu. Hlavním výstupem této kapitoly je rozhodovací diagram, který určuje, jaké informace jsou nutné k jednotlivým dílčím rozhodnutím. Výstupem diagramu je doporučení, zda je po technické stránce možné na vybrané trati realizovat konkrétní druh alternativního pohonu.

Kapitola 6 tohoto dokumentu detailněji popisuje požadavky na infrastrukturu pro vodíkový a bateriový provoz.

V kapitole 7 je realizována aplikace metodiky na modelové trati, která umožňuje porovnání všech uvažovaných variant pohonů.

Kapitola 8 pak detailně popisuje příklad užití této metodiky na trať č. 310 Olomouc – Opava–východ. V kapitole jsou diskutovány možné varianty pro danou trať po stránce technické. Dále jsou zde detailně rozvedeny náklady na realizaci a provoz pro všechny uvažované varianty včetně orientačního výpočtu nákladů na vlakokilometr.

Přílohy

Analýza nákladů a přínosů

V souladu s *Rezortní metodikou pro hodnocení ekonomické efektivnosti projektů dopravních staveb* [16] je pro kvantitativní posouzení srovnávaných variant (projektových variant a varianty bez projektu) používána analýza nákladů a přínosů, tzv. CBA. Tato část metodiky je stručným výtahem z *Rezortní metodiky* a slouží pro základní orientaci o tom, co vše je potřeba mít pro reálný výpočet CBA k dispozici. Před samotným zpracováním analýzy nákladů a přínosů je nezbytné věnovat pozornost:

- představení kontextu zamýšleného projektu,
- stanovení cílů projektu,
- identifikaci projektu,
- proveditelnosti projektu s analýzou poptávky a variant.

Popis výše uvedených čtyř bodů, je podrobně uveden v *Prováděcím nařízení komise (EU) 2015/207* [15], a v *Rezortní metodice pro hodnocení ekonomické efektivnosti projektů dopravních staveb* [16]. V následujícím textu bude z těchto předkladů vycházeno a analýza nákladů a přínosů bude představena především s důrazem kladeným na železniční dopravu.

Analýza nákladů a přínosů je jednou z metod, sloužících k posuzování investičních rozhodnutí. Tento analytický nástroj je založen na porovnání přínosů (Benefits) a nákladů (Costs), přičemž přínosy zde zastupují veškeré pozitivní důsledky a náklady pak veškeré negativní důsledky realizovaných investičních rozhodnutí. Jednotlivé kvantifikované přínosy a náklady jsou v rámci CBA přístupu srovnávány prostřednictvím přírůstkové analýzy. Za předpokladu, že jsou v rámci hodnocení srovnávány základní dvě varianty, tzv. nulová varianta, resp. varianta bez projektu a jedna projektová varianta, lze celkový dopad projektu *CDP* vyjádřit vztahem (8).

$$CDP = (V_P - N_P) - (V_B - N_B) \quad (8)$$

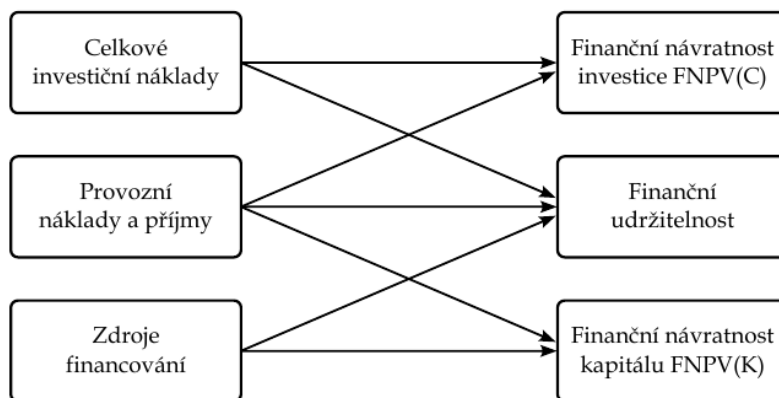
kde V_P a N_P představují výnosy a náklady varianty s projektem a V_B a N_B pak představují výnosy a náklady nulové varianty.

Analýza nákladů a přínosů je standardně vztahována k referenčnímu období, které koresponduje s ekonomickou životností posuzovaných variant. V železniční dopravě činí základní délka referenčního období od 20 do 90 let vzhledem určenému technickému zařazení. Veškerá kvantitativní analýza je realizovaná v reálných cenách. Tyto reálné ceny odpovídají cenové úrovni roku, ve kterém je analýza zpracovávána. Všechny běžné ceny je pak nutné na tuto cenovou úroveň převést prostřednictvím inflačních koeficientů [16]. Nedílnou součástí analýzy je rovněž zohlednění časové hodnoty peněz prostřednictvím diskontování [15].

Samotná analýza nákladů a přínosů je tvořena třemi klíčovými ukazateli. Jsou jimi finanční analýza, ekonomická analýza a hodnocení rizik.

1. Finanční analýza

Prvním krokem analýzy nákladů a přínosů je zpracování finanční analýzy, jejímž cílem je zhodnotit konsolidovanou ziskovost projektu, posoudit jeho finanční udržitelnost a analyzovat jednotlivé finanční toky. Schematické znázornění struktury finanční analýzy je zachyceno na Obr. 18.



Obr. 18 Schematické znázornění struktury finanční analýzy

Zdroj: Vlastní zpracování s využitím [17]

2. Vstupní data pro finanční analýzu

V rámci finanční analýzy je nutné podrobně zpracovat veškeré vstupní údaje týkající se investičních nákladů, provozních nákladů, reinvestic a zdrojů financování.

2.1. Investiční náklady

Investiční náklady představují celkovou počáteční investici a jsou tvořeny kapitálovými náklady vynaloženými na pořízení jak dlouhodobých, tak krátkodobých aktiv. Jedná se například o náklady na zábory a nákup pozemků, stavební náklady, potřebné vybavení, ale též na projektovou dokumentaci, řízení projektu, stavební dozor apod. Pro vyčíslení předpokládaných investičních nákladů spojených s železničními stavbami je možné vycházet z *Oborového třídníku stavebních konstrukcí a prací železničních staveb* [18] a ze *Sborníku pro oceňování železničních staveb ve stavu proveditelnosti* [19].

2.2. Provozní náklady

Provozní náklady jsou tvořeny souhrnem nákladů vynaložených na provoz a údržbu předmětné infrastruktury. Tyto náklady mohou být dle závislosti na objemu poskytované služby dále rozděleny na fixní a variabilní. V rámci železniční dopravy jsou do provozních nákladů započítány náklady na infrastrukturu, náklady na řízení provozu a náklady na provoz vozidel. Součástí provozních nákladů jsou v souladu s [15] rovněž reinvestice.

Náklady na infrastrukturu

Výpočet provozních nákladů spojených s reinvesticemi v železniční dopravě lze realizovat:

- s využitím měrných sazeb (použití u staveb liniového charakteru, zpravidla překračujících délku 50 km),
- podrobným oceněním obnovy.

Jak již bylo uvedeno výše, u staveb liniového charakteru nad 50 km délky, lze k vyčíslení provozních nákladů spojených s reinvesticemi využít měrných sazeb. Doporučené měrné sazby v mil. Kč·km⁻¹·rok⁻¹ jsou pro železniční dopravu dále rozděleny dle jednotlivých kategorií tratí

celostátní či regionální dráhy a jsou uvedeny v [16]. U staveb, které nesplňují výše uvedenou podmínku je nutné výši reinvestic stanovit na základě podrobného ocenění obnovy s ohledem na doporučené délky dob cyklů do obnovy. Doporučené délky dob cyklů do obnovy zařízení v letech jsou opět v závislosti na kategoriích tratí celostátní či regionální dráhy uvedeny v [16].

Při výpočtu provozních nákladů připadajících na infrastrukturu v železniční dopravě lze opět realizovat:

- s využitím měrných sazeb (použití u staveb liniového charakteru, zpravidla překračujících délku 50 km),
- individuálním výpočtem.

Doporučené měrné sazby pro vyčíslení nákladů na údržbu a opravy v jednotkách mil. Kč·km⁻¹·rok⁻¹ jsou pro železniční dopravu opět dále rozděleny dle jednotlivých kategorií tratí celostátní či regionální dráhy a jsou uvedeny v [16]. Tyto sazby vycházejí z *Metodiky klíčování nákladů na opravy a údržbu celostátních a regionálních drah a vyčíslení nákladů nutných pro zajištění jejich provozuschopnosti* [20]. Za předpokladu, že předmětem hodnocení je projekt lokální investice, je potřeba náklady na údržbu a opravy stanovit individuálním výpočtem v závislosti na reálné prognóze údržby a oprav jednotlivých prvků železniční infrastruktury. Zjednodušeně lze náklady na údržbu a opravy, avšak s ohledem na rozložení údržby a oprav v životním cyklu jednotlivých prvků železniční infrastruktury, odvodit z provozních nákladů na reinvestice. Doporučené měrné sazby pro odvození nákladů na provoz a údržbu z nákladů na reinvestice, v závislosti na rozložení údržby a oprav v životním cyklu prvků železniční infrastruktury, jsou uvedeny v [16].

Náklady na řízení provozu

V souladu s výše uvedeným je do provozních nákladů nutné zahrnout rovněž náklady na řízení provozu. Jedná se o souhrn nákladů vynaložených na provozní zaměstnance. Tyto náklady jsou stanovovány s ohledem na jednotlivé profese zabezpečované v řešených úsecích. Základní náklady mzdové náklady za rok práce v Kč jsou uvedeny [16].

Náklady na provoz vozidel

Ke stanovení provozních nákladů železničních vozidel je zpracována samostatná *Metodika stanovení nákladů na provoz vlaků vstupujících do CBA železničních projektů* [16]. Součástí této metodiky je výpočetní model MS Excel, který je modifikovatelný s ohledem na:

- nastavení základních parametrů,
- sestavu vlaku,
- nastavení jízdy vlaku,
- obsazení vlaku personálem,
- parametry železničních vozidel.

V rámci nastavení základních parametrů je v první řadě definována základní cena v Kč za použití dráhy, a to v závislosti na dalších parametrech (druh dopravy, druh ceny apod.). Dále je pozornost věnována stanovení ceny za energii v Kč·kW⁻¹·h⁻¹, a to podle druhu použité trakce. Následně jsou definovány základní sazby spotřeby trakční i netrakční energie v kW·h·Hr⁻¹·km⁻¹. Tyto sazby opět zohledňují řadu dalších parametrů (druh dopravy, počet zastavení, sklon, rychlost apod.). Součástí nastavení základních parametrů jsou rovněž mzdové náklady pracovníků dopravce podílejících se přímo na jízdě vlaku.

Výpočetní model dále zohledňuje sestavu konkrétního vlaku. V rámci výpočtu jsou zapracovány náklady na pořízení vlaku v mil. Kč, roční náklady na údržbu a opravy v mil. Kč·rok⁻¹ a poměr časového využití vlaku v %. Všechny náklady lze v rámci výpočetního modelu přepočítat na běžné hodiny Kč·hod⁻¹, resp. na provozní hodiny Kč·vlhod⁻¹.

Pro účely výpočetního modelu je jízda vlaku nastavována v závislosti na druhu vlaku, použité trakci, disponibilní rekuperaci a hrubé hmotnosti vlaku. Dále jsou ve výpočtu nastaveny parametry pojížděné dráhy, a to v závislosti na délce traťového úseku a jeho příslušné kategorii. U jednotlivých tratí lze dále specifikovat například stupeň počtu zastavování, stupeň sklonové náročnosti tratě, stupeň rychlosti apod.).

Součástí výpočetního modelu je rovněž stanovení personálních nákladů, které vyplývá z nutnosti obsazení vlaku personálem. Náklady na vlakový personál v Kč·hod⁻¹ jsou pak vypočteny v závislosti na druhu vykonávané profese, hodinových nákladech na příslušnou profesi a počtu obsazených osob.

2.3. Provozní příjmy

Provozní příjmy jsou peněžní prostředky inkasované provozovatelem dopravní infrastruktury ze strany jejich uživatelů, nejčastěji dopravců. V rámci železniční dopravy jsou tyto provozní příjmy stanovovány na základě aktualizovaného dokumentu *Prohlášení o dráze celostátní a dráhách regionálních* [21]. Cenu za použití dráhy jízdou vlaku C_V lze stanovit na základě vztahů (9) – (11).

$$C_V = \sum C_S + C_{PK} \quad (9)$$

kde C_V je cena za použití dráhy jízdou vlaku v Kč, C_S je cena za použití dráhy jízdou jednoho subvlaku v Kč a C_{PK} je cena za použití přístupových komunikací pro cestující ve vlaku osobní dopravy Kč.

$$C_S = (L \cdot Z_{RP}) + (L \cdot Z_I \cdot M \cdot P_x \cdot k_{ETCS}) \quad (10)$$

kde L je délka jízdy subvlaku v km, Z_{RP} je základní cena zařízení provozu na jednotku dopravního výkonu v Kč·km⁻¹, Z_I je základní cena za údržbu a opravy infrastruktury na jednotku dopravního výkonu v Kč·hrtkm⁻¹, M je celková hmotnost vlaku v t, P_x je hodnota produktového faktoru P_1 až P_5 a k_{ETCS} je koeficient vybavenosti vlaku mobilní částí ETCS.

$$C_{PK} = \sum_{n=11}^{15} Z_{PK}^n \cdot M_{PK} \cdot N_Z^n \quad (11)$$

kde Z_{PK}^n je základní cena za jedno plánované zastavení vlaku osobní dopravy pro nástup anebo výstup cestujících v železničních stanicích a zastávkách kategorie n v (Kč za zastavení), M_{PK} je hmotnost vlaku pro výpočet ceny za přístupové komunikace v t a N_Z^n je plánovaný počet zastavení vlaku osobní dopravy pro nástup anebo výstup cestujících v železničních stanicích a zastávkách kategorie n .

6.2.4 Zdroje financování

Součástí finanční analýzy je rovněž podrobný popis zdrojů financování, přičemž hlavními zdroji mohou být:

- veřejné zdroje nadnárodní (např. granty EU),
- veřejné zdroje národní (např. granty centrální, regionální či místní úrovně veřejné správy),
- vlastní zdroje investora (půjčky, resp. vlastní kapitál),
- příspěvek ze soukromého sektoru (půjčky, resp. vlastní kapitál).

3. Výstupní ukazatele finanční analýzy

Za předpokladu, že jsou k dispozici potřebná vstupní data, je možné přistoupit ke stanovení výstupních ukazatelů finanční analýzy. Hlavními kvantitativními ukazateli finanční analýzy jsou:

- zůstatková hodnota,
- finanční čistá současná hodnota investice $FNPV(C)$,
- finanční vnitřní výnosové procento investice $FRR(C)$ ⁸,
- finanční čistá současná hodnota národního kapitálu $FNPV(K)$,
- finanční vnitřní výnosové procento kapitálu $FRR(K)$ ⁹,
- finanční udržitelnost projektu.

3.1. Zůstatková hodnota

Zůstatková hodnota představuje zbývajících „kapacitu“ předmětu hodnocené investice, jehož ekonomická životnost ještě není naplněna. Za předpokladu, že je referenční období blízké ekonomické životnosti předmětu realizované investice, může být její zůstatková hodnota zanedbatelná, resp. nulová. Zůstatkovou hodnotu investice je možné určit vypočtením čisté současné hodnoty peněžních toků ve zbývajících letech životnosti předmětu investice.

3.2. Finanční čistá současná hodnota investice

Finanční čistou současnou hodnotu investice v Kč vypočteme podle vztahu 12 kde a_t je finanční diskontní faktor pro diskontování v čase t a S_t je bilance peněžního toku v čase t . Jedná se o částku vypočtenou odečtením (bilancí) očekávaných diskontovaných investičních a provozních nákladů projektu od očekávaných diskontovaných příjmů. Koeficient i představuje finanční diskontní sazbu.

$$FNPV(C) = \sum_{t=0}^n a_t \cdot S_t = \frac{1}{(1+i)^t} \cdot S_t \quad (12)$$

$$\text{Pokud } FNPV(C) = \begin{cases} > 0, \\ \leq 0, \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{projekt nevyžaduje finanční podporu} \\ \text{projekt vyžaduje finanční podporu.} \end{array}$$

⁸ Resp. finanční míra návratnosti investice.

⁹ Resp. finanční míra návratnosti kapitálu.

3.3. Finanční vnitřní výnosové procento investice

Finanční vnitřní výnosové procento investice v % pak vypočteme podle vztahu 13, kde S_t je zůstatek hotovosti v čase t . Jedná se o diskontní sazbu po jejímž započtení je hodnota $FNPV$ rovna nule.

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{1}{(1 + FRR)^t} \cdot S_t \quad (13)$$

3.4. Finanční čistá současná hodnota kapitálu

Finanční čistou současnou hodnotu národního kapitálu $FNPV(K)$ v Kč vypočteme modifikací vztahu (12). Do výpočtu jsou zahrnuty všechny zdroje financování mimo příspěvky z EU.

3.5. Finanční vnitřní výnosové procento kapitálu

Finanční vnitřní výnosové procento kapitálu $FRR(K)$ v % pak vypočteme modifikací vztahu (13). Do výpočtu jsou opět zahrnuty všechny zdroje financování mimo příspěvky z EU. Hlavním cílem výpočtu $FRR(K)$ je prověření výkonnosti projektu podpořeného grantem z EU vzhledem k podpořené veřejnosti, resp. podpořeným soukromým subjektům.

3.6. Finanční udržitelnost projektu

Finanční udržitelnost projektu reprezentuje riziko vyčerpání finanční hotovosti v průběhu investiční i provozní fáze. Cílem finanční udržitelnosti je podrobná analýza zdrojů financování s ohledem na každoroční výši splátek. Projekt je finančně udržitelný, pokud jsou souhrnné generované peněžní toky pro všechny hodnocené roky projektu kladné.

4. Ekonomická analýza

Druhým krokem analýzy nákladů a přínosů je zpracování ekonomické analýzy, která navazuje na analýzu finanční. Cílem ekonomické analýzy je v souladu s *Nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 1303/2013* [22] posoudit přínos projektu pro socioekonomický rozvoj (úroveň blahobytu). Základním principem ekonomické analýzy je zohlednění tzv. stínových cen získaných příslušnou konverzí z cen tržních. V rámci ekonomické analýzy je nutné věnovat pozornost:

- fiskální korekci,
- přepočtu tržních cen na ceny stínové,
- zohlednění netržních dopadů a externalit.

4.1. Fiskální korekce a konverze tržních cen

Fiskální korekce má za cíl odstranění tzv. transferových plateb (daně, dotace). Přepočet tržních cen na stínové ceny je pak realizován prostřednictvím příslušných konverzních faktorů, které představují poměr stínových ku tržním cenám. Obecný vztah pro výpočet a aplikaci konverzního faktoru vyjadřuje rovnice (14).

$$k_i = \frac{v_i}{p_i} \text{ pro } i = 1, \dots, m, \quad (14)$$

kde k_i představuje konverzní faktor, v_i je stínová cena a p_i je tržní cena zboží i . Tyto konverzní faktory jsou v rámci projektů zaměřených na železniční infrastrukturu aplikovány na investiční náklady, provozní náklady vztahené k opravě a údržbě infrastruktury, provozní náklady vztahené k řízení dopravy a provozní náklady vozidel. Hodnoty jednotlivých konverzních faktorů jsou pro jednotlivé nákladové složky uvedeny v [16].

4.2. Netržní dopady a externality

Netržní dopady představují přímé přínosy projektu zahrnující například zkrácení cestovní doby, zvýšení bezpečnosti provozu, eliminace hluku apod. Za předpokladu, že tyto pozitivní přínosy projektu překračují interakci dopravce a správce infrastruktury a týkají se třetích osob, jedná se o tzv. externality. Mezi hlavní přímé přínosy projektu a externality, které je potřeba v rámci ekonomické analýzy zohlednit patří:

- investiční náklady,
- provozní náklady na infrastrukturu a reinvestice,
- úspora nákladů na provoz vozidel,
- úspora času,
- snížení nehodovosti,
- snížení hluku,
- snížení emisí skleníkových, jiných plynů a pevných částic,
- jiné přínosy.

Provozní a investiční náklady, stejně jako náklady na reinvestice vycházejí z finanční analýzy popsané v kapitole 8, avšak jsou přepočteny na ekonomické ceny. Úspora nákladů na provoz vozidel může být přímým důsledkem vhodně realizovaných změn (např. zvýšená kapacita trati apod.). Dalším z přímých přínosů je úspora přepravního času, u které je při vyhodnocování nutné vycházet z tzv. přepravní prognózy, resp. dopravního modelu. Podrobné ohodnocení času pro účely ekonomické analýzy je uvedeno v *HEATCO: Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment* [23].

Z hlediska externalit je pozornost možné věnovat především snížení nehodovosti při porovnání nulové varianty a projektových variant. Obecně jsou posuzovány tři kategorie dopravních nehod s ohledem na úmrtí, zranění a hmotnou škodu. Výchozím materiálem pro tuto analýzu jsou statistická data *Drážní inspekce* a *Správy železnic*. Jednotkové společenské náklady v Kč vztažené k jednotlivým druhům dopravních nehod, resp. jednotkové externí náklady nehod jsou uvedeny v [16].

Dále je do externalit možné zahrnout vliv hluku v souladu s procesem EIA posuzujícím vliv záměrů na životní prostředí. Jednotkové náklady hluku v $\text{Kč} \cdot \text{osoba}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, resp. zjednodušené jednotkové externí náklady hluku jsou uvedeny v [16].

Ovlivnění kvality životního prostředí je možné do externalit zahrnout především s ohledem na vybrané znečišťující látky a emise skleníkových plynů. Do znečišťujících látek patří pevné částice $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , dále pak prekurzory ozónu NM VOC, prekurzory ozónu a nitrátů NO_x a prekurzory sulfátů SO_x . Z hlediska skleníkových plynů je pozornost věnována emisím CO_2 , N_2O a CH_4 , které jsou přepočítány na ekvivalenty CO_2e . Jednotkové náklady výše uvedených polutantů v dopravě v $\text{Kč} \cdot \text{t}^{-1}$, resp. jejich emisní faktory v závislosti na druhu dopravy jsou opět uvedeny v [16].

5. Výstupní ukazatele ekonomické analýzy

Za předpokladu, že jsou k dispozici potřebná vstupní data, je možné přistoupit ke stanovení výstupních ukazatelů ekonomické analýzy. Hlavními kvantitativními ukazateli ekonomické analýzy jsou:

- zůstatková hodnota,
- ekonomická čistá současná hodnota $ENPV$,
- ekonomické vnitřní výnosové procento ERR ,
- poměr přínosů a nákladů B/C .

5.1. Ekonomická čistá současná hodnota

Ekonomickou čistou současnou hodnotu v Kč vypočteme podle vztahu (15), kde ρ_t je sociální diskontní faktor pro diskontování v čase t a V_t je bilance čistých přínosů v čase t . Koeficient r představuje sociální diskontní sazbu SDR , která je v souladu s [15] pro Českou republiku stanovena na 5 %. Ekonomická čistá současná hodnota je hlavním kvantitativním ukazatelem ekonomické analýzy a jedná se o částku vypočtenou odečtením (bilancí) očekávaných diskontovaných společenských nákladů projektu od očekávaných diskontovaných společenských příjmů.

$$ENPV = \sum_{t=0}^n \rho_t \cdot V_t = \frac{1}{(1+r)^t} \cdot V_t \quad (15)$$

$$\text{Pokud } ENPV = \begin{cases} > 0, & \text{projekt je pro společnost přínosem,} \\ \leq 0, & \text{projekt není pro společnost přínosem.} \end{cases}$$

5.2. Ekonomické vnitřní výnosové procento

Ekonomické vnitřní výnosové procento v % pak vypočteme podle vztahu (16), kde V_t je bilance čistých příjmů v čase t . Jedná se o diskontní sazbu po jejímž započtení je hodnota $ENPV$ rovna nule.

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{1}{(1+ERR)^t} \cdot V_t \quad (16)$$

5.3. Poměr přínosů a nákladů

Poměr přínosů a nákladů vypočteme podle vztahu (17), kde B_t jsou celkové diskontované přínosy v čase t , C_t jsou celkové diskontované náklady v čase t , ρ_t je sociální diskontní faktor pro diskontování v čase t a r představuje sociální diskontní sazbu SDR . Očekávaný poměr přínosů je větší než jedna, tedy $B/C > 1$.

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^n \rho_t \cdot B_t}{\sum_{t=0}^n \rho_t \cdot C_t} \quad (17)$$

6. Hodnocení rizik

Třetí částí analýzy nákladů a přínosů je v souladu s [22] hodnocení rizik, obsahující rovněž analýzu citlivosti. V rámci tohoto kroku má být pozornost primárně zaměřena na:

- analýzu citlivosti,
- kvalitativní analýzu rizik,
- kvantitativní analýzu rizik.

6.1. Analýza citlivosti

Jedná se o metodu provádění výpočtů, která zkoumá vliv změny vstupních proměnných výpočtu na jeho výstupy (výsledky). Účelem citlivostní analýzy je tedy určit citlivost výstupů na jednotlivé nebo kombinované vstupy a zjistit, jak tyto vstupy ovlivňují celkový výsledek.

Vzhledem k tomu, že v průběhu doby trvání investice se mohou některé parametry měnit, na příklad cena energie, hustota provozu na analyzované trati a další parametry, zabýváme se tedy otázkou „Co se stane když“ se změni vstupní parametr o určitou hodnotu, jak se změní hodnota výstupní veličiny.

Cílem analýzy citlivosti je identifikace kritických proměnných, jejichž změny (ať už pozitivní či negativní) představují zásadní změnu finanční nebo ekonomické výkonnosti projektu. Identifikace kritických proměnných u_i , kde $i=1,...,m$ z množiny proměnných m lze formálně zapsat následujícím způsobem:

$$\text{Pokud } u_i \pm 1 \% = \begin{cases} \Delta NPV > 1 \%, & \text{proměnná je kritická,} \\ \Delta NPV \leq 1 \%, & \text{proměnná není kritická.} \end{cases}$$

Tedy, pokud je důsledkem změny proměnné o $\pm 1 \%$ změna NPV o 1% , lze tuto proměnnou považovat za kritickou. Po identifikaci těchto proměnných je vhodné provést analýzu scénářů. V rámci této analýzy jsou stanoveny optimistické a pesimistické odhady kritických proměnných a je sledována jejich vzájemná interakce s cílem eliminovat možná rizika. Součástí analýzy citlivosti je rovněž identifikace tzv. přechodových hodnot, při kterých je hodnota NPV rovna nule. Platí-li například, že $ENPV > 0$ i v rámci pesimistického nastavení kritických hodnot, lze považovat riziko projektu za nízké a naopak.

6.2. Kvalitativní analýza rizik

Cílem kvalitativní analýzy rizik je identifikace potenciálních nežádoucích hrozeb. V rámci kvalitativní analýzy rizik nutné věnovat pozornost:

- identifikaci nežádoucích událostí,
- definování matice rizik,
- interpretaci matice rizik,
- popisu zmírňujících, resp. preventivních opatření hlavních rizik.

Po identifikaci potenciálních nepříznivých událostí $j=1,...,n$ je každé z těchto událostí přiřazena pravděpodobnost jejího výskytu P_j . Množina pravděpodobností je popsána v Tab. 16.

Tab. 16 Pravděpodobnost výskytu nežádoucích událostí P_j

Klasifikace	Popis	Pravděpodobnost
A	Velmi nepravděpodobná	0–10 %
B	Nepravděpodobná	10–33 %
C	Neutrální	33–66 %
D	Pravděpodobná	66–90 %
E	Velmi pravděpodobná	90–100 %

Zdroj: Vlastní zpracování s využitím [17]

Současně je pro každou nepříznivou událost $j=1,...,n$ stanovena závažnost dopadu S_j . Množina závažností těchto dopadů je popsána v Tab. 17. Zároveň je v tabulce vyjádřeno, zda může vhodná realizace preventivních a zmírňujících opatření eliminovat příslušný dopad nežádoucí události.

Tab. 17 Závažnost dopadů nežádoucích událostí S_j

Klasifikace	Popis	Nápravná opatření
I	Žádný dopad	Nerelevantní
II	Mírné zhoršení sociálního blahobytu.	Ano
III	Střední zhoršení sociálního blahobytu.	Ano
IV	Kritické zhoršení sociálního blahobytu.	NE
V	Katastrofální – selhání projektu.	NE

Výsledná úroveň rizika konkrétní nepříznivé události $j=1,...,n$ je pak dána interakcí pravděpodobnosti výskytu P_j a závažnosti jejího dopadu S_j . Výstupy interakcí jsou pak shrnuty v Tab. 18.

Tab. 18 Závažnost dopadů nežádoucích událostí S_j

P_j / S_j	I	II	III	IV	V
A	Nízká	Nízká	Nízká	Nízká	Střední
B	Nízká	Nízká	Střední	Střední	Vysoká
C	Nízká	Střední	Střední	Vysoká	Vysoká
D	Nízká	Střední	Vysoká	Velmi vysoká	Velmi vysoká
E	Střední	Vysoká	Velmi vysoká	Velmi vysoká	Velmi vysoká

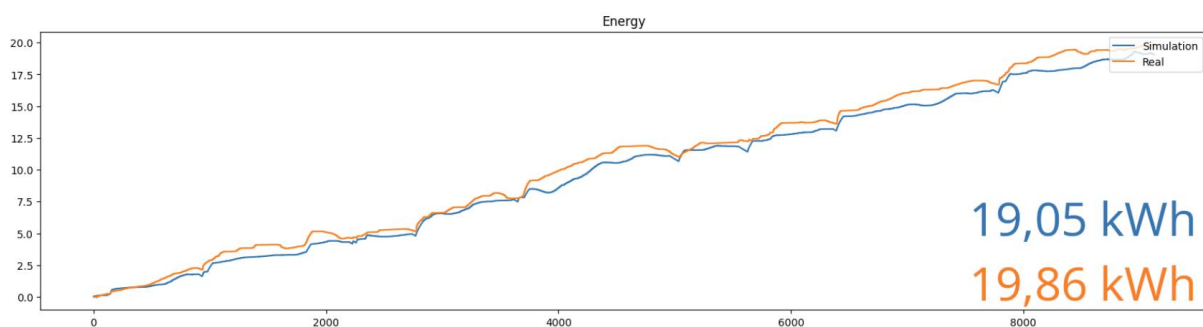
6.3. Kvantitativní analýza rizik

Kvantitativní analýzu rizik je v souladu s [22] vhodné zpracovat za předpokladu, že i po uplatnění preventivních a zmírňujících opatření zůstává významné zbytkové riziko. V tomto případě je každé z kritických proměnných, které byly identifikovány v rámci analýzy citlivosti, přiřazeno konkrétní rozdělení pravděpodobnosti. Následně je možné s využitím simulační metody Monte Carlo odhadnout rozdělení pravděpodobnosti pro výstupní ukazatele finanční a ekonomické analýzy $FNPV$, FRR , $ENPV$, ERR . Vyhodnocení přijatelnosti konkrétního projektu pak předpokládá, že výsledné ukazatele finanční a ekonomické analýzy dostatečně přesahují vypočtenou hranici efektivit. Podrobný rozbor kvantitativní analýzy rizik je uveden v [17].

Webová aplikace

Nad rámec řešeného projektu je vyvíjena webová aplikace, která si klade za cíl být cenným nástrojem pro kvalifikovaný odhad investičních a provozních nákladů pro provoz vlaků na alternativní pohon na konkrétní trati.

Jedna z nejobtížnějších částí procesu odhadu nákladů na provoz vlaků na alternativní pohon je nutnost určit energetickou náročnost jízdy vlaku na konkrétní trati. Při těchto odhadech se často používá pouze průměrná spotřeba konkrétního vlaku či jednotky, ale nijak se nerespektuje výškový profil tratě a mnoho dalších již diskutovaných skutečností. Webová aplikace pracuje s reálným reliéfem tratě a obsahuje v sobě fyzikální modely jednotlivých vlakových jednotek. Jednotlivé modely byly v průběhu řešení validovány nad reálnými daty a je tak možné konstatovat, že jejich výsledky budou velmi podobné realitě. Na Obr. 19 je zachyceno porovnání reálné a simulované energetické náročnosti jízdy vlaku. Oranžová křivka reprezentuje reálně naměřená data, modrá křivka pak reprezentuje simulaci na úseku dlouhém zhruba 9 km.



Obr. 19 Porovnání reálné a simulované energetické náročnosti jízdy vlaku

Energetická náročnost vlakového provozu

323 - Ostrava hlavní nádraží - Valašské Meziříčí

Plánovač provozu | Vodik | Elektřina | Výsledný výpočet

Mapa trati

Jízdní řád

Název vlaku	Výkon	Hmotnost lokomotivy	Hmotnost vagónů	Počet jíz	Zastávky
Motorový vůz ČSD 860	480 kW	56 000 kg	64 490 kg	4	Upravit
CityElefant 471	2000 kW	155 400 kg	102 400 kg	12	Upravit
RegioPanter 650	1360 kW	102 800 kg	102 800 kg	10	Upravit

[+ Přidat jízdu vlaku](#)

Obr. 20 Energetická náročnost vlakového provozu (Plánovač provozu)

Aplikace se skládá ze čtyř záložek, jak je vidět na Obr. 20 až Obr. 24. V první záložce, Obr. 20, bude uživatel definovat konkrétní trať a dále bude definovat jednotlivé soupravy, které bude chtít na trati provozovat. U každé soupravy bude zadáno, jaký úsek tratě bude projíždět a v jakých zastávkách bude zastavovat. Nad zadanými daty se poté provede simulace jejíž výsledek bude

definovat celkovou potřebu energie na provoz definovaných vlakových souprav na dané trati.

Energetická náročnost vlakového provozu

323 - Ostrava hlavní nádraží - Valašské Meziříčí

Plánovač provozu | **Vodík** | Elektřina | Výsledný výpočet

Vodíková plnicí stanice

Zvolte typ plnicí stanice

S elektrolyzérem | S dovozem vodíku

Cena plnicí stanice a zásobníku	Cena vody
500000 KČ	7 KČ
Cena elektrolyzéru a technologií	Cena odpadového hospodářství
10000000 KČ	1320000 KČ
Cena 1kg H ₂	Cena za kWh
32 KČ	5 KČ
Cena technologie úpravy vody	
2100000 KČ	

Obr. 21 Energetická náročnost vlakového provozu (Vodík – S elektrolyzérem)

Energetická náročnost vlakového provozu

323 - Ostrava hlavní nádraží - Valašské Meziříčí

Plánovač provozu | **Vodík** | Elektřina | Výsledný výpočet

Vodíková plnicí stanice

Zvolte typ plnicí stanice

S elektrolyzérem | **S dovozem vodíku**

Cena plnicí stanice a zásobníku
2100000 KČ
Vzdálenost v km ke zdroji vodíku
64 km
Cena za přepravu 1 kg H ₂ (1 km vlakem)
9 KČ
Cena za přepravu 1kg H ₂ (1 km nákl. autem)
14 KČ
Cena 1 kg H ₂ včetně čištění
39 KČ

Obr. 22 Energetická náročnost vlakového provozu (Vodík – S dovozem vodíku)

Další záložka bude specifikovat parametry vodíkového provozu, a to jak ve variantě lokální výroby vodíku – Obr. 21, tak ve variantě dovozu vodíku – Obr. 22.

Energetická náročnost vlakového provozu

323 - Ostrava hlavní nádraží - Valašské Meziříčí

Plánovač provozu | Vodík | **Elektřina** | Výsledný výpočet

Dobíjecí stanice

Zvolte způsob dodání el. energie

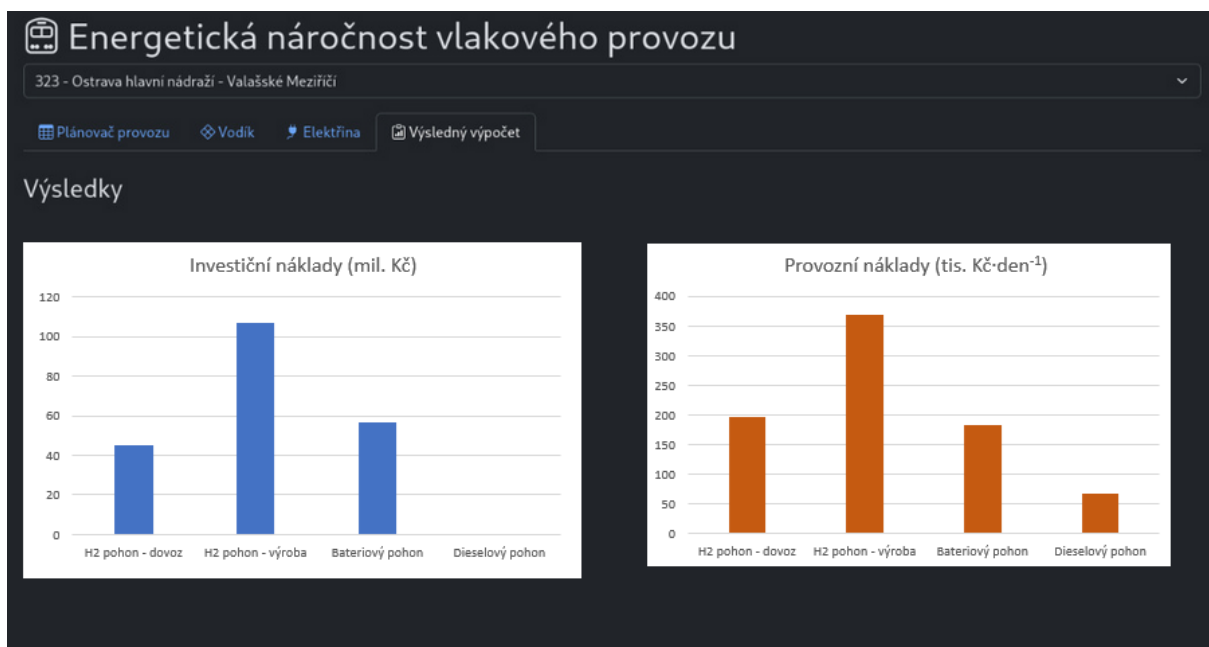
Dobíjení pod trolejí 25 kV AC | Dobíjení pod trolejí 3 kV DC | Výstavba parazitní troleje

Cena za kWh

5 Kč

Obr. 23 Energetická náročnost vlakového provozu (Elektřina – Dobíjení pod trolejí 25 kV AC)

V položce, která je pracovně nazvaná „*Elektřina*“ budou specifikovány parametry dobíjecích stanic ve všech dostupných variantách – Obr. 23.



Obr. 24 Energetická náročnost vlakového provozu (Výsledný výpočet)

V záložce „*Výsledné výpočty*“ budou číselně a graficky zobrazeny výsledky simulace – Obr. 24. Taktéž bude možné, některé vstupní parametry dynamicky měnit tak, aby se jejich změna okamžitě promítla do výsledků. Uživatel tak bude moci sledovat, jak jednotlivé vstupy ovlivňují celkovou bilanci. Všechny výše uvedené obrázky Obr. 19 až Obr. 24 jsou pouze náhledy a zdaleka neobsahují plnou zamýšlenou funkcionalitu.

Literatura

- [1] Technologická agentura ČR, „Specifikace požadavků poskytovatele na výsledky VaV“, 2022.
- [2] Ministerstvo dopravy ČR, „Certifikované a schválené metodiky, Kolejová doprava“, <https://www.mdcr.cz/Dokumenty/Veda-a-vyzkum/Certifikovane-metodiky/Zeleznicni-metodiky> (viděno 28. srpen 2023).
- [3] Správa železnic, „Základní charakteristika železniční sítě“. <https://www.spravazeleznic.cz/o-nas/vse-o-sprave-zeleznic/zeleznice-cr/zeleznicni-sit-v-cr> (viděno 28. srpen 2023).
- [4] „Železničář“, České dráhy, a.s., Praha, 1. duben 2016.
- [5] „Akumulátorová lokomotiva E 212.001 „Koloběžka““, České dráhy, a.s., 2022. <https://www.cdnostalgie.cz/expozice/muzeum/nase-exponaty/-37158/> (viděno 28. srpen 2023).
- [6] „KEEPING GOING WHEN THE CATENARY ENDS: THE FLIRT AKKU“. <https://www.stadlerrail.com/en/flirt-akku/details/> (viděno 28. srpen 2023).
- [7] „Pohon autobusů a vlaků na H₂“, Linde Gas a.s. <https://www.linde-gas.cz/cs/hydrogen/mobilizing-public-buses-and-trains-with-h2.html> (viděno 28. srpen 2023).
- [8] Martin Paidar, Adam Giurg, a Karel Denk, „Výroba vodíku v ČR a její uhlíková stopa“, in Projekt: Regionální vodíkové vlaky na českých železnicích TAČR KAPPA (TO01000324),
- [9] M. Špina, „Vodík: Nejlehčí prvek je největší výzva“, O energetice, 29. prosinec 2021. <https://oenergetice.cz/vodik/vodik-nejlehci-prvek-nejvetsi-vyzva> (viděno 28. srpen 2023).
- [10] „Výroba vodíku“, Devinn. <https://www.devinn.cz/blog/vyroba-vodiku> (viděno 28. srpen 2023).
- [11] „Stadler Rail Unveils Hydrogen-Powered FLIRT H₂ Trains for Sustainable Rail Transport“. <https://energynews.biz/stadler-rail-unveils-hydrogen-powered-flirt-h2-trains-for-sustainable-rail-transport/> (viděno 28. srpen 2023).
- [12] „7 DŮVODŮ PROČ JE LiFePO₄ BATERIE TAK SKVĚLÁ, ŽE NEMÁ ŽÁDNOU KONKURENCI“, GWL. https://files.gwl.eu/inc/_doc/Pdf/210127ebook7duvodubaterielifepo4210x210cz4.pdf (viděno 28. srpen 2023).
- [13] SUDOP, „Sborník pro oceňování železničních staveb ve stavu proveditelnosti“, Praha: SUDOP PRAHA, a.s., 2015.
- [14] Správa železnic, „Prohlášení o dráze celostátní a dráhách regionálních“, Praha, 2022.
- [15] Evropská komise, „Prováděcí nařízení komise (EU) 2015/207“, Brusel, 2015.

-
- [16] Kolektiv autorů, „Rezortní metodika pro hodnocení ekonomické efektivity projektů dopravních staveb“, Praha, 2016.
- [17] Europea comission, „Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects“, Brusel, 2014.
- [18] SFDI, „Oborový třídník stavebních konstrukcí a prací železničních staveb“, Praha, 2014.
- [19] SUDOP, „Sborník pro oceňování železničních staveb ve stavu proveditelnosti“, Praha: SUDOP PRAHA, a.s., 2015.
- [20] SFDI, „Metodika klíčování nákladů na opravy a údržbu celostátních a regionálních drah a vyčíslení nákladů nutných pro zajištění jejich provozuschopnosti“, Praha, 2015.
- [21] SŽ, „Prohlášení o dráze celostátní a dráhách regionálních“, Praha, 2022.
- [22] Evropský parlament, „Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 1303/2013“, Brusel, 2013.
- [23] „Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment“. Viděno: 28. srpen 2023. [Online]. Dostupné z: <https://trimis.ec.europa.eu/project/developing-harmonised-european-approaches-transport-costing-and-project-assessment>
- [24] „Jízdní řády“, 28. srpen 2023. <https://www.spravazeleznic.cz/cestujici/jizdni-rad> (viděno 28. srpen 2023).
- [25] ODHAD ZDARMA s.r.o., „Odhad-zdarma.cz“. <https://www.odhad-zdarma.cz/> (viděno 28. srpen 2023).
- [26] P. Woff, „Cena vody 2023: Vodné a stočné zdražilo průměrně o 22 %“, 4. únor 2023. <https://www.kupnisila.cz/cena-vody-vodne-stocene/> (viděno 28. srpen 2023).
- [27] „VOLTAP: die Schnellladestation für Batteriezüge (BEMU)“. <https://www.swtue.de/geschaeftskunden/energie/strom/bahnstrom/voltap.html> (viděno 28. srpen 2023).
- [28] „MPO: Vodíková strategie České republiky“. https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2021/8/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf (viděno 28. srpen 2023).
- [29] „SFDI: Cenové databáze“. <https://www.sfdi.cz/pravidla-metodiky-a-ceniky/cenove-databaze/> (viděno 28. srpen 2023).

