



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Pavel Homolka

MOŽNOSTI VYUŽITÍ BEMU
V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY

Diplomová práce

2020



K617..... Ústav logistiky a managementu dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Pavel Homolka

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – LA – Logistika a řízení dopravních procesů

Název tématu (česky): **Možnosti využití BEMU v podmínkách České republiky**

Název tématu (anglicky): The Possibilities of Using BEMU in the Conditions of the Czech Republic

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- popis koncepce hybridního pohonu elektrických jednotek s důrazem na bateriově-
elektrické ucelené jednotky (BEMU),
- rozbor z pohledu provozního a ekonomického,
- požadavky na infrastrukturu v porovnání s elektrizací tratě,
- návrh využití hybridních jednotek na konkrétních příkladech tratí v ČR,
- shrnutí výsledků a doporučení pro úspěšnou realizaci.



Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Vuchic, V.: Urban transit systems and technology. Hoboken: Wiley, 2007.
Rüger, S.: Transporttechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr. Berlin: Transpress, 1986.
Hedrichová, H.: Hybridní pohony kolejových vozidel. Praha: ČVUT FS, 2016

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2018**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Tomáš Horák, Ph.D.
vedoucí
Ústavu logistiky a managementu dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Pavel Homolka
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....11. listopadu 2019

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří se podíleli na vzniku této diplomové práce. Zvláště pak děkuji vedoucímu své práce Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné rady a čas strávený konzultacemi této práce. Také jsem velice vděčný Ing. Jiřímu Pohlovi, který mi ochotně poskytoval své odborné rady v oblasti železničních vozidel. V neposlední řadě patří velký dík mé rodině a blízkým za podporu, které se mi po celou dobu studia dostávalo.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10. května 2020



.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

MOŽNOSTI VYUŽITÍ BEMU V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY

diplomová práce

červen 2020

Bc. Pavel Homolka

ABSTRAKT

Předmětem práce je zhodnocení možností využití bateriových elektrických železničních jednotek (BEMU) v podmínkách České republiky. První část práce zahrnuje přehled konvenčních i alternativních druhů pohonu železničních jednotek. Dále je představena historie i současný stav bateriových elektrických železničních vozidel. Převážná část práce je pak věnována rozboru specifik provozování BEMU. Získané znalosti jsou aplikovány v modelu využití BEMU na příkladech konkrétních tratí. V poslední části práce jsou uvedena doporučení pro vhodné využití BEMU v rámci železniční sítě České republiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

železniční vozidla, železniční infrastruktura, osobní železniční doprava, alternativní pohony na železnici, elektromobilita, bateriová elektrická jednotka

ABSTRACT

The subject of this thesis is evaluation of the possibilities of using battery electric multiple railway units (BEMU) in the conditions of the Czech Republic. The first part of the thesis includes an overview of conventional and alternative propulsion systems for multiple unit trains. Furthermore, the history and current state of battery electric railway vehicles are presented. Most of the work is then devoted to the analysis of the specifics of BEMU operation. Acquired knowledge is used in the model usage of BEMU on examples of specific routes. The last part of the thesis contains recommendations for the appropriate use of BEMU within the railway network of the Czech Republic.

KEY WORDS

railway vehicles, railway infrastructure, passenger rail transport, alternative propulsion systems for railway, electromobility, battery electric multiple unit

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	5
ÚVOD	6
1 POHONY ŽELEZNIČNÍCH JEDNOTEK	8
1.1 KONVENČNÍ POHONY	9
1.2 ALTERNATIVNÍ POHONY	14
2 BATERIOVÉ ELEKTRICKÉ JEDNOTKY (BEMU)	25
2.1 OSTATNÍ BATERIOVÁ ELEKTRICKÁ KOLEJOVÁ VOZIDLA	25
2.2 HISTORIE	27
2.3 AKTUÁLNÍ VÝVOJ	31
3 SPECIFIKA PROVOZOVÁNÍ BEMU	35
3.1 TECHNICKÁ SPECIFIKA	35
3.2 INFRASTRUKTURA	39
3.3 PROVOZNÍ KONCEPT	49
3.4 ENERGETIKA A EKOLOGIE	53
3.5 EKONOMIKA	58
3.6 ORGANIZAČNÍ ZAJIŠTĚNÍ	61
4 MODEL VYUŽITÍ BEMU	66
4.1 VSTUPNÍ PŘEDPOKLADY	66
4.2 SOUČASNÁ INFRASTRUKTURA (MODEL „VYSOČINA“)	69
4.3 NOVÁ INFRASTRUKTURA (MODEL „SLOVÁCKO-VALAŠSKO“)	80
5 MOŽNOSTI VYUŽITÍ BEMU V ČR	91
5.1 LOKALITY S POTENCIÁLEM VYUŽITÍ BEMU V ČR	91
5.2 DOPORUČENÍ PRO VYUŽITÍ BEMU V PODMÍNKÁCH ČR	95
ZÁVĚR	101
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	104
SEZNAM OBRÁZKŮ	112
SEZNAM TABULEK	114
SEZNAM GRAFŮ	115
SEZNAM PŘÍLOH	116

Seznam použitých zkratek

AC	střídavý proud (alternating current)
BEMU	bateriová elektrická jednotka (battery electric multiple unit)
BMU	dvouzdrojová jednotka (bi-mode multiple unit)
BMVI	Ministerstvo dopravy a digitální infrastruktury Spolkové republiky Německo (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur)
BMWİ	Ministerstvo hospodářství a energetiky Spolkové republiky Německo (Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie)
ČD	České dráhy
ČSN	české technické normy
DB	Německé dráhy (Deutsche Bahn)
DC	stejnoseměrný proud (direct current)
DHEMU	diesel-elektrická hybridní jednotka (diesel-electric hybrid multiple unit)
DMU	dieselová jednotka (diesel multiple unit)
EMU	elektrická jednotka (electric multiple unit)
FCEMU	elektrická jednotka s palivovými články (fuel cell electric multiple unit)
FCMU	jednotka s palivovými články (fuel cell multiple unit)
HMU	vodíková jednotka (hydrogen multiple unit)
HVO	hydrogenovaný rostlinný olej (hydrogenated vegetable oil)
IPEMU	nezávisle poháněná elektrická jednotka (independently powered electric multiple unit)
IT	informační technologie
KJŘ	knižní jízdní řád
LFP	lithium-železo-fosfátová baterie
LTO	lithium-titanová baterie
MDČR	Ministerstvo dopravy České republiky
NMC	lithium-nikl-mangan oxid kobaltová baterie
ÖBB	Rakouské spolkové dráhy (Österreichische Bundesbahnen)
OZE	obnovitelné zdroje energie
SNCF	Francouzská národní železniční společnost (Société nationale des chemins de fer français)
TSI	technické specifikace interoperability
TT	trakční transformovna
vtkm	vlakokilometr
VRT	vysokorychlostní trať

Úvod

Vzhledem k rostoucí mobilitě obyvatel, vyššímu důrazu na efektivní využívání zdrojů a preferenci udržitelných forem dopravy, zažívá železniční osobní doprava v posledním desetiletí znatelný růst. Železnice především v zemích západní Evropy představuje v očích veřejnosti moderní a stále oblíbenější druh dopravy. Aby bylo oprávněné tvrzení, že je železnice moderní i v České republice, je nezbytné dbát na její efektivní využívání, podporu provozně i energeticky výhodných druhů pohonu a zajištění jejího dostatečného financování.

V současném stavu je možné se na železniční síti České republiky setkat s velmi různorodým vozovým parkem, a to jak z hlediska technických parametrů, tak i z hlediska stáří nebo provozovatele vozidel. Používané druhy pohonu jsou však v pravidelné osobní dopravě pouze dieselová a elektrická trakce. Vozidla v elektrické trakci jsou provozována především na hlavních mezinárodních trasách a v aglomeracích největších měst. V regionech je naopak nejběžnější provoz v dieselové trakci.

Ne všechny formy železniční dopravy jsou však optimální, ať už ekonomicky či energeticky. Aktuálně je téměř polovina dopravního výkonu v České republice zajišťována vozidly v dieselové trakci, která s sebou nesou množství negativních dopadů, zvláště kvůli emisím škodlivých látek, hluku a vibracím. Především s výhledem do budoucna nemusí jít ani o ekonomicky výhodný druh trakce pro železniční vozidla.

Dle cílů Státní energetické koncepce ČR (2015) i Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu (2019) by v oblasti železniční dopravy měla být spotřeba nafty snížena a nahrazena alternativními palivy. Žádná konkrétní opatření pro železniční dopravu v ČR ale definována nebyla.

Na konci roku 2019 byl Evropskou komisí představen balíček opatření nazvaný „The European Green Deal“. Mezi navrhovaná opatření patří snížení emisí, ochrana životního prostředí a investice do výzkumu a inovací. Jedním z hlavních cílů této dohody je dosažení klimatické neutrality do roku 2050. Toho by mělo být dosaženo snížením emisí skleníkových plynů. Dopomoci k tomu by měla postupná dekarbonizace energetického systému a zvýšení účinnosti výroby elektrické energie s co nejnižším dopadem na životní prostředí.

Jedna čtvrtina všech skleníkových plynů vyprodukovaných v rámci EU připadá na sektor dopravy. K dosažení klimatické neutrality je do roku 2050 potřebné snížení emisí z dopravy o 90 %. Tomu by mohlo napomoci urychlení vývoje a zavádění vhodných alternativních paliv používaných v odvětví dopravy a převedení dopravního zatížení na efektivnější dopravní mód, kterým v případě dálkové i regionální přepravy osob může být právě železniční doprava.

Především v západní Evropě začali výrobci železničních vozidel spolu s dopravci vyvíjet nové, alternativní druhy pohonů pro použití na železnici. Jedná se zejména o kombinaci energie získané z nafty a elektřiny, energie z vodíku či o využívání energie uložené do baterií.

Elektromobilita se před nedávnem dostala do popředí společenského zájmu především ve spojitosti s automobilovým průmyslem. Právě možnost přepravy osob na čistě elektrický pohon byla však již od počátku 20. století výsadou právě železniční dopravy. V posledních letech se ale také v automobilovém průmyslu, který byl dosud závislý na spotřebě ropných derivátů, začal prosazovat čistě elektrický nebo hybridní pohon. To bylo značným impulsem pro vývoj nových technologií, mimo jiné i v oblasti uchovávání elektrické energie.

Zvláště výhodné se ukázalo být využití moderních baterií v železničních jednotkách. Vyvinuty byly jednotky vybavené elektromotorem s možností napájení z vrchního trakčního vedení a jízdy na baterii mimo elektrizovaný úsek. Jejich využití může být vhodnou alternativou k dosud provozovaným vozidlům dieselové trakce z důvodu vyšší efektivity elektrického pohonu a snížení dopadů na okolí. Zároveň by tím odpadla nutnost nákladné výstavby elektrického trakčního vedení na celé síti.

Ucelené jednotky, využívající pro trakci napájení buď přímo z trakčního vedení, nebo ze zařízení pro uchovávání elektrické energie, se v anglické terminologii označují zkratkou „BEMU“ (battery electric multiple unit). V české odborné terminologii pro jejich označení neexistuje odpovídající ekvivalent. Někdy jsou označovány jako „elektrická jednotka trolej/akumulátor“ nebo nepřesně jako „bateriové jednotky“. V souladu s anglickou odbornou terminologií je v této práci užíván pojem „baterie“, označující zpravidla chemický zdroj elektrické energie bez možnosti dobíjení, jakožto synonymum pro výraz „akumulátor“. Pojem „akumulátor“ je v anglických odborných publikacích považován spíše za archaický. Pro označení těchto vozidel je tak v této práci využíván termín „bateriová elektrická jednotka“.

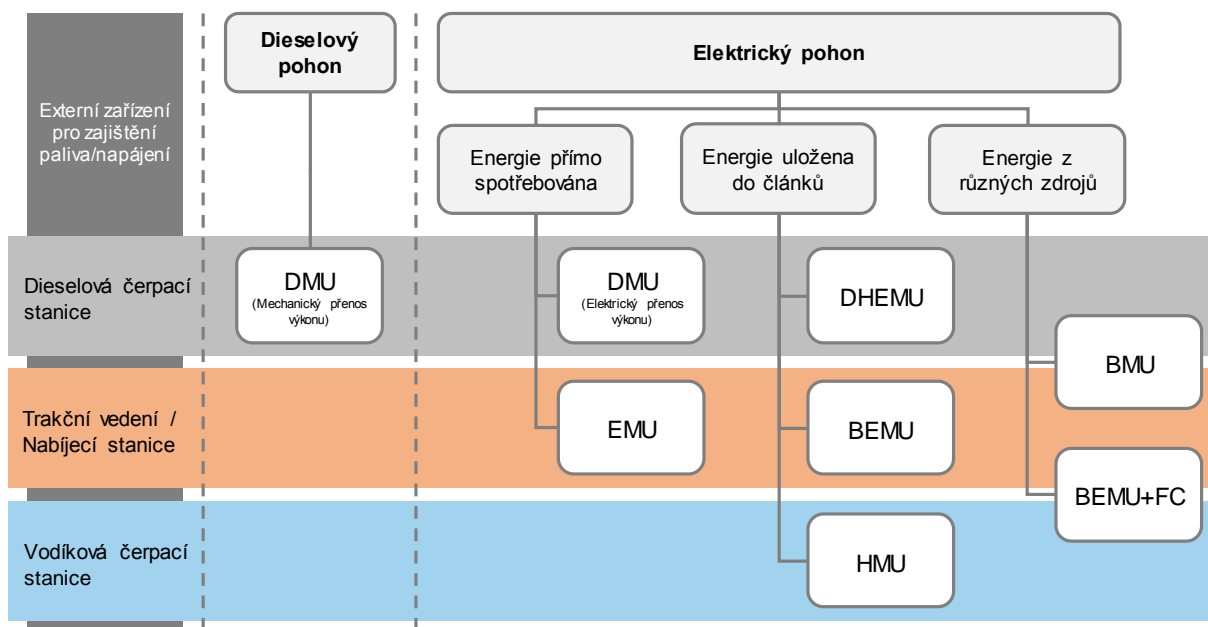
Tato diplomová práce se zabývá konkrétními možnostmi využití bateriových elektrických jednotek, a to s ohledem na jejich aktuální vývoj a podmínky specifické pro Českou republiku. V jednotlivých částech práce jsou popsány druhy pohonu železničních jednotek, je představena historie i současný stav bateriových elektrických železničních vozidel a převážná část práce je pak věnována rozboru specifik provozování BEMU v nejdůležitějších oblastech. Získané znalosti jsou aplikovány v modelu využití BEMU na příkladech konkrétních tratí. Cílem práce je vyhodnocení vhodnosti této koncepce, návrh konkrétních lokalit pro jejich provoz na železniční síti ČR a nalezení podmínek, za kterých je využívání BEMU v podmínkách ČR výhodné. Závěry této práce mohou být přínosné především pro objednatele železniční dopravy, správce infrastruktury a také jako vstupy do koncepce rozvoje železniční dopravy v ČR.

1 Pohony železničních jednotek

Při vozbě vlaků osobní dopravy v současnosti stále narůstá význam ucelených jednotek, které postupně nahrazují, zvláště pak v zemích západní Evropy, soupravy lokomotivou tažených vlaků s klasickými vozy. Především v regionální dopravě mají ucelené jednotky či motorové vozy převahu i v rámci České republiky a s nákupem nových vozidel je tento trend stále více podporován.

Pohony železničních jednotek jsou pro účely této práce rozděleny na konvenční a alternativní, dle četnosti jejich současného využití. Uvedené pohony jsou buď využívány v současném provozu, nebo je s nimi uvažováno pro budoucnost železniční dopravy. Během historického vývoje železnice se využívaly i další druhy pohonu, které však již v současné době nejsou běžně používány (parní či koňská trakce) a nejsou tak v tomto přehledu zmíněny. V této kapitole jsou uvedeny i pohony hybridní, které využívají energie získané z více různých zdrojů.

Rozdělení ucelených jednotek dle druhu pohonu, je uvedeno ve schématu na obrázku 1. Základním rozdílem mezi koncepcemi jednotlivých pohonů je, zda je k pohonu hnacích dvojkolí vozidla využíváno dieselového motoru (dieselový pohon) či elektromotoru (elektrický pohon). Při pohonu vozidla elektřinou je možné elektrickou energii přímo spotřebovat na trakci nebo ji ukládat do článku (baterie nebo palivové články) pro následnou spotřebu. Další možností je využití různých zdrojů energie, jako je například kombinace dieselu a elektřiny nebo vodíku a elektřiny.



Obrázek 1 Schéma rozdělení pohonů ucelených jednotek [autor s využitím 1]

1.1 Konvenční pohony

Mezi konvenční druhy pohonu jsou v této práci zařazeny pohony, které jsou v současnosti na železnici nejběžnější a nejpoužívanější. Aktuálně mají absolutní převahu nad jakýmkoliv jiným druhem pohonu železničních vozidel pohony dieselové a elektrické. Kromě příležitostných jízd historických vozidel nejsou v České republice v současnosti provozována v osobní dopravě žádná vozidla jiné trakce.

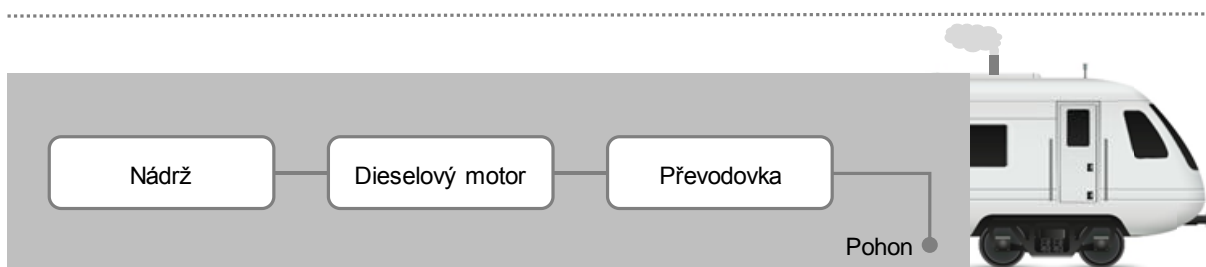
1.1.1 Dieselové jednotky (DMU)

Dieselová trakce patří k nejnověji používaným druhům pohonu železničních vozidel. K jejímu rozšíření došlo až ve druhé polovině 20. století, kdy zaznamenala veliký růst především v 60. a 70. letech, a to u lokomotiv i u motorových vozů a ucelených jednotek. Jedná se o nezávislý druh trakce, při kterém je jako palivo používána motorová nafta. V zahraniční terminologii jsou dieselové jednotky označovány jako DMU (diesel multiple unit).

Vzhledem k odlišnosti průběhu ideální trakční charakteristiky a momentové charakteristiky spalovacího motoru je pohon dvojkolí přímo spalovacím motorem nevhodný. Řešením je vložení mezičlánku mezi výstupní hřídel spalovacího motoru a nápravovou převodovku na dvojkolí. Tento mezičlánek zajišťuje přenos výkonu a napomáhá k přiblížení se ideální trakční charakteristice. Existuje několik druhů dieselových hnacích vozidel podle způsobu přenosu výkonu. Ucelené jednotky a motorové vozy se dle přenosu výkonu dají rozdělit na tři základní typy a sice, diesel-mechanické, diesel-hydraulické a diesel-elektrické [2].

1.1.1.1 Diesel-mechanický a diesel-hydraulický pohon

Mechanický pohon, znázorněný ve schématu na obrázku 2, se vyznačuje přenosem výkonu dieselového motoru skrze převodovku přímo na hnací dvojkolí. Variantou podobnou mechanickému je i hydraulický přenos výkonu, který využívá hydraulickou převodovku namísto mechanické.



Obrázek 2 Koncepce pohonu DMU (diesel-mechanická) [autor s využitím 1, 3, 4]

V současnosti nejrozšířenější modifikací tohoto přenosu je přenos hydrodynamický a hydromechanický, které využívají hydraulickou převodovku. Hydrodynamický přenos výkonu je založen na proudění kapaliny o nízkém tlaku a využívá její kinetické energie pro přenášení výkonu. Je tvořen hydrodynamickou převodovkou, která je sestavena z měničů. Měniče svojí

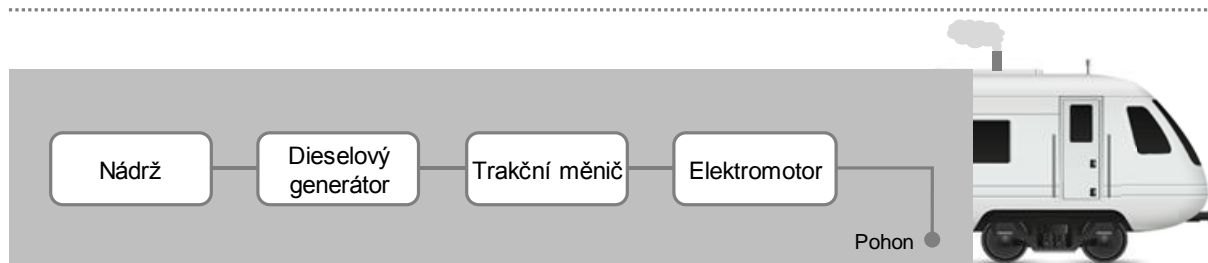
podstatou odpovídají převodovým stupňům mechanické převodovky. Jedná se o levnější a lehčí alternativu k elektrickému přenosu výkonu. Má však nižší účinnost. Umožňuje docílit vysoké tažné síly při rozjezdu bez použití součástí podléhajících mechanickému opotřebení, jako jsou například třecí spojky. Tento přenos výkonu se využíval již v 60. letech minulého století pro motorové vozy řady 850 a 851. Dnes je stále hojně využíván například u motorových vozů 854 či u původem německých jednotek BR 628 (v ČR řada 845) [2, 5].

Zvláštním případem především pro nižší výkony je použití tzv. hydromechanického přenosu výkonu. U tohoto způsobu přenosu převodovka obsahuje jediný měnič a jízdní stupně se řadí mechanicky. Tento typ přenosu výkonu používají například motorové vozy řady 810 a její deriváty.

Diesel-mechanický či diesel-hydraulický pohon využívá i většina moderních zahraničních vozidel, např. Siemens Desiro, Alstom Coradia LINT, Pesa LINK II a Stadler Regio Shuttle.

1.1.1.2 Diesel-elektrický pohon

Diesel-elektrický pohon znázorněný ve schématu na obrázku 3 se vyznačuje přítomností dieselového generátoru, který generuje elektrický proud, kterým je skrze trakční měnič napájen trakční elektromotor. Dieselový generátor se na rozdíl od diesel-mechanického pohonu nepodílí přímo na pohonu dvojkolí, ale pouze generuje elektrickou energii, přičemž o pohon dvojkolí se stará elektromotor.



Obrázek 3 Koncepce pohonu DMU (diesel-elektrická) [autor s využitím 1, 3, 4]

Elektrický přenos výkonu je nejmodernějším způsobem přenosu výkonu u dieselových vozidel. Existuje ve variantách stejnosměrný (DC/DC), střídavě stejnosměrný (AC/DC) a střídavý (AC/AC). Trakční elektromotor není omezen sníženým výkonem při nízkých otáčkách a poskytuje optimální provozní parametry pro hospodárny provoz ve vysokém rozsahu otáček. Vyznačuje se vysokou účinností a je vhodný i pro nejvyšší výkony. Umožňuje také elektrodynamické brzdění a celkově snazší ovládání než u diesel-mechanického pohonu. Nevýhodou je však nutnost náročné regulace přenosu a vyšší hmotnosti. Je využíván například u vozidel řady 843 nebo jednotek Stadler GTW. Rozšíření diesel-elektrického pohonu však není takové jako u diesel-mechanického, a to především z důvodu vysoké ceny [5].

Nespornou výhodou vozidel dieselová trakce je jejich vysoký dojezd, kterého jsou schopna dosáhnout díky vysoké hustotě energie obsažené v naftě (cca 11 900 kWh/t). Jedná se dle konkrétních podmínek o dojezd 800 – 2 000 km na jedno natankování. Navíc doplňování paliva probíhá velmi rychle v řádech několika minut. Tím jsou schopny provozu i na dlouhých úsecích neelektrizovaných tratí a jsou velmi flexibilní, co se týče potřebného času údržby. Jejich pořízení je také relativně levné, a zvláště vozidla o nízké kapacitě jsou schopna dosahovat nízkých provozních nákladů [6].

Nevýhodami vozidel dieselové trakce jsou především jízdni vlastnosti a vysoké emise hluku a látek škodlivých pro životní prostředí. Cestující pociťují zejména snížený komfort z důvodu vibrací od spalovacího motoru a také velkého hluku uvnitř vozidel především při akceleraci. Hluk je však šířen i v okolí vozidla spolu s emisemi výfukových plynů obsahující nežádoucí CO₂ a další škodlivé látky. Vozidla nedosahují srovnatelných dynamických vlastností jako vozidla elektrické trakce. Maximální výkon, kterého vozidla dieselové trakce běžně dosahují, se pohybuje okolo 1 MW. Účinnost spalovacích motorů je přitom přibližně 30 %. Neexistuje zde ani možnost rekuperace brzděné energie a její opětovného využití. Shrnutí výhod a nevýhod ucelených jednotek dieselové trakce je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1 Výhody a nevýhody DMU

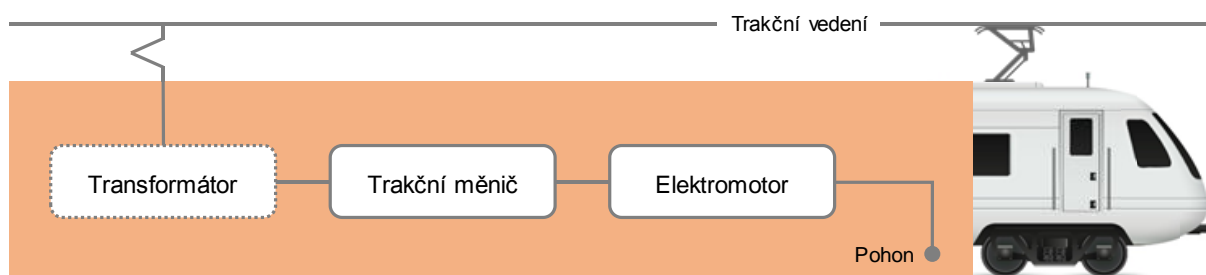
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Nízká pořizovací cena vozidel • Vysoký dojezd bez nutnosti výstavby napájecí infrastruktury 	<ul style="list-style-type: none"> • Nízký výkon a omezená jízdni dynamika • Nízká energetická účinnost • Vysoké emise škodlivin (především CO₂) • Snížený komfort pro cestující (hluk, vibrace)
<p>Vhodné využití: Neelektrizované tratě s nízkou poptávkou cestujících</p>	

Pro provozovatele železniční dopravy dieselové jednotky dosud představovaly jediné vhodné řešení na neelektrizované trati. Zvláště pak na tratích s nízkou poptávkou cestujících by nasazení jiné trakce nebylo ani ekonomicky udržitelné. Vzhledem k tomu, že především celková ekonomika je nejdůležitějším kritériem při volbě vozidel pro zajišťování dopravní obslužnosti, je v současné době dieselová trakce na mnoha relacích jedinou alternativou pro zachování železničního provozu. Většina nevýhod dieselové trakce nemá přímý dopad do rozpočtů objednatelů a ti jim proto nepřikládají velkou důležitost. Tyto externality totiž nejsou vyčísleny a nejsou žádným konkrétním subjektem hrazeny. Je však nepochybné, že vznikají a ovlivňují jak komfort cestujících, tak i životní prostředí jako celek.

1.1.2 Elektrické jednotky (EMU)

Elektrická železniční hnací vozidla se na konci 19. století vyvíjela po boku elektrických tramvají, se kterými sdílela základní principy, které se následně rozvíjely v rámci specifik železničního provozu. Provoz na první elektrizované železniční trati na území dnešní České republiky byl zahájen v roce 1903 mezi Tábořem a Bechyní. Až po druhé světové válce začala elektrizace hlavní dálkové trati z Prahy do Košic. Hromadná elektrizace tratí na území ČR pak začala až v 50. letech 20. století. V té době měla nahradit především dožívající parní trakci, oproti které nabízela nespočet výhod. Ucelené jednotky elektrické trakce jsou označovány jako EMU (electric multiple unit).

Vozidla elektrické trakce jsou vybavena přívodem elektrického proudu do elektromotoru skrze transformátor (v případě střídavé napájecí soustavy) a trakční měnič. Elektromotor následně pohání hnací dvojkolí. Přívod elektrického proudu nejčastěji probíhá skrze sběrač proudu z vrchního trakčního vedení. Schéma koncepce pohonu EMU je znázorněno ve schématu na obrázku 4.



Obrázek 4 Koncepce pohonu EMU [autor s využitím 1, 3, 4]

Jedná se o druh závislé trakce, kdy musí být vozidlo neustále v kontaktu s napájecí infrastrukturou, bez níž není schopné fungovat. Provoz vozidel elektrické trakce je tak limitován rozsahem elektrizovaných tratí [2].

Důležitým parametrem pro provoz vozidel v elektrické trakci je použitá trakční soustava. Historickým vývojem se území České republiky rozdělilo na dvě téměř stejně rozsáhlé části vyžívající jinou napájecí soustavu. Severní část republiky byla elektrizována stejnosměrným proudem o napětí 3 kV, jižní část pak střídavým proudem o napětí 25 kV a frekvenci 50 Hz. Zcela minoritně jsou na území pak zastoupeny soustavy DC 1,5 kV a AC 15 kV, 16,7 Hz. Více o rozšíření trakčních napájecích soustav je uvedeno v kapitole 3.2. Z výše uvedených důvodů je nutné použití vícesystémového vozidla v případě přejezdů mezi soustavami. Vozidla uzpůsobená pouze pro provoz pod jednou napájecí soustavou jsou tak značně limitována ve svém využití v rámci železniční sítě ČR.

Přívod elektrického proudu do vozidla může být realizován různými způsoby. Nejrozšířenějším způsobem a na železniční síti v ČR v současnosti jediným používaným řešením je nadzemní vedení. Sběrač proudu je umístěn na střeše vozidla a odebírá proud z trolejového vedení. Trolejové vedení je umístěno ve výšce přibližně 5,5 metrů nad kolejí a jeho styčnou částí s vozidlem je měděný trolejový drát specifického průřezu dle normy ČSN. Průřez drátu se liší podle proudového zatížení, a především podle použité napájecí soustavy. U stejnosměrné soustavy je trolejový drát značně silnější z důvodu zatížení vyšším proudem. Oproti tomu v případě střídavého proudu postačí tenčí a tím pádem lehčí a levnější trolejové vedení [7].

Dalšími možnostmi jsou vedení pozemní a podzemní. Při pozemním vedení je vedle kolejnic pro jízdu vlaku umístěna třetí kolejnice určená pro napájení vozidla. Toto řešení znamená nižší náklady na vybudování a údržbu, ale představuje nebezpečí úrazu při kontaktu. Pozemní vedení se dnes používá především v uzavřených systémech metra nebo příměstských drah (S-Bahn). Podzemní vedení proudu je pak uloženo v podzemním kanálku přístupného úzkou štěrbinou pomocí sběračové tyče. Tento kanálek se však snadno zanášá nečistotami či vodou a vedení je tak nespolehlivé [8].

Trakční elektromotor pohánějící dvojkolí může být stejnosměrný nebo střídavý (synchronní, asynchronní). Typ motoru však přímo nesouvisí s napájecí soustavou, jelikož proud může být ve vozidle transformován. Dříve byly více rozšířeny stejnosměrné motory, zatímco dnes se více používají střídavé asynchronní motory (např. řada 680).

Elektrická trakce se vyznačuje řadou výhod. Díky vysoké účinnosti elektromotorů (až 90 %) a možnosti rekuperace brzděné energie je možné efektivně využívat energii a tím dosáhnout značných energetických úspor. Dalším důležitým aspektem je ekologie, kdy při provozu v elektrické trakci nedochází ke spalování paliva, ale pouze přeměně elektrické energie na kinetickou. Ekologické zatížení je však přesunuto do přecházející fáze výroby elektrické energie. Pro cestující je znatelný rozdíl v komfortu, kdy je v interiéru nižší hladina hluku a vibrací oproti vozidlům dieselové trakce. Z hlediska provozu jsou pak pozitivní dynamické vlastnosti zvláště pak u vozidel provozovaných na soustavě AC 25 kV, která umožňuje dosahovat vysokého výkonu a je tak optimální i pro vysokorychlostní vlaky. EMU vynikají také nenáročností na obsluhu a údržbu.

Nevýhodou elektrické trakce je především nutnost vybudování potřebné infrastruktury, bez které není možný její provoz. Investice do infrastruktury jsou velmi nákladné a vyplatí se pouze u vysoce dopravně zatížených tratí. Z dlouhodobého hlediska jsou však benefity elektrické trakce nesporné a vyvažují vysoké investiční náklady i nefinančními přínosy. Shrnutí výhod a nevýhod ucelených jednotek elektrické trakce je uvedeno v tabulce 2.

Tabulka 2 Výhody a nevýhody EMU

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none">• Nízké provozní náklady• Vysoký výkon a dobrá jízdní dynamika• Vysoká energetická účinnost• Provoz bez emisí škodlivin• Vysoký komfort pro cestující (nízký hluk a vibrace)	<ul style="list-style-type: none">• Vyšší pořizovací cena vozidel• Nutnost vybudování napájecí infrastruktury v plné délce trasy• Ekologická zátěž přenesena do míst výroby elektrické energie
Vhodné využití: Elektrizované tratě	

Z hlediska dlouhodobé koncepce dopravy s ohledem na vysoký komfort pro cestující, vysokou cestovní rychlost a ekologickou šetrnost je právě elektrická trakce preferovanou variantou pohonu pro zajištění železniční dopravy. Není však reálně možné jí v krátké době a s přiměřenými náklady pokrýt celou železniční síť v České republice, a proto je nutné hledat alternativní druhy pohonu, které alespoň částečně využívají benefitů elektrického pohonu.

1.2 Alternativní pohony

Mezi alternativní pohony jsou v této práci zařazeny druhy pohonů, které se v současnosti pro pohon železničních vozidel běžně nevyužívají. Jde především o hybridní technologie, které se právě testují a podstupují zkušebnímu provozu. Konkrétně se jedná o pohon s využitím vodíku, kombinaci elektrické trakce s napájením z trakčního vedení a baterií nebo různé kombinace se spalovacím motorem. Tyto nové formy pohonu jsou vyvíjeny především s cílem snížení energetické náročnosti dopravy, snížení ekologické zátěže a zvýšení komfortu cestujících. Všechny dále popsané pohony jsou alternativami především pro provoz vozidel dieselové trakce.

Jako hybridní vozidla jsou obecně označována vozidla, která pro svůj pohon používají více zdrojů energie. Této koncepcí využívají jak vozidla železniční, tak vozidla silniční. Mezi silničními vozidly lze nalézt zástupce hybridních vozidel, jak mezi osobními automobily, tak i trolejbusy. V neposlední řadě je pak hybridních pohonů využíváno u tramvají.

Principem funkce hybridního pohonu je využívání různých zdrojů energie pro pohon vozidla, tak aby v daný okamžik byl zvolen co nejvhodnější druh pohonu. Například elektromobily využívají pro rozjezd a jízdu při nízké rychlosti elektromotor, protože je při časté akceleraci a brždění energeticky výhodnější, to navíc nastává nejčastěji i při jízdě ve městě a zde jsou výhodou minimální emise. Oproti tomu při vyšších rychlostech a potřebě většího výkonu (a tím i větší spotřebě energie) používají spalovací agregát a je tak možné dosáhnout většího dojezdu při jízdě mimo město či po dálnici.

Nejrozšířenějšími typy hybridních pohonů v současné době jsou:

- spalovací motor + elektromotor poháněný baterií,
- spalovací motor + elektromotor s externím přívodem elektrické energie (např. trolej),
- spalovací motor + setrvačnick,
- lidská síla + elektromotor (například elektrokola) [9].

Pro pohon těžších a výkonnějších vozidel (jak automobilů, tak prostředků pro hromadnou přepravu osob, či nákladů) jsou nejvýhodnějším řešením první dvě zmíněné kombinace, a to spalovací motor v kombinaci s elektromotorem a poháněný baterií nebo externím přívodem energie.

Pro využití na železnici mohou být výhodné především možnosti kombinace spalovacího motoru a elektromotoru, a to jak poháněného baterií, tak i s napájením z troleje. Jedná se totiž o kombinace na železnici již používaných druhů pohonu a je tak možné kombinovat jejich pozitivní vlastnosti. Spalovací motor je také možné nahradit vodíkovými palivovými články.

Hybridní pohony (především kombinace spalovacího motoru a elektromotoru) lze rozdělit podle toku výkonu na sériové, paralelní nebo smíšené uspořádání [10].

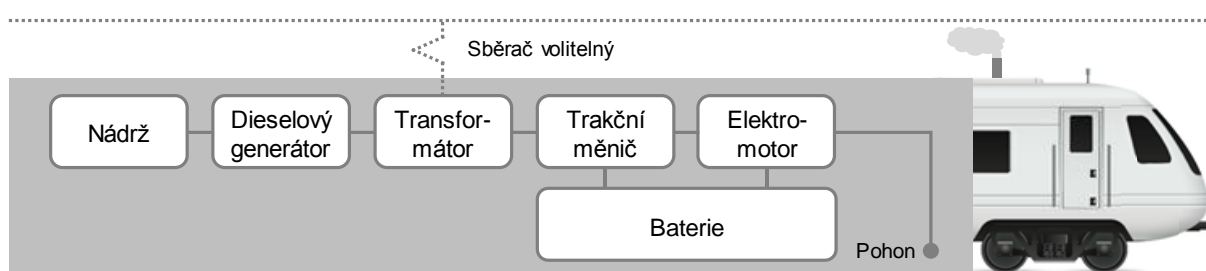
Při sériovém uspořádání hybridních pohonů je vozidlo poháněno primárně elektromotorem. Spalovací motor pak slouží ve spojení s generátorem jako zdroj elektrické energie, která následně pohání elektromotor. Výhodou je možnost provozu spalovacího motoru v optimálním rozsahu otáček a tím dosažení nejvyšší možné účinnosti a minimalizace emisí. Při provozu je k pohonu použit elektromotor, který je zásobován energií z baterie. V případě, že baterie nedokáže pokrýt momentální spotřebu energie, je nastartován spalovací motor, který baterii dobíjí. Nevýhodou této koncepce je vícenásobná přeměna energie.

Při paralelním uspořádání jsou oba motory spojeny s hnacím ústrojím a každý zvlášť nebo oba společně se starají o pohon vozidla. Výhodou je, že na rozdíl od sériového uspořádání odpadá vícenásobná přeměna energie, a s tím vznikající ztráty. Obvykle je v činnosti pouze spalovací motor, kdy při velkém zrychlení se připojí elektromotor a tím je krátkodobě zvýšen špičkový výkon. Omezením této koncepce jsou vysoké náklady a nízká životnost přídatných komponentů, které jsou nezbytné k chodu.

Smíšené uspořádání má za cíl odstranit nevýhody sériového a paralelního uspořádání a využít naopak jejich výhod. Varianty tohoto uspořádání mohou být různé. Může se například jednat o uspořádání s větvením výkonu, kdy spalovací motor je spojen přímo s hnacím ústrojím, ale zároveň může sloužit i k dobíjení baterie. Účinnost této koncepce je z uváděných uspořádání nejvyšší, ale za cenu nejvyšších výrobních nákladů.

1.2.1 Diesel-elektrické hybridní jednotky (DHEMU)

Specifickou možností hybridního pohonu je kombinace spalovacího motoru a baterie. Taková koncepce je v současné době velmi neobvyklá a může být navržena v různých modifikacích. Tento pohon je principem podobný diesel-elektrickému pohonu, který je doplněn o baterii pro ukládání elektrické energie. V automobilovém průmyslu se takové řešení nazývá „Plug-in hybrid“. Alternativní možností je vybavení vozidla sběračem proudu, čímž je umožněno dobíjení baterie z trakčního vedení [1, 11]. Takové jednotky se dají označit jako DHEMU (diesel-electric hybrid multiple unit). Pokud je vozidlo vybaveno i sběračem proudu, označuje se jako BEMU+D (battery electric multiple unit + diesel). Koncepce těchto vozidel je znázorněna ve schématu na obrázku 5.



Obrázek 5 Koncepce pohonu DHEMU [autor s využitím 1, 3, 4]

Nabíjení baterie probíhá obvykle pomocí nabíjecího kabelu. Tím je znemožněno dobíjení baterie při jízdě (s výjimkou dobíjení z dieselového generátoru). K dobíjení baterií pak musí docházet při odstavení vozidla, což může snižovat možnost jeho využití a prodlužovat dobu mimo výkon. Vozidla však mohou být vybavena rekuperací brzdné energie, čímž je dosaženo vyšší energetické účinnosti oproti DMU [11].

Pro jízdu existuje více variant této koncepce. Je možné podobně jako v diesel-elektrických jednotkách využívat dieselový generátor pro výrobu elektřiny pro trakční elektromotor, nebo v místech, kde není žádoucí zvýšený hluk a emise, využívat pouze energii uloženou v bateriích. Případně je také možné využívat pro trakci energii z baterií a dieselovým generátorem zajistit jejich dobíjení. Jelikož jsou tato vozidla velmi těžká, může být pro úsporu hmotnosti použit dieselový agregát o nižším výkonu, který je pak ale možno použít pouze pro dobíjení baterie. Tyto různé varianty ovlivňují také dynamické vlastnosti vozidla. Obecně je u všech variant z důvodu vysoké hmotnosti snížený výkon oproti ostatním koncepcím pohonu. Při doplnění vozidla o sběrač proudu je teoreticky možné takové vozidlo provozovat i v režimu jízdy na elektřinu jako u klasické EMU, má však výrazně vyšší hmotnost a tím ovlivněnu spotřebu energie i dynamické vlastnosti [11]. Shrnutí výhod a nevýhod ucelených jednotek využívajících kombinaci dieselové trakce a baterií je uvedeno v tabulce 3.

Tabulka 3 Výhody a nevýhody DHEMU

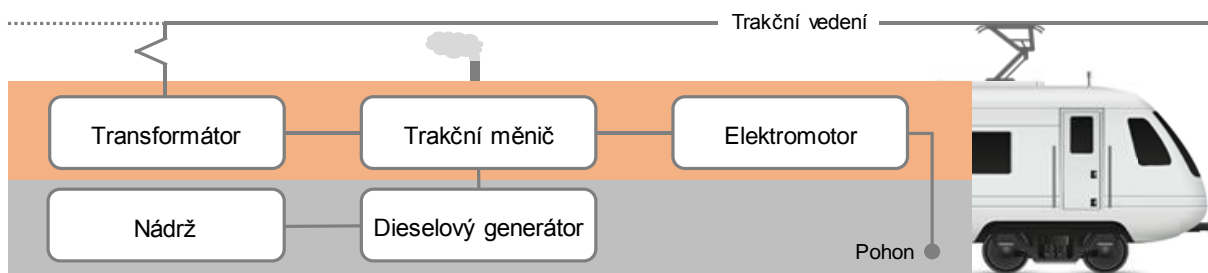
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Vysoký dojezd bez nutnosti výstavby napájecí infrastruktury • V bateriovém režimu provoz bez emisí škodlivin a s nízkou mírou hluku a vibrací 	<ul style="list-style-type: none"> • Velmi vysoká hmotnost vozidel (vyšší provozní náklady a nižší dynamika) • Nízký dojezd v bateriovém režimu • V dieselovém režimu přejímá většinu nevýhod DMU (emise, hluk, vibrace)
Vhodné využití: Neelektrizované tratě s kratšími úseky s potřebou nízkoemisního provozu	

Tato koncepce pohonu může být ve svých různých modifikacích zajímavá především při přestavbě současných diesel-elektrických vozidel. Ty mohou být takto dále využívány se sníženou produkcí emisí či hluku. Navíc získají oproti samotné dieselové trakci i schopnost rekuperace a tím částečné energetické úspory. Ve variantě BEMU+D je oproti klasické BEMU zvýšen dojezd na jedno nabití, díky vyšší specifické hustotě energie obsažené v naftě. Nevýhodou je zvýšená hmotnost z důvodu přítomnosti dieselového ústrojí, baterií a případně i elektrické výzbroje pro odběr proudu z trakčního vedení [11].

V roce 2012 bylo vozidlo Siemens Desiro přestavěno na DHEMU (tedy jednotku bez sběrače proudu) pod názvem EcoTrain. Přestavba proběhla výměnou jednoho dieselového agregátu za nový „power pack“ obsahující sadu dieselového generátoru a trakční elektromotor a druhého dieselového agregátu za baterie s dalším trakčním elektromotorem. Dieselový generátor poskytuje přibližně stejný výkon jako dříve instalovaný motor. Osazeny byly Li-ion baterie s kapacitou přibližně 150 kWh. Jednotka měla být provozována buď ve standardním dieselovém režimu, režimu provozu na baterie nebo v kombinovaném režimu s použitím dieselového generátoru i baterií současně. Během tříletého testovacího provozu bylo dosaženo úspory paliva ve výši 15 % a při ideálních podmínkách (více možností pro rekuperaci) by pak údajně mělo být možno dosáhnout úspory 20–25 %. Také hluk byl snížen o 5 dB při jízdě a o 21 dB při stání vozidla. V další fázi pak měl být na vozidlo instalován sběrač proudu pro možnost dobíjení z trakčního vedení [11, 12].

1.2.2 Dvouzdrojové jednotky (BMU)

Jako zástupce hybridních pohonů v železničním odvětví se v současnosti již využívá kombinace spalovacího motoru a trakčního elektromotoru s možností externího napájení z trakčního vedení. Vozidla založená na této koncepci tak mohou na nelektrizovaném úseku trati využívat k výrobě elektrické energie spalovací motor a při jízdě po elektrizované trati pak využívat elektrické energie z trakčního vedení. Takové jednotky jsou označovány jako BMU (bi-mode multiple unit) a jejich koncepce je znázorněna ve schématu na obrázku 6.



Obrázek 6 Koncepce pohonu BMU [autor s využitím 1, 3, 4]

Tato koncepce umožňuje získávání elektrické energie z nafty. Především díky vysoké hustotě energie v ní obsažené a možnosti jejího rychlého doplnění lze dosáhnout dojezdu až několika stovek kilometrů na úsecích bez trakčního vedení. Kapacita je limitována pouze objemem palivové nádrže vozidla [13].

Omezení této koncepce pramení z využívání dvou zcela rozdílných technologií, tedy spalovacího motoru a elektrické výzbroje. Jednou z nevýhod je nutnost náročné údržby. Údržba dieselové části pohonu probíhá technologicky odděleně od údržby elektrické části. To s sebou nese řadu komplikací a neefektivity, kdy pro každou z technologií je nutný odlišný postup, personál i odlišná zařízení pro údržbu. Tím jsou navýšeny náklady a čas strávený v údržbě [13].

Vozidla vybavená oběma technologiemi mají značně vyšší hmotnost a nižší využitelné místo pro cestující. Typicky jsou tato vozidla vybavena samostatným článkem, ve kterém je uloženo dieselové ústrojí (tzv. „power pack“), ten je zachycen na obrázku 7. Kvůli vyšší hmotnosti vzrůstají jednotkové náklady na provoz oproti konvenčním jednotkám a při provozu v dieselovém režimu přejímají také nevýhody dieselové trakce [13].



Obrázek 7 Článek obsahující „power pack“ BMU Stadler Flirt 3 [14]

Mezi benefity této koncepce patří odstranění přestupů při přejezdu mezi elektrizovanou a neelektrizovanou tratí a také efektivní využívání vybudované infrastruktury. O využití BMU se dá uvažovat i v případě postupující elektrizace na trati, a to jako dočasné řešení při stavbě a nahrazení čistě elektrickou trakcí po dokončení elektrizace v plné délce. Výhodou je dále vysoká flexibilita nasazení BMU například při napěťových výlukách či v případě poruchy trakčního vedení, kdy je možno dokončit jízdu v alespoň omezeném rozsahu, na rozdíl od čistě elektrické jednotky. Použití může být vhodné tam, kde ostatní druhy alternativních pohonů není možné použít, například v případě dlouhých neelektrizovaných úseků na jinak elektrizované trase.

Dalším specifickým je obecná vlastnost dieselové a elektrické trakce týkající se výkonu. Pokud je udáván určitý výkon u dieselové jednotky je nutné odečíst přibližně 10 % výkonu na pomocné služby jako je vytápění, klimatizace, osvětlení a další. Výkon využitelný pro trakci tak dosahuje přibližně 90 % uváděného výkonu motorů. Zatímco u elektrické trakce je uváděn stálý výkon, který může být v krátkých časových intervalech překročen až o 25 % (například při rozjezdu). Dieselový motor by tedy musel být dimenzován na podstatně vyšší výkon, pokud by se měl vyrovnat trakčním vlastnostem elektrické trakce. Shrnutí výhod a nevýhod ucelených jednotek využívajících kombinaci elektrické a dieselové trakce je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4 Výhody a nevýhody BMU

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> Možnost efektivního využívání dostupné infrastruktury Vysoký dojezd a flexibilita (možnost využití při mimořádnostech či napěťových výlukách) Odstranění přestupu při přejezdu mezi elektrizovanými a neelektrizovanými úseky 	<ul style="list-style-type: none"> Vysoká pořizovací cena vozidel Vysoká hmotnost vozidel (vyšší provozní náklady a nižší dynamika) Nutnost údržby dvou různých technologií pohonu Při provozu v dieselovém režimu také emise škodlivin a snížení komfortu pro cestující jako v případě DMU
<p>Vhodné využití: Delší neelektrizované úseky na jinak elektrizovaných trasách</p>	

BMU jsou v současnosti využívány především ve Francii, Velké Británii a Itálii. Od roku 2005 francouzský státní dopravce SNCF provozuje jednotky B 81500 od výrobce Bombardier, které jsou vybaveny dieselovým agregátem a sběračem pro provoz na soustavě DC 1,5 kV. Od roku 2007 jsou pak ve Francii provozovány i jednotky B 82500, které jsou navíc doplněny o schopnost provozu na soustavě AC 25 kV. Oba tyto typy jsou využívány v regionální dopravě a dosahují maximální rychlosti 160 km/h. Od roku 2014 jsou v provozu elektrické jednotky Alstom Régionalis, z nichž některé jsou doplněny o dieselový agregát [15, 16].

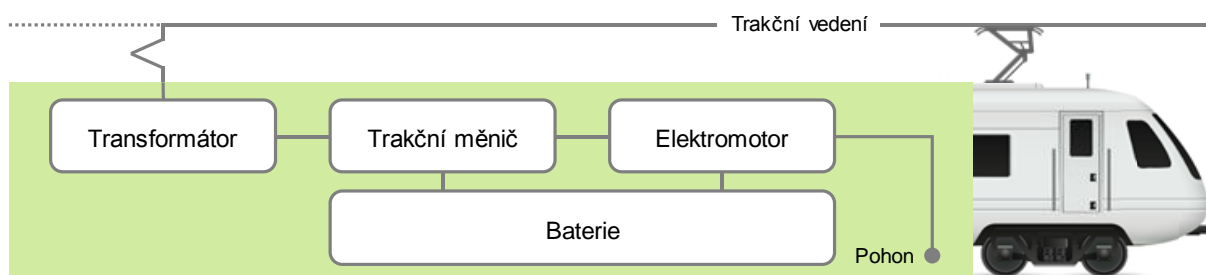
Ve Velké Británii jsou všechny BMU provozovány v elektrickém režimu pod soustavou AC 25 kV. Zajímavé jsou vysokorychlostní jednotky (BR Class 800 a 802) od výrobce Hitachi provozované na linkách inter-city od roku 2017, respektive 2018. V elektrickém režimu mohou dosahovat rychlosti až 225 km/h. Od léta 2019 jsou pak společností Greater Anglia provozovány BMU Stadler Flirt 3, v celkovém počtu 38 jednotek. Ty mají maximální rychlost v elektrickém režimu obvyklých 160 km/h [17].

V roce 2015 bylo objednáno 5 jednotek BMU Stadler Flirt 3 pro provoz na trase Aosta – Turín v severní Itálii. Do provozu byly první jednotky nasazeny v říjnu 2019. Kromě dieselové trakce je vozidlo schopno jízdy pod soustavou DC 3 kV. V elektrickém režimu dosahuje maximální rychlosti 160 km/h, v dieselové režimu pak 140 km/h [18].

Mimo evropský kontinent má být od roku 2023 v provozu 29 souprav BMU výrobce CAF v australském Novém Jižním Walesu [19].

1.2.3 Bateriové elektrické jednotky (BEMU)

Bateriové elektrické jednotky (BEMU) jsou použitými technologiemi velmi podobné elektrickým jednotkám (EMU), které jsou navíc doplněny o baterie pro uchování elektrické energie. Při kombinaci napájení z trolejového vedení a baterií je vozidlo poháněno elektromotorem, který je napájen buď skrze transformátor a trakční měnič přímo z trakčního vedení nebo využívá energii uloženou do trakčních baterií. Díky tomu je umožněno odebírání energie z trakčního vedení za jízdy i při stání vozidla a je možné odebírat energii současně pro trakci i pro dobíjení baterií. Při jízdě po trati bez trakčního vedení je pak možné využívat pro trakci energii uloženou v bateriích. Baterie navíc kromě ukládání energie odebrané z trakčního vedení umožňují i akumulaci energie získané při rekuperačním brzdění [20]. Takové jednotky jsou označovány jako BEMU (battery electric multiple unit), případně IPEMU (independently powered electric multiple unit). Schéma této koncepce je znázorněno na obrázku 8.



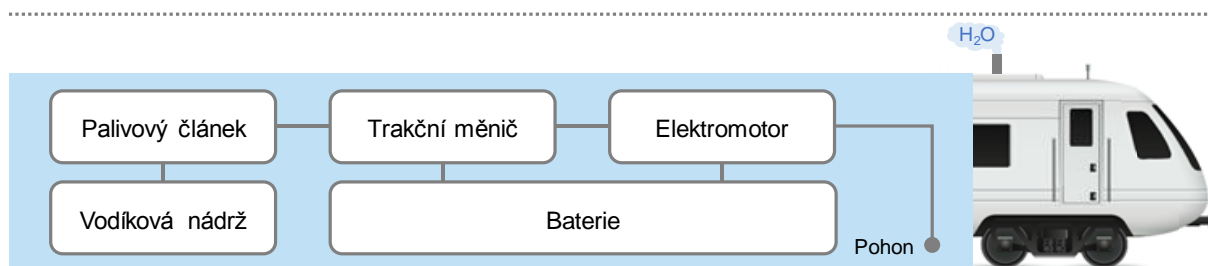
Obrázek 8 Koncepce pohonu BEMU [autor s využitím 1, 3, 4]

Popisem možného využití BEMU a specifiky jejich provozu se zabývají další kapitoly této práce. Popis historického i aktuálního vývoje bateriových elektrických jednotek včetně přehledu současných vozidel je uveden v kapitole 2. Posouzením specifik, které ovlivňují využití BEMU v jednotlivých oblastech souvisejících s jejich provozem, se zabývá kapitola 3.

V kapitole 4 je uveden model jejich provozu na konkrétních příkladech tratí v ČR. V kapitole 5 jsou pak uvedeny konkrétní lokality možného využití BEMU v rámci železniční sítě České republiky a v druhé části této kapitoly jsou formulována doporučení k jejich vhodnému využití v podmínkách ČR.

1.2.4 Vodíkové jednotky (HMU)

Principem jsou tato vozidla podobná nejvíc diesel-elektrickým jednotkám s baterií, kdy dieselový generátor je nahrazen palivovými články, ve kterých je v tlakových nádržích uložen plyný vodík. Chemickou reakcí vodíku v kombinaci s atmosférickým kyslíkem vzniká elektrická energie. Vedlejším produktem této reakce je vodní pára, případně voda. Tato elektrická energie následně pohání trakční elektromotor. Jelikož palivové články poskytují stálý výkon, je pro vyrovnávání energetické bilance potřebné použití baterií. Přebytečná energie vzniklá reakcí v palivovém článku je uložena do Li-ion baterie a využívá se při potřebě pokrytí výkonových špiček pro zrychlení během jízdy. Do baterií je také ukládána energie získaná při rekuperaci [21]. Tato vozidla jsou označována jako HMU (hydrogen multiple unit) nebo FCMU (fuel cell multiple unit), případně FCEMU (fuel cell electric multiple unit). Schéma této koncepce je znázorněno na obrázku 9.



Obrázek 9 Koncepce pohonu HMU [autor s využitím 1, 3, 4]

Palivové články jsou „stohovány“ z několika dílčích článků, které jsou zapojeny do série. Toto stohování je nezbytné pro dosažení dostatečně vysokého napětí na výstupu. V palivových článcích dochází ke stárnutí protonové membrány uvnitř článku. Při údržbě je nutné tyto membrány revidovat a nahrazovat [11].

Účinnost otevřeného cyklu elektrolýzy při výrobě elektřiny z vodíku je přibližně 40 %. Díky vyšší specifické hustotě energie oproti bateriím (cca 900 kWh/t) je dojezd HMU ve srovnání s BEMU násobně vyšší a to přibližně 600 – 1 000 km. Doplnění vodíku trvá přibližně 15 minut. Vodíková vozidla se vyznačují bezemisním provozem a jsou kladně přijímána za svůj přínos k ekologii, kdy při provozu vypouštějí pouze vodní páru a kondenzovanou vodu. Hrozbou při provozu je především nebezpečí výbuchu při nekontrolovaném kontaktu vodíku se vzduchem například v důsledku nehody [20]. Palivové články a vodíkové nádrže umístěné na střeše HMU Alstom iLint jsou zobrazeny na obrázku 10.



Obrázek 10 Palivové články a vodíkové nádrže na střeše HMU Alstom iLint [22]

Zásadním problémem při provozování HMU je především zásobování vozidel vodíkem. K tomu je nutné vybudování dosud neexistující infrastruktury. Přeprava vodíku je velmi náročná. Vodík je nutné skladovat a přepravovat v tlakových nádobách, které jsou ale násobně těžší, než je hmotnost přepravovaného vodíku. To v kombinaci s přepravou prázdných nádob v opačném směru znamená při přepravě na velké vzdálenosti velmi vysoké přepravní náklady. Provozování vozidel na vodík je tak výhodné, pokud jsou vodíková vozidla provozována co nejbližší místu jeho výroby. Dále je také potřebné velké množství energie k samotné výrobě vodíku. Jako vhodné řešení se zde jeví využití energie z obnovitelných zdrojů a výroby vodíku v době přebytků energie v síti (přebytky solárních či větrných elektráren při vysoké výrobě a nízké spotřebě) [20]. Shrnutí výhod a nevýhod ucelených jednotek využívajících vodík je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka 5 Výhody a nevýhody HMU

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Vysoký dojezd bez nutnosti výstavby napájecí infrastruktury • Provoz bez emisí škodlivin • Nízká míra hluku a vibrací 	<ul style="list-style-type: none"> • Vysoká pořizovací cena vozidel • Nutnost výroby a distribuce vodíku • Nízká účinnost procesu získávání vodíku a jeho přeměny v trakční energii • Nebezpečí v případě nehody
Vhodné využití:	Neelektrizované tratě v oblastech s dostupnou výrobou vodíku

Od roku 2018 je v pravidelném provozu jednotka Alstom iLint v německé spolkové zemi Dolní Sasko. Celkem má být dodáno 14 těchto vozidel, která budou ve vlastnictví místního objednatele dopravy LNVG. Ten má v plánu nahradit provoz na neelektrizovaných tratích v regionu právě vodíkovým pohonem. Kapacita vozidel je 176 míst k sezení a dynamické vlastnosti jsou srovnatelné s dieselovými jednotkami, maximální rychlost je 140 km/h. Dojezd vozidel je v rozmezí 800 – 1 000 km, nahrazení membrány v palivovém článku je nutné po přibližně 4–5 letech. V květnu 2019 objednatel RMV, který organizuje dopravu v metropolitní oblasti Frankfurtu nad Mohanem, objednal 27 jednotek iLint, které by měly být dodány do prosince 2022 a jedná se tak o největší objednávku vodíkových železničních vozidel v dosavadní historii [11, 23].

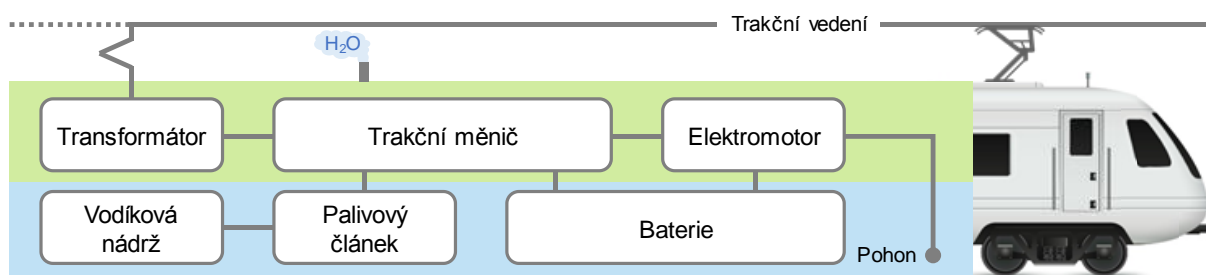
Výroba dalších HMU je aktuálně v přípravě. Společnost Siemens již zahájila vývoj vozidla na vodíkový pohon na bázi typu Mireo a je označováno jako varianta „Plus H“. Společnost Stadler vyvíjí úzkorozchodnou vodíkovou jednotku pro Zillertalbahn v Rakousku. Má se jednat o čtyřdílnou úzkorozchodnou jednotku a dodání je plánováno na rok 2022. O provozu vodíkových jednotek také jedná například ve Velké Británii či Nizozemsku [24].

Poptávka po vodíkem poháněných jednotkách existuje i v USA. V roce 2019 byla objednatelem železniční dopravy San Bernardino County v Californii, podepsána smlouva na dodávku jednotky Stadler Flirt H2 do roku 2024, s možností dodání dalších 4 kusů. Jedná se o dvoučlánkovou jednotku o kapacitě 108 sedadel a maximální rychlosti 127 km/h [25].

O provozu vozidel na vodíkový pohon jako první v ČR otevřeně uvažuje Moravskoslezský kraj. Jako předpoklad uvádí výrobu vodíku na území kraje a její následné využití nejen pro železnici, ale také pro autobusy. Vodík by zde mohl pokrýt provoz na neelektrizovaných tratích namísto nákupu nových dieselových vozidel [26].

1.2.5 Bateriové elektrické jednotky s palivovými články (BEMU+FC)

Jedná se o teoretickou modifikaci BEMU, do které jsou k elektrické výzbroji s bateriemi navíc přidány vodíkové palivové články. Oproti klasické BEMU je tím zvýšen možný dojezd vozidla. Tato koncepce bývá označována jako BEMU+FC (battery electric multiple unit + fuel cell) a její schéma je znázorněno na obrázku 11.



Obrázek 11 Koncepce pohonu BEMU+FC [autor s využitím 1, 3, 4]

Použití této koncepce také přejímá nevýhody vozidel provozovaných na vodík zmíněné v kapitole 1.2.4. Její využití je vhodné především v oblasti, kde je již vybudována infrastruktura pro zásobování vodíkem. Největší potenciál je pak na tratích, které jsou v rámci oblasti s provozem vodíkových vozidel z části elektrizovány. Celá oblast pak může být pokryta vozidly čistě na vodík (HMU) v kombinaci s BEMU+FC. Výhodou této koncepce je možnost přejezdů k místu čerpání vodíku na elektřinu a tím odpadá nutnost jeho přepravy blíže k pravidelné trase vodíkových vozidel. Příklad reálného ani uvažovaného využití této koncepce není znám.

Shrnutí výhod a nevýhod ucelených jednotek využívajících kombinaci elektřiny a vodíku je uvedeno v tabulce 6.

Tabulka 6 Výhody a nevýhody BEMU+FC

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Vysoký dojezd a flexibilita • Provoz bez emisí škodlivin • Nízká míra hluku a vibrací 	<ul style="list-style-type: none"> • Vysoká pořizovací cena vozidel (vyšší než u HMU) • Nutnost výroby a distribuce vodíku
Vhodné využití:	Neelektrizované úseky na jinak elektrizovaných trasách v oblastech s dostupnou výrobou vodíku

2 Bateriové elektrické jednotky (BEMU)

Možnost pohánění vozidel pomocí baterií není zcela novou a převratnou novinkou. Baterie se pro uskladnění energie a její následné využití pro trakci využívaly již více než před sto lety. Po dlouhých desetiletích bez zásadních inovací, však v posledních letech díky příchodu nových technologií začal vývoj opět zrychlovat své tempo. Díky vývoji nových typů bateriových článků bylo dosaženo vlastností potřebných pro efektivní použití v moderních dopravních prostředcích. Baterie jsou dnes již běžně využívány pro pohon elektrobuses či parciálních trolejbusů. V neposlední řadě probíhá také obrovský rozmach elektromobility v automobilovém průmyslu, kdy strmě roste podíl hybridních i čistě elektrických vozidel. S ohledem na cíl této práce má nejzásadnější vliv vývoj využití baterií v oblasti kolejových vozidel, který prozatím probíhá ve značně pomalejším tempu.

2.1 Ostatní bateriová elektrická kolejová vozidla

Mezi kolejovými vozidly se kromě ucelených jednotek rozvíjí baterie jako zdroj energie také u tramvají či lokomotiv. K vývoji dochází především ve vztahu k osobní dopravě, u lokomotiv se pak uvažuje i s využitím v nákladní dopravě.

2.1.1 Tramvaje

Už na přelomu 19. a 20. století byly v Austrálii provedeny experimenty s provozováním bateriových tramvají. Již po třech měsících provozu však byly tehdy nahrazeny parní trakcí. Podobné experimenty probíhaly i v dalších provozech, ale většího rozšíření se bateriové tramvaje v historii nedočkaly [27].

Po relativně dlouhém období bez zásadních inovací, začal novodobý rozvoj až na začátku 21. století také díky možnosti využívat pro napájení kombinaci baterií a superkondenzátorů. Ty jsou na trase dobíjeny (obvykle v zastávkách) a umožňují použití menších baterií. Snižuje se tím i potřeba úseků s elektrickým vedením. V roce 2008 byly v Portugalsku uvedeny do provozu tramvaje Siemens Combino vybavené technologií Siemens Sitras HES (kombinace baterií a superkondenzátoru), díky které jsou schopny ujet 2,5 km bez vrchního trolejového vedení. Od roku 2011 jsou v provozu tramvaje výrobce CAF se superkondenzátory ve španělské Seville, kde jsou zastávky vybaveny trolejovým vedením pro rychlé dobíjení superkondenzátorů. Podobnou technologii také využívají od roku 2019 nově implementované tramvaje v katarském Dauhá. Jsou zde nasazovány tramvaje Siemens, které jsou dobíjeny z vrchní napájecí kolejnice ve stanicích a jsou také vybaveny rekuperací. Od roku 2016 jsou v čínském Huai'an provozovány tramvaje výrobce CCRC Zhuzhou s využitím technologie RailBaar [28, 29].

Výrobce kolejových vozidel Alstom již více než 15 let vyvíjí technologie pro provozování tramvají bez vrchního trolejového vedení. Ve francouzském Nice byla použita technologie založená na superkondenzátorech, která umožňuje jejich nabíjení v zastávkách s trváním přibližně 20 sekund. Jejich předpokládaná životnost je 15 let. Při zastavení ve stanici se tramvaj dobíjí pomocí nabíjecího ústrojí uloženého pod podlahou ze zemního napájecího zařízení. To je zachyceno na obrázku 12 a je označováno jako SRS. Při přejezdu na úsek vybavený trakčním vedením je sběrač proudu automaticky zdvihnut. Veškeré procesy spojené s napájením probíhají zcela automaticky bez zásahu řidiče [30].



Obrázek 12 Zařízení SRS pro statické dobíjení tramvají v Nice [31]

Také český výrobce Škoda Transportation od roku 2015 vyrábí tramvaje vybavené bateriemi. Konkrétně se jedná o model ForCity Classic dodávaný do tureckých měst Konya a Eskişehir (úzkorozchodná varianta). Díky vybavení bateriemi mohou být tato vozidla provozována i na úsecích bez trolejového vedení, a to v délce až 3 km. Baterie jsou umístěny v kontejnerech na střeše tramvaje a ve zkušebním provozu stačily na ujetí až 10 km. Dobíjení bateríí je možné jak za jízdy, tak při stání vozidla a trvá několik minut [32].

2.1.2 Lokomotivy

Raný vývoj bateriových lokomotiv probíhal společně s rozvojem bateriových tramvají. V roce 1916 vyrobila firma Ringhoffer posunovací lokomotivu o výkonu 40 kW a váze 16 t, která byla osazena olověnými bateriemi, které byly posléze nahrazeny za nikl-kadmiové s kapacitou

přibližně 45 kWh. Na jedno nabití byla schopna posunu po dobu 8 hodin. Tato lokomotiva byla provozována na vlečce cihelny až do roku 1991 [33].

Pro posun na pražském Wilsonově nádraží (dnešní Hlavní nádraží) byly využívány bateriové lokomotivy, aby po elektrizaci stanice v roce 1927 nebyli cestující obtěžováni kouřem při posunu. Provozováno bylo několik bateriových lokomotiv, přičemž se nejvíce osvědčily lokomotivy E 416.0 vyrobené ve Škodě Plzeň v roce 1943–1949 a provozovány byly do roku 1966. Poté však kvůli problematické údržbě byly nahrazeny dieselovými lokomotivami [33].

Po několika experimentech s hybridními diesel-bateriovými lokomotivami začal vývoj čistě bateriových lokomotiv v ČR v 90. letech 20. století. V roce 1993 postavila ČKD ve spolupráci s ÖBB bateriovou posunovací lokomotivu A 219.0 s dojezdem až 200 km. Po testech v okolí Vídně se i přes dobré výsledky do sériové výroby nedostala. Dalším experimentálním způsobem, který byl testován, bylo spojení elektrické lokomotivy s přivěšeným bateriovým vozem. Žádného většího rozšíření se však bateriové lokomotivy v ČR nedočkaly. Provozována je dodnes pouze čistě bateriová řada 199 a hybridní diesel-bateriová řada 799. Obě tyto řady jsou určeny pro posun v areálech lokomotivních dep, dosahují velmi nízkého výkonu a maximální rychlosti 10 km/h [33].

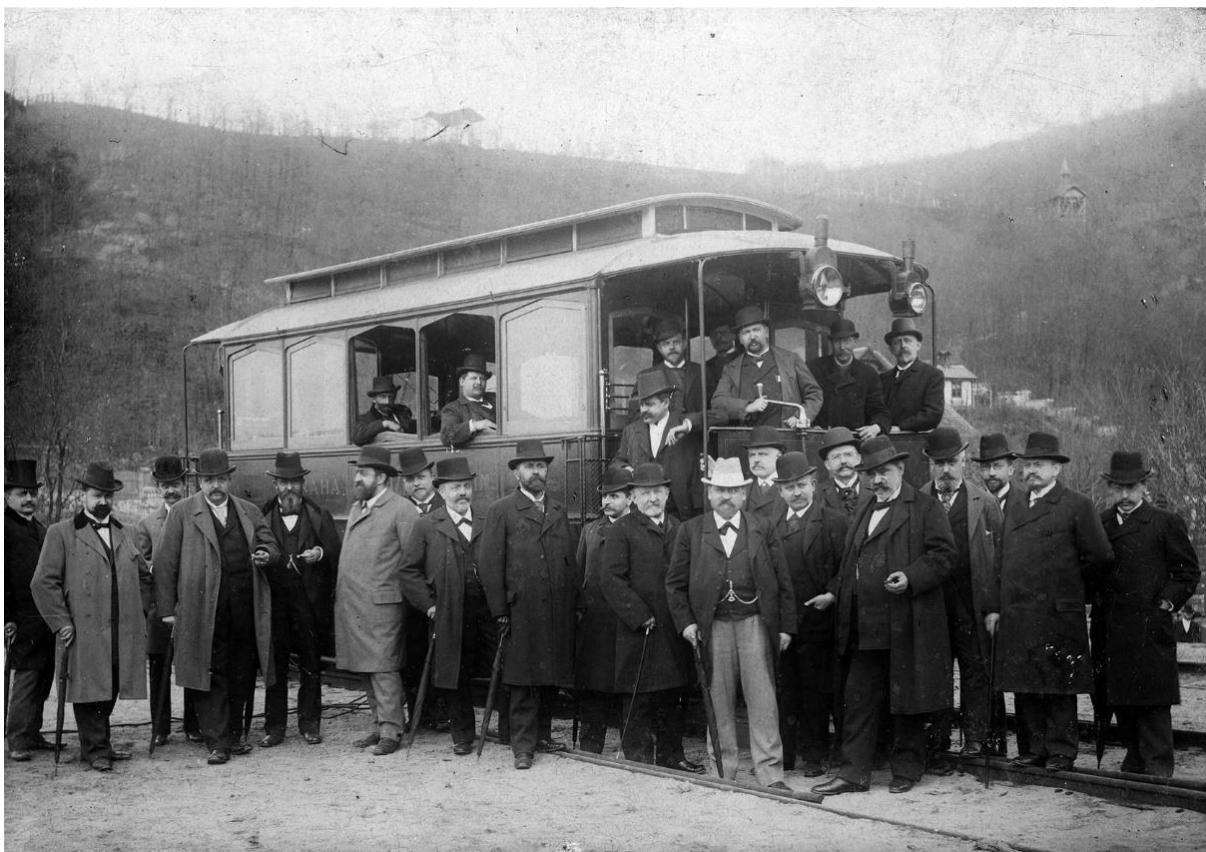
V roce 2020 začala společnost Toshiba vyrábět sérii 50 diesel-bateriových lokomotiv HDB 800 pro DB Cargo. Díky kombinaci pohonu na diesel a na baterie odhadují úsporu paliva ve výši 30 %. Tyto lokomotivy jsou osazeny bateriemi technologie LTO, a dodány mají být v roce 2021. Toshiba navíc představila i „trojživelné“ lokomotivy, tedy lokomotivy schopné jízdy na elektřinu, diesel i baterie. Na počátku roku 2020 pak ohlásilo vývoj „trojživelné“ lokomotivy i CZ LOKO, které ještě v roce 2019 představilo model HybridShunter 400, který má být provozován především na baterie, a diesel využívat pouze jako zálohu na velmi krátký dojezd. Lokomotiva je určena pro posun a pro provoz na průmyslových vlečkách. [34, 35, 36]

2.2 Historie

Elektrický pohon je u železničních vozidel využíván již více než sto let a patří mezi tradiční formy pohonu. Standardně je elektrická energie pro trakci přiváděna pomocí trakčního vedení, případně ze třetí kolejnice. Již na konci 19. století však byly uskutečněny i první experimenty s využitím baterií pro uchování elektrické energie pro trakci. Experimenty s bateriovými železničními vozy byly prováděny přibližně od roku 1890 v tehdy nevyspělejší zemích Evropy, například ve Francii, Belgii, Německu a Itálii. Kromě Evropy byly experimenty s bateriovým pohonem železničních vozidel prováděny i v USA či na Novém Zélandě.

První experimenty s bateriovým pohonem byly prováděny především úpravou elektrických tramvajových vozů. Na území Čech provedl František Křížík zkušební jízdy s tramvají upravenou pro jízdu na železniční trati osazenou olověnými akumulátory s celkovou

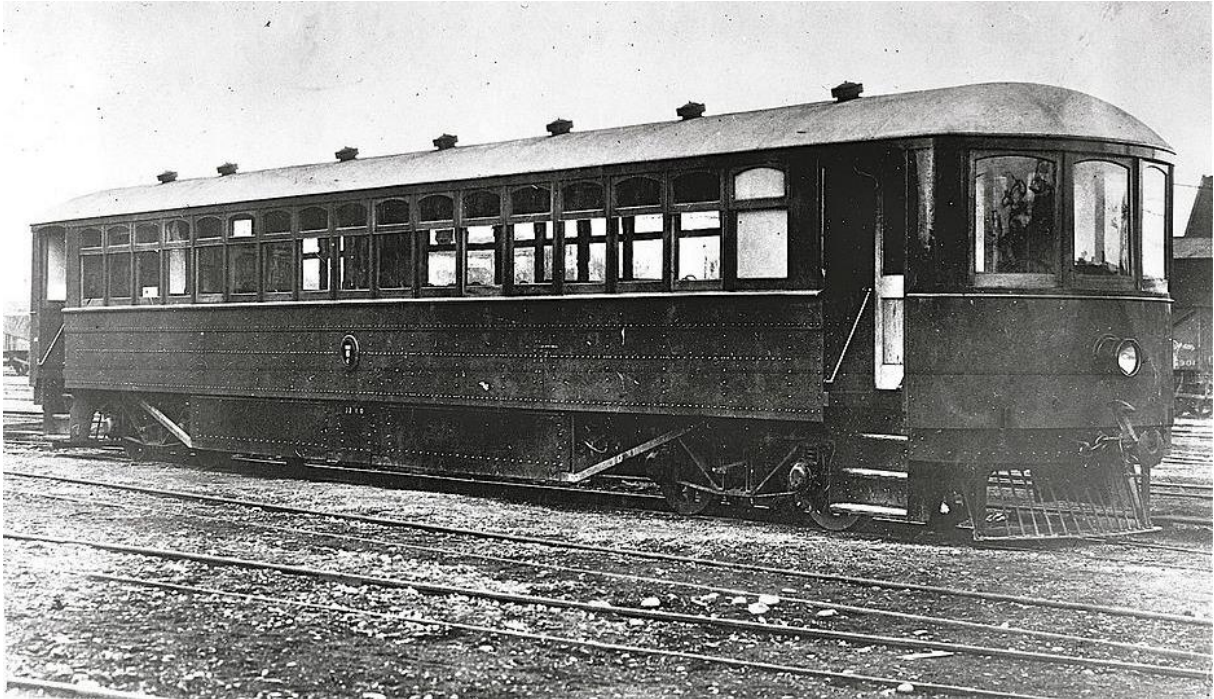
kapacitou 20Ah, která je zachycena na obrázku 13. Bylo to v roce 1899 na železniční trati Nusle – Modřany – Zbraslav. Podle dobových informací měrná spotřeba činila 34 Wh/tkm při průměrné rychlosti 30 km/h. Jedno nabití trvalo 20 minut a stačilo na ujetí právě trasy Nusle – Zbraslav. Zkušební provoz sice dopadl úspěšně, ale kvůli nízkému poměru kapacity akumulátorů vůči jejich hmotnosti a nutnosti časté údržby nebylo ve vývoji pokračováno a do pravidelného provozu se toto vozidlo nikdy nedostalo [33].



Obrázek 13 Akumulátorová tramvaj Františka Křížika (1899) [37]

V USA byly od roku 1911 využívány bateriové železniční vozy typu Edison-Beach, které byly vybaveny nikl-železnými (NiFe) bateriemi. Tento typ baterií na svou dobu vynikal svojí energetickou kapacitou, ale byl velmi drahý a při nízkých teplotách měl nízký výkon [38].

V letech 1926 až 1934 byl na Novém Zélandě provozován bateriově poháněný vůz NZR RM Class (Edison Battery-Electric). Tento železniční vůz připomínající tramvaj, zachycený na obrázku 14, byl provozován v okolí města Christchurch. Mohl vézt přibližně 70 cestujících a dosahoval rychlosti 60 km/h. Jeho uváděný dojezd byl okolo 160 km na jedno nabití baterie (NiFe), které trvalo přibližně 4 hodiny. Na svoji dobu byl při jízdě velmi tichý, hladce akceleroval a díky tomu se těšil veliké oblíbenosti u cestujících. V roce 1934 byl však při požáru zničen a kvůli hospodářské krizi již nebyl nikdy obnoven [39].



Obrázek 14 Novozélandský prototyp bateriového vozu (1926) [39]

Ve 30. letech 20. století byla v Irsku zkonstruována dvouvozová bateriová jednotka Drumm Battery Train. Provozována byla na trase Dublin – Bray. Byla vybavena nikl-zinkovou baterií (NiZn), která byla nabíjena z vrchního vedení v obrátových stanicích. Nabití energie na ujetí jedné míle trvalo přibližně 1 minutu, na trasu Dublin – Bray (přibližně 24 km) tedy nabití trvalo asi 15 minut. Nevýhodou této baterie však byla nízká životnost z důvodu nízkého počtu možných nabíjecích cyklů. Provozní dojezd jednotky byl 64 km a dosahovala maximální rychlosti až 100 km/h. Celkem byly vyrobeny 4 jednotky, každá s kapacitou přibližně 140 cestujících. Jejich provoz se ukázal být výhodný především při nedostatku uhlí během ekonomické krize ve 30. letech, ale v roce 1949 byl ukončen z důvodu končící životnosti baterií a levnějšími alternativami [40].

Mezi lety 1958 až 1966 byla také ve Skotsku mezi městy Aberdeen a Ballater provozována dvouvozová bateriová jednotka British Rail BEMU. Ta byla napájena z olověné baterie a nabíjení probíhalo u nástupiště v koncových stanicích. Jednalo se o přestavbu původně dieselové jednotky, u které ale bylo nutné z důvodu vysoké hmotnosti baterie vyztužit podvozek. Měla kapacitu 117 míst a maximální rychlost 97 km/h. Na počátku 60. let byla baterie vyměněna za novější typ, ale z důvodu častých požárů v bateriovém prostoru byla v roce 1966 vyřazena z provozu. Tato jednotka se zachovala dodnes [41].

V Anglii byl v roce 1959 uveden do provozu bateriový elektrický vůz BR class 419, který byl určen pro vlaky spojující Londýn s přístavy Dover a Folkestone. Vozidlo bylo napájeno pomocí třetí kolejnice, ale bylo vybaveno i bateriemi, které umožňovaly jízdu nízkou rychlostí po dobu 20 až 30 minut. Současně mohly být baterie dobíjeny při napájení vozidla ze třetí kolejnice.

V provozu na původní trase vydržely do roku 1992, poté byly nasazovány na různé výkony až do roku 2004 [42].

Na území Německa se první bateriově poháněné železniční vozidlo objevilo v roce 1901. Jednalo se o akumulátorový vůz Bavorských státních drah s olověným akumulátorem, vzniklý přestavbou osobního vozu z roku 1887. Jezdil na trase Augsburg – Haunstetten do roku 1907. Následovalo několik experimentálních vozidel i v dalších německých státech [43].

Od roku 1907 provozovaly Pruské státní dráhy velmi úspěšná vozidla Wittfeld (ETA 177, 178 a 180). Jednalo se o dvoudílné jednotky, které dokázaly přepravit 100 cestujících na vzdálenost 100 km rychlostí 50 km/h (po vodorovné trati). Akumulátory byly umístěny na čelech vozů, aby neobtěžovaly cestující případnými kyselými výparry. V té době bylo v jiných vozidlech běžné jejich umístění pod podlahou. Vozidla měla schopnost rekuperace energie při brzdění a tím mohla lehce zvýšit dojezd. Postupem času byly akumulátory nahrazovány za novější typy s dojezdem až 300 km a maximální rychlostí 70 km/h. Celkem bylo těchto vozidel vyrobeno více než 160 kusů a byla v provozu až do roku 1962. Po první a druhé světové válce připadla část vozidel polským drahám, které je nadále provozovaly. Vozidlo s obdobnými parametry bylo postaveno v roce 1910 i v Rusku a stalo se tak prvním akumulátorovým vozidlem na území Ruska, kdy jezdilo na trase St. Petersburg – Pawlowsk. Zda se jednalo o licenční stavbu pruského vozidla Wittfeld není jasné. Od roku 1926 německé dráhy také provozovaly několik vozidel ETA 179, konstrukčně podobných vozidlům Wittfeld. Ta se udržela v provozu až do roku 1968 [43].

Po druhé světové válce byla ve Spolkové republice Německo poptávka po vozidlech s nízkou spotřebou energie. Na neelektrizovaných tratích se ukázalo jako vhodně řešení použití bateriových vozidel a využití zkušeností, především bývalých pruských drah. V letech 1952–1958 byla vyvinuta řada ETA 176. Jednalo se o akumulátorové vozy s maximální rychlostí až 100 km/h a dojezdem 400 km. V roce 1965 byla modernizována jejich výzbroj a získaly schopnost rekuperace, což umožnilo zvýšit jejich dojezd zhruba o 30 %. Celkem jich bylo vyrobeno 8 kusů a v provozu byly do roku 1984. Jejich hlavní nevýhodou byla vysoká cena a s časem rostoucí náklady na údržbu [43].

Patrně největší sériově vyráběnou řadou akumulátorových vozů byla ETA 150, kterých se od roku 1955 vyrobilo 232 kusů a v provozu byly až do roku 1995. Tyto vozy provozované většinou ve spojení s řídicím vozem měly kapacitu okolo 80 míst a maximální rychlost 100 km/h. Dosahovaly dojezdu 400 km a nabíjení trvalo zhruba 3 hodiny (kapacita baterií byla 548 kWh). Nabíjení bylo prováděno napájecím kabelem v koncových stanicích a jeho průběh je zachycen na obrázku 15. Vozidla nebyla vybavena rekuperací. Používána byla jak na

hlavních, tak na odbočných tratích a poskytovala velmi komfortní cestování z důvodu nízkého hluku a absenci výfukových zplodin či kouře [43].



Obrázek 15 Nabíjení vozidla ETA 150 (1955) [44]

Od konce 50. let 20. století však vývoj bateriových vozidel ustal jak v Německu, tak v dalších zemích a do popředí zájmu se dostala vozidla s dieselovým pohonem. Nastala tak zhruba 50 let trvající prodleva ve vývoji dalších bateriových železničních vozidel. Přitom vozidla z počátku 20. století byla vybavena systémem rekuperace, schopností nabíjení z vrchního trolejového vedení či dojezdem v řádech stovek kilometrů, což je i dnes považováno za standard pro moderní bateriová elektrická vozidla. Bohužel ekonomická krize ve 30. letech, dvě světové války a prudký rozmach dieselových spalovacích motorů tento rozvoj zbrzdily. Jejich rozšíření také limitovala vysoká hmotnost baterií, náročná údržba a dlouhá doba nabíjení.

2.3 Aktuální vývoj

K opětovnému rozvoji železničních vozidel poháněných bateriemi došlo až na počátku 21. století. Kromě několika pokusů především s posunovacími lokomotivami v průběhu přechozích let došlo po roce 2000 i k rozvoji bateriových jednotek. Zde je nutné podotknout, že se poprvé začala rozvíjet i koncepce vozidla, které je možné pohánět za jízdy elektřinou z trakčního vedení a zároveň dobíjet baterie. Do té doby byla vozidla zpravidla plně bateriová a nabíjela se ve stacionárním stavu. Myšlenka o schopnosti kombinace jízdy na baterii a jízdy pod trakčním vedením s možností současného odběru trakční energie a dobíjení baterie, přinesla zcela nové možnosti použití.

2.3.1 Japonsko

Vývoj BEMU v Japonsku se projevil v roce 2009, kdy byl testován NE Train Smart Denchi-kun, bateriový elektrický vůz, který je schopen ujet na baterie až 50 km. Maximální rychlost vozu je 100 km/h a nabíjení probíhá z trolejového vedení nebo v dobíjecím zařízení v koncové stanici. Na základě zkušeností z provozu zmíněného vozu je od roku 2014 v provozu řada EV-E301, dvouvozová bateriová elektrická jednotka vybavená Li-ion bateriemi s kapacitou 190 kWh. Je provozována z části pod elektrickým vedením DC 1,5 kV, a poté na baterii na 20 km dlouhé neelektrizované trati při maximální provozní rychlosti 65 km/h. Dobíjení probíhá při jízdě pod trolejovým vedením a také v obrátové stanici. V roce 2016 přišla do provozu jednotka s označením DENCHA (Dual Energy Charge Train) výrobce Hitachi, která je zobrazena na obrázku 16. Jedná se o dvouvozovou BEMU s maximální rychlostí 120 km/h napájenou soustavou AC 20 kV, 60 Hz z trolejového trakčního vedení. Mimo trolejové vedení je na baterie provozována na úseku dlouhém 10 km [45, 46].



Obrázek 16 Japonská BEMU DENCHA (2016) [47]

V roce 2017 pak zahájila provoz dvouvozová BEMU EV-E801. Napájena je soustavou AC 20kV, 60 Hz a při napájení z troleje dosahuje maximální rychlosti 110 km/h, v bateriovém režimu pak 85 km/h. Pojžděný úsek bez trolejového vedení je dlouhý přibližně 27 km [48].

2.3.2 Nový Zéland

Na Novém Zélandě byl v roce 2017 schválen nákup 17 bateriových elektrických jednotek pro provoz v okolí Aucklandu, které mají nahradit dieselové jednotky na příměstských tratích. První jednotky mají být dodány v průběhu roku 2020, a do roku 2022 má být jejich flotila kompletní.

Výrobce je španělský CAF a cena za všech 17 jednotek je 207 mil. NZD (cca 180 mil. Kč na jednotku). Délka úseku provozovaného na baterie (Papakura – Pukekohe) je přibližně 20 km [49].

2.3.3 Velká Británie

Ve Velké Británii byla v roce 2015 provedena zkušební přestavba elektrické jednotky BR Class 379 Electrostar výrobce Bombardier na bateriovou elektrickou jednotku (označována jako IPEMU). Doplněno bylo 6 bateriových Li-ion článků vážících celkem 8 tun, s kapacitou přibližně 450 kWh a dojezd na baterie činil až 77 km. Nabíjení této jednotky z trolejového vedení napájeného soustavou AC 25 kV trvalo přibližně 2 hodiny na 1 hodinu jízdy. Testovací úsek zahrnoval 50 km pod trolejovým vedením a 30 km mimo něj. Testování probíhalo po dobu jednoho měsíce a jako optimální provozní nastavení se ukázalo omezení míry akcelerace při jízdě na baterie na úroveň diesellových jednotek (přibližně 0,5 m/s²), zatímco při jízdě pod trolejovým vedením mohla být zachována plná akcelerace. Testovací provoz byl vyhodnocen jako úspěšný, nicméně jako slabina této koncepce byla shledána vysoká hmotnost baterií a jejich zahřívání [50, 51].

V roce 2018 společnost Vivarail přestavěla jeden vůz Londýnského metra na BEMU, jako jednotku BR class 230, s Li-ion bateriemi o kapacitě přibližně 424 kWh. Udávaná doba nabíjení je 10 minut pro dojezd 80 km. Životnost baterií se předpokládá na 7 let [52].

2.3.4 Německo

V roce 2018 společnost Bombardier představila bateriovou elektrickou jednotku Talent 3. Tu v průběhu roku 2019 začaly testovat DB v okolí Bodamského jezera ve spolkové zemi Bádensko-Württembersko na jihozápadě Německa. Prototyp této jednotky dokáže na baterie urazit 40 km, další verze pak mají dosáhnout dojezdu až 100 km. Bombardier označuje BEMU Talent 3 jako první železniční jednotku svého druhu v Evropě po 60 letech. Patrně tím naráží na odkaz jednotky ETA 150 [53].

Spolková země Bádensko-Württembersko také podepsala smlouvu na dodávku 20 BEMU Siemens Mireo. Součástí kontraktu je i údržba vozidel po dobu 29,5 roku. Siemens bude dále odpovědný za spotřebu energie a náklady na energii vlaků po celou dobu trvání smlouvy. Vozidla Mireo se vyznačují použitím podvozků s vnitřním rámem, díky kterým je hmotnost podvozků snížena až o 25 %. Uvedení do provozu je naplánováno na červen 2023 [54].

Spolková země Šlesvicko-Holštýnsko v roce 2019 uzavřela smlouvu se společností Stadler na dodávku 55 BEMU Flirt Akku. Tato spolková země má elektrizováno pouze 29 % svých tratí, a chce tak pomocí BEMU nahradit výkony diesellových vlaků. Provoz BEMU by zde měl začít v letech 2022–2023. Jednotky mají dojezd až 150 km a v některých stanicích, které neleží na

elektrizovaných tratích, budou vybudována nabíjecí zařízení. Součástí objednávky je údržba po dobu 30 let [55].

Na počátku roku 2020 byl v Sasku dopravním svazem VMS uzavřen kontrakt na dodávku 11 vozidel Alstom Coradia Continental BEMU. Tato vozidla by měla být provozována na 80 km dlouhé neelektrizované trati mezi Lipskem a Saskou Kamenicí (RE6 Leipzig – Chemnitz), přičemž dobíjení má probíhat při obratu v koncových stanicích. Dojezd vozidel by měl být 120 km a kapacita baterií by měla být dostatečná pro zajištění potřebného výkonu a jízdního komfortu. Vozidla budou tříčlánková s kapacitou 150 míst k sezení a maximální rychlostí 160 km/h. Do provozu budou uvedena v roce 2023. Tento kontrakt má hodnotu 100 mil. EUR (přibližně 2,6 mld. Kč) a zahrnuje údržbu vozidel do roku 2032 [56].

2.3.5 Rakousko

V roce 2018 přestavil výrobce Siemens ve spolupráci s dopravcem ÖBB novou BEMU Desiro ML (ÖBB Cityjet Eco). Je vybavena 3 bateriovými kontejnery s lithium-titanovými bateriemi (LTO) o celkové kapacitě více než 500 kWh. Dojezd na jedno nabití je přibližně 80 km. Implementace baterií do existujícího vozidla začala v první polovině roku 2018. Po implementaci následoval proces homologace, který byl úspěšně dokončen v létě 2019. Na podzim 2019 pak byl zahájen zkušební provoz na několika trasách v Dolním Rakousku. Ohlasy cestujících na jejich provoz byly velmi pozitivní [57].

2.3.6 Nizozemsko

V roce 2018 byla uzavřena smlouva na dodávku 18 jednotek Stadler Wink pro dopravce Arriva do regionu Friesland a Groningen. Vozidla budou vybavena motorem na hydrogenovaný rostlinný olej (HVO), který bude možno vyměnit za elektrickou výzbroj s bateriovým ústrojím a tím vozidlo přestavět na plnohodnotnou BEMU. Zahájení provozu je plánováno na prosinec 2020 a přestavba na BEMU je očekávána v roce 2025 [58].

2.3.7 Česká republika

Na konci roku 2018 ohlásily České dráhy, že ve spolupráci se Škoda Transportation vyvíjí prototyp BEMU s využitím vozidla Regiopanther doplněného o upravené bateriové kontejnery používané v tramvajích. Představení prototypu je očekáváno v průběhu roku 2020 [59, 60].

2.3.8 Přehled současných vozidel BEMU

Přehled výrobců a bateriových elektrických jednotek, které jsou aktuálně vyvíjeny či testovány je uveden v příloze 1. U těchto vozidel se v nejbližších měsících nebo letech předpokládá uvedení do provozu. Uvedené parametry jsou získány na základě dostupných informací o testovaných či objednaných vozidlech a mohou se měnit v závislosti na provedení požadovaném pro konkrétní objednávku. V tomto ohledu se může měnit především kapacita a dojezd vozidel.

3 Specifika provozování BEMU

Bateriové elektrické jednotky (BEMU) mají specifické nároky, které ovlivňují možnost jejich využití. Tyto nároky lze rozdělit zejména z hledisek technického, infrastrukturního, provozního, energetického, ekonomického a organizačního. Pro každého účastníka procesu zajištění provozu železniční dopravy jsou nároky a jejich vnímání rozdílné v závislosti na jeho požadavcích a kompetencích.

3.1 Technická specifika

Důležitým aspektem bateriových elektrických jednotek jsou technické parametry a použité technologie, kterými tato vozidla v současné době disponují. Níže uvedené údaje jsou souhrnem technických parametrů získaných napříč kapitolami této práce. Zásadní technologií, která využití BEMU ovlivňuje a odlišuje tato vozidla od konvenčních EMU, je způsob ukládání energie, k němuž jsou využívány trakční baterie.

3.1.1 Technické parametry

BEMU se z důvodu vyšší hmotnosti kvůli umístění bateriových článků vyznačují také vyšším zatížením náprav oproti běžně využívaným druhům pohonu. Oproti běžným elektrickým jednotkám (EMU) je hmotnost vyšší přibližně o 10 %, především z důvodu přítomnosti baterií (hmotnost jednoho bateriového modulu jednotky Bombardier Talent 3 BEMU je přibližně 6,9 t). Ve srovnání s dieselovými jednotkami (DMU) je pak rozdíl ještě výraznější kvůli přítomnosti elektrických zařízení, především transformátoru a trakčního měniče, které zapříčiňují zvýšenou hmotnost vozidla. BEMU jsou těžší než DMU přibližně o 10–15 t [11, 20, 61].

Standardně BEMU vyhovují pro jízdu na tratích s dovolenou traťovou třídou zatížení C (20 t na nápravu) nebo vyšší. Odlehčené verze BEMU s nižší kapacitou baterií a tím i sníženým dojezdem pak vyhovují pro provoz i na tratích třídy B (18 t na nápravu). Nižší třída zatížení než třída B se na železniční síti ČR téměř nevyskytuje [62].

Maximální rychlost BEMU je v elektrickém režimu většinou totožná s obdobnými EMU (zpravidla 140–160 km/h). V režimu provozu na baterie však často bývá omezena na 100–140 km/h. Míra akcelerace je nižší než u klasických EMU z důvodu vyšší hmotnosti. Míra akcelerace v elektrickém režimu obvykle dosahuje 1,0–1,2 m/s², v režimu provozu na baterie pak přibližně 0,7–0,8 m/s². Maximální výkon (konkrétně pro jednotku Bombardier Talent 3 BEMU) je 2 MW v elektrickém režimu a 1 MW v bateriovém režimu, zatímco srovnatelná DMU by měla výkon pouze přibližně 0,8 MW [61].

Díky rekuperaci brzděné energie, která může být ukládána do baterií lze dosáhnout významných energetických úspor. U vlaků s častými zastávkami je díky tomu možné dosáhnout snížení celkové spotřeby energie o 10–30 % [20].

V ostatních technických parametrech většinou nejsou BEMU ve svojí podstatě odlišné od klasických EMU. Kapacitní požadavek pro BEMU se zpravidla pohybuje mezi 120–250 místy k sezení, protože pro nižší kapacitu by hmotnost baterií byla neúměrně vysoká k hmotnosti vozidla, zatímco při vyšší kapacitě by pravděpodobně byla na trati dostatečná poptávka k obhájení elektrizaci dané trati. Existovat však mohou i BEMU i kapacitou vyšší. Samotné elektrické vozy vybavené bateriemi by byly limitovány maximálními nápravovými tlaky a použité baterie by musely mít pouze minimální hmotnost a tím i kapacitu.

3.1.2 Ukládání energie

Jednotky BEMU z principu svého fungování vyžadují zařízení pro ukládání energie, kterou následně využívají. Ukládání energie je možné do chemických bateriových článků, případně do superkondenzátorů. Do těchto článků je energie ukládána při stání či jízdě pod trolejovým vedením a spotřebovávána je při jízdě na neelektrizovaném úseku.

3.1.2.1 Trakční baterie

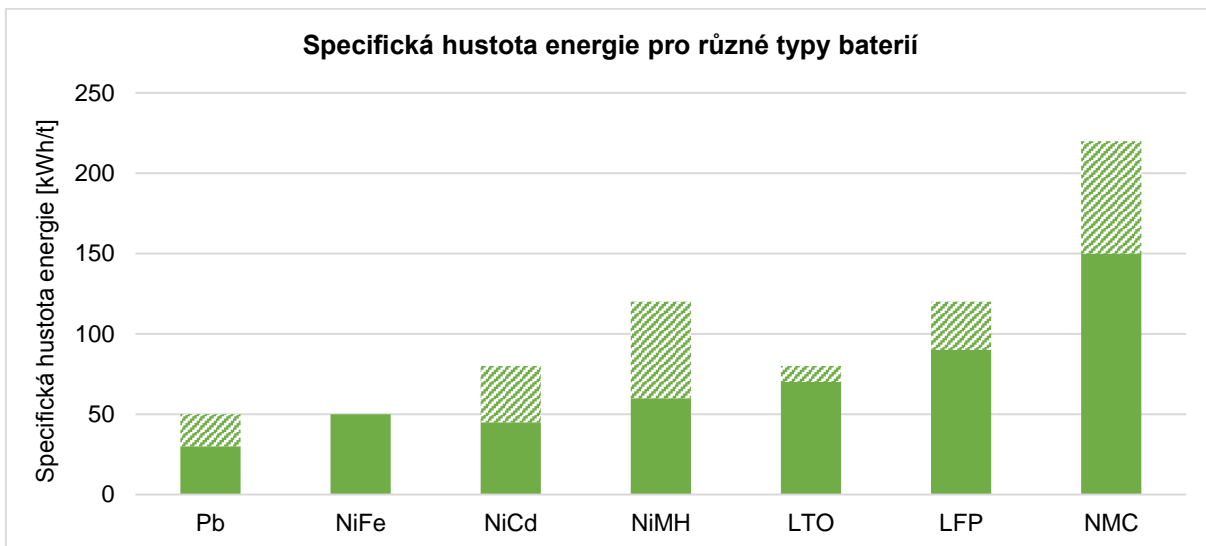
Systém baterií je u většiny jednotek uložen společně s ostatní elektrickou výzbrojí na střeše vozů nebo pod podlahou. U některých vozidel jsou baterie umístěny v samostatném zkráceném článku. Stejným způsobem má například Stadler Flirt 3 BMU umístěn dieselový „power pack“. Teoreticky je možné toto dieselové ústrojí vyměnit právě za systém baterií. Umístění do samostatného článku má výhodu v nižších nápravových tlacích a snazšímu umístění baterií vzhledem ke konstrukci skříně u kratších jednotek. Způsobuje však prodloužení délky vozidla a jeho zvýšenou hmotnost.

Baterie pracují na chemickém principu a vyžadují relativně pomalé nabíjení. Jsou vhodné pro uložení elektrické energie na delší časový úsek a její následné pomalé čerpání. Mezi nejčastěji využívané typy trakčních baterií patřily v historii především olověné bateriové články (Pb). Ty jsou však velmi citlivé na hluboké vybíjení (pod hranici 20 % kapacity) a mezidobíjení, trpí tím jejich kapacita a celková životnost. Dalšími používanými typy baterií jsou pak baterie na bázi niklu (NiFe, NiZn, NiCd, NiMH) či na bázi lithia. Niklové baterie patřily k nejvyužívanějším na počátku 20. století, v moderních trakčních bateriích se nejčastěji využívá především lithium.

Baterie typu lithium-ion (Li-ion), patří mezi nejmodernější typy baterií používaných ve vozidlech, a to především díky vysoké hustotě energie vzhledem k objemu/hmotnosti. Mezi aktuálně používané typy Li-ion baterií patří kombinace lithia a niklu, manganu a kobaltu (NMC), fosforečnanu železitého (LFP) nebo titanu (LTO) [63].

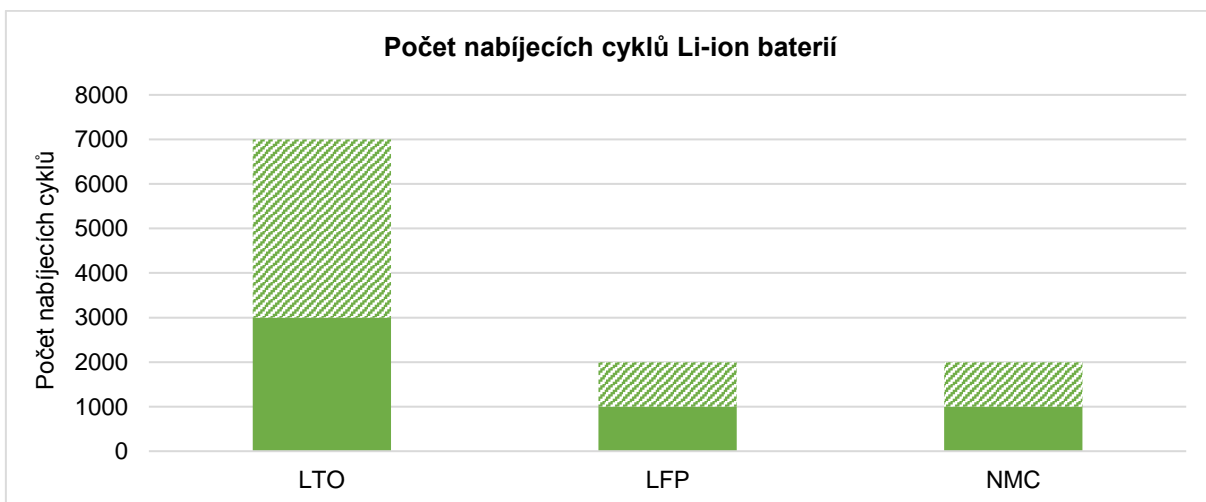
Specifické hustoty energie baterií na bázi lithia, niklu i olova (včetně rozpětí možných hodnot) jsou zobrazeny v grafu 1. Z něj je patrné, že baterie na bázi lithia mají nejvyšší specifickou hustotu energie, vyjádřenou jako poměr kapacity uložené energie vzhledem k hmotnosti. Olověné baterie dosahují maximálně 50 kWh/t, niklové články se pak pohybují maximálně

okolo 120 kWh/t, zatímco lithiové články mohou dosáhnout až na 220 kWh/t. Díky tomu, je v bateriích na bázi lithia možno ukládat velké množství energie při nižším nárůstu hmotnosti oproti bateriím na bázi niklu či olova. Zvláště u lithiových baterií typu NMC je pro uskladnění stejného množství energie oproti olověným článkům potřebná méně než třetinová hmotnost baterie. To znamená významný předpoklad pro možnost efektivního využívání lithiových baterií ve vozidlech [63].



Graf 1 Specifická hustota energie pro různé typy baterií [autor s využitím 63]

Důležitým parametrem kromě poměru energie vůči hmotnosti je i životnost bateriových článků. Opakováním nabíjecích a vybíjecích cyklů se postupně snižuje kapacita baterie. Životnost tedy nekončí náhlým selháním, ale je normativně definována na hodnotu 80 % původní kapacity baterie. Porovnání počtu možných nabíjecích cyklů pro zmíněné druhy lithiových baterií (včetně rozpětí možných hodnot) je uvedeno v grafu 2.



Graf 2 Počet nabíjecích cyklů Li-ion baterií [autor s využitím 63]

Z grafu 2 vyplývá, že baterie typu LTO mají přibližně trojnásobnou životnost, dle počtu nabíjecích cyklů, oproti typům LFP a NMC. Při reálném využití výrobci vozidel udávají, že baterie typu LTO mají životnost 15 let a baterie typu NMC 8 let. Obecně se tak životnost bateriových článků pro využití v BEMU udává 8–15 let. Z energetického hlediska je důležité také zmínit účinnost skladování energie v bateriích, která se pohybuje v rozmezí 80–90 % [20].

Dalším aspektem je cena. Uvádí se, že baterie LTO mají náklady na 1 kWh kapacity přibližně 1 005 USD, typ LFP přibližně 580 USD a typ NMC pak 420 USD. Počet nabíjecích cyklů je tak vyvážen vyššími náklady na pořízení baterií typu LTO, které jsou oproti zbylým přibližně dvojnásobné [63].

Baterie LTO jsou využívány zejména pro dlouhou životnost, rychlé nabíjení a velký rozsah provozních teplot. Jsou také označovány jako nejbezpečnější Li-ion baterie. Jejich nevýhodou je vysoká cena a nízká kapacita. Tento typ baterií využívají v současnosti například vozidla Siemens Cityjet Eco [63].

Bateriový modul od společnosti MITRAC, který využívá Bombardier Talent 3 BEMU (NMC) je zachycen na obrázku 17. Modul bývá umístěn na střeše jednotky.



Obrázek 17 Trakční baterie MITRAC využívaná u vozidla Bombardier Talent 3 BEMU [64]

V současnosti používané baterie jsou stále inovovány, především s cílem zvýšení hustoty energie uložené v bateriích a následného docílení nižší hmotnosti vozidel. Velká pozornost se v tomto směru upírá na lithium-vzduchové baterie (Li-air), které slibují hustotu energie minimálně 1 000 – 1 700 kWh/t. Kromě vyšší energetické hustoty se od těchto článků očekává

i zlepšení bezpečnosti a snížení ceny bateriových článků. Vývoj takových bateriových článků je však v praxi velmi náročný a spojený s pochopením elektrochemických procesů lithium-kyslík, vývojem nových materiálů elektrického článku a inovací v klíčových aspektech designu elektrického článku. Jejich běžné použití je tak otázkou dalšího vývoje, který však může trvat i další desetiletí [65, 66].

3.1.2.2 Superkondenzátory

Alternativou k využívání v současnosti nejrozšířenějších Li-ion baterií je využívání technologie tzv. superkondenzátorů. Ty pracují na elektrostatickém principu uložení náboje a vyznačují se schopností rychlého nabití. Jsou vhodné pro krátkodobé uložení energie a její následné rychlé čerpání. Pracují ve vysokém rozsahu provozních teplot, snášejí opakované nabíjení a vybíjení vysokými proudy, mají dlouhou životnost a nedochází u nich k paměťovému efektu [67].

Jejich zásadní nevýhodou je nízká hustota energie, která je přibližně 10–20krát nižší než u Li-ion baterií. Vhodné jsou tak pro krátkodobé pokrytí vysoké potřeby energie. Toho se dá využít především u rekuperace energie při brzdění a jejího následného využití pro rozjezd [68].

Superkondenzátory jsou vhodné k pohonu lehkých drážních vozidel (tramvaje) na kratší mezistaniční úseky. Pro potřeby železničního provozu je jejich použití nevhodné a je tedy nezbytné využití baterií. Zajímavou možností by však byla kombinace baterií pro pokrytí „dlouhodobé“ potřeby energie pro jízdu a využití superkondenzátorů pro rekuperaci brzděné energie a následné vykrytí vysoké potřeby energie pro rozjezd [68].

3.2 Infrastruktura

Na možnost využívání BEMU má zásadní vliv železniční infrastruktura. Hlavní motivací pro nasazení BEMU je právě příhodná konfigurace dostupné infrastruktury, ze které vyplývá potřeba kombinace provozu na elektrizovaných a neelektrizovaných úsecích. Pokud by byly všechny tratě v určitém území elektrizovány, nemá provozování BEMU opodstatnění, stejně jako v případě sítě bez elektrizace.

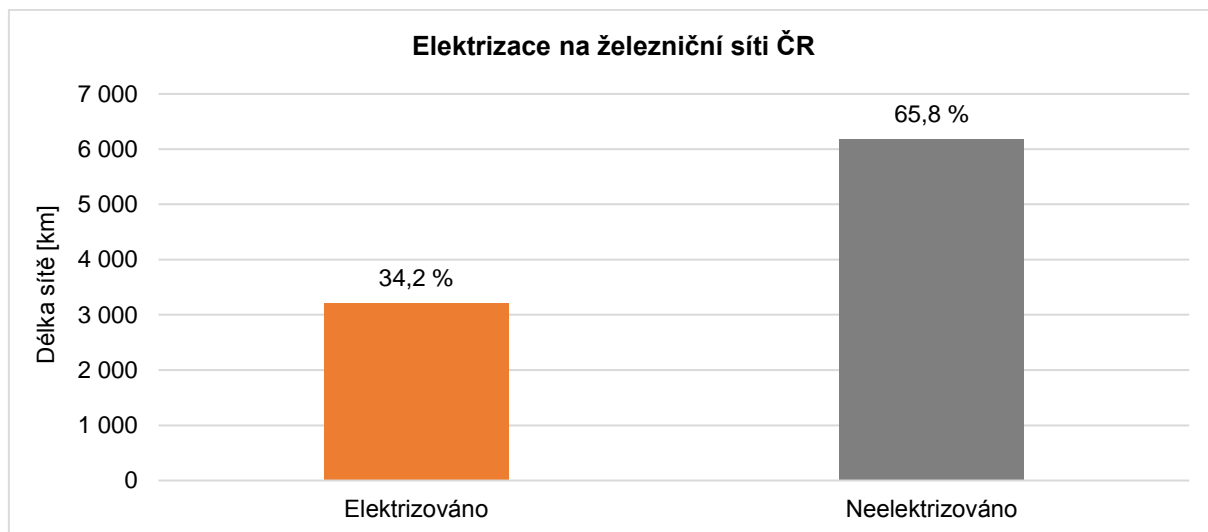
3.2.1 Železniční síť ČR

Pro zhodnocení podmínek pro provoz BEMU na území ČR je stěžejní dostupná železniční infrastruktura. Železniční síť ČR patří k nejhustším na světě a její celková délka dosahuje téměř k 10 000 km. To činí Českou republiku jednou ze zemí, která má k provozování spolehlivé a dostupné železniční dopravy vynikající předpoklady. Problémem je však faktická podoba jednotlivých tratí, která je spíše poplatná době jejich vzniku než aktuálním požadavkům na železniční dopravu. Vzhledem k trasování jednotlivých tratí a jejich směrovým a sklonovým poměrům je možné dosahovat pouze nízkých rychlostí a cestovní doby jsou relativně vysoké. To limituje konkurenceschopnost železniční dopravy především vůči ostatním druhům dopravy. Parametry současné železniční sítě ČR jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7 Délka železniční sítě ČR 2019 [69]

Železniční tratě	Délka [km]	Podíl
Celkem	9 396	-
Elektrizované	3 213	34,2 %
Jednokolejné	1 267	39,4 %
Dvou a vícekolejné	1 946	60,6 %
AC 25 kV	1 372	42,7 %
AC 15 kV	14	0,4 %
DC 3 kV	1 803	56,1 %
DC 1,5 kV	24	0,8 %
Neelektrizované	6 183	65,8 %
Jednokolejné	6 105	98,7 %
Dvou a vícekolejné	78	1,3 %

V České republice se nachází 9 396 km železničních tratí, ze kterých je elektrizováno 3 213 km, což tvoří přibližně 34 % celkové délky sítě. Zbylých 6 183 km tratí, tedy téměř 66 %, elektrizováno není. Tento poměr je znázorněn v grafu 3.



Graf 3 Elektrizace na železniční síti ČR [autor s využitím 69]

Zajímavý je také poměr tratí dvou a více kolejných oproti tratím jednokolejným. Z elektrizovaných tratí je více než 60 % dvou a více kolejných, zatímco u neelektrizovaných je dvou a více kolejných pouhých 1,2 %. Z toho vyplývá, že hlavní tratě s vyšší intenzitou provozu a vyšším počtem traťových kolejí jsou elektrizovány ve vyšší míře a neelektrizovány jsou spíše tratě s nižším využitím. Celkově je však délka elektrizovaných tratí pouze přibližně poloviční oproti neelektrizovaným.

Co se týče podílu trakčních napájecích soustav, tak více než 56 % délky elektrizovaných tratí je elektrizováno soustavou DC 3 kV, dále pak téměř 43 % soustavou AC 25 kV. Napájecí soustavy AC 15 kV a DC 1,5 kV jsou zastoupeny pouze okrajově s podílem nižším než 1 %.

Dalším relevantním pohledem je podíl dopravního výkonu v osobní dopravě dle trakce, uvedený v tabulce 8. Zde je již převládající trakce elektrická s přibližně 53 % oproti 47 % nezávislé dieselové trakce. Tím se potvrzuje, že provoz na elektrizovaných tratích je v průměru výrazně vyšší než na tratích neelektrizovaných. Zároveň však podíl na neelektrizovaných tratích dosahující téměř poloviny celkového dopravního výkonu znamená veliký potenciál pro nahrazení alternativním druhem pohonu. Je nutné také podotknout, že část výkonů v dieselové trakci se navíc odehrává na elektrizovaných úsecích. To jsou již v současném stavu ideální příležitosti k využití BEMU.

Tabulka 8 Dopravní výkon vlaků osobní dopravy v ČR 2019 [69]

Druh trakce	Dopravní výkon [tis. vlkm]	Podíl
Elektrická trakce	72 167	53,0 %
Dieselová trakce	63 836	46,9 %
Kombinace	104	0,1 %
Celkem	136 107	-

V současné době Správa železnic připravuje mnoho projektů na elektrizaci dalších úseků tratí. Schválena je aktuálně elektrizace cca 500 km tratí a další projekty jsou stále v řešení. Ale ani v cílovém stavu není reálné, především s ohledem na ekonomickou udržitelnost, elektrizovat všechny tratě.

Elektrizovány by měly být tratě, na kterých je provozována:

- pravidelná dálková doprava,
- intenzivní regionální doprava (např. aglomerace krajských měst),
- intenzivní nákladní doprava.

Dále by měly být elektrizovány tratě, na kterých se při strategickém plánování očekává nárůst intenzity osobní či nákladní dopravy. Dle studie zpracované Technickou univerzitou Drážďany by měly být elektrizovány takové tratě, na kterých jsou provozovány vlaky osobní dopravy v intervalu ≤ 60 minut, za předpokladu že jsou provozovány alespoň dvouvozové jednotky [70].

3.2.2 Vhodná napájecí soustava pro provoz BEMU

Pro využití BEMU je nezbytná vhodná trakční napájecí soustava. V současném stavu má v České republice podíl 56 % stejnosměrná soustava DC 3 kV a téměř 43 % střídavá soustava AC 25 kV. Ostatní napájecí soustavy jsou zastoupeny pouze marginálně. Železniční mapa ČR s vyznačením trakčních napájecích soustav je zobrazena v příloze 3.

Pro každou trakční napájecí soustavu je charakteristická schopnost dobíjení baterií, která je dána především svou rychlostí. Rychlost dobíjení závisí na elektrickém výkonu, kterého je možné dosáhnout. Limitována je především průřezem trolejového drátu při statickém nabíjení. Čím větší je potřebný proud, tím je třeba použít drát o větším průřezu. Elektrický výkon je dán vztahem v rovnici 1:

$$P = U * I \quad (1)$$

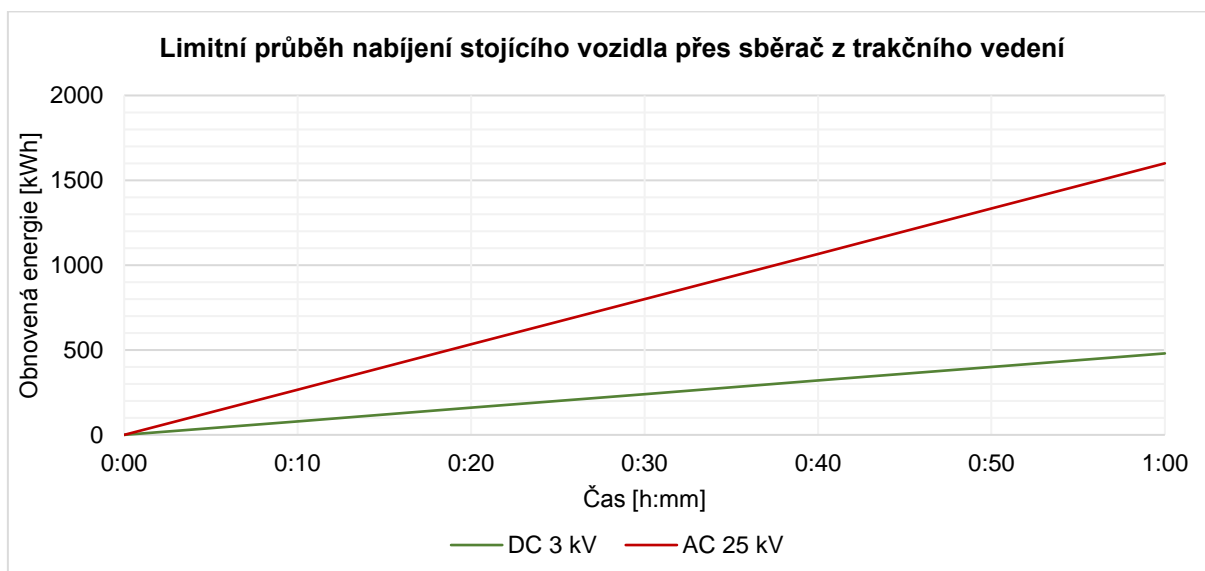
Pro stejnosměrnou soustavu o napětí 3 kV a dosažitelné hodnotě proudu 200 A (což je limit dovoleného proudu kontaktu sběrače s trolejí pro stojící vozidlo) je výkon dle rovnice 2:

$$P = U * I = 3 \text{ kV} * 200 \text{ A} = 600 \text{ kW} \quad (2)$$

Pro střídavou soustavu o napětí 25 kV a dosažitelné hodnotě proudu 80 A (zde již není příkon pro nabíjení limitujících faktorem) je výkon dle rovnice 3:

$$P = U * I = 25 \text{ kV} * 80 \text{ A} = 2000 \text{ kW} \quad (3)$$

Po započítání účinnosti (cca 80 %) je výsledný průběh nabíjení uveden v grafu 4. Tento graf znázorňuje teoretický limitní průběh nabíjení železničního vozidla skrze sběrač z trolejového vedení při stání vozidla. Reálně však takové rychlosti nabíjení není možné dosáhnout a při běžném nabíjení je nutné počítat s delší dobou. Nabíjení baterií pomocí soustavy DC 3 kV není příliš efektivní z důvodu nízkého elektrického výkonu této soustavy. Pro použití BEMU je tedy spíše vhodná soustava AC 25 kV, která má vyšší elektrický výkon a tím i lepší schopnost dobíjení. Vozidlo s kapacitou baterií např. 500 kWh je teoreticky možno na této soustavě plně dobít již za přibližně 20 minut (na soustavě DC 3 kV by trvalo více než hodinu).



Graf 4 Limitní průběh nabíjení stojícího vozidla přes sběrač z trakčního vedení [autor s využitím 20]

Na případné nabíjení BEMU musí být napájecí soustava také dostatečně dimenzována, což může být především na soustavě DC 3 kV problematické. Na některých úsecích již v současném stavu není dostatečná dodávka elektrické energie ani pro jízdu vozidel v krátkém

sledu za sebou (elektrické následné mezidobí) a v případě současného nabíjení by byla značně snížena propustnost těchto tratí. Případně by napájecí infrastruktura musela být posílena. Podobný problém by nastával také ve stanicích.

Další nevýhodou tohoto systému je také výše napětí v DC meziobvodu vozidla. Akumulátorové baterie jsou řešeny pro napětí do 1 kV a je tak nutné je od stejnosměrného meziobvodu 3 kV potenciálově oddělit měničem s induktivní vazbou, což s sebou nese zvýšení hmotnosti a snížení prostorových možností pro umístění baterií. To se negativně projevuje na dojezdu vozidla. Limitována je kvůli oddělovacímu transformátoru jak rychlost nabíjení z trakčního vedení, tak i trakční výkon a výkon elektrodynamické rekuperační brzdy [20].

Z výše uvedeného srovnání tedy vyplývá, že pro plnohodnotné využití BEMU je vhodné napájet vozidla ideálně pod soustavou AC 25 kV. V současnosti testovaná vozidla v Německu i v Rakousku využívají soustavu AC 15 kV, která je výkonově slabší ale stále podstatně výkonnější než soustava DC 3 kV. Vzhledem k současnému stále vysokému podílu této stejnosměrné soustavy na území ČR je vhodné pokračovat v již započaté konverzi na jednotnou střídavou soustavu AC 25 kV.

Na základě těchto závěrů jsou všechny údaje týkající se BEMU a jejich provozních možností v této práci, uvažovány při provozu na soustavě AC 25 kV, 50 Hz, pokud není uvedeno jinak.

Možností by mohlo být využití dvousystémové BEMU, která by kombinovala obě zmíněné napájecí soustavy. Takové vozidlo by nejspíše bylo složité na konstrukci s vysokou hmotností a vysokou cenou. Aby bylo možné umístit všechny potřebné technologie, pravděpodobně by to znamenalo možnost použití pouze u 3 a více vozových jednotek.

3.2.3 Konverze trakční napájecí soustavy v ČR na AC 25 kV

Dle rozhodnutí Centrální komise Ministerstva dopravy bude v následujících letech provedena konverze stejnosměrné části trakční napájecí sítě na jednotnou soustavu AC 25 kV, 50 Hz v celé zemi s cílem dosažení významných energetických úspor.

Konverze se týká stávající sítě napájené stejnosměrnou soustavou DC 3 kV. Tou je pokryta severní polovina České republiky včetně nejzatíženějších koridorových tratí (Praha – Česká Třebová – Ostrava – Polsko/Slovensko, Praha – Děčín – Německo) a hlavních železničních uzlů (Praha, Ostravsko, Ústecko).

Na počátku roku 2020 byla zahájena příprava konverze na úseku Nedakonice – Říkovice na trati 330 mezi Břeclaví a Přerovem. Plánována je dále konverze úseku mezi státní hranicí se Slovenskem a Vsetínem na trati 280 v návaznosti na konverzi na slovenské straně, a to s termínem do roku 2025. Na ostatní úseky je teprve postupně připravována studie

proveditelnosti. Přesný harmonogram konverze na jednotnou napájecí soustavu není v době vzniku této diplomové práce známý. Pravděpodobně však bude trvat přibližně 30 let [71].

Konverze na jednotnou trakční napájecí soustavu má i přes vysoké investiční náklady své opodstatnění. Vozidla využívající střídavý proud jsou sice technologicky složitější, dražší a těžší, ale jejich údržba a provoz je efektivnější a levnější. Střídavý proud umožňuje dosahovat vyšší výkon a je tak vhodný i pro napájení vysokorychlostních tratí. Umožňuje vyšší jízdní dynamiku vozidel a také možnost vozby těžších a kapacitnějších vlaků a zvyšuje tím propustnost tratí a celkovou kapacitu železniční dopravy.

Díky nižším přenášeným proudům postačují na střídavé napájecí soustavě trolejové dráty o nižším průřezu, což znamená úsporu materiálu a hmotnosti trolejového vedení a tím i nižší náklady. Zásadní výhodou je pak snížení počtu potřebných napájecích stanic. Jedna trakční napájecí stanice dokáže při stejnosměrné trakci pokrýt úsek o délce přibližně 15 km, zatímco na střídavé soustavě 60–70 km. Cena takové napájecí stanice se přitom pro obě soustavy pohybuje okolo 250 mil. Kč. Další výhodou je, že díky vyššímu napětí troleje méně namrzají a snižuje se riziko kolapsu provozu elektrické trakce z důvodu ledovky, ke kterému v ČR došlo například v roce 2014 [72].

Odhadované náklady na tuto investiční akci jsou 78,8 mld. Kč vč. DPH dle Národního investičního plánu České republiky 2020–2050 zpracovaného Úřadem vlády ČR v roce 2019.

3.2.4 Využití BEMU vzhledem k infrastruktuře

Možnosti využití BEMU vzhledem k infrastruktuře jsou následovné:

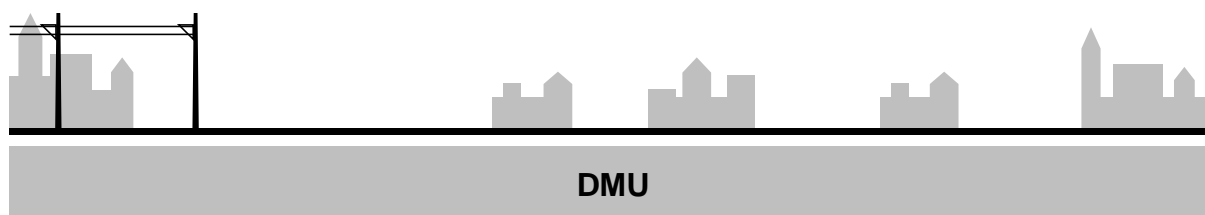
- přechodné řešení při postupu elektrizace tratí,
- úseky tratí, na kterých se elektrizace nepředpokládá,
- úseky tratí, na kterých není možné vybudovat trolejové vedení.

Konkrétní varianty provozního konceptu umožněné vzhledem k infrastruktuře, včetně určení potřebných délek elektrizovaných a neelektrizovaných úseků jsou uvedeny v kapitole 3.3.2.

3.2.4.1 Přechodné řešení při postupu elektrizace tratí

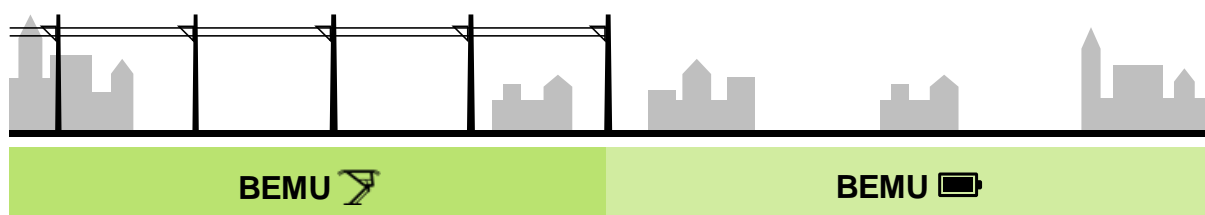
Využití BEMU se jeví jako vhodné dočasné řešení při rozhodnutí o elektrizaci určité trati nebo celé oblasti. Předpokladem je, že při zahájení provozu BEMU existují na trati (v oblasti) úseky nebo stanice, které již elektrizovány jsou, a je zde možné provádět dobíjení baterií. V případě malého rozsahu těchto napájecích míst je však velmi limitován možný provozní koncept s ohledem na potřebu dobíjení vozidel po ujetí maximálně 80–100 km. Elektrizace určité oblasti může trvat několik jednotek až desítek let s ohledem na velikost oblasti a rychlost výstavby. Na rychlost elektrizace může působit řada vlivů, ať už legislativních, technických či ekonomických. V průběhu této doby je možné provozovat na dotčených relacích BEMU jako náhradu za dieselovou trakci ještě před kompletním dokončením elektrizace.

Stav před zahájením elektrizace je zobrazen na obrázku 18. V tomto stavu je provoz na trati obvykle veden v diesellové trakci. Vzhledem k minimální (nebo žádné) možnosti dobíjení vozidel, v tomto stavu není možné o provozu BEMU uvažovat.



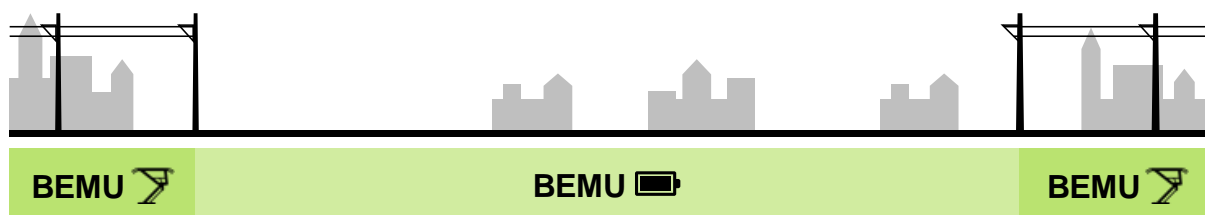
Obrázek 18 Postup elektrizace: stav před zahájením elektrizace (provoz DMU) [autor]

Při zahájení elektrizace je možno postupovat dvěma způsoby. Elektrizovat trať z jednoho či obou konců současně. Pokud je elektrizace započata souvisle z jednoho elektrizovaného konce, je možné provozovat BEMU bez omezení až při dostatečné délce elektrizovaném úseku. Tento stav je zobrazen na obrázku 19. Úsek potřebný pro dobíjení se obecně pohybuje okolo 20–40 km jízdy. Při obratu na elektrizovaném konci proto postačuje poloviční délka úseku, protože vlak úsekem projíždí v obou směrech.



Obrázek 19 Postup elektrizace: průběh souvislé elektrizace (provoz BEMU) [autor]

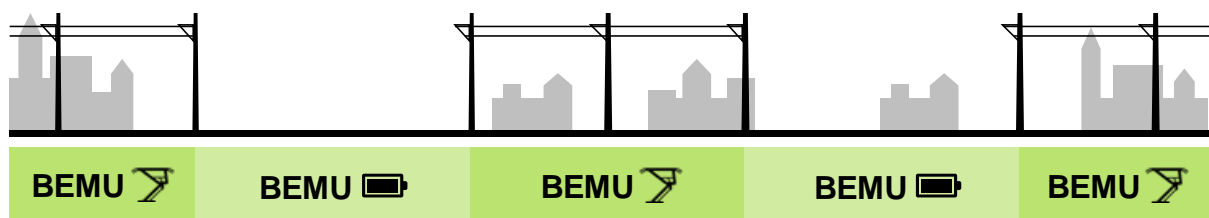
V případě druhé varianty, tedy elektrizace obou koncových úseků, zobrazené na obrázku 20, je možné začít provozovat BEMU alespoň v omezeném režimu, pokud délka neelektrizovaného úseku nepřesáhne přibližně 80–100 km. V tomto stavu je nutné vhodně naplánovat obraty v koncových stanicích, aby byl zajištěn dostatečný čas k plnému nabití baterií. Při tomto řešení je omezena operativnost využití BEMU, snížen jejich denní proběh a celková možnost jejich využití. Takový provoz by pravděpodobně znamenal nižší ekonomickou výhodnost, než jaké je možno ideálně dosáhnout. S rostoucí délkou elektrizovaných úseků je možno tento negativní efekt eliminovat.



Obrázek 20 Postup elektrizace: elektrizované koncové úseky (provoz BEMU) [autor]

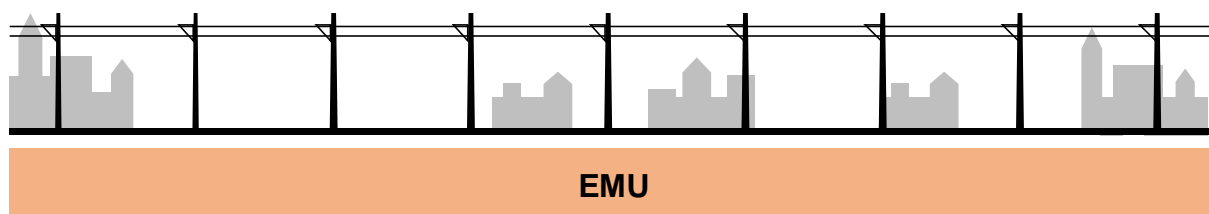
Elektrizace může také probíhat vybudováním tzv. „trolejových ostrovů“, kdy není elektrizace provedena souvisle, ale střídají se elektrizované úseky s neelektrizovanými. Při takovém

rozvržení je možné provozovat BEMU bez omezení i na dlouhých úsecích tratí bez plné elektrizace, pokud jsou trolejové ostrovy vhodně rozmístěny. Postup elektrizace při využití trolejových ostrovů je zobrazen na obrázku 21.



Obrázek 21 Postup elektrizace: elektrizované „trolejové ostrovy“ (provoz BEMU) [autor]

Při dokončení elektrizace na všech plánovaných úsecích v plné délce, které je zobrazeno na obrázku 22, je možno provozovat již čistě elektrické EMU.



Obrázek 22 Postup elektrizace: elektrizace celého úseku (provoz EMU) [autor]

Pro použitá vozidla BEMU se po dokončení plné elektrizace nabízejí další možnosti jejich využití. Po dokončení elektrizace původní oblasti provozování BEMU je možností dalšího využití jejich relokace do jiné oblasti. Pokud taková možnost neexistuje pro stávajícího provozovatele, je vhodné vozidla prodat jinému provozovateli. Možnosti jejich využití jsou poměrně rozsáhlé, takže je pravděpodobné, že by poptávka po takových vozidlech na trhu mohla existovat. Riziko jejich neupotřebení nebo ztráty na ceně však není zanedbatelné.

Při provozu BEMU od počátku elektrizace trávající 5–10 let, je pravděpodobné, že by po uplynutí této doby mohlo také dojít ke konci životnosti baterií (např. baterie NMC mají životnosti cca 8 let, LTO cca 15 let). Právě v případě nutné výměny baterií by mohlo být výhodné baterie již nenahrazovat, ale konvertovat jednotku na EMU. Demontovat tedy baterie a jejich příslušenství a využívat již výhradně externí napájení vozidla. V souvislosti s životností baterií je také možné vyvažovat úbytek jejich kapacity po konci doby životnosti (stanovená na cca 80 % kapacity) prodlužováním elektrizovaných úseků v průběhu výstavby.

3.2.4.2 Úseky tratí, na kterých se elektrizace nepředpokládá

Možností pro využití BEMU je zajištění provozu na tratích či úsecích tratí, kde by plná elektrizace znamenala neúměrně vysoké investiční nebo provozní náklady. Náklady vynaložené na elektrizaci by vždy měly být vyváženy odpovídajícími přínosy, a to finančními či nefinančními. Pokud jsou i při vyčíslení veškerých přínosů, náklady neúměrně vysoké, není taková investice obhajitelná. V takovém případě je nutné hledat jiné řešení, jak zachovat

provoz železniční dopravy na takové trase. Existovat může více vlivů, které neumožňují provedení elektrizace. Možné příčiny nezahájení elektrizace trati jsou:

- nízká přepravní poptávka,
- nepříznivé technické parametry trati (limitující konkurenceschopnost),
- nutnost výstavby nové trakční měřírny,
- nedostatečné zdroje financování,
- zamítavý postoj investora, orgánů státní správy či územní samosprávy,
- legislativní překážky (neprůchodnost povolovacího řízení),
- nedostatečná aktuální kapacita stavebních firem.

Pokud je na konkrétní trati i přes ekonomickou nerentabilitu plné elektrizace výhodné zachovat železniční provoz, může být vhodnou alternativou použití BEMU. Elektrizovaný úsek pro provoz BEMU zde musí být dostatečný pro nabíjení baterií, ale zároveň nesmí být příliš dlouhý, protože z důvodu „mrtvé váhy“ baterií je provoz na elektrizovaném úseku dražší než v případě EMU. Pokud by byl úsek pro nabíjení příliš krátký, byly by značně limitovány možnosti provozního konceptu či snížen dojezd vozidel.

Možností pro využití BEMU na takovýchto úsecích existuje zřejmě nejvíce a podrobněji se jimi zabývají kapitoly 4 a 5. Ekonomická nerentabilita plné elektrizace nebo nemožnost elektrizovat trať v dohledné době, je nejčastější motivací pro využití BEMU.

3.2.4.3 Úseky tratí, na kterých není možné vybudovat trolejové vedení

Existují také úseky tratí, na kterých není technicky možné elektrizaci provést. Jedná se především o úseky tratí vedoucí tunely s nevyhovujícím průjezdným průřezem pro umístění trolejového vedení. V takovém případě není možné (při vynaložení přiměřených nákladů) elektrizaci realizovat. Dalšími příklady mohou být také křížení železničních tratí s tratěmi tramvajovými či trolejbusovými. Z důvodů již vybudovaného trolejového vedení není možné toto vedení křížit železničním trolejovým vedením.

Na takových úsecích se BEMU jeví, jako vhodná alternativa k provozu DMU, protože použití EMU je zde vyloučeno. Náklady na zajištění provozu v čistě elektrické trakci by na těchto relacích byly neúměrně vysoké, protože by znamenaly rozsáhlé přeložky trati, stavby nových tunelů, mostů apod.

3.2.5 Technologie RailBaar

Alternativním způsobem pro dobíjení bateriových vozidel v neelektrizovaných stanicích je využití technologie RailBaar. Tato technologie je inspirována způsobem rychlého dobíjení, které využívají například tramvaje či elektrobusy. Tyto dobíjecí mechanismy mohou být umístěny u nástupiště nebo na jiné koleji a mají polohovatelnou výšku dobíjecího ramena, které se tak může přizpůsobit výšce vozidla, případně být vytaženo pro zachování

maximálního průjezdného profilu, pokud není využíváno. Veškerá elektronika je umístěna do vertikálního stožáru, který zabírá v průřezu méně než 0,5 m². Díky tomu nezabírá místo, které je možné využít pro cestující, či jiná zařízení a neznamena tak výrazný zásah do architektury stanic. Pro funkci tohoto systému jsou na střechu vozidla instalovány dvoukontaktní pevné proudové kolektory, které představují levné, lehké a na údržbu nenáročné zařízení [29].

Základní infrastruktura poskytuje možnost dobíjení vozidel v koncových stanicích, v zařízeních údržby nebo v nabíjecích stanicích po trase pro rychlé částečné dobití trvajících 1–3 minuty. Časy potřebné pro dobíjení jsou důležitým hlediskem s ohledem na možnosti nastavení provozního konceptu. V současném stavu se časy potřebné pro plné nabití pohybují mezi 10 a 30 minutami v závislosti na výkonu zařízení a kapacitě baterií. Je nutné zohlednit napájecí kapacity v místě nabíjení, protože plné nabití vyžaduje významnou spotřebu energie. Nabíjecí stanice je tak možné doplnit o vyrovnávací baterii pro snížení dopadů na rozvodnou síť. Rychlé mechanické připojení systému maximalizuje efektivitu při nabíjení. Životnost zařízení je odhadována na 20 let a provozní rozsah teplot je -25 až +55 °C [29]. Zařízení využitelné pro systém RailBaar je zobrazeno na obrázku 23.



Obrázek 23 Nabíjecí zařízení využitelné pro systém RailBaar [73]

Zařízení díky kompaktním rozměrům a všem pohyblivým částem pod krytem, umožňuje různé způsoby umístění. Může tak být snadno umístěno na různé podpory, budovy či střechy nástupišť. Je tak možné toto zařízení vhodně umístit i s ohledem na architekturu stanice. Instalace zařízení je také snadná. Pokud se zařízení právě nepoužívá, je vypnuto, a může být také umístěno na konci nástupiště. Tím je zaručena vysoká míra bezpečnosti, především ve srovnání s průběžným trolejovým vedením. Zařízení se vždy spustí nad stojící vozidlo (za méně než 5 sekund) a při odjezdu vozidla se zase vysune zpět do krytu [29].

Použitím systému RailBaar je umožněno průběžné dobíjení vozidla i ve stanicích bez trakčního vedení a je tím snížena potřebná kapacita baterií a s tím související úspora hmotnosti. Na vozidle také není nutné mít sběrač pro připojení k trakčnímu vedení, což vede k další úspoře hmotnosti. Protože každou nabíjecí stanicí může využívat několik vozidel, jednotkové náklady na dobíjecí zařízení se se zvyšujícím počtem vozidel snižují.

Mezi výhody technologie RailBaar patří především malé rozměry, umožňující instalaci na téměř jakémkoliv vozidle a do většiny stanic či nástupišť. Konstrukce také umožňuje splnění požadavků na přenos velmi vysokého proudu a výkonu. Bezpečnostní prvky zajišťují správné připojení vozidel a nabíjecích stanic různých výrobců, včetně odlišných požadavků na výkon. Modulární design umožňuje snadné rozšiřování sítě strategickým umístěním zařízení do dalších stanic. Integrované zakrytování dále poskytuje zvýšenou úroveň bezpečnosti.

Toto řešení může být zajímavou alternativou ke klasickému dobíjení BEMU na elektrizovaných úsecích či ve stanicích s trolejovým vedením. Vyžaduje však odlišný sběrač, než jakým jsou opatřena konvenční železniční vozidla a je primárně vhodný pro autonomní systémy. Pokud by technologie RailBaar měla být využívána na běžné železniční síti, musela by být vozidla pravděpodobně opatřena dvěma odlišnými sběrači, případně by zařízení RailBaar muselo být modifikováno. Náklady na výstavbu napájecího zařízení RailBaar jsou nižší než náklady na elektrizaci stanice či traťového úseku, a proto lze při jeho využití dosáhnout úspor. V současné době však toto zařízení není nikde na železnici plně využíváno a stále prochází vývojem.

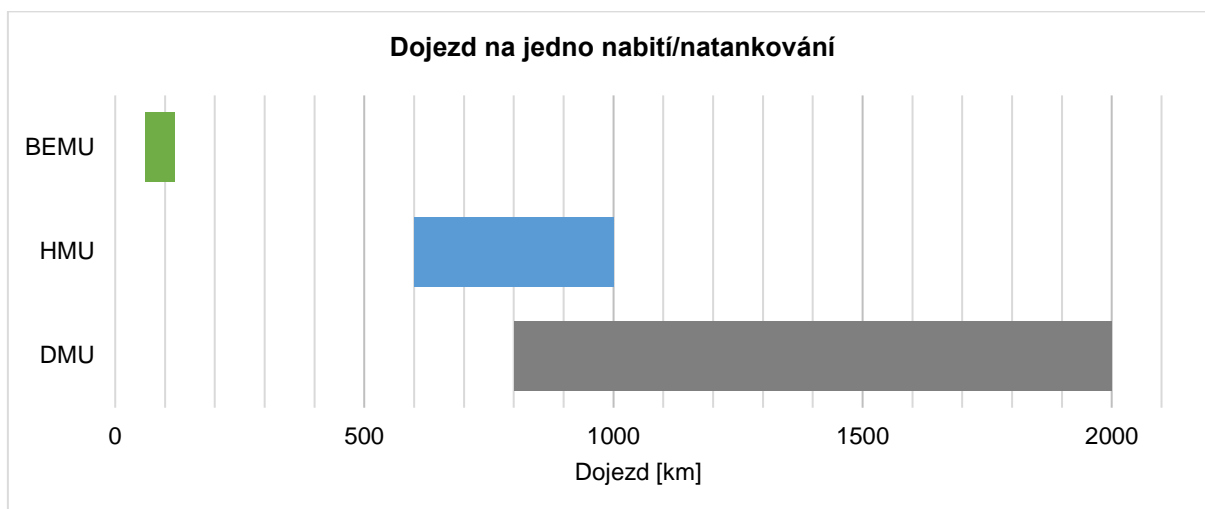
3.3 Provozní koncept

Vzhledem k omezenému dojezdu a nutnosti časově náročného nabíjení, jsou BEMU citlivé na vhodně koncipovaný provozní koncept. Při sestavování provozního konceptu pro využívání BEMU je nutné plánovat oběhy vozidel tak, aby byly zachovány dostatečné úseky pro nabíjení při jízdě nebo při pobytu ve stanici.

3.3.1 Provozní možnosti

Pravidelný dojezd vozidel na jedno nabití v případě BEMU a jedno natankování v případě HMU a DMU je zobrazen v grafu 5. Důležité je zdůraznit, že dojezd BEMU je závislý na kapacitě použité baterie, která se liší podle požadavků zákazníků. Uvedené hodnoty jsou obecné a platné pro současná vozidla dle informací od výrobců. Dojezd je ovlivněn především sklonovými poměry na trati, rychlostním profilem a počtem zastavení vlaku. Současná vozidla BEMU mají výrazně nižší dojezd oproti DMU i HMU. Pravidelný dojezd na baterie je přibližně 60–120 km (až do konce plánované životnosti baterií). V případě potřeby provozovat BEMU na další úseky bez trolejového vedení je nutné zřídit další místa pro nabíjení (např. v obrátové stanici). Při obrátu v neelektrizované stanici vozidlo spotřebovává energii i při pobytu, protože stále vyžaduje aktivní osvětlení, vytápění apod. Nutné je také myslet na zajištění provozu

v případě výluk či mimořádností. Systém napájení musí být dostatečně robustní, aby dokázal zajistit provoz v co největším rozsahu i při nefunkčnosti části napájecí sítě [11, 74].



Graf 5 Dojezd vozidel dle trakce [autor s využitím 1]

Následující úvahy vycházejí z teoretických výpočtů poskytnutých panem Ing. Jiřím Pohlem, který se dlouhodobě tématem BEMU zabývá a je považován za předního odborníka na elektromobilitu na železnici v České republice. Na ujetí 50 km dlouhého úseku pomocí baterií spotřebuje BEMU alespoň 200 kWh elektrické energie. Pro její obnovení je potřeba, aby byl elektrizovaný úsek dlouhý alespoň 18 minut jízdy, tzn. při průměrné rychlosti 60 km/h je délka potřebného úseku minimálně 18 km. Teoretický optimální úsek by tak znamenal přibližně 20 km elektrizované trati na 50 km trati neelektrizované. V takovém případě by bylo optimálně využito dojezdu na baterii v poměru ke zvýšené hmotnosti na elektrizovaném úseku [20].

Do spotřeby energie vstupuje více vlivů, jako je výškové a směrové vedení trati či aktuální povětrnostní podmínky. Rozdíly ve spotřebě energie jsou také u vlaků osobních, které často zastavují a u vlaků vyšších segmentů, které mají méně nácestných zastávek. Se vzrůstajícím počtem zastavení a rozjezdů se zvyšuje i spotřeba energie a snižuje se tím dojezd BEMU. Část této energie je však doplňována zpět pomocí rekuperace. Dojezd vozidel je také snižován nutností vytápění či klimatizace vnitřního prostoru a osvětlení.

BEMU jsou vhodné spíše na regionální dopravu než na dopravu dálkovou, protože s narůstající ujetou vzdáleností pod trakčním vedením se stále více projevuje zvýšená spotřeba energie z důvodu vyšší hmotnosti. Není energeticky výhodné například na expresní lince o délce několik stovek kilometrů využívat BEMU, kvůli přejezdu několika kilometrového úseku bez trakčního vedení. Ideální z tohoto pohledu je využívání BEMU na rychlých regionálních spojích o délce trasy okolo 100 km, pokud je zajištěna dostatečná délka úseků pro nabíjení.

Další oblastí specifickou pro BEMU jsou dynamické vlastnosti. Ty jsou lepší než v případě DMU, ale zaostávají za EMU stejně jako v dalších parametrech z důvodu zvýšené hmotnosti. BEMU vykazují nižší míru akcelerace a nižší maximální rychlost, především v bateriovém režimu. U některých BEMU je snížena maximální rychlost v bateriovém režimu na 100–140 km/h.

V případě výluk či mimořádností na trati je nutné vhodně posoudit možnosti operativního nasazení BEMU. Díky schopnosti provozu na neelektrizovaném úseku je možný jejich provoz i v úsecích s přerušenými dodávkami elektrické energie. Na tratích, kde je dostatečná rezerva v délce úseků pro nabíjení, je možné v případě napěťových výluk na určitých úsecích stále provozovat BEMU bez omezení jejich provozu.

Při určitých mimořádnostech však může dojít ke komplikacím. Například pokud nebude možné dostat vozidlo na elektrizovaný úsek a vozidlo tak zůstane izolované bez možnosti napájení. V takovém případě nejsou BEMU schopné dalšího provozu a musí být odstaveny. V krajním případě mohou na takovém úseku uvíznout a po vyčerpání veškeré energie (např. z důvodu nutnosti vytápění) by bylo nutné jejich stažení z trati pomocí jiného vozidla.

3.3.2 Varianty provozního konceptu vzhledem k infrastruktuře

Při provozu BEMU je nutné klást zvýšený důraz na vhodný provozní koncept. Z hlediska konfigurace infrastruktury existuje několik variant, které provozní koncept zásadně ovlivňují. Provozní koncept BEMU je ovlivněn především dojezdem vozidla a dobou potřebnou pro nabití baterií. Zároveň z důvodu „mrtvé váhy“ baterií není vhodné provozovat BEMU na zbytečně dlouhém elektrizovaném úseku. V ideálním případě by měla být délka navržené linky na elektrizovaném úseku co nejkratší možná pro nabití baterií a současně s co největším poměrem jízdy mimo elektrizovaný úsek. Vzhledem ke kapacitě baterií je maximální délka neelektrizovaného úseku se zohledněním určité rezervy přibližně 100 km.

Teoreticky je možné provozovat BEMU na neelektrizovaném úseku o délce přibližně 50–100 km, pokud jsou obě koncové stanice vybaveny zařízením pro dobíjení (elektrizovány či vybaveny jinou technologií pro napájení), jako je znázorněno na obrázku 24.



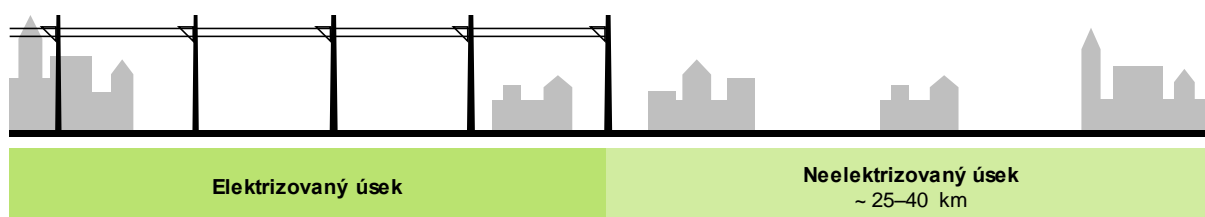
Obrázek 24 Provozování BEMU na neelektrizovaném úseku s nabíjením v koncových úsecích [autor]

V případě možnosti dobíjení pouze v jedné z koncových stanic může mít tento úsek délku pouze přibližně 25–40 km. Úsek by tedy měl být méně než poloviční oproti variantě zahrnující

elektrizaci obou koncových úseků, protože při odstavení vozidla na neelektrizovaném konci je nutné počítat se spotřebou energie i při stání vozidla. Obrátové stanice na neelektrizovaném úseku je vhodné doplnit alespoň o přípojku pro napájení vozidel z elektrické sítě, která by byla využívána především pro temperování vozidel při odstavení přes noc. Tím se ušetří energie uložená v bateriích a nedojde ke snížení dojezdu vozidel při dlouhém odstavení. Takové řešení je již využíváno i u některých DMU.

V takovém případě je však nutné počítat s pobytem v elektrizované obrátové stanici s nabíjením ve výši přibližně 30 minut. Tato doba obratu nemůže být zkrácena, protože jinak by vozidlo nemělo dostatek energie na spolehlivé pokračování v provozu. Reálně by bylo nutné připočítat k době obratu i rezervu na eliminaci dopadů provozních nepravidelností a doba obratu pro tento režim provozu BEMU by se prodloužila minimálně na 40 minut. To znamená, že by vozidlo strávilo ve stanici až polovinu své provozní doby. To vše značně snižuje využití takového vozidla a jeho kilometrický proběh což se negativně odráží na ekonomice provozu.

V reálné provozu je tak uvažováno spíše s dobíjením BEMU i za jízdy. Pokud je elektrizovaný úsek dostatečně dlouhý pro úplné nabití baterií, je dosaženo maximálního možného využití vozidla. Tato varianta je znázorněna na obrázku 25.



Obrázek 25 Provozování BEMU na koncovém neelektrizovaném úseku [autor]

Další variantou je výstavba tzv. „trolejových ostrovů“ pomocí kterých je možné zvýšit provozní dojezd BEMU na neelektrizovaných úsecích. Konkrétní dojezd pak závisí na poměru délek jednotlivých úseků. Varianta využití trolejových ostrovů zlepšuje robustnost možného provozního konceptu při mimořádnostech či výlukách a umožňuje různé varianty provozu podle toho, které úseky bude možné využívat. Varianta provozu BEMU na trati s „trolejovými ostrovy“ je znázorněna na obrázku 26.



Obrázek 26 Provozování BEMU na neelektrizovaném úseku s „trolejovými ostrovy“ [autor]

3.3.3 Údržba

Oproti vozidlům dieselové trakce odpadají při provozu BEMU režijní přejezdy do míst údržby z důvodu tankování pohonných hmot. BEMU jsou tak flexibilnější v plánování údržby, protože nejsou omezeny potřebou doplnění paliva. Dle studie, kterou zpracovala Technická univerzita Drážďany, jsou z důvodu tankování pohonných hmot navýšeny provozní náklady DMU přibližně o 3 % [11].

V technologii údržby jsou BEMU velmi podobné klasickým EMU. Vzhledem k podobnosti koncepce BEMU a EMU je možné pro jejich údržbu využívat společná zařízení údržby a stejný personál. Vozidla dieselové trakce vyžadují odlišná zařízení i odlišnou kvalifikaci personálu. Eliminace využívání DMU a jejich nahrazení pomocí BEMU snižuje potřebu rozdílných technologií údržby. Údržba elektrické části pohonu u BEMU i EMU je technologicky podstatně jednodušší a rychlejší, než údržba spalovacího agregátu v případě DMU, odpadá také spotřeba spotřebního materiálu (filtrační vložky) a provozních tekutin (oleje). Tím je celý proces údržby zásadně zjednodušen a náklady údržby jsou nižší. Snáze se také zajišťuje personál, u kterého odpadá nutnost znalosti technologií spalovacích motorů. Údržba DMU navíc probíhá z důvodu rozdílných technologií často v samostatných prostorách, které je možno při jejich nahrazení zrušit či přestavět a využívat pro údržbu BEMU i EMU současně.

3.4 Energetika a ekologie

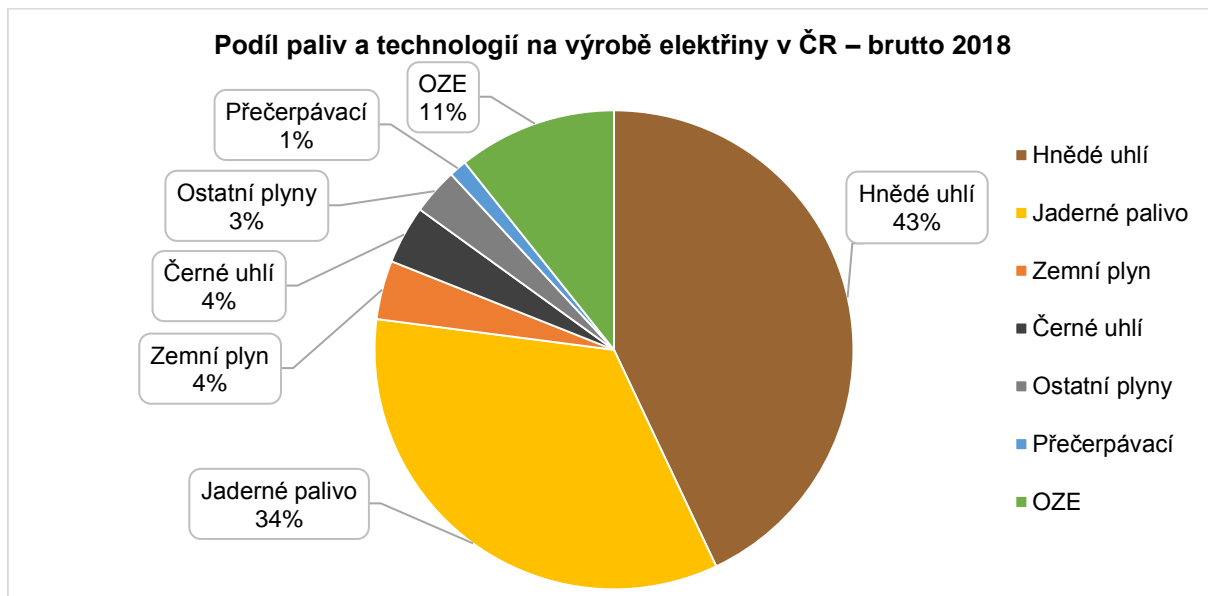
Ekologické a energetické aspekty mohou mít veliký význam při posuzování vhodnosti využívání BEMU jako alternativy k vozidlům dieselové trakce. Právě tyto aspekty mohou být vzhledem k politice ochrany klimatu v budoucnu pro dopravu ve vyspělých zemích zásadní a rozhodující roli již dnes plní v některých zemích západní Evropy.

3.4.1 Výroba a distribuce elektrické energie

Pro možnost provozování vozidel v elektrické trakci je nezbytná především dostatečná elektrická přenosová síť. To se samozřejmě týká také BEMU, které mají nároky na přenosovou síť dokonce vyšší než klasické EMU. Při jízdě na elektrizovaném úseku totiž BEMU kromě elektřiny potřebné na jízdu odebírají také elektřinu pro dobíjení baterií. Vyžadují tedy vyšší elektrický výkon. Jak již bylo zmíněno v kapitole týkající se infrastruktury, je proto vhodné využití BEMU především na úsecích elektrizovaných soustavou AC 25 kV. Aby bylo možné plnohodnotně využívat BEMU, je nutné zajistit stabilní a výkonnou elektrickou přenosovou síť, což je rovněž důležité pro rozvoj elektromobility jako celku (elektromobily, elektrobuses, tramvaje atd.). Elektromobilita je trendem, který je v současnosti považován za velmi progresivní, ale její nároky na přenosovou soustavu nesmí být opomíjeny.

Vzhledem k vysokým ztrátám při přenosu elektrické energie na dlouhé vzdálenosti je nutné využívat zdrojů elektrické energie, které jsou v dané oblasti dostupné. Největší koncentrace

elektráren v České republice je v oblasti severozápadních Čech, kde se nachází velké množství hnědouhelných elektráren. V jižní části země se pak nacházejí dvě jaderné elektrárny, které společně s uhelnými pokrývají většinu spotřeby elektrické energie v ČR. Podíl zdrojů na výrobě elektrické energie v ČR je zobrazen v grafu 6.



Graf 6 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny v ČR – brutto 2018 [autor s využitím 75]

Jak je patrné z grafu 6, největší podíl (43 %) elektrické energie vyrobené v ČR pochází ze spalování hnědého uhlí. Druhým největším zdrojem elektrické energie v ČR je jaderné palivo. Jaderné elektrárny Dukovany a Temelín v součtu produkují 34 % elektrické energie vyrobené v ČR. Obnovitelné zdroje (OZE) pak představují přibližně 11 % produkce elektrické energie v ČR. Mezi tyto obnovitelné zdroje patří zejména bioplyn (3,0 %), fotovoltaika (2,7 %), biomasa (2,4 %), vodní (1,9 %) a větrná energie (0,7 %). Dalšími zdroji jsou pak černé uhlí či zemní plyn. Jak je z těchto podílů patrné, tak energetika v ČR je založená převážně na energii z hnědého uhlí a jádra [75].

Elektrárny spalující hnědé uhlí však představují velkou zátěž pro životní prostředí a jsou v přímém rozporu s globální energetickou politikou, která se dlouhodobě snaží o snížení emisí skleníkových plynů a celkové snížení dopadů výroby elektrické energie na životní prostředí. V roce 2017 byl Českou republikou ratifikován klíčový koncepční dokument tzv. Pařížská dohoda. Ta ukládá všem signatářům, kterými je 195 zemí celého světa, součinnost při ochraně klimatu, především pak v oblasti snižování globální průměrné teploty a posilování odolnosti vůči změně klimatu. Evropská unie je jedním z lídrů této dohody, a proto usiluje o naplnění jejich cílů. Ve své politice proto navrhuje například cíl zvyšování energetické účinnosti na úroveň 30 % do roku 2030. To by znamenalo snížení konečné spotřeby elektrické energie o 9,1 % ve srovnání s rokem 2015. Rizikem této politiky je jistá nerentabilita opatření vedoucích k energetickým úsporám a potřebnost dotací [76].

Politika EU má také za cíl snižování emisí CO₂, kdy do roku 2050 by měly být emise CO₂ nižší o 80 % ve srovnání s rokem 1990. Takové snižování emisí však vyžaduje obrovské investice, které nemohou být čistě ekonomicky návratné a efektivita takovýchto investic je tak z pohledu jejich rentability velmi nízká. Cílem k splnění této politiky je postupné omezování výroby elektřiny v uhelných elektrárnách a jejich odstavování [77].

Aby mohly být naplněny cíle této politiky, a zároveň byl zajištěn dostatek elektrické energie i při nárůstu elektromobility, je nutné odstavené uhelné elektrárny nahradit jinými zdroji energie. Obnovitelné zdroje však tento nedostatek energie v současnosti nedokáží plně nahradit. Ekonomicky i ekologicky udržitelnou alternativou může být jaderná energetika, která dokáže vyrobit velké množství elektrické energie s minimálními dopady na životní prostředí. Je tedy na zvážení možné rozšiřování současných jaderných elektráren. Jedná se o výhodný způsob, jak naplnit globální ekologické cíle a zároveň efektivně nakládat se zdroji. Výstavba nových elektráren využívající obnovitelné zdroje pak může být vhodným doplňkem v oblastech, kde jsou pro konkrétní zdroj energie (vítr, voda, slunce) příhodné podmínky.

Vzhledem k tomu, že saldo exportu elektrické energie je pro Českou republiku vyšší než 15 % (na území ČR bylo vyrobeno o 15 % více elektrické energie, než bylo spotřebováno) má výroba elektřiny v ČR jisté rezervy, které je možno do budoucna využít právě pro pokrytí zvýšené poptávky po elektřině v souvislosti s rozvojem elektromobility. Je tomu však nutno také přizpůsobit přenosovou síť a optimálně rozmístit případné nové elektrárny, které nahradí uzavřené uhelné elektrárny, při naplňování strategie snižování emisí z výroby elektrické energie [75].

3.4.2 Ekologie provozu

Při provozu jsou BEMU ekologicky srovnatelné s čistě elektrickými jednotkami. To znamená výrazně nižší ekologickou zátěž ve srovnání s aktuálně využívanými vozidly dieselové trakce. Emise CO₂ z dopravy v ČR dlouhodobě rostou přibližně o 3,8 % ročně. Aby bylo možné dosáhnout stanovených cílů při snižování emisí, je třeba snižovat emise z provozu (nejen železničních) vozidel. V současnosti je pro dopravu z 92 % využívána energie z ropných produktů a pouze z 2,2 % je využívána elektřina. Jedním z důležitých cílů ekologické politiky by tak mělo být zvýšení podílu elektromobility na úkor spalovacích motorů [20].

Při provozu vozidel mohou vznikat emise škodlivých látek či hluku. Podle místa vzniku se tyto vlivy dají rozdělit na lokální a globální.

Lokální vlivy vznikají přímo v místě provozu vozidla. Zatěžují tedy nejbližší okolí dotčené tratě. Významné jsou především u dieselové trakce. Vozidla dieselové trakce zatěžují své okolí emisemi škodlivin, především se jedná o emise výfukových plynů obsahující oxid uhličitý (CO₂) a oxidy dusíku (NO_x). Je tím také zvýšena prašnost vznikající při provozu. Dále vozidla

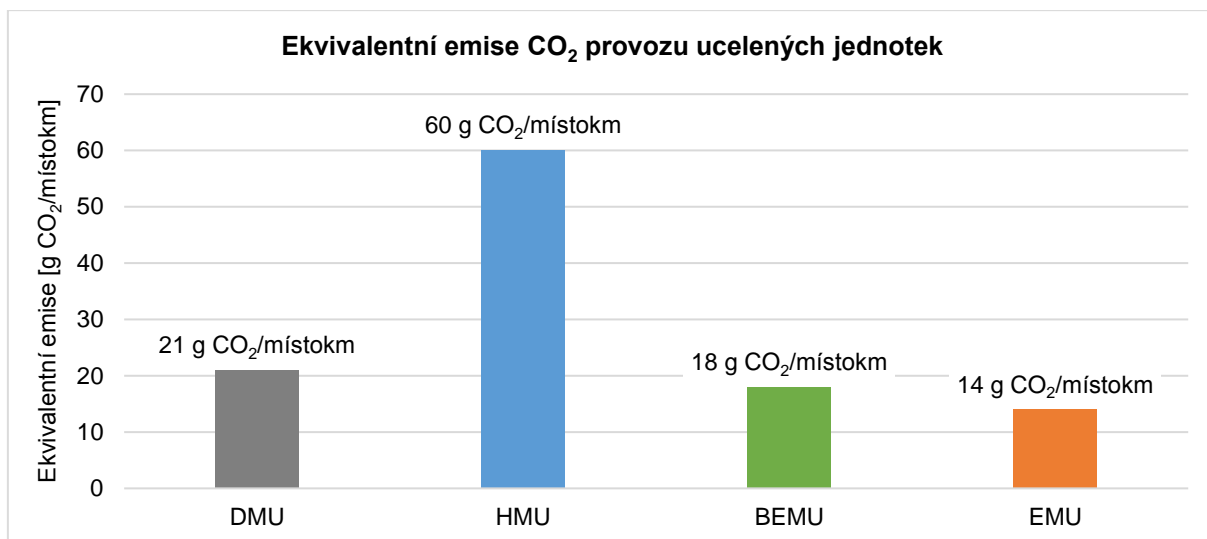
dieselové trakce produkují zvýšenou hladinu hluku. Oproti tomu vozidla elektrické trakce (tedy i BEMU) kromě nižší úrovně hluku neprodukují při jízdě emise dalších látek. Při provozu BEMU je hladina hluku při jízdě snížena oproti provozu DMU až o 7 dB [53]. Lokální emise jsou zásadní především pro přímé účastníky provozu a jeho okolí. Lokální ekologické dopady jsou pro jednotlivé druhy trakce známé, avšak k jejich kompenzaci ani systematické podpoře vozidel s nízkými dopady na životní prostředí nedochází.

Globální vlivy vznikají v celém procesu výroby a distribuce energie pro provoz vozidel. Zatěžují tedy okolí místa vzniku a přenosu energie a nemají přímý vztah na okolí provozu. U vozidel dieselové trakce se tak jedná o řetězec těžby a zpracování ropy a distribuce z ní vyrobeného paliva až do čerpací stanice, kde dochází k jejich tankování do vozidel. U vozidel elektrické trakce se jedná o řetězec výroby elektrické energie a její následné distribuce až do trakčního vedení, ze kterého ji vozidla odebírají. BEMU jsou navíc specifické tím, že vyžadují i výrobu a likvidaci baterií. Tyto procesy také představují jistou ekologickou zátěž.

Na snížení negativních dopadů výroby elektrické energie jsou vypracovány dlouhodobé strategie. Do budoucna by měly být jak lokální, tak globální dopady provozování vozidel elektrické trakce jednoznačně nižší než u vozidel dieselové trakce. BEMU budou oproti čistě elektrické trakci vždy o něco znevýhodněny z důvodu nutnosti používání baterií.

Kromě volby vhodného zdroje energie je důležité snížit celkovou spotřebu energie. Proto je nutné vzít do úvahy účinnost jednotlivých druhů pohonu. Spalovací motory se vyznačují účinností pouze okolo 30 %. Vozidla opatřená vodíkovými palivovými články dosahují účinnosti okolo 60 %. BEMU jsou schopny dosahovat účinnosti 70 % a vozidla v čistě elektrické trakci až 80 %. Při využití vozidel elektrické trakce je tedy potřeba nižší vstupní množství energie pro vykonání stejné práce oproti vozidlům dieselové trakce. Pokud by byla využívána ve větší míře elektrická trakce, je možné snížit celkovou energetickou náročnost dopravy. BEMU se tak jeví jako energeticky a ekologicky výhodný doplněk k vozidlům elektrické trakce na místech, kde není možné provést kompletní elektrizaci [20].

Na základě studií, provedených Technickou univerzitou Berlín, jsou emise vyprodukované v celém cyklu výroby energie u BEMU přibližně 18 g CO₂/místokm oproti 21 g CO₂/místokm u DMU. Na grafu 7 je zobrazeno porovnání ekvivalentních emisí CO₂, které produkují vozidla jednotlivých druhů trakce. Oproti BEMU jsou emise mírně nižší pouze u EMU, naopak u vodíkového pohonu jsou z důvodu nízké účinnosti přibližně trojnásobně vyšší. Započítány jsou i emise, které vznikají při výrobě elektrické energie při energetickém mixu 30 % OZE [78].



Graf 7 Ekvivalentní emise provozu ucelených jednotek [autor s využitím 78]

Organizace NOW GmbH (Národní organizace pro technologii vodíkových a palivových článků spravovaná Ministerstvem dopravy a digitální infrastruktury Spolkové republiky Německo) zpracovala studii, která bere v potaz emise vzniklé v důsledku výroby vozidel, výroby baterií (včetně jejich výměny) i provozu vozidel (včetně výroby energie). Dle této studie může činit úspora emisí CO₂ při provozu BEMU oproti DMU za 30 let provozu až 30 % při energetickém mixu Německa z roku 2018, který zahrnoval (brutto) z 35 % energii z obnovitelných zdrojů (OZE) a ze 12 % energii z jádra. Při současném energetickém mixu ČR (11 % OZE a 34 % jádro) tak může být celková úspora emisí CO₂ zcela srovnatelná [1, 79].

3.4.3 Výroba a recyklace baterií

Důvodem, kvůli kterému jsou BEMU v hodnocení ekologické a energetické výhodnosti až za čistě elektrickými vozidly, je právě nutnost využívání baterií. Ty sice umožňují těmto vozidlům rozsáhlejší využití i na neelektrizovaných tratích, ale nesou s sebou i některé nevýhody. Baterie, pro jejichž výrobu se v současné době využívá především lithium, musí být vyráběny a likvidovány procesem, který představuje značnou ekologickou zátěž. Pro výrobu současných baterií je klíčová těžba lithia. Největší zásoby lithia se nacházejí v Jižní Americe, ale také Česká republika má odhadovány nezanedbatelné zásoby, které jsou jedny z největších v Evropě. To znamená veliký význam ČR při těžbě této strategické suroviny pro budoucnost elektromobility.

Při těžbě lithia je možné využívat několik metod, avšak všechny znamenají zátěž především pro půdu a ovzduší. Těžba může vyžadovat obrovské množství vody a hrozí úniky nebezpečných kyselin do půdy i vody. Nebezpečné látky také mohou unikat do ovzduší. Při těžbě je rovněž narušen ráz krajiny a ekosystém. Zde platí především to, že čím vyšší je snaha o šetrnost těžby, tím se zvyšuje její nákladnost [80].

Důležité je baterie recyklovat, aby již vytěžené lithium bylo využito na maximum. Tím se zajistí efektivní využití již vytěžené suroviny a snížení závislosti na zemích produkujících lithium. Recyklace zatím ve velkém měřítku neprobíhá, protože většina lithiových baterií v dopravě zatím nedosáhla hranice svojí životnosti. U bateriových vozidel se za hranici životnosti považuje 80 % původní kapacity. Při nižší kapacitě je vhodné baterii nahradit za novou. Staré baterie pak mohou posloužit například pro uchování elektrické energie pro energetickou síť. Baterie mohou být po konci své životnosti recyklovány pro využití materiálů v nich obsažených. Cílem recyklace je zajištění vysoké kvality výstupů, tak aby mohly být znovu využity pro výrobu baterií. V současnosti však kvalita recyklace výrobu nových baterií neumožňuje a v tomto ohledu je ještě nutné zlepšení. Teoreticky je možné lithiové články recyklovat téměř celé. V praxi již bylo dokázáno, že je možné z baterie recyklovat až 90 % lithia. Tento proces je však prozatím ve větším měřítku ekonomicky nerealizovatelný. Udává se, že náklady na recyklaci lithia z Li-ion baterií jsou až 5x vyšší ve srovnání s cenou jejich těžby. Aktuálně je recyklace baterií velkým tématem pro budoucnost celé elektromobility a je podrobována dalšímu výzkumu s cílem snížení její ceny a energetické náročnosti [81].

3.5 Ekonomika

Jedním z důležitých aspektů při posuzování nároků BEMU je ekonomika. Aby mohla být tato vozidla provozována, je nezbytné, aby náklady na jejich pořízení a provoz byly přiměřené benefitům, které jejich provoz nabízí.

3.5.1 Investiční a provozní náklady

V současném stavu jsou technologie BEMU stále ve vývoji a skutečné náklady spojené s jejich provozem budou zřejmě až z vyhodnocení reálného nasazení těchto jednotek. Na základě zpracovaných odborných studií je však možné alespoň odhadnout, jak si BEMU vedou z pohledu ekonomiky oproti ostatním druhům pohonu, především oproti DMU.

V roce 2019 zpracovala Technická univerzita Drážďany studii nahrazení vozidel dieselové trakce alternativními způsoby pro organizátora regionální železniční dopravy v jižní části německé spolkové země Porýní-Falc (ZSPNV-Süd). V rámci ekonomického hodnocení tato studie pracovala s neveřejnými daty, které byly ze strany objednatele poskytnuty jako důvěrné. Byly však zveřejněny závěry této studie. Z nich je zřejmé, že při jízdě na baterii jsou provozní náklady přibližně o 10 % vyšší v porovnání s jízdou pod trolejovým vedením z důvodu účinnosti bateriového systému. Účinnost využití energie v elektrické trakci je přibližně 2,7krát vyšší než v dieselové trakci. Vozidla v dieselové trakci přitom nejsou schopna rekuperace, což navyšuje jejich spotřebu energie o dalších přibližně 30 %. Navíc jsou z důvodu režijních přejezdů k načerpání pohonných hmot navýšeny jejich přímé provozní náklady o další 3 % a je také nutné připočítat mzdu obsluhujících zaměstnanců [11].

Z hlediska pořizovacích nákladů jsou vozidla BEMU dražší jak oproti EMU, tak s ještě vyšším rozdílem oproti DMU, které v tomto ohledu vycházejí nejvýhodněji. Pořizovací náklady BEMU jsou oproti EMU navýšeny především z důvodu nutnosti instalace bateriového systému a souvisejících konstrukčních úprav. DMU jsou na pořízení nejlevnější, protože použité technologie jsou relativně snadné na výrobu a implementaci.

Vzhledem ke stále zpřísnujícím se emisním normám a klesající poptávce po DMU se však do budoucna očekává nárůst jejich pořizovací ceny, a to minimálně na úroveň srovnatelnou s EMU. Dalším úskalím nákupu nových DMU může být také problematické financování. Vzhledem k jejich plánované životnosti není zaručeno využití po celou její dobu a existuje riziko neupotřebení těchto vozidel po zpřísnění podmínek pro provoz vozidel s vysokými emisemi. Možnosti úvěrů na taková vozidla tak mohou být do budoucna limitovány. Některé studie již dnes uvažují s odepisováním DMU po dobu pouze 25 let oproti vozidlům elektrické trakce, která jsou ve stejném případě odepisována po dobu 35 let [70].

Z hlediska provozních nákladů, které jsou dány především náklady na energie a údržbu, jsou díky vysoké účinnosti elektromotoru a snadné údržbě nejvýhodnější EMU. Oproti nim mají BEMU kvůli vyšší hmotnosti a nižší účinnosti bateriového vybavení provozní náklady mírně vyšší. DMU jsou, především z důvodu nízké účinnosti spalovacího motoru, absenci rekuperace a spotřebě provozních kapalin, provozně nejméně výhodné.

Je nutné zmínit, že tyto předpoklady jsou opodstatněné při využití srovnatelných vozidel (především kapacitou, výkonem a stářím vozidla). Z uvedeného srovnání by se mohlo zdát, že EMU jsou vždy výhodnější než BEMU, jelikož mají nižší pořizovací i provozní náklady. Je však nutné vzít do úvahy, že pro jejich využití je potřebné vybudování podstatně nákladnější infrastruktury než pro BEMU.

Rámcový model nákladů, určující ekonomicky nejvýhodnější druh pohonu pro dané podmínky provozu a infrastruktury, je uveden na modelových příkladech v kapitole 4.

3.5.2 Rozdělení nákladů

Rozdělení nákladů na zajištění provozu osobní železniční dopravy je možné provést několika způsoby. Pro možnost ekonomického porovnání jednotlivých druhů pohonu je vhodné rozdělit náklady na ty, které jsou ovlivněny konkrétním druhem trakce a na ty, které jsou na zvolené trakci nezávislé. Pro organizační zajištění je podstatné rozdělení nákladů dle jejich nositele. Dělení lze provést u položek výchozího finančního modelu pro veřejnou drážní dopravu, dle Vyhlášky o postupech pro sestavení finančního modelu a určení maximální výše kompenzace (Vyhláška č. 296/2010 Sb.).

3.5.2.1 Rozdělení nákladů dle závislosti na zvolené trakci

Náklady spojené s provozováním osobní železniční dopravy lze dle závislosti na druhu trakce rozdělit následovně:

- Náklady primárně závislé na zvolené trakci
 - Trakční energie a palivo
 - Netrakční energie a palivo
 - Přímý materiál
 - Oprava a údržba vozidel
 - Odpisy dlouhodobého majetku
 - Pronájem a leasing vozidel

- Náklady primárně nezávislé na zvolené trakci
 - Mzdové náklady
 - Sociální a zdravotní pojištění
 - Cestovné
 - Úhrada za použití dopravní cesty
 - Úhrada za použití ostatní infrastruktury
 - Ostatní přímé náklady
 - Ostatní služby
 - Provozní režie
 - Správní režie

Je zřejmé, že při použití jiného druhu trakce mohou být rozdílné i položky, které primárně s trakcí nesouvisejí, to ale není účelem tohoto rozdělení. Jedná se o rozdělení nákladů, které jsou ovlivněny primárně změnou trakce, a ne pouze sekundárně, například z důvodu změny provozního konceptu.

3.5.2.2 Rozdělení nákladů dle jejich nositele

Pro organizační zajištění je pak důležité rozdělení nákladů dle toho, kdo je jejich nositelem a tedy, z jakých zdrojů je nutné tyto nákladové položky financovat. Toto rozdělení je zásadní z pohledu zajištění provozu, protože je nutné zohlednit všechny náklady související s provozem a všichni účastníci jsou povinni uhradit jim náležející část nákladů. To v praxi přináší řadu komplikací, především proto, že výhody i nevýhody provozu vozidel v konkrétní trakci nemusejí vždy dopadat přímo na nositele těchto nákladů. Zvláště pak v případech externalit, které často nejsou ani měřitelné nebo jsou jen obtížně vyčíslitelné. To se může týkat například emisí škodlivých látek, hluku, vibrací apod. Ty jsou ovlivněny zpravidla volbou konkrétní trakce, potažmo vozidel. Náklady na pořízení vozidel hradí dopravce (resp. objednatel), ale externality dopadají jak na cestující, tak na celou společnost.

V konečném důsledku tak přenesené negativní vlivy dopadají na státní rozpočet, ze kterého jsou většinou financována opatření na ochranu životního prostředí, zdravotní péči apod.

Objednatelé dopravy, kteří rozhodují o volbě trakce a zároveň mají i odpovědnost za řádné nakládání s veřejnými penězi, by mohli požadovat určitou finanční podporu ze státního rozpočtu v případě zvolení trakce nesoucí nižší objem externalit. Tím by se teoreticky snížily následné výdaje ze státního rozpočtu na řešení jejich dopadů. Tyto externality jsou těžko vyčíslitelné. I přesto, že na jejich vyčíslení metodika existuje, nejsou obvykle předmětem kritérií pro výběr vozidel pro zajišťování železniční dopravy v závazku veřejné služby.

Náklady na provoz železniční dopravy je možno rozdělit na náklady spojené s provozem vozidel, které hradí dopravce (respektive objednatel) a náklady spojené s výstavbou a provozem infrastruktury, které hradí správce infrastruktury.

Rozdělení nákladů železniční dopravy podle jejich nositele je následující:

- Náklady nesené dopravcem (resp. objednatelem)
 - *Všechny položky výchozího finančního modelu pro veřejnou drážní dopravu (viz všechny položky uvedené v kapitole 3.5.2.1)*
- Náklady nesené správcem infrastruktury
 - Náklady na vybudování infrastruktury pro napájení
 - Náklady na údržbu infrastruktury pro napájení

Teoreticky by výstavba a údržba potřebné infrastruktury měla být hrazena z úhrady za použití dopravní cesty. V praxi jsou však tyto poplatky zcela nedostatečné k pokrytí veškerých nákladů spojených s infrastrukturou. Infrastrukturní stavby navíc představují značné nároky na počáteční investici, zatímco poplatky za použití dopravní cesty jsou vybírány až zpětně při provozu infrastruktury.

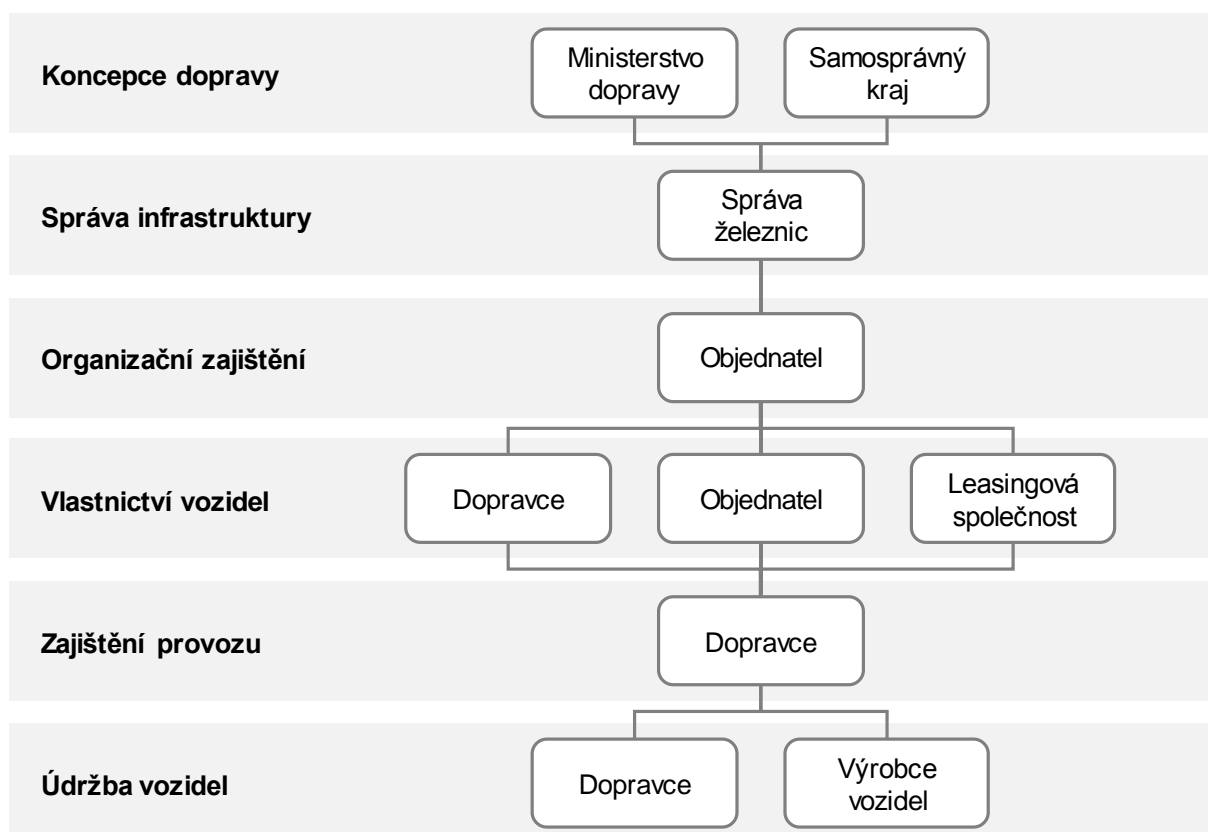
3.6 Organizační zajištění

Existuje několik možností zajištění provozu osobní železniční dopravy. Při dopravě provozované na tzv. komerční riziko, označované tedy jako komerční doprava, je rozhodování o organizaci provozu v kompetenci dopravce. V České republice je pro zajišťování dopravní obslužnosti obvyklé objednávání dopravy v tzv. závazku veřejné služby dle Smlouvy o veřejných službách v přepravě cestujících veřejnou drážní osobní dopravou k zajištění dopravní obslužnosti. Tato smlouva bývá označována jako „závazková smlouva“ nebo „smlouva o závazku“. Zajištění železniční dopravy objednávkou se v České republice využívá především v regionální a u většiny dálkové dopravy. Komerčně jsou zajišťovány v současnosti pouze páteřní relace celostátního a mezinárodního významu. Oproti tomu například v Německu je veškerá dálková doprava na spolkové úrovni provozována v komerčním režimu.

Vzhledem ke specifickým BEMU se předpokládá jejich využití především v regionální či meziregionální dopravě. Ta je v ČR plně v kompetenci objednatelů dopravy, kterými jsou pro regionální spoje jednotlivé samosprávné kraje a pro meziregionální spoje (kategorie R a Ex) pak Ministerstvo dopravy. Objednatel obvykle objednává od dopravce kompletní zajištění dopravních služeb dle svých požadavků. Objednatel tak nevlastní technická zařízení ani nezajišťuje personál a jejich role je čistě organizační.

Objednatelé se však mohou rozhodnout i pro jinou formu vztahu s dopravci. Například Jihomoravský kraj se rozhodl pro koupi železničních vozidel pro vybrané regionální linky do svého majetku. Spolu s tím také vysoutěžil údržbu těchto vozidel. Z toho důvodu již vstupuje do soutěže o dopravce s vlastním vozovým parkem a vybraný dopravce zajistí pouze personál a ostatní náležitosti provozu. Jde o odlišný přístup, kdy po konci závazkové smlouvy zůstanou vozidla v majetku objednatele a ten bude řešit jejich další využití.

Pro využití maximálního potenciálu infrastruktury a možné použití BEMU je nezbytná spolupráce mezi správcem infrastruktury, objednateli dopravy, provozovateli vozidel a dalšími účastníky organizačního zajištění. Účastníci procesu zajišťování železniční dopravy v závazku veřejné služby jsou uvedeni ve schématu na obrázku 27.



Obrázek 27 Aktéři zajištění železničního provozu v závazku veřejné služby [autor]

3.6.1 Legislativa

Provozování železniční dopravy se musí řídit platnou legislativní úpravou. Kromě národní legislativy a technické legislativy pro konstrukci a provoz železničních vozidel (TSI) je zásadní jednotná evropská legislativa, která definuje podmínky zajišťování železniční dopravy v rámci jednotného evropského liberalizovaného trhu.

Běžná délka trvání smlouvy o závazku veřejné služby v ČR je v současnosti 8–10 let. Maximální standardní délka trvání smlouvy o závazku veřejné služby v přepravě cestujících je dle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1370/2007 ze dne 23. října 2007 o veřejných službách v přepravě cestujících po železnici a silnici a o zrušení nařízení Rady (EHS) č. 1191/69 a č. 1107/70 stanovena na 15 let. Při prokázání nutnosti vysoké investice do kapitálu k zajištění plnění smlouvy (např. nákup nových vozidel) je však možné smlouvu prodloužit až o polovinu doby trvání na výsledných 22,5 let. Existuje i možnost delšího trvání smlouvy, pokud by byla prokázána i investice do infrastruktury podmíněná trváním této smlouvy. Ani maximální možná délka trvání smlouvy dle platné legislativy tak nezajišťuje využitelnost vozidel po celou dobu životnosti, která je přibližně 30 let.

3.6.2 Varianty zajištění provozu dle vlastnictví vozidel

Pro provoz BEMU je nejvýhodnější zajištění, při kterém je zaručena flexibilita jejich využití (možnost využívat vozidla na různých trasách či při různých provozních konceptech), ale zároveň dostatečná záruka dlouhodobého provozu. Vlastník vozidel totiž musí mít jistotu provozu vozidel po celou dobu jejich životnosti, tak aby mu byly uhrazeny všechny náklady spojené s jejich pořízením a provozem. Ty jsou v případě BEMU příznivější s narůstající dobou provozu, jelikož mají relativně vysoké investiční náklady, ale příznivé provozní náklady. Vyžadují tedy pro svoji ekonomickou výhodnost být zasmluvněny na provoz alespoň po dobu blízkou se jejich životnosti. Tak dlouhé trvání smluv však v závazkové dopravě není obvyklé a vysoké investiční náklady nemusejí být při smlouvě trvajících pouze 10 let plně vyváženy provozními úsporami. Celková výhodnost zajištění provozu se může lišit v závislosti na tom, který subjekt vlastní vozidla. Tímto subjektem může být dopravce, objednatel nebo leasingová společnost.

3.6.2.1 Dopravce vlastníkem vozidel

Obvyklé je vlastnictví vozidel dopravcem. Pokud by dopravce nastavil financování, tak že bude počítat s plnohodnotným využitím vozidel i po konci trvání závazkové smlouvy, dostává se do rizika, že neuzavře další smlouvu, případně nebude další smlouva okamžitě navazovat. Pokud by došlo k prodlevě mezi kontrakty v délce rok či déle, může to být pro dopravce ekonomicky neúnosné. Dalším problémem může být nestejná potřeba vozidel v navazujícím kontraktu. Pořizování BEMU bez jistoty zasmluvnění provozu po celou dobu jejich životnosti je proto pro dopravce velmi rizikové. Variantou zajišťující dopravci potřebnou jistotu by mohlo být zaručení

objednatele na odkup vozidel při konci smlouvy. Riziko neupotřebení vozidel by tak přešlo na objednatele a dopravce by měl zajištěno, že vozidla po skončení smlouvy odprodá za předem sjednanou cenu a nebude tak tratit při jejich případném dalším neupotřebení.

3.6.2.2 Objednatel vlastníkem vozidel

Při vlastnění vozidel objednatelem je situace příznivější, protože objednatel může mít již dopředu jistotu, že na dané trase chce provozovat daná vozidla po celou dobu životnosti. Při změně dopravce v tomto případě zůstávají v provozu původní vozidla. Objednatel má navíc možnost v rámci své objednávky vozidla dislokovat na jiné výkony, pokud by došlo k úpravám infrastruktury (např. nově elektrizované úseky) nebo pokud by se změnilly parametry provozu (např. nový provozní koncept). Flexibilita využití vozidel je v tomto případě vysoká a tím se pro objednatele snižuje riziko, že by jeho investice nedosáhla potřebné návratnosti. Délku provozu těchto vozidel, tak aby pokryla celou životnost, si navíc může objednatel sám stanovit a zasmluvnit s libovolným dopravcem.

Alternativně může objednatel zřídit svého vnitřního provozovatele a provozovat železniční dopravu na vlastní riziko, bez nutnosti soutěžit dopravce. Tento model využívají například některá polská vojvodství k zajištění regionální dopravy. Kromě snížení rizika neupotřebení vozidel tato možnost nese teoreticky i možnost úspor, protože při odpovědném a efektivním řízení může především u větších celků při dostatečných úsporách z rozsahu dosahovat nižších nákladů než, které jsou objednatelé schopni získat v soutěžích.

3.6.2.3 Leasingová společnost vlastníkem vozidel

Při vlastnictví vozidel leasingovou společností je možná flexibilita použití vozidel vyšší než v případě dopravce. V současném stavu je stále běžné, že dopravci mají vozidla ve svém majetku a vozidla od leasingových společností využívají pouze krátkodobě či pouze jednotky vozidel. S přibývajícím soutěžením v závazkové dopravě, kdy po roce 2030 by měla být veškerá závazková doprava v ČR provozována pouze na základě otevřeného zadávacího řízení, lze očekávat zvýšení podílu provozovaných vozidel ve vlastnictví leasingových společností. To je dnes již zcela běžné například v Německu, kde je také podstatně delší zkušenost s otevřenými zadávacími řízeními v regionální železniční dopravě. Podobný trend se tak dá očekávat i v ČR. Jediným současným případem v ČR, kdy dopravce zajišťuje celý provozní soubor vozidly ve vlastnictví leasingové společnosti je provoz společnosti Leo Express na tratích 024 a 025 v objednávce Pardubického kraje.

Výhody vlastnictví vozidel leasingovými společnostmi se plně začínají projevovat na otevřených železničních trzích, kdy se dopravcům přestává vyplácet nakupovat vozidla k zajištění dopravy při smlouvě trvající kratší dobu, než je životnost požadovaných vozidel. Leasingová společnost totiž může uchovat vozidla na stejné trati i při změně dopravce, pokud

se dokáže s vítězným dopravcem dohodnout na podmínkách pronájmu. To bývá často výhodným řešením pro obě strany. Spolupráce s leasingovou společností bývá výhodná i při pořizování nových vozidel, kdy pro leasingovou společnost je riziko neupotřebení vozidla po konci trvání smlouvy mnohem nižší než pro dopravce. Leasingová společnost se na pronajímání vozidel specializuje a má tak dobrou pozici pro vyjednávání a podstatně vyšší šanci na upotřebení tak specifických vozidel jako jsou BEMU. Především pak oproti dopravcům, kteří hledají možnosti další upotřebení v rámci rozsahu vlastního provozu. Leasingová společnost může navíc vozidla pronajímat jakémukoliv dopravci, a to nejen v rámci jedné země, pokud jsou splněny technické a legislativní podmínky.

3.6.3 Podpora vývoje alternativních pohonů

Vývoj nových technologií v oblasti BEMU je v Německu, které je v současnosti v přípravě provozu BEMU nejdále, financován i z veřejných zdrojů. Výzkumný projekt nové BEMU Talent 3 výrobce Bombardier, který připravuje ve spolupráci s Technickou univerzitou Berlín, je financován Spolkovým ministerstvem dopravy a digitální infrastruktury (BMVI) v rámci inovačního programu pro elektromobilitu částkou 4 mil. EUR. Stejně tak výrobce Stadler obdržel od Spolkového ministerstva hospodářství a technologií (BMWí) dotaci ve výši 2 mil. EUR na stavbu prototypu Flirt Akku. Výrobce Alstom obdržel od spolkové vlády dotaci ve výši 8 mil. EUR na vývoj HMU iLint. V České republice však podpora vývoje alternativních pohonů na železnici z veřejných rozpočtů neprobíhá [82, 83, 84].

Klíčovým aktérem procesu rozhodování o využitém typu vozidel jsou v současném stavu objednatelé železniční dopravy, tedy kraje a Ministerstvo dopravy. Objednatelé však nejsou žádným způsobem motivováni k upřednostňování jiných alternativ než těch, které se po dobu trvání závazkové smlouvy jeví jako ekonomicky nejvýhodnější. Pokud by však existovala jasná koncepce na úrovni státu nebo na úrovni jednotlivých krajů, pak by mohla být posuzována výhodnost provozu železniční dopravy v delším časovém horizontu, což by napomohlo právě k prosazení vyššího podílu alternativních druhů pohonu, jako jsou BEMU.

Nevýhodou BEMU v současném stavu je především vysoká pořizovací cena a nízká kapacita baterií a tím i nízký dojezd na jedno nabití. Tyto parametry však podléhají dalšímu vývoji, který je v současnosti iniciován především výrobcí vozidel ve spolupráci s dopravci (např. DB, ÖBB) a veřejným sektorem (např. BMVI, BMWí). Díky postupujícím inovacím lze do budoucna předpokládat další zlepšení těchto parametrů. Reálná cena vozidel BEMU bude pravděpodobně klesat. Se zvyšujícím se rozšířením těchto vozidel a s postupem vývoje bateriových technologií, lze očekávat i zvyšující se dojezd vozidel při stejné hmotnosti bateriových článků. V horizontu několika let tak lze očekávat zlepšení těchto klíčových parametrů, a to především díky iniciativě výše zmíněných aktérů.

4 Model využití BEMU

V této kapitole jsou prakticky využity znalosti získané v předcházejících částech této práce. Teoretické poznatky jsou aplikovány na příkladech konkrétních tratí v rámci železniční sítě České republiky.

Pro účely zkoumání využití BEMU v podmínkách železniční sítě ČR byly vybrány dvě modelové trasy, na kterých je možné určit vhodnost použití tohoto hybridního pohonu. Pro možnost vyhodnocení jsou BEMU porovnány s nejrozšířenějšími alternativami, kterými jsou v současné době dieselové jednotky (DMU) a elektrické jednotky (EMU). Zvoleny byly dva modelové příklady, které se od sebe odlišují současným stavem elektrizace, rozsahem úprav nutných pro provoz BEMU i konfigurací elektrizovaných úseků v cílovém stavu. Jedná se o vzorové využití BEMU, které je možné využít i na kterékoliv jiné trati s obdobnými parametry (především rozsahem elektrizace).

4.1 Vstupní předpoklady

Aby bylo porovnání co nejobektivnější, je uvažováno s univerzálním vozidlem (tedy bez specifikace konkrétního typu ani výrobce), které má pro všechny druhy pohonu shodné parametry na něm nezávislé a liší se pouze parametry souvisejícími s využívaným druhem trakce. Modelové vozidlo je určeno dle parametrů, které jsou pro provoz na regionálních tratích v České republice vhodné.

Parametry modelového vozidla jsou:

- nové vozidlo (rok výroby 2020 nebo novější),
- dvouvozová jednotka,
- kapacita min. 120 míst k sezení,
- maximální rychlost v elektrickém režimu min. 140 km/h (v bateriovém režimu min. 100 km/h).

Provozní koncept je pro každou vybranou lokalitu sestaven pouze rámcově bez vazby na reálné časové polohy současných spojů, jelikož tyto faktory nemají na vhodnost využití BEMU v tomto případě vliv. Zpracován je vždy v několika scénářích, pro které se liší interval mezi spoji na jednotlivých úsecích.

Vyhodnocení modelu probíhá v časových horizontech, které mají vazbu na hlavní milníky, z pohledu smluvního zajištění, životnosti vozidel a životnosti infrastruktury. Prvním horizontem pro vyhodnocení je 15 let, což je maximální standardní doba trvání smlouvy o závazku veřejné služby (viz kapitola 3.6.1). Dalším horizontem je 30 let, což je standardní doba životnosti železničních vozidel. A posledním horizontem je 60 let, což je odhadovaná doba životnosti nové infrastruktury.

Vnímání důležitosti těchto časových horizontů se liší dle účastníků procesu zajišťování železniční dopravy. Objednatelé obvykle hledí na zajištění co nejvýhodnějšího provozu po období trvání smlouvy, dopravci chtějí maximalizovat svůj užitek po dobu životnosti vozidel, zatímco správce infrastruktury požaduje efektivní využívání infrastruktury po celou dobu její životnosti. Z pohledu provozování železniční dopravy na úrovni státu a celospolečenských přínosů je žádoucí nahlížet na vyhodnocení v co nejdelším časovém horizontu.

Do modelu vstupují dvě základní proměnné, kterými jsou:

- počet potřebných vozidel,
- dopravní výkon za rok.

Hodnoty proměnných jsou určeny vždy dle konkrétního scénáře provozního konceptu. Suma hodnot proměnné je v rámci scénáře obvykle shodná pro všechny porovnávané druhy trakce (pokud není uvedeno jinak), ale může se lišit podíl jejich rozdělení v případě využití varianty kombinující více trakcí v rámci jednoho scénáře.

Pro každý druh pohonu byla určena výše investičních nákladů na pořízení vozidel a výše provozních nákladů souvisejících s provozem těchto vozidel. Jedná se o rámcové kalkulace, které se mohou měnit v závislosti na konkrétních podmínkách (využitá vozidla, provozní koncept, doba zahájení provozu apod.).

V modelu jsou kalkulovány pouze takové náklady, které jsou závislé na druhu pohonu (viz kapitola 3.5.2.1). Náklady na přímý materiál jsou zahrnuty jako součást údržby. Náklady, které s použitou trakcí přímo nesouvisí a jejich výše tak výsledný rozdíl neovlivní, jsou v modelu přičteny jako konstanta. Tato konstanta zahrnuje náklady na personál, poplatky za použití infrastruktury (všechna vozidla spadají do stejného hmotnostního intervalu dle Prohlášení o dráze), režijní náklady a další nákladové položky. Výše této konstanty je určena jako odhad průměrné hodnoty pro obdobný provozní soubor a je uvedena vždy u konkrétního modelu pro jednotlivé dílčí scénáře.

Nákladovými položkami vozidel pro model jsou:

- Investiční náklady
 - Náklady na pořízení vozidel
- Provozní náklady
 - Náklady na energie
 - Náklady na údržbu vozidel
 - Náklady na výměnu baterií

Hodnoty vstupů do modelu jsou určeny v cenové hladině roku 2019 s přihlédnutím k očekávanému vývoji do dalších let a jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 Vstupní náklady vozidel pro model

Nákladová položka	DMU	EMU	BEMU
Náklady na pořízení vozidel	110 000 000 Kč	130 000 000 Kč	160 000 000 Kč /ks
Náklady na energie	29,0 Kč	12,0 Kč	13,5 Kč /km
Náklady na údržbu vozidel	19,0 Kč	15,0 Kč	15,0 Kč /km
Náklady na výměnu baterií	0 Kč	0 Kč	15 000 000 Kč /15 let

Investiční náklady jsou určeny jako součin počtu potřebných vozidel a nákladů na pořízení jednoho vozidla s životností 30 let. K nákladům na pořízení vozidel je pro část investice, která přesahuje výši investičně nejméně nákladné varianty, připočítána i suma nákladů na financování, při uvažované průměrné roční úrokové míře 3 %. Tyto finanční náklady však na rozdíl od ostatních investičních nákladů vstupují do modelu průběžně po celou dobu životnosti vozidel (dle pravidel úročení). Provozní náklady jsou určeny jako součin ujetých vlkm ročně a jednotkových nákladů na energie a údržbu na 1 vlkm. V případě BEMU jsou navíc započítány i náklady na výměnu bateriového modulu, která probíhá po 15 letech provozu.

V případě nutnosti výstavby nové infrastruktury jsou připočítány i dodatečné náklady na elektrizaci potřebného traťového úseku a náklady na údržbu těchto nových zařízení. Infrastrukturní náklady na výstavbu a údržbu jsou určeny jako náklady na výstavbu trolejového vedení včetně souvisejících technologií a dalších stavebních úprav na traťovém úseku pro umožnění provozu EMU, případně BEMU. Tyto hodnoty nemusí odpovídat reálným nákladům, které se obvykle při elektrizacích traťových úseků udávají, protože v rámci těchto akcí zpravidla probíhají i další úpravy železniční infrastruktury (železniční svršek, úpravy stanic apod.). Jedná se pouze o poměrnou část nákladů přímo související s možností provozovat vozidla v elektrické trakci (trať musí být udržována a modernizována, i kdyby elektrizována nebyla). Pokud je nutná výstavba nové trakční transformovny (TT), jsou pak k nákladům připočítány i tyto jednorázové náklady.

Nákladovými položkami infrastruktury pro model jsou:

- Infrastrukturní náklady
 - Náklady na výstavbu nové infrastruktury
 - Náklady na údržbu nové infrastruktury

Hodnoty uvažovaných nákladů na výstavbu infrastruktury jsou uvedeny v tabulce 10. Do modelu jsou tyto náklady započítávány u variant, které tuto infrastrukturu ke svému provozu nezbytně vyžadují.

Tabulka 10 Vstupní náklady na výstavbu infrastruktury pro model

Elektrizace traťového úseku	25 000 000 Kč /km
Výstavba nové TT	250 000 000 Kč /ks
Údržba trakčního vedení	200 000 Kč /km ročně

Veškeré nákladové položky modelu jsou upraveny oproti výchozí cenové hladině o kumulovanou inflaci ve výši 1,5 % ročně. Model tak vždy počítá v cenách daného roku. Vstupní hodnoty do modelu jsou založeny na dostupných zdrojích uvedených v této práci a na odborném odhadu autora ve spolupráci se zástupci objednatelů železniční dopravy, zástupci železničních dopravců a zástupci výrobců železničních vozidel. Veškeré výpočty modelu byly provedeny v tabulkovém procesoru Microsoft Excel.

Vybrané modelové trasy slouží jako ukázka využití BEMU na příkladech konkrétních tratí. Získané závěry jsou však přenosné na jakoukoliv trasu s obdobnými parametry. Jedná se o kalkulaci pouze výše zmíněných nákladových položek, nejsou započítány náklady spojené s externalitami (úspora emisí, času), případně s úsporami v dalších oblastech provozu (údržbové zázemí, personál apod.)

4.2 Současná infrastruktura (model „Vysočina“)

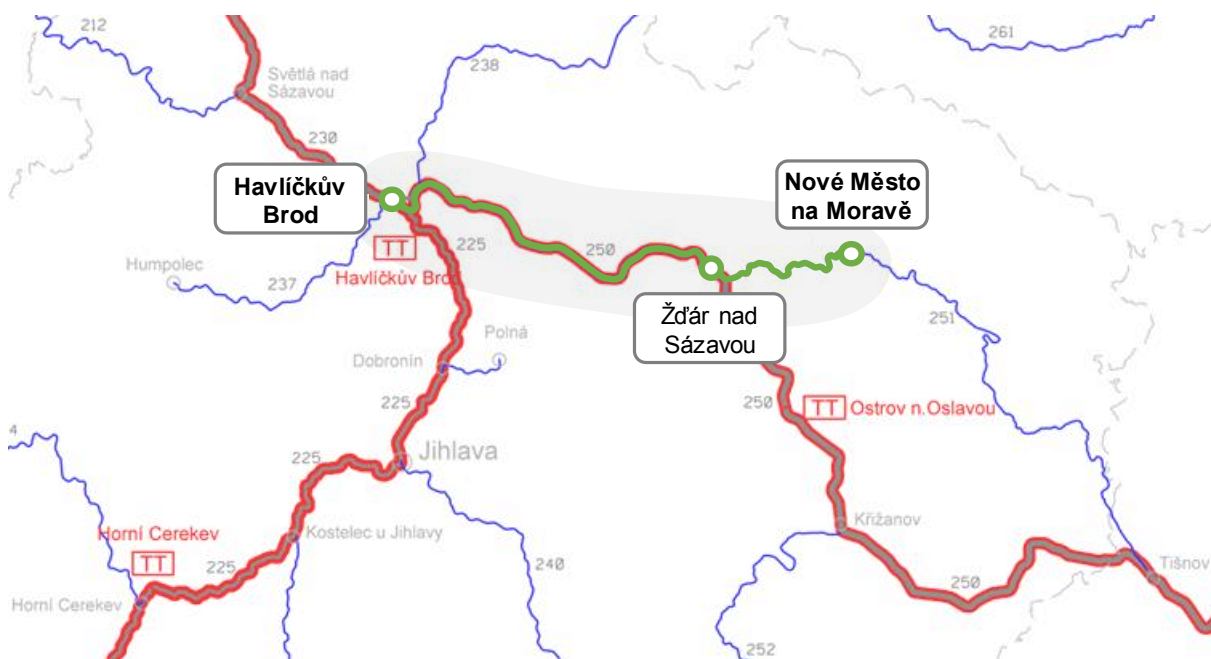
Tento modelový příklad je založen na předpokladu, že trasa je již v současném stavu vhodná k provozování BEMU a k zahájení jejich provozu tak není nutné zásadních investic do infrastruktury.

4.2.1 Popis lokality „Vysočina“

Lokalita severní části kraje Vysočina byla vybrána z důvodu vhodného současného stavu infrastruktury k ukázce možnosti provozování BEMU bez nutnosti elektrizace.

Jedná se o území na hranici Čech a Moravy v bývalých okresech Havlíčkův Brod a Žďár nad Sázavou. Územím prochází elektrizovaná (AC 25 kV) dvojkolejná trať spojující pražskou a brněnskou aglomeraci s krajem Vysočina. Tato trať je v úseku Kolín – Havlíčkův Brod označena dle KJŘ jako trať 230 a v úseku Havlíčkův Brod – Brno jako trať 250. Trať je využívána rychlíkovou linkou R9 (objednávka MDČR) v současné době provozovanou dopravcem České dráhy. Pro zvolenou modelovou trasu je podstatná odbočná trať 256 (do roku 2019 trať 251) ze Žďáru nad Sázavou do Tišnova přes Nové Město na Moravě. Jedná se o neelektrizovanou jednokolejnou regionální trať bez provozu vlaků dálkové dopravy. Veškerou osobní železniční dopravu v oblasti zajišťují rovněž ČD.

Trasa pro model „Vysočina“ je na obrázku 28 vyznačena světle zelenou čarou, červeně je zvýrazněna současná elektrizace AC 25 kV.



Obrázek 28 Schématická mapa trasy pro model „Vysočina“ [autor s využitím 85]

Alternativně je možné protažení spojů skrze Havlíčkův Brod do Světlé nad Sázavou a dále do Ledče nad Sázavou (na trať 212) a vytvoření tak severního tangenciálního železničního spojení kraje Vysočina. Obě části této trasy mohou být provozovány odděleně, a to v závislosti na konkrétním provozním konceptu. Toto prodloužení by pomohlo dosáhnout úspor z rozsahu.

4.2.2 Provozní aspekty modelu „Vysočina“

V modelovém příkladu „Vysočina“ je uvažováno s provozem vlaků regionální osobní dopravy na trase Havlíčkův Brod – Žďár nad Sázavou – Nové Město na Moravě. Parametry současné infrastruktury jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 Parametry infrastruktury pro model „Vysočina“

Trat'	Úsek	Počet zastavení na úseku	Délka úseku	Elektrizováno
250	Havlíčkův Brod – Žďár nad Sázavou	9	33 km	33 km
256	Žďár nad Sázavou – Nové Město na Moravě	3	14 km	0 km
Celkem:			47 km	33 km

Pro provoz DMU nejsou nutné žádné úpravy infrastruktury, jsou zde provozovány již v současném stavu. Stejně tak pro provoz BEMU není nutné zásadních investic do infrastruktury. Pouze pro možnost provozu EMU je nutné vybudování napájecí infrastruktury v úseku Žďár na Sázavou – Nové Město na Moravě (14 km). Při úvaze využití stávající trakční

transformovny v Ostrově nad Oslavou je pravděpodobné, že by elektrizace spočívala pouze v instalaci trolejového vedení a souvisejících zařízení.

Provozní koncept je zpracován v intervalech 30, 60 a 120 minut. Jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 12. Scénáře jsou označeny dle délky intervalu pro lepší názornost. Z hlediska modelu nákladů je klíčový průměrný průběh na vozidlo, který se při kratším intervalu dá předpokládat vyšší.

Tabulka 12 Parametry provozního konceptu pro model „Vysočina“

Scénář	Interval	Počet vozidel	Roční dopravní výkon	Roční proběh na vozidlo	Denní proběh na vozidlo
a)	30 minut	6	1 097 920 vlkm	182 987 km	ø 501 km
b)	60 minut	4	548 960 vlkm	137 240 km	ø 376 km
c)	120 minut	3	274 480 vlkm	91 493 km	ø 251 km

Jednotlivé scénáře se liší intervalem mezi spoji, který má vliv na počet potřebných vozidel a na hodnoty dopravního výkonu. V počtu vozidel jsou zahrnuta i vozidla provozní zálohy. Zvolený provozní koncept uvažuje s provozem všech spojů v celé trase v období dne mezi 6. a 22. hodinou. Přesné časové polohy spojů nejsou pro potřeby modelu relevantní.

4.2.3 Model nákladů „Vysočina“

Model „Vysočina“ porovnává investiční a provozní náklady DMU, EMU a BEMU a je založen na vstupních údajích dle scénářů provozního konceptu z tabulky 12. Mezi proměnné modelu patří počet potřebných vozidel a celkový roční dopravní výkon. Náklady v modelu vycházejí z předpokladů uvedených v kapitole 4.1 a jsou k nim připočítány náklady nezávislé na trakci ve výši uvedené pro jednotlivé scénáře v tabulce 13.

Tabulka 13 Vstupní náklady nezávislé na trakci pro model „Vysočina“

Nákladová položka pro scénář	a) Interval 30 minut	b) Interval 60 minut	c) Interval 120 minut
Náklady nezávislé na trakci	65 Kč	70 Kč	75 Kč /km

4.2.3.1 Scénář a) Interval 30 minut

Prvním porovnávaným scénářem modelu „Vysočina“ je provoz v celodenním 30minutovém intervalu, který odpovídá vysoké poptávce po přepravě, která bývá obvyklá například v aglomeracích velkých měst. Při 30minutovém intervalu je v tomto modelovém příkladu potřeba 6 vozidel pro všechny druhy trakce. Celkový roční dopravní výkon přesahuje 1 mil. vlkm. Hodnoty nákladů pro 30minutový interval modelu „Vysočina“ jsou uvedeny v tabulce 14.

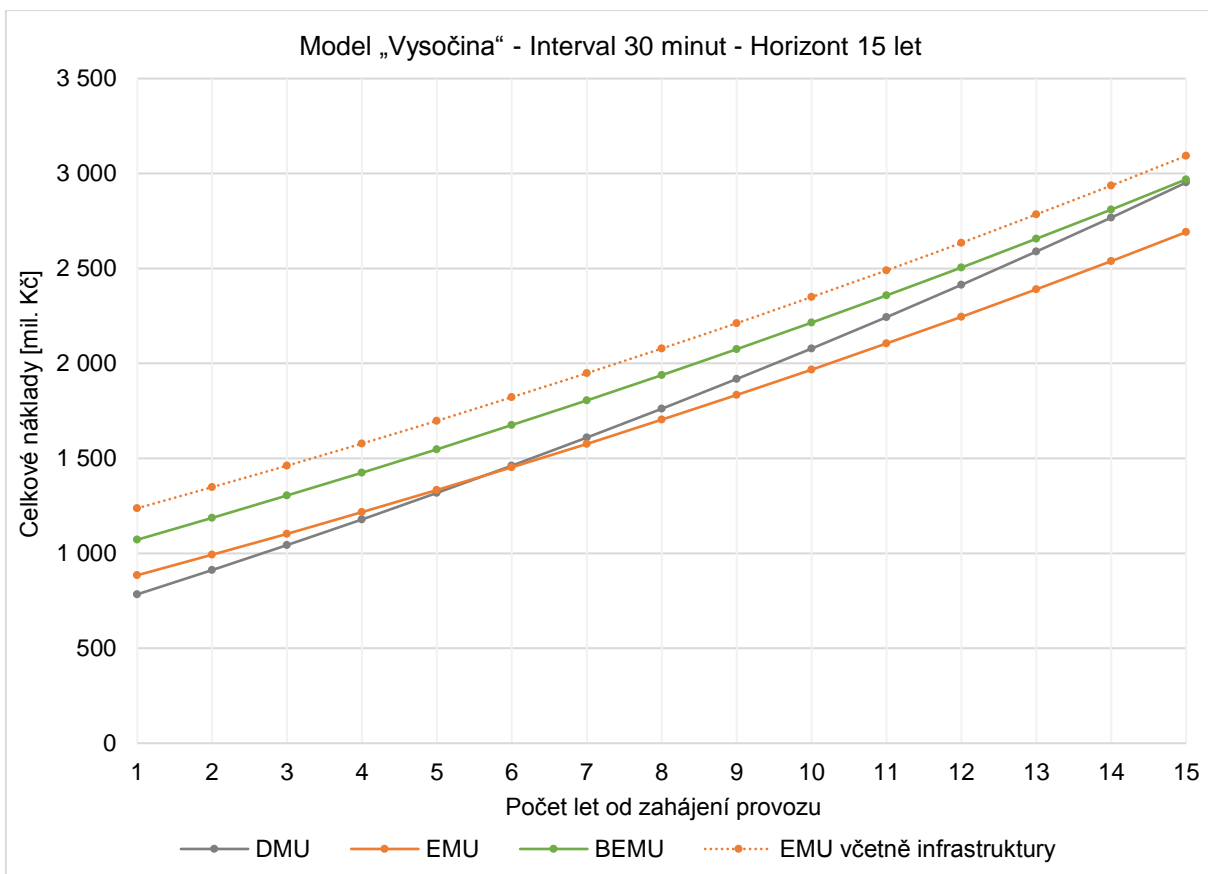
Tabulka 14 Položky nákladů modelu „Vysočina“ pro 30minutový interval

Položka modelu	Interval vynaložení	DMU	EMU	BEMU
Náklady na pořízení vozidel	30 let	660 000 000 Kč	843 669 334 Kč	1 119 173 334 Kč
Náklady na energie	1 rok	31 839 680 Kč	13 175 040 Kč	14 821 920 Kč
Náklady na údržbu vozidel	1 rok	20 860 480 Kč	16 468 800 Kč	16 468 800 Kč
Náklady na výměnu baterií	15 let	0 Kč	0 Kč	90 000 000 Kč
Náklady na výstavbu nové infrastruktury	60 let	0 Kč	350 000 000 Kč	0 Kč
Náklady na údržbu nové infrastruktury	1 rok	0 Kč	2 800 000 Kč	0 Kč
Náklady nezávislé na trakci	1 rok	71 364 800 Kč	71 364 800 Kč	71 364 800 Kč

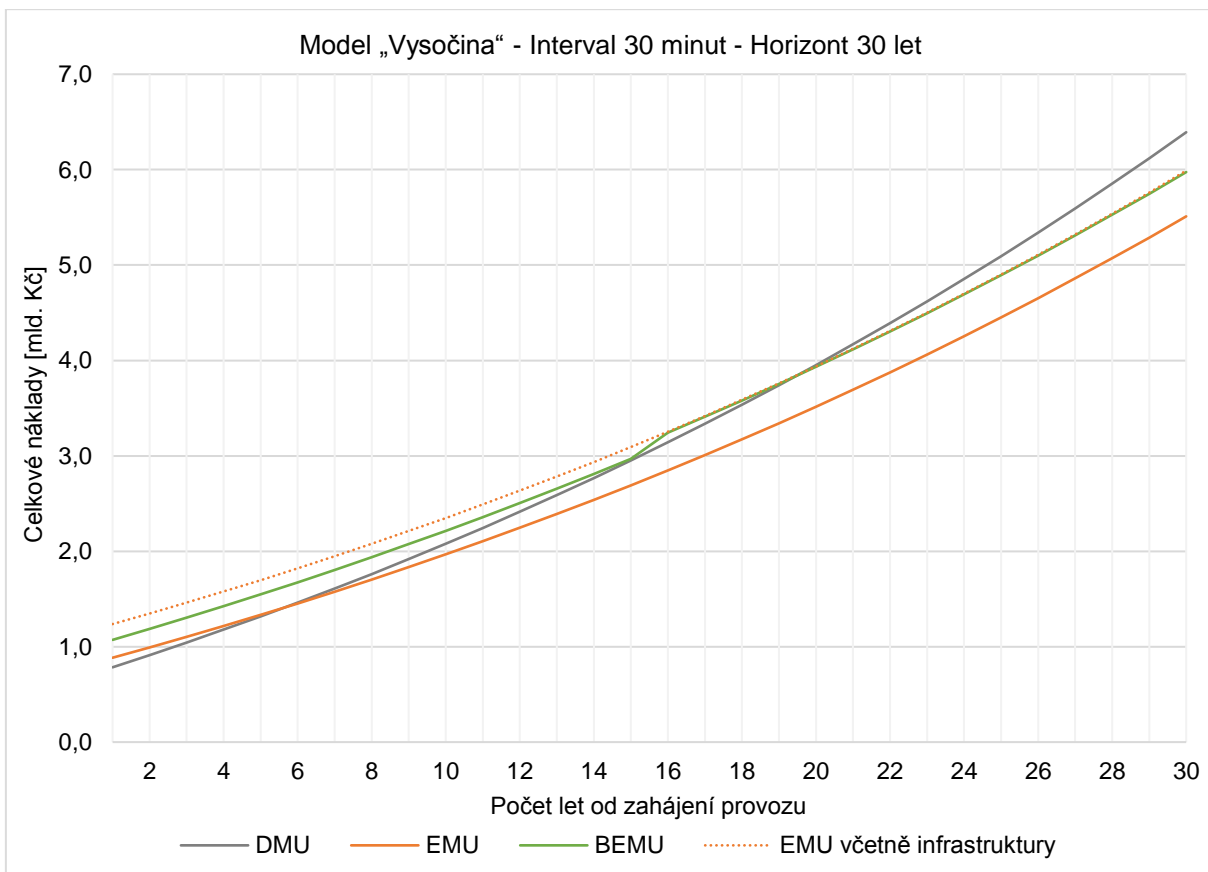
Při modelování nákladů v horizontu 15 let (nejvyšší standardní doba trvání smlouvy v závazkové dopravě), uvedeném v grafu 8, se jako nejvýhodnější se jeví využití EMU, které ale při započítání infrastrukturních nákladů vycházejí v tomto časovém horizontu nejnákladněji. Jednotky BEMU i přes vysoké investiční náklady díky příznivým provozním nákladům téměř vyrovnají náklady DMU. Z toho vyplývá, že při intenzivním provozu a relativně vysokých probězích vozidel (přibližně 500 km na vozidlo denně), je možné za dobu trvání smlouvy o závazku veřejné služby pro BEMU náklady na provoz DMU téměř dorovnat.

Z modelu s časovým horizontem 30 let (doba životnosti vozidel), uvedeném v grafu 9, je zřejmé, že náklady BEMU kolísají v souvislosti s nutnou výměnou bateriových článků v 15. roce provozu z důvodu konce jejich životnosti, a ve 20. roce provozu dochází k vyrovnání kumulovaných nákladů BEMU a DMU. Od tohoto bodu je výhodnější využití BEMU a v celkovém horizontu 30 let vyznívá nákladová stránka pro využití BEMU s rozdílem přibližně 6,53 % (417 mil. Kč) oproti DMU. V tomto horizontu je oproti DMU výhodnější provoz EMU i se započítáním výstavby napájecí infrastruktury, který téměř vyrovnává nákladovou úroveň BEMU.

Model nákladů je zpracován i v horizontu 60 let (doba životnosti infrastruktury), ve kterém roste výhodnost využití BEMU, ale především se jako výhodná jeví elektrizace trati a následný provoz EMU. Elektrizace trati a následný provoz EMU se stává nejvýhodnější od 31. roku po zahájení provozu, kdy dochází k obnově vozidel z důvodu konce jejich životnosti. Kumulované náklady na provoz DMU jsou v tomto časovém horizontu nejvyšší. Tento model je uveden v příloze 2 této práce (graf 20).



Graf 8 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 30minutový interval v horizontu 15 let



Graf 9 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 30minutový interval v horizontu 30 let

4.2.3.2 Scénář b) Interval 60 minut

Dalším porovnávaným scénářem modelu „Vysočina“ je provoz v celodenním 60minutovém intervalu, který odpovídá středně vysoké poptávce po přepravě, která bývá obvyklá v okolí krajských měst či pro páteční regionální spojení. Při 60minutovém intervalu jsou v tomto modelovém příkladu potřeba 4 vozidla. Celkový roční dopravní výkon dosahuje téměř 550 tis. vlkm. Hodnoty nákladů pro 60minutový interval jsou uvedeny v tabulce 15.

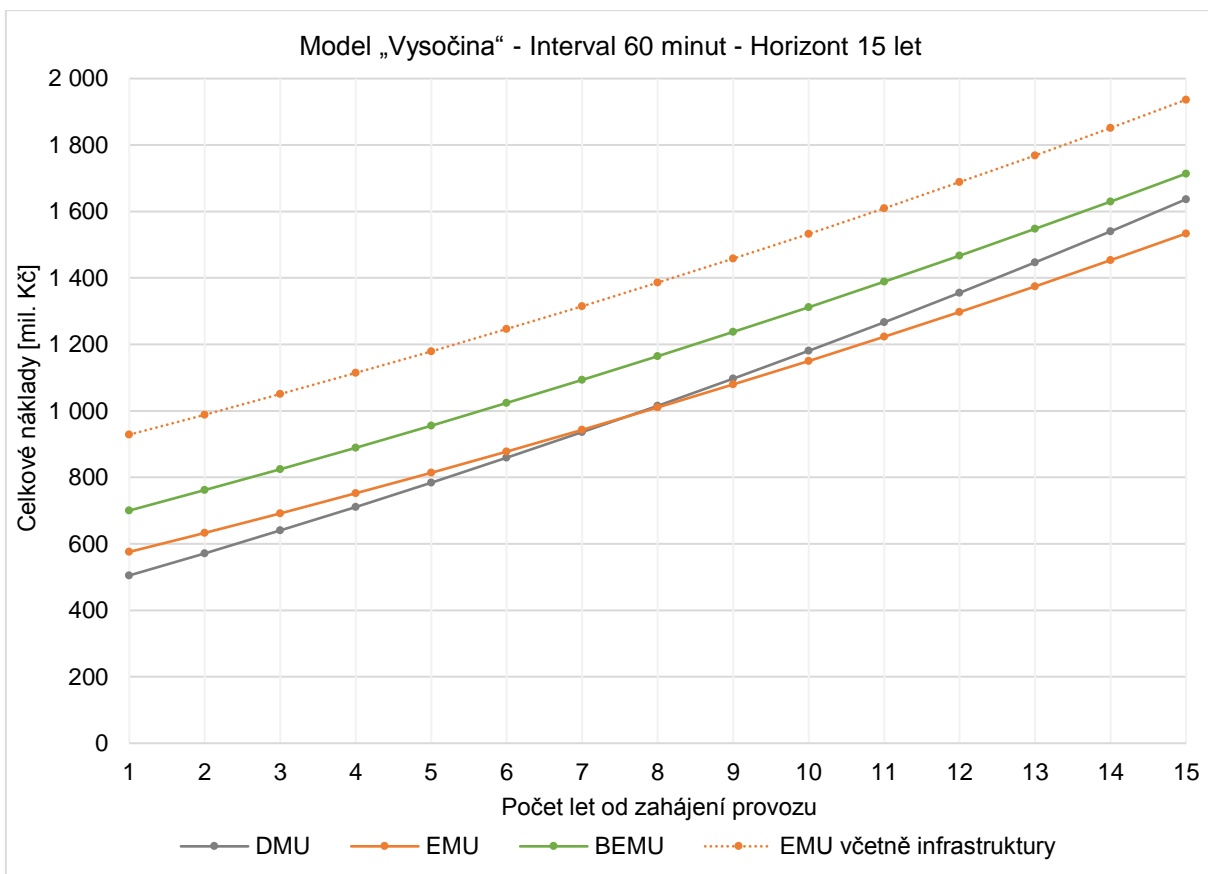
Tabulka 15 Položky nákladů modelu „Vysočina“ pro 60minutový interval

Položka modelu	Interval vynaložení	DMU	EMU	BEMU
Náklady na pořízení vozidel	30 let	440 000 000 Kč	562 446 222 Kč	746 115 556 Kč
Náklady na energie	1 rok	15 919 840 Kč	6 587 520 Kč	7 410 960 Kč
Náklady na údržbu vozidel	1 rok	10 430 240 Kč	8 234 400 Kč	8 234 400 Kč
Náklady na výměnu baterií	15 let	0 Kč	0 Kč	60 000 000 Kč
Náklady na výstavbu nové infrastruktury	60 let	0 Kč	350 000 000 Kč	0 Kč
Náklady na údržbu nové infrastruktury	1 rok	0 Kč	2 800 000 Kč	0 Kč
Náklady nezávislé na trakci	1 rok	38 427 200 Kč	38 427 200 Kč	38 427 200 Kč

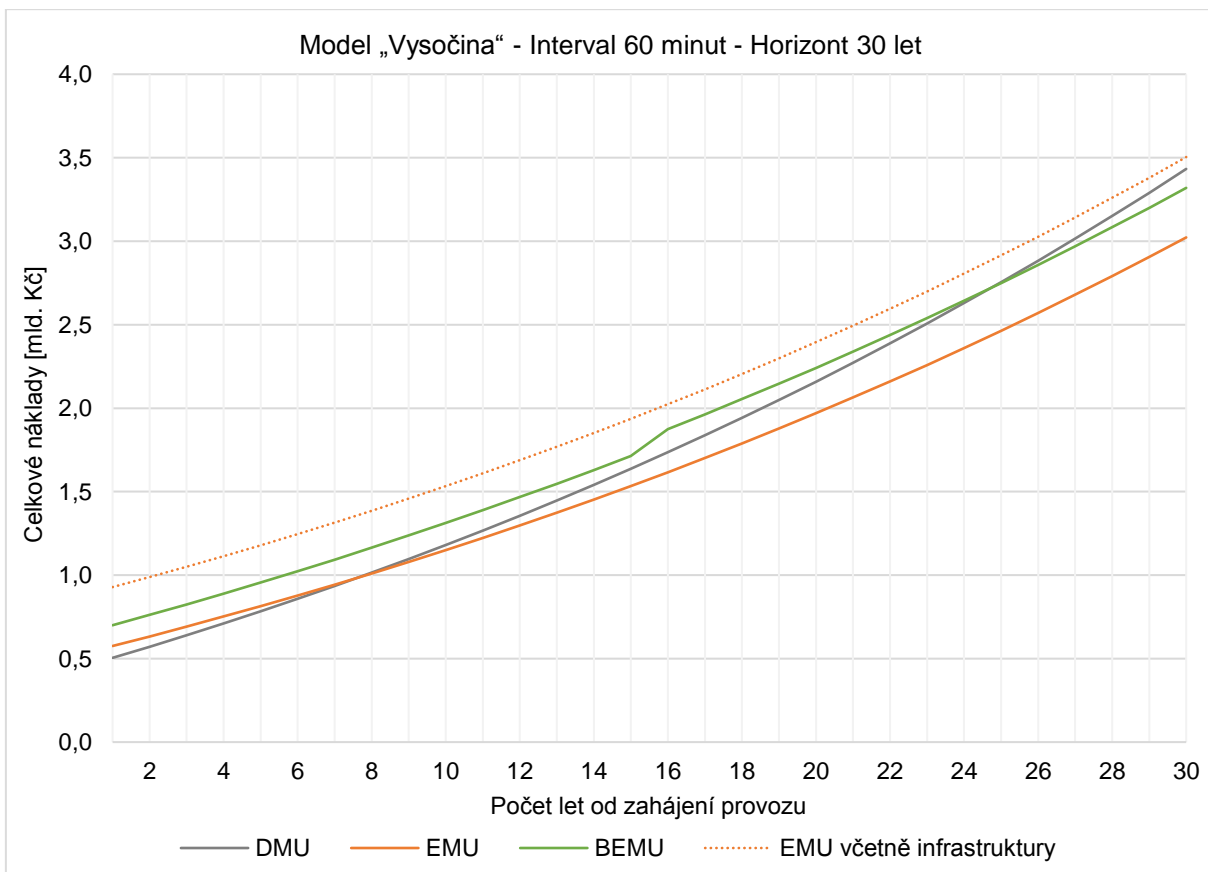
Při modelování nákladů v horizontu 15 let, uvedeném v grafu 10, je zřejmé, že není dosaženo ekonomické výhodnosti BEMU oproti využití DMU, přičemž rozdíl v nákladech je díky nižšímu proběhu vozidel vyšší než v prvním scénáři. Nejvýhodnějším se jeví využití EMU, které ale při započítání infrastrukturních nákladů vycházejí v tomto časovém horizontu opět nejnákladněji. Z toho je zřejmé, že při obvyklém provozu páteřních regionálních spojení s celodenním intervalem 60 minut (při průměrném proběhu cca 380 km na vozidlo denně) není za dobu trvání standardní smlouvy o závazku veřejné služby dosaženo ekonomických benefitů využití BEMU.

Z modelu s časovým horizontem 30 let, uvedeném v grafu 11, je zřejmé, že v tomto případě dochází k vyrovnání kumulovaných nákladů BEMU a DMU ve 25. roce provozu a od tohoto bodu je výhodnější využití BEMU. V horizontu 30 let je rozdíl přibližně 3,30 % (113 mil. Kč) ve prospěch BEMU oproti DMU. Náklady EMU jsou v tomto horizontu nejnižší, ale ekonomické přínosy nejsou dostatečné, aby dokázaly vyrovnat investiční náklady na elektrizaci trati.

Model nákladů v horizontu 60 let vykresluje výhodnost využití BEMU v delším časovém horizontu, kdy má BEMU oproti DMU náklady již výrazněji nižší. V tomto časové horizontu se také elektrizace trati a následný provoz EMU vyrovnává provozu BEMU a na konci období je mírně výhodnější. Tento model je uveden v příloze 2 této práce (graf 21).



Graf 10 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 60minutový interval v horizontu 15 let



Graf 11 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 60minutový interval v horizontu 30 let

4.2.3.3 Scénář c) Interval 120 minut

Posledním scénářem modelu „Vysočina“ je provoz v celodenním 120minutovém intervalu, který odpovídá nižší poptávce po přepravě, která bývá obvyklá pro běžná regionální spojení. Při 120minutovém intervalu jsou v tomto modelovém příkladu potřeba 3 vozidla pro všechny druhy trakce. Celkový roční dopravní výkon dosahuje přibližně 275 tis. vlkm. Hodnoty nákladů pro 120minutový interval modelu „Vysočina“ jsou uvedeny v tabulce 16.

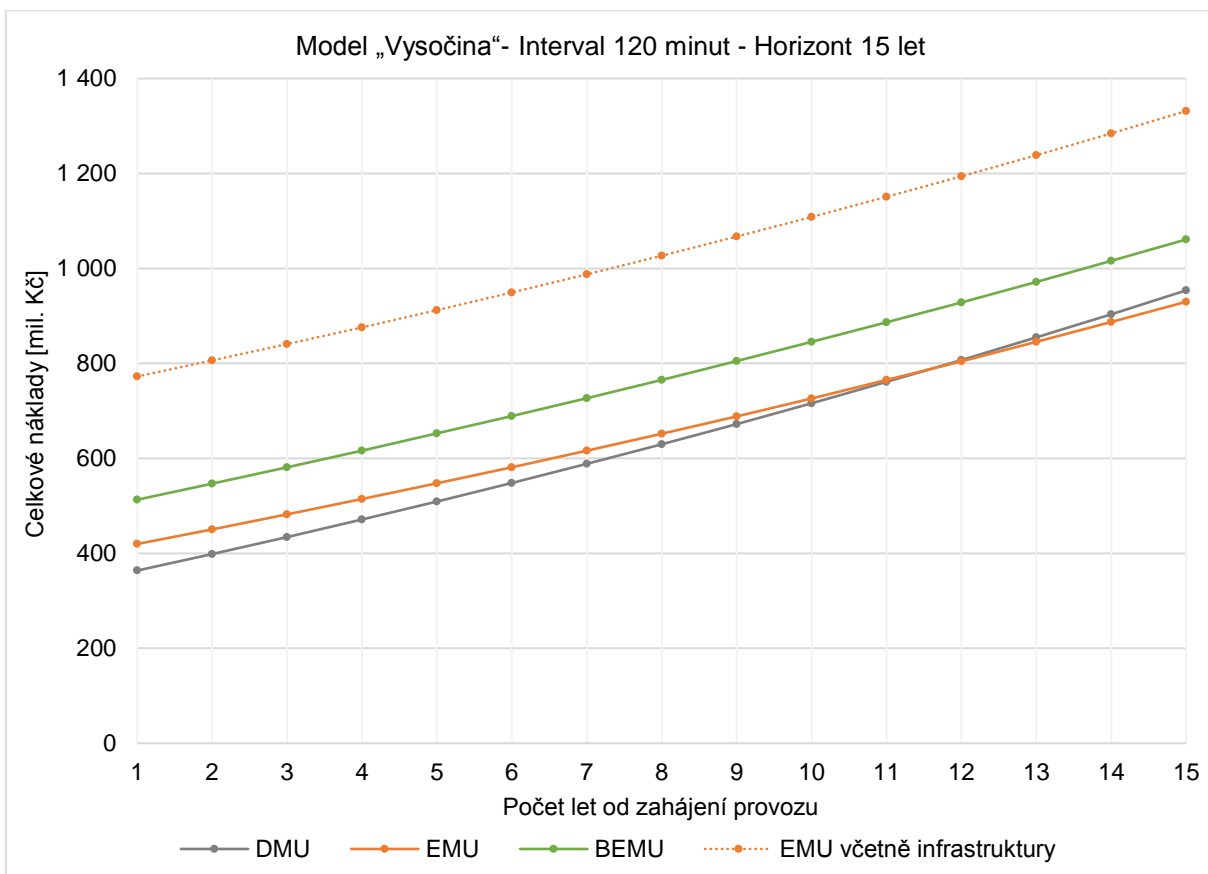
Tabulka 16 Položky nákladů modelu „Vysočina“ pro 120minutový interval

Položka modelu	Interval vynaložení	DMU	EMU	BEMU
Náklady na pořízení vozidel	30 let	330 000 000 Kč	421 834 667 Kč	559 586 667 Kč
Náklady na energie	1 rok	7 959 920 Kč	3 293 760 Kč	3 705 480 Kč
Náklady na údržbu vozidel	1 rok	5 215 120 Kč	4 117 200 Kč	4 117 200 Kč
Náklady na výměnu baterií	15 let	0 Kč	0 Kč	45 000 000 Kč
Náklady na výstavbu nové infrastruktury	60 let	0 Kč	350 000 000 Kč	0 Kč
Náklady na údržbu nové infrastruktury	1 rok	0 Kč	2 800 000 Kč	0 Kč
Náklady nezávislé na trakci	1 rok	20 586 000 Kč	20 586 000 Kč	20 586 000 Kč

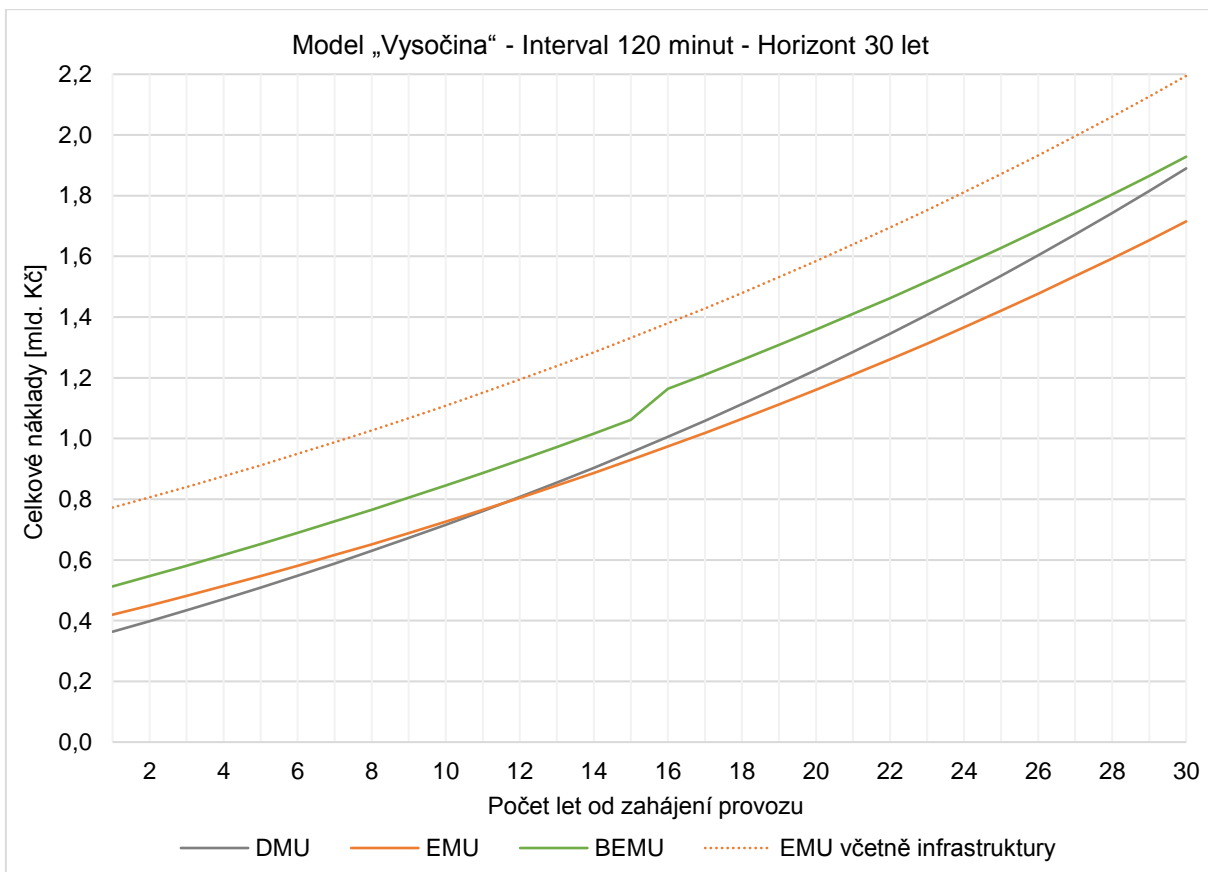
Při modelování nákladů v horizontu 15 let, uvedeném v grafu 12, je zřejmý rozdíl v nákladech, kdy BEMU převyšují nákladovou úroveň DMU. Mírně nejvýhodnější se jeví využití EMU, které ale při započítání infrastrukturních nákladů vycházejí v tomto časovém horizontu s velkým odstupem nejnákladněji. Z toho vyplývá, že při obvyklém provozu na regionálních spojení s celodenním intervalem 120minut a nízkým proběhem vozidel (cca 250 km na vozidlo denně) není za dobu trvání standardní smlouvy o závazku veřejné služby dosaženo ekonomických benefitů využití BEMU.

Z modelu s časovým horizontem 30 let, uvedeném v grafu 13, je zřejmé, že k vyrovnání nákladů BEMU a DMU nedochází, ale pouze se přibližují. V horizontu 30 let je rozdíl přibližně 2,04 % (39 mil. Kč) ve prospěch DMU oproti BEMU. Náklady EMU jsou i v tomto horizontu stále nejnižší, ale náklady na elektrizaci tento rozdíl zdaleka převyšují.

Model nákladů v horizontu 60 let, ukazuje trend vyššího rozdílu nákladů BEMU a DMU, který se ale postupně snižuje a na konci období se kumulované náklady BEMU dostávají těsně pod úroveň DMU. Vzhledem k délce tohoto horizontu jsou kumulované náklady na konci období v podstatě totožné. Elektrizace trati se při tomto scénáři nejeví jako výhodná s relativně vysokým rozdílem z důvodu nejnižšího dopravního výkonu z uvažovaných scénářů. Tento model je uveden v příloze 2 této práce (graf 22).



Graf 12 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 120minutový interval v horizontu 15 let



Graf 13 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 120minutový interval v horizontu 30 let

4.2.4 Vyhodnocení modelu „Vysočina“

Na modelovém příkladu „Vysočina“ je znázorněn průběh nákladů pro vozidla DMU, EMU a BEMU. V případě EMU je navíc kalkulována i varianta se započítáním nákladů na elektrizaci traťového úseku pro umožnění jejich provozu na dané trase. Jako modelová trasa byla vybrána relace Havlíčkův Brod – Žďár nad Sázavou – Nové Město na Moravě v kraji Vysočina, která je již v současném stavu vhodná pro provozování BEMU.

Model je zpracován ve třech scénářích, které se liší intervalem mezi spoji. Z tohoto modelu vyplývá, že při zkracujícím se intervalu mezi spoji a zároveň i zvyšujícím se denním proběhu vozidel, se zvyšuje ekonomická výhodnost provozování BEMU. BEMU se totiž oproti DMU vyznačují vyšší pořizovací cenou, ale nižšími provozními náklady, kdy s mírou intenzity využívání vozidla roste jeho nákladová efektivita.

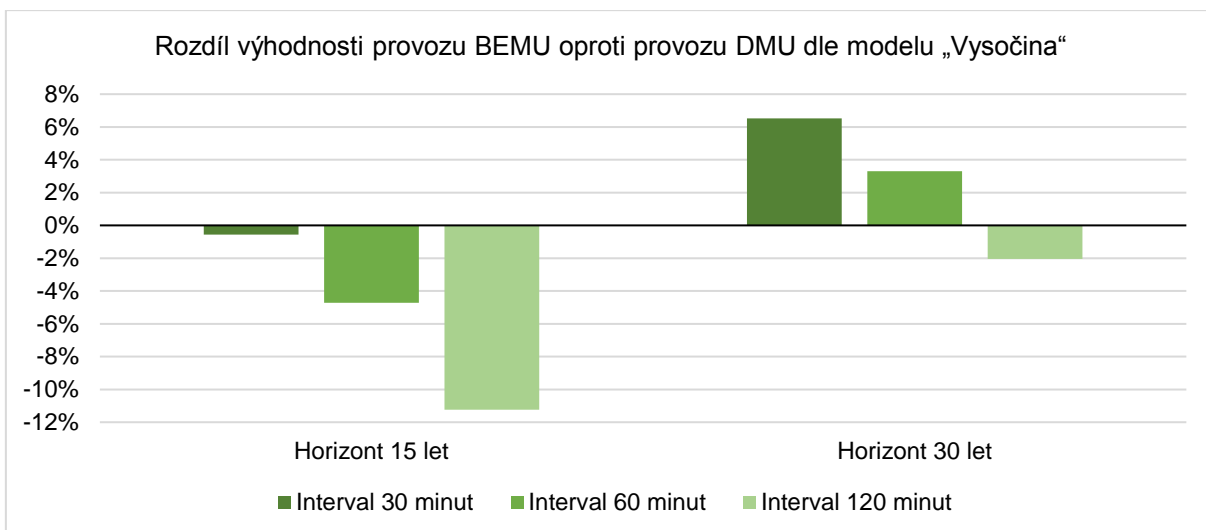
V modelu tedy BEMU nejlépe obstály při intervalu 30 minut, kdy mají oproti DMU za dobu svojí životnosti náklady nižší přibližně o 6,53 %. Při intervalu 60 minut je pak rozdíl nižší, ale BEMU vycházejí stále o přibližně 3,30 % výhodněji. Při intervalu 120 minut pak vycházejí výhodněji DMU s rozdílem 2,04 % oproti BEMU. To je způsobeno především nízkým denním proběhem v tomto modelovém scénáři, kdy jsou vozidla s vysokými investičními náklady značně znevýhodněna.

Porovnání nákladů probíhalo v časových horizontech 15 let, 30 let a 60 let. Z provozního hlediska jsou důležité především horizonty 15 let a 30 let, horizont 60 let je relevantní při ohledu na výstavbu nové infrastruktury. Porovnání výsledných rozdílových hodnot mezi DMU a BEMU v prvních dvou horizontech je uvedeno v tabulce 17. Záporná hodnota značí nižší náklady pro DMU, kladná hodnota pak značí nižší náklady při využití BEMU.

Tabulka 17 Výsledné rozdílové hodnoty nákladů DMU a BEMU dle modelu „Vysočina“

Horizont	a) Interval 30 minut	b) Interval 60 minut	c) Interval 120 minut
15 let	-16 738 043 Kč (-0,57 %)	-77 086 696 Kč (-4,71 %)	-107 261 023 Kč (-11,25 %)
30 let	417 409 392 Kč (6,53 %)	113 422 326 Kč (3,30 %)	-38 571 207 Kč (-2,04 %)

Rozdílové hodnoty kumulovaných nákladů provozu BEMU oproti provozu DMU dle časového horizontu a intervalu jsou zobrazeny v grafu 14. Kladné hodnoty značí výhodnost BEMU, záporné hodnoty pak znamenají výhodnost provozu v dieselové trakci.



Graf 14 Rozdíl výhodnosti provozu BEMU oproti provozu DMU dle modelu „Vysočina“

Nelze také opomenout, že provozně nejvýhodněji vychází využití EMU, u kterých je ale nutné zohlednit i náklady na elektrizaci trati. S připočtením těchto nákladů je využití EMU nejvýhodnější při intervalech 30 minut a 60 minut v horizontu 30 a více let. V horizontu 60 let při intervalu 30 minut vycházejí EMU se započítáním infrastrukturních nákladů výhodněji oproti DMU s rozdílem přibližně 2,1 mld. Kč, což více než dvojnásobně převyšuje dodatečné náklady na elektrizaci traťového úseku při zohlednění průměrné 1,5% inflace za období.

Lze z toho tedy odvodit, že při intervalu 30 minut a nižším je na obdobné relaci vhodná spíše elektrizace tratě, a naopak při intervalu vyšším než 120 minut je výhodnější v tuto chvíli ponechat na této relaci provoz v dieselové trakci. Pro využití BEMU na obdobné relaci se jako nejvýhodnější jeví provoz v intervalu 30–60 minut, tedy při průměrném proběhu vyšším než přibližně 300 km na vozidlo denně, tedy průměrný nájezd přibližně 110 000 km na vozidlo ročně.

4.3 Nová infrastruktura (model „Slovácko-Valašsko“)

V tomto modelovém příkladu je uvažováno s nutností výstavby nové infrastruktury, aby mohl být provoz BEMU umožněn. Trasu je nutné částečně elektrizovat, protože v současném stavu není možné BEMU z důvodu dlouhého neelektrizovaného úseku využít. Elektrizovaný úsek je navíc elektrizován výkonově nevhodnou soustavou DC 3 kV. V současné době však již probíhá příprava k přepnutí dotčených elektrizovaných úseků na jednotnou soustavu AC 25 kV a také je připravována studie proveditelnosti k elektrizaci další části trati. Oba projekty by v závislosti na vybrané variantě řešení mohly být hotovy do roku 2030, kdy by mohl být provoz BEMU nejpozději zahájen.

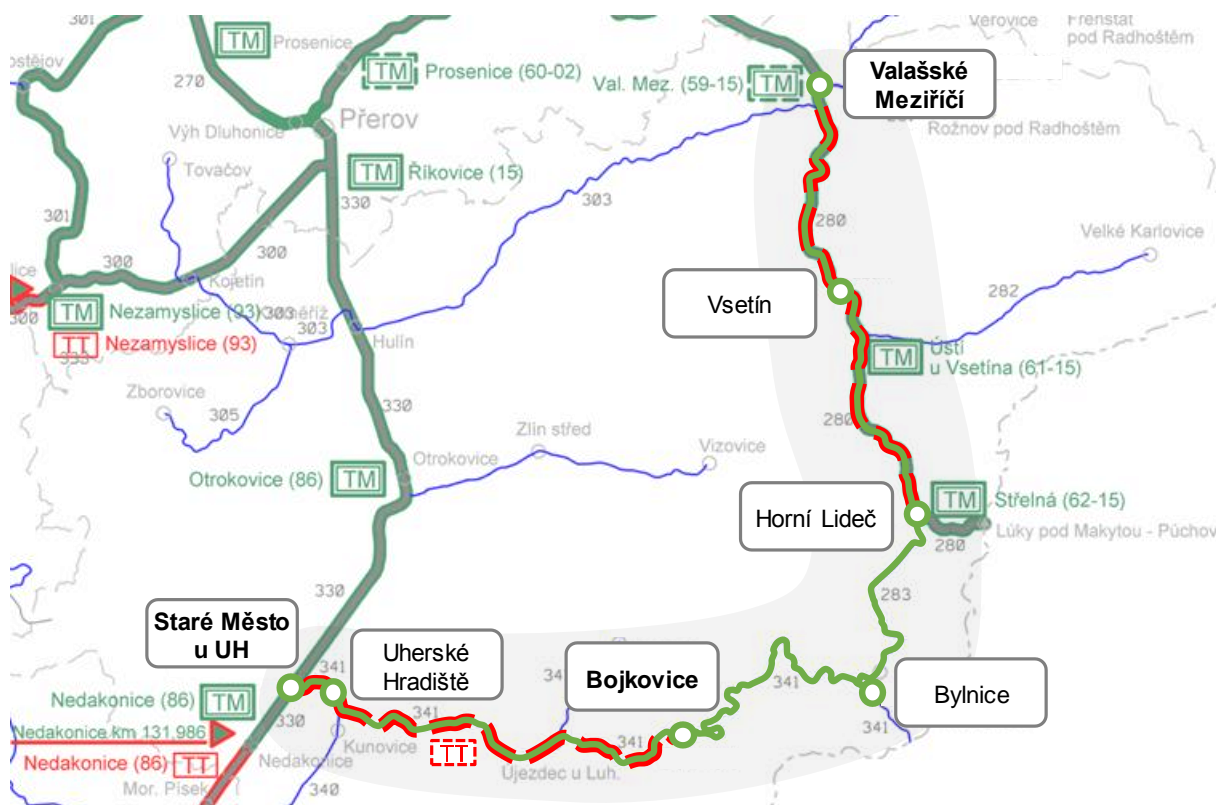
Jedná se tak o modelový příklad trasy, na které v současném stavu není provoz BEMU možný, ale jsou již podnikány reálné kroky k tomu, aby byl jejich provoz v dohledné době umožněn. Závěry tohoto modelu by pak mohly být aplikovány i na další lokality, kde bude k úpravám infrastruktury docházet (především ve spojitosti s konverzí na jednotnou napájecí soustavu).

4.3.1 Popis lokality „Slovácko-Valašsko“

Oblast Slovácka a Valaška ve Zlínském kraji při hranici se Slovenskem byla vybrána jako vhodná ukázka oblasti, kde by pomocí BEMU mohla být vhodně využita plánovaná infrastruktura.

Začátek navrhované trasy je v železniční stanici Staré Město u Uherského Hradiště, kde se z koridorové trati 330 (dle KJŘ) odpojuje jednokolejná neelektrizovaná trať 341 ve směru Uherské Hradiště a Bylnice. V Bylnici je pak napojena trať 280 (do roku 2019 trať 283) do Horní Lidče a dále pokračuje již dvojkolejná elektrizovaná trať 280 do Vsetína a Valašského Meziříčí. Při jízdě z Uherského Hradiště ve směru na Horní Lidče je v Bylnici nutná jízda úvratí. Trati 341 a 280 zajišťují spojení této příhraniční oblasti s lokálními centry Zlínského kraje a také zajišťují návazné spojení k vlakům dálkové dopravy. Mezi dotčené linky dálkové dopravy patří linka R18 (ta trať 341 využívá v úseku Staré Město – Újezdec u Luhačovic – Luhačovice), linka Ex2 ze Vsetína a Valašského Meziříčí ve směru Praha a Žilina, a také linky Ex4, R13 a komerční spoje ve stanici Staré Město u Uherského Hradiště. Dálkové linky Ex2, Ex4, R13 a R18 jsou v současnosti zajišťovány dopravcem České dráhy, komerční spoje do Prahy dopravcem Leo Express a komerční spoje mezi Prahou a Nitrou společností Arriva. Společnost Arriva rovněž zajišťuje regionální spoje v dieselové trakci v oblasti Slovácka a Valaška. Ostatní spoje v oblasti jsou pak provozovány Českými drahami.

Trasa pro model „Slovácko-Valašsko“ je na obrázku 29 vyznačena světle zelenou čarou, červeně je zvýrazněna současná (souvisle) a budoucí (přerušovaně) elektrizace AC 25 kV, tmavě zeleně je pak zvýrazněna současná elektrizace DC 3 kV.



Obrázek 29 Schématická mapa trasy pro model „Slovácko-Valašsko“ [autor s využitím 85]

4.3.2 Provozní aspekty modelu „Slovácko-Valašsko“

V tomto modelové příkladě je uvažováno s vedením osobních vlaků v trase Staré Město u Uherského Hradiště – Uherské Hradiště – Bylnice – Horní Lideč – Vsetín – Valašské Meziříčí. Současný stav infrastruktury je uveden v tabulce 18.

Tabulka 18 Parametry infrastruktury pro model „Slovácko-Valašsko“

Trať	Úsek	Počet zastavení na úseku	Délka úseku	Elektrizováno
341	Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice	11	35 km	0 km
341	Bojkovice – Bylnice	6	28 km	0 km
280	Bylnice – Horní Lideč	6	19 km	0 km
280	Horní Lideč – Valašské Meziříčí	9	37 km	37 km
Celkem:			119 km	37 km

Provozování DMU je možné již při současném stavu infrastruktury. Pro umožnění provozu BEMU by v souladu s aktuálními záměry měl být elektrizován úsek Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice (příp. až do zastávky Bojkovice město) na trati 341 (plánováno je včetně elektrizace úseku Újezdec u Luhačovic – Luhačovice pro provoz dálkové linky R18). Dále je pak nutná konverze současné napájecí soustavy na trati 280 na střídavou soustavu AC 25 kV,

kteřá je plánována v návaznosti na změnu napájecí soustavy na slovenském území. Po dokončení těchto úprav infrastruktury bude možné provozovat BEMU v navržené trase.

Elektrizace úseku Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice by znamenala dalších 35 km elektrizované tratě, čímž by vznikly ideální podmínky pro provozování BEMU. Na celé trase by tak bylo elektrizováno prvních 35 km, poté by následoval 47 km dlouhý úsek bez elektrizace a na závěr trasy pak 37 km dlouhý elektrizovaný úsek. Bylo by tak umožněno dobíjení baterií na začátku i konci trasy a prostřední úsek by mohl být projížděn v bateriovém režimu, přičemž by nebyl narušen provozní koncept. Kapacita v současnosti používaných baterií by měla dostačovat na takto dlouhý úsek a zároveň elektrizované úseky jsou dostatečné pro jejich plné dobíjení.

S ohledem na přepravní poptávku je na dotčených relacích uvažováno s pásmovým provozem, kdy jsou vlaky vedené v celé trase doplněny o vložené spoje v úseku Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice, na kterém je tím vytvořen poloviční interval. Základní parametry provozního konceptu jsou uvedeny v tabulce 19. Scénáře jsou označeny dle délky intervalu pro lepší názornost. Z hlediska modelu nákladů je klíčový průměrný průběh na vozidlo, který se při kratším intervalu dá předpokládat vyšší.

Tabulka 19 Parametry provozního konceptu pro model „Slovácko-Valašsko“

Scénář	Úsek	Interval	Roční dopravní výkon
a)	Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice	30 minut	1 798 720 vlkm
	Bojkovice – Valašské Meziříčí	60 minut	
b)	Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice	60 minut	899 360 vlkm
	Bojkovice – Valašské Meziříčí	120 minut	

Jednotlivé scénáře se liší intervalem mezi spoji, který má vliv na počet potřebných vozidel a na hodnoty dopravního výkonu. Zvolený provozní koncept uvažuje s provozem všech spojů v celé trase v období dne mezi 6. a 22. hodinou. Přesné časové polohy spojů nejsou pro potřeby modelu relevantní.

Pro zajištění provozu se nabízejí varianty:

- DMU: provoz DMU na všech spojích
- DMU+EMU: provoz EMU na všech spojích Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice, s přestupem na DMU v trase Bojkovice – Valašské Meziříčí
- BEMU+EMU: provoz BEMU na spojích v celé trase, provoz EMU na vložených spojích Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice

V případě využívání kombinace DMU+EMU však vzniká navíc přestup ve stanici Bojkovice a z důvodu provozní neefektivity je nutné navýšení turnusové potřeby o 1 vozidlo oproti ostatním variantám v obou scénářích. Při kombinaci provozu BEMU+EMU je maximálně využita elektrizace a zároveň je využito podobností koncepce těchto vozidel. Varianty provozního konceptu dle počtu nasazených vozidel konkrétního typu jsou uvedeny v tabulce 20. V počtu vozidel jsou zahrnuta i vozidla provozní zálohy.

Tabulka 20 Varianty provozního konceptu pro model „Slovácko-Valašsko“

Scénář	Varianta	Počet vozidel	Roční dopravní výkon	Roční proběh na vozidlo	Denní proběh na vozidlo
a)	DMU	10 DMU	1 798 720 vlkm	179 872 km	ø 493 km
		6 DMU	981 120 vlkm	163 520 km	ø 448 km
	DMU+EMU	5 EMU	817 600 vlkm	163 520 km	ø 448 km
		7 BEMU	1 389 920 vlkm	198 560 km	ø 544 km
	BEMU+EMU	3 EMU	408 800 vlkm	136 267 km	ø 373 km
b)	DMU	7 DMU	899 360 vlkm	128 480 km	ø 352 km
		5 DMU	490 560 vlkm	98 112 km	ø 269 km
	DMU+EMU	3 EMU	408 800 vlkm	136 267 km	ø 373 km
		5 BEMU	694 960 vlkm	138 992 km	ø 381 km
	BEMU+EMU	2 EMU	204 400 vlkm	102 200 km	ø 280 km

4.3.3 Model nákladů „Slovácko-Valašsko“

Model „Slovácko-Valašsko“ porovnává investiční a provozní náklady DMU, EMU a BEMU a je založen na vstupních údajích dle scénářů provozního konceptu z tabulky 20. Mezi proměnné modelu patří počet potřebných vozidel a celkový roční dopravní výkon. Náklady v modelu vycházejí z předpokladů uvedených v kapitole 4.1 a jsou k nim připočítány náklady nezávislé na trakci ve výši uvedené pro jednotlivé scénáře v tabulce 21.

Tabulka 21 Vstupní náklady nezávislé na trakci pro model „Slovácko-Valašsko“

Nákladová položka pro scénář	a) Interval 30/60 minut	b) Interval 60/120 minut
Náklady nezávislé na trakci	60 Kč	65 Kč /km

4.3.3.1 Scénář a) Interval 30/60 minut

Prvním porovnávaným scénářem modelu „Slovácko-Valašsko“ je provoz v celodenním 30minutovém intervalu v úseku Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice, a v celodenním 60minutovém intervalu v úseku Bojkovice – Valašské Meziříčí. Takový pásmový provoz odpovídá zlomu v poptávce například na hranicích městských aglomerací. Pro zajištění zmíněných intervalů je v tomto modelovém příkladu potřeba 10 vozidel DMU. Pro

variantu DMU+EMU se jedná o 6 vozidel DMU a 5 vozidel EMU a pro kombinaci BEMU+EMU pak o 7 vozidel BEMU a 3 vozidla EMU. Celkový roční dopravní výkon dosahuje téměř 1,8 milionů vlkm. Hodnoty nákladů pro 30/60minutový interval modelu „Slovácko-Valašsko“ jsou uvedeny v tabulce 22.

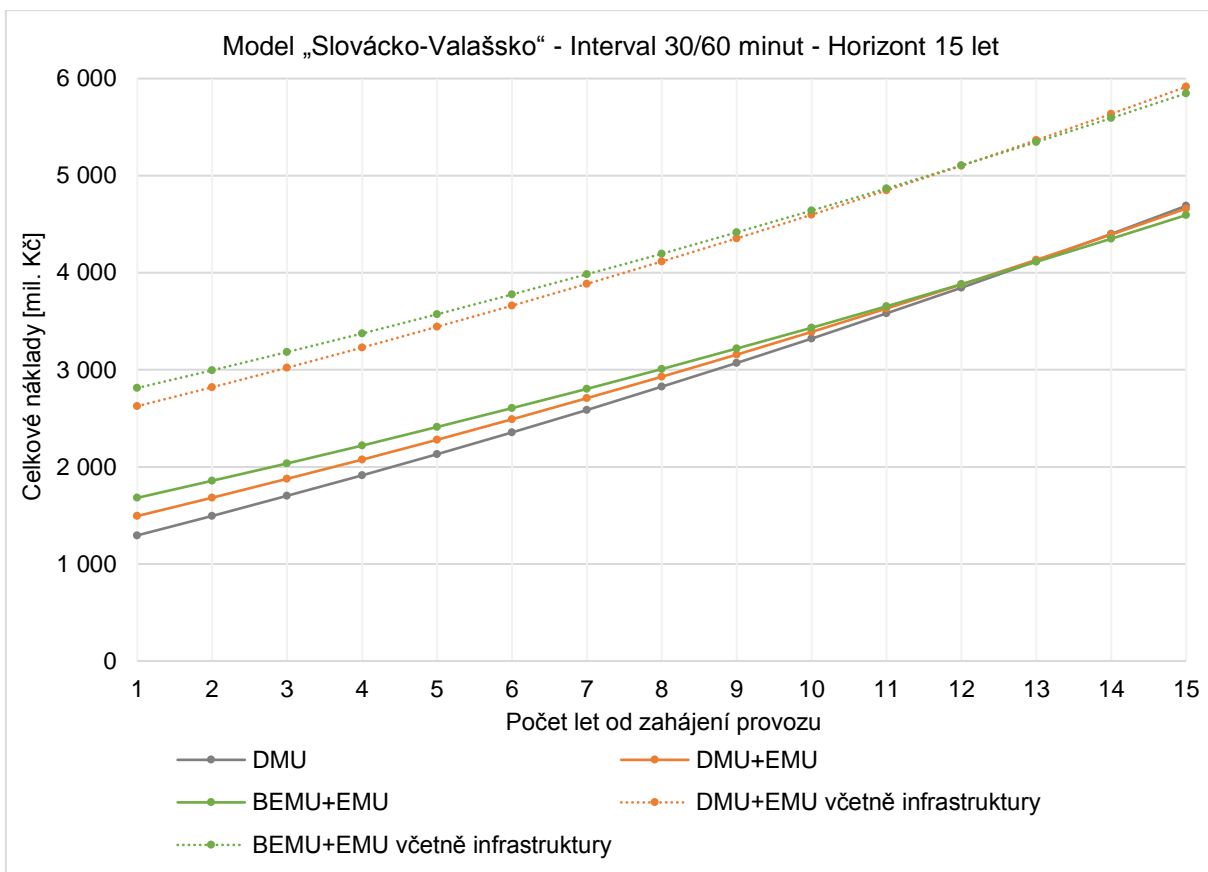
Tabulka 22 Položky nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 30/60minutový interval

Položka modelu	Interval vynaložení	DMU	DMU+EMU	BEMU+EMU
Náklady na pořízení vozidel	30 let	1 100 000 000 Kč	1 421 421 334 Kč	1 727 536 890 Kč
Náklady na energie	1 rok	52 162 880 Kč	38 263 680 Kč	23 669 520 Kč
Náklady na údržbu vozidel	1 rok	34 175 680 Kč	30 905 280 Kč	26 980 800 Kč
Náklady na výměnu baterií	15 let	0 Kč	0 Kč	105 000 000 Kč
Náklady na výstavbu nové infrastruktury	60 let	0 Kč	1 125 000 000 Kč	1 125 000 000 Kč
Náklady na údržbu nové infrastruktury	1 rok	0 Kč	7 000 000 Kč	7 000 000 Kč
Náklady nezávislé na trakci	1 rok	107 923 200 Kč	107 923 200 Kč	107 923 200 Kč

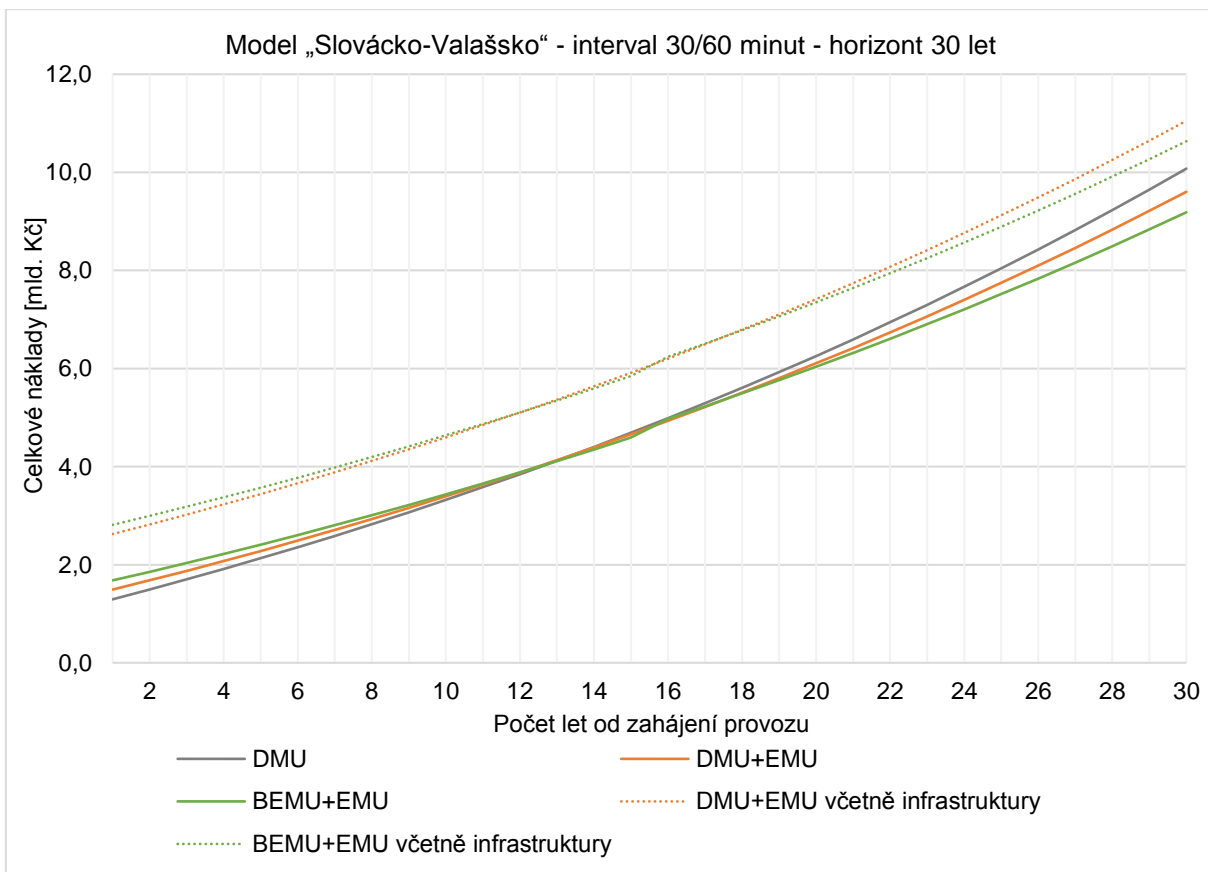
Při modelování nákladů v horizontu 15 let, uvedeném v grafu 15, se jako nejvýhodnější se jeví využití kombinace BEMU+EMU, které ale při započítání infrastrukturních nákladů, vychází v tomto časovém horizontu výrazně nákladněji oproti využití samotných DMU. Kombinace DMU+EMU sice nákladově těsně předčí DMU, ale v případě započítání nákladů na výstavbu infrastruktury jsou z porovnávaných variant nejnákladnější.

Z modelu s časovým horizontem 30 let, uvedeném v grafu 16, je zřejmé, že náklady BEMU+EMU kolísají v souvislosti s nutnou výměnou bateriových článků v 15. roce provozu z důvodu konce jejich životnosti, ale od 18. roku je využití BEMU+EMU nejvýhodnější, kdy tato kombinace dosahuje nižších kumulovaných nákladů, než kombinace DMU+EMU. V celkovém horizontu 30 let vyznívá nákladová stránka pro využití BEMU+EMU s rozdílem přibližně 8,83 % (890 mil. Kč) oproti DMU a 4,35 % (418 mil. Kč) oproti DMU+EMU. Výhodnější provoz však stále nedokáže vyvážit náklady na výstavbu napájecí infrastruktury, která je v tomto případě pro provoz BEMU a EMU nezbytná. Při jejich započítání vychází provoz BEMU+EMU o 5,54 % (558 mil. Kč) nákladněji, než provoz samotných DMU.

Model nákladů je zpracován i v horizontu 60 let (doba životnosti infrastruktury), ve kterém vychází provoz BEMU+EMU nejvýhodněji i při započítání nákladů na výstavbu potřebné infrastruktury. Náklady na provoz BEMU+EMU s výstavbu infrastruktury v tomto horizontu předčí náklady DMU s rozdílem 3,48 % (1,1 mld Kč). Tento model je uveden v příloze 2 této práce (graf 23).



Graf 15 Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 30/60minutový interval v horizontu 15 let



Graf 16 Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 30/60minutový interval v horizontu 30 let

4.3.3.2 Scénář b) Interval 60/120 minut

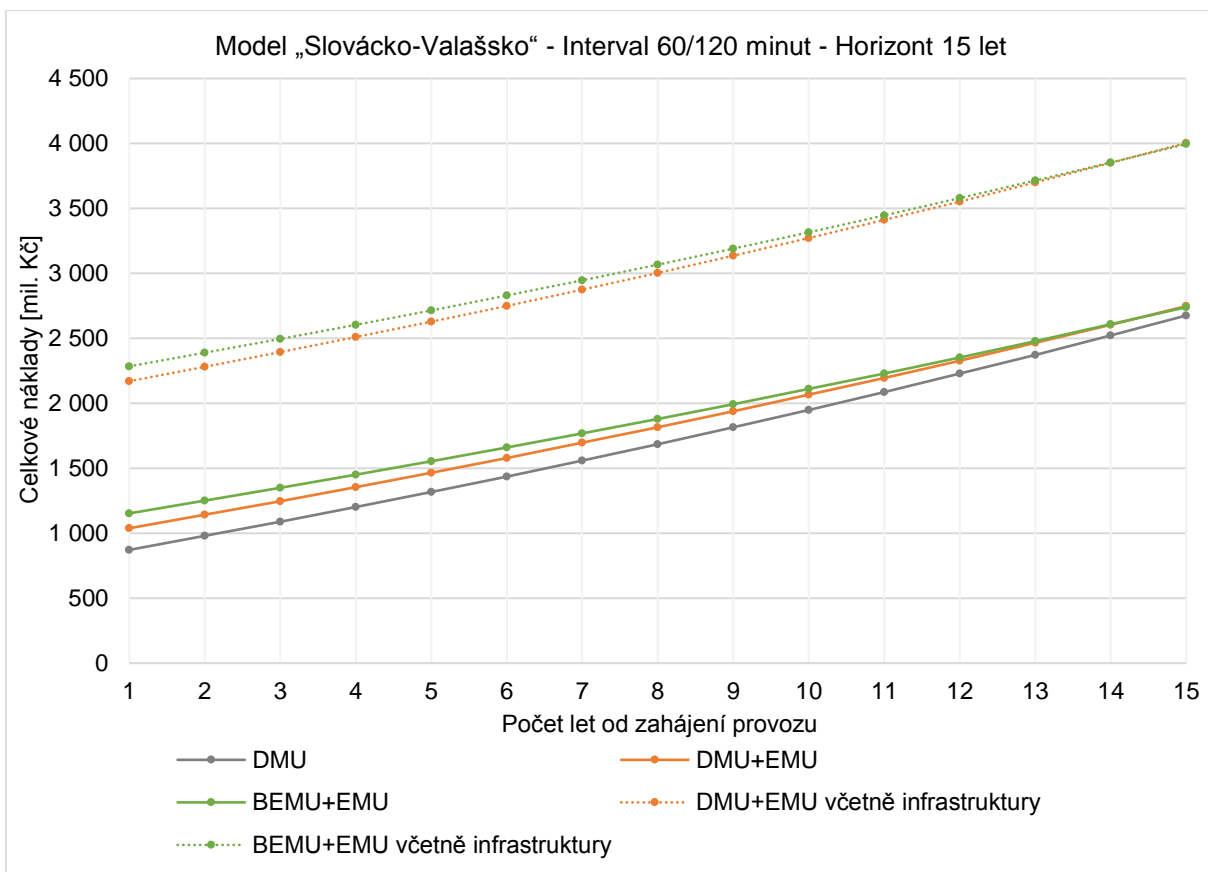
Dalším porovnávaným scénářem modelu „Slovácko-Valašsko“ je provoz v celodenním 60minutovém intervalu v úseku Staré Město u Uherského Hradiště – Bojkovice, a v celodenním 120minutovém intervalu v úseku Bojkovice – Valašské Meziříčí. Takový pásmový provoz odpovídá zlomu v poptávce například na hranicích regionálních center a okrajových částí regionu. Pro zajištění zmíněných intervalů je v tomto modelovém příkladu potřeba 7 vozidel DMU. Pro variantu DMU+EMU se jedná o 5 vozidel DMU a 3 vozidla EMU a pro kombinaci BEMU+EMU pak o 5 vozidel BEMU a 2 vozidla EMU. Celkový roční dopravní výkon dosahuje téměř 900 tis. vlkm. Hodnoty nákladů pro 60/120minutový interval modelu „Slovácko-Valašsko“ jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 23 Položky nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 60/120minutový interval

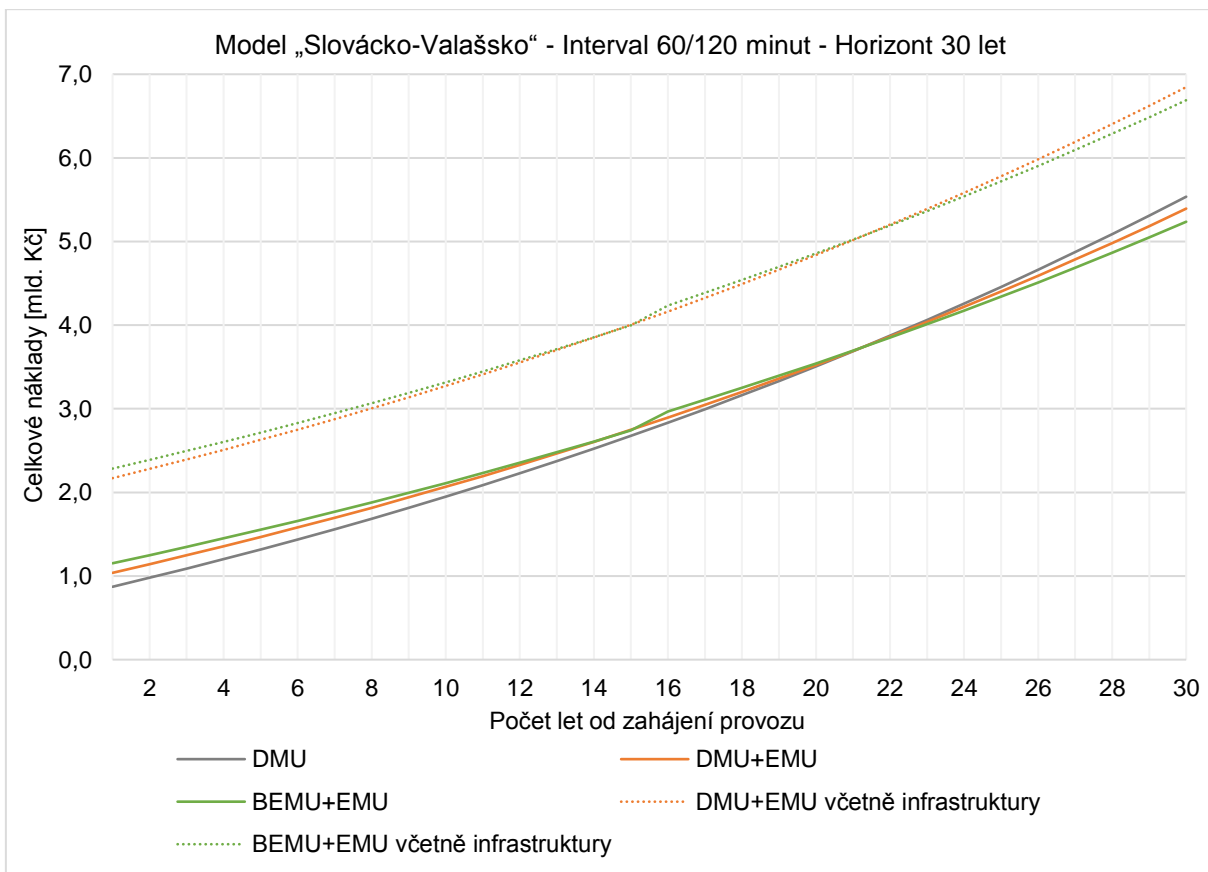
Položka modelu	Interval vynaložení	DMU	DMU+EMU	BEMU+EMU
Náklady na pořízení vozidel	30 let	770 000 000 Kč	1 030 198 223 Kč	1 213 867 556 Kč
Náklady na energie	1 rok	26 081 440 Kč	19 131 840 Kč	11 834 760 Kč
Náklady na údržbu vozidel	1 rok	17 087 840 Kč	15 452 640 Kč	13 490 400 Kč
Náklady na výměnu baterií	15 let	0 Kč	0 Kč	75 000 000 Kč
Náklady na výstavbu nové infrastruktury	60 let	0 Kč	1 125 000 000 Kč	1 125 000 000 Kč
Náklady na údržbu nové infrastruktury	1 rok	0 Kč	7 000 000 Kč	7 000 000 Kč
Náklady nezávislé na trakci	1 rok	58 458 400 Kč	58 458 400 Kč	58 458 400 Kč

Při modelování nákladů v horizontu 15 let, uvedeném v grafu 17, se jeví jako nejvýhodnější využití DMU. Kombinace BEMU+EMU je pak naprosto vyrovnaná kombinací DMU+EMU a je velmi těsně výhodnější. Při započítání infrastrukturních nákladů, však BEMU+EMU vycházejí v tomto časovém horizontu výrazně nákladněji než DMU.

Z modelu s časovým horizontem 30 let, uvedeném v grafu 18, je zřejmé, že náklady BEMU+EMU kolísají v souvislosti s nutnou výměnou bateriových článků v 15. roce provozu z důvodu konce jejich životnosti, a ve 23. roce dochází k vyrovnání kumulovaných nákladů kombinace BEMU+EMU a DMU. Od tohoto bodu je pak nejvýhodnější využití BEMU+EMU. V celkovém horizontu 30 let vyznívá nákladová stránka pro využití BEMU+EMU s rozdílem přibližně 5,40 % (299 mil. Kč) oproti DMU, a rozdílem 2,91 % (157 mil. Kč) oproti kombinaci DMU+EMU. Výhodnější provoz však nedokáže vyvážit náklady na výstavbu napájecí infrastruktury, která je v tomto případě pro provoz BEMU a EMU nezbytná. Rozdíl se započítáním nákladů na infrastrukturu je výraznější než u prvního scénáře.



Graf 17 Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 60/120minutový interval v horizontu 15 let



Graf 18 Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 60/120minutový interval v horizontu 30 let

Model nákladů je zpracován i v horizontu 60 let, ze kterého je zřejmá výhodnost provozu BEMU+EMU, následována kombinací DMU+EMU. Přestože jsou kumulované náklady DMU vyšší než u zbylých kombinací, vlivem nízkého dopravního výkonu není dosaženo dostatečné nákladové efektivity pro vyrovnání nákladů na výstavbu potřebné infrastruktury. Tento model je uveden v příloze 2 této práce (graf 24).

4.3.4 Vyhodnocení modelu „Slovácko-Valašsko“

Na modelovém příkladu „Slovácko-Valašsko“ je znázorněn průběh nákladů pro vozidla DMU, kombinaci vozidel DMU+EMU a pro kombinaci vozidel BEMU+EMU. V případě vozidel vyžadujících napájení z trakčního vedení jsou navíc kalkulovány i varianty se započítáním nákladů na elektrizaci traťového úseku pro umožnění jejich provozu na dané trase. Jako modelová trasa byla v tomto případě vybrána relace Staré Město u Uherského Hradiště – Uherské Hradiště – Bojkovice – Bylnice – Horní Lideč – Vsetín – Valašské Meziříčí ve Zlínském kraji, na které jsou aktuálně plánována infrastrukturní opatření zahrnující elektrizaci a která by tak v případě realizace těchto opatření byla vhodná pro provoz jednotek BEMU.

Model je zpracován ve dvou scénářích, které se liší intervalem mezi spoji při pásmovém provozu, potažmo průměrným proběhem na vozidlo. Z tohoto modelu, stejně jako z prvního modelového příkladu, vyplývá, že při zkracujícím se intervalu mezi spoji a zároveň i zvyšujícím se denním proběhu vozidel, se zvyšuje ekonomická výhodnost provozování BEMU. V tomto případě však nejsou BEMU provozovány samostatně, ale v kombinaci s provozem EMU na vložených spojích. Na plně elektrizovaném úseku je provoz EMU výhodnější než provoz BEMU z důvodu nižších pořizovacích i provozních nákladů.

Výhodnější, než provoz samotných DMU je také kombinace DMU+EMU. Ve zvoleném provozním konceptu je uvažováno s provozem EMU na elektrizovaném úseku tratě 341 a DMU na zbytku trasy. Tím je maximalizováno využití EMU, které mají příznivé provozní náklady a zároveň jsou maximalizovány přínosy nově vybudované infrastruktury. Přináší to však nutnost přestupu a není tak možné jet celou trasu bez přestupu. To s sebou nese snížení atraktivity pro cestující, prodloužení cestovní doby a kvůli neefektivitě využití vozového parku je tím také generována zvýšená potřeba turnusových vozidel. Kvůli nasazení DMU na významné části trasy, na které zajišťují více než polovinu dopravního výkonu, je také růst provozních nákladů strmější, než by byl v případě možnosti nasazení samotných EMU.

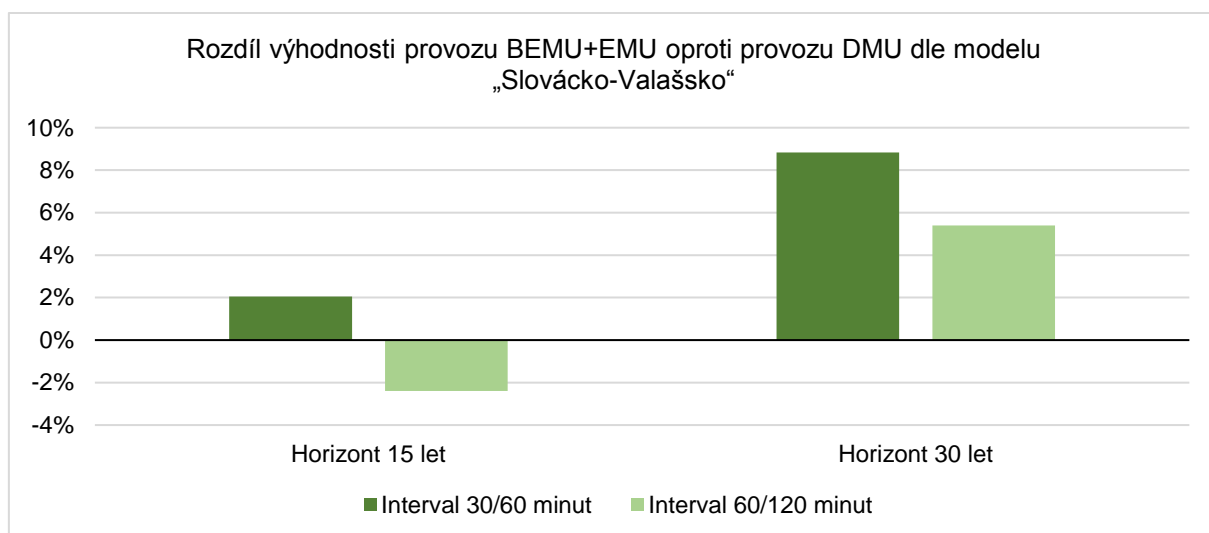
V modelu BEMU v kombinaci s EMU nejlépe obstály při intervalu 30/60 minut, kdy mají oproti DMU za dobu svojí životnosti náklady nižší přibližně o 8,83 %. Při intervalu 60/120 minut je rozdíl nižší, ale BEMU+EMU vycházejí stále přibližně o 5,40 % výhodněji. Nižší rozdíl je způsoben především nižším proběhem vozidel.

Porovnání nákladů probíhalo v časových horizontech 15 let, 30 let a 60 let. Z provozního hlediska jsou důležité především horizonty 15 let a 30 let, horizont 60 let je relevantní při ohledu na výstavbu nové infrastruktury. Porovnání výsledných rozdílových hodnot mezi DMU a BEMU+EMU v prvních dvou horizontech je uvedeno v tabulce 24. Záporná hodnota značí nižší náklady pro DMU, kladná hodnota pak značí nižší náklady při využití BEMU+EMU.

Tabulka 24 Rozdílové hodnoty nákladů DMU a BEMU+EMU dle modelu „Slovácko-Valašsko“

Horizont	a) Interval 30/60 minut	b) Interval 60/120 minut
15 let	95 902 979 Kč (2,05 %)	-63 923 148 Kč (-2,39 %)
30 let	889 964 567 Kč (8,83 %)	299 118 770 Kč (5,40 %)

Rozdílové hodnoty kumulovaných nákladů provozu BEMU+EMU oproti provozu DMU dle časového horizontu a intervalu jsou zobrazeny v grafu 19. Kladné hodnoty značí výhodnost BEMU+EMU, záporné hodnoty pak znamenají výhodnost provozu v dieselové trakci.



Graf 19 Rozdíl výhodnosti provozu BEMU+EMU oproti provozu DMU dle modelu „Slovácko-Valašsko“

Provoz kombinace DMU+EMU je nákladově s BEMU+EMU na srovnatelnější úrovni. Oproti provozu DMU+EMU vychází kombinace BEMU+EMU za dobu své životnosti výhodněji při intervalu 30/60 minut o 4,35 %, a při intervalu 60/120 minut o 2,91 %. Porovnání výsledných rozdílových hodnot DMU+EMU a BEMU+EMU je uvedeno v tabulce 25. Ve zvolených scénářích vychází využití BEMU+EMU vždy výhodněji než DMU+EMU.

Tabulka 25 Rozdílové hodnoty nákladů DMU+EMU a BEMU+EMU dle modelu „Slovácko-Valašsko“

Horizont	a) Interval 30/60 minut	b) Interval 60/120 minut
15 let	67 285 915 Kč (1,44 %)	8 722 062 Kč (0,32 %)
30 let	418 160 419 Kč (4,35 %)	156 755 060 Kč (2,91 %)

Pro provoz BEMU je v tomto případě nezbytná také elektrizace trati. Náklady na ni však nejsou v časovém horizontu 15 ani 30 let plně vyrovnány úsporami z provozu vozidel v elektrické trakci. Úspora v dostatečné míře k pokrytí nákladů na elektrizaci je dosaženo až v horizontu 60 let při intervalu 30/60 minut. Dle modelu dojde k vyrovnání kumulovaných nákladů BEMU+EMU a DMU v 51. roce provozu. Rozdíl po 60 letech při provozu BEMU+EMU včetně infrastruktury oproti provozu DMU je dle modelu 3,48 % (1,1 mld. Kč).

Z výsledků modelu je patrné, že při intenzivním provozu v okolí městských aglomerací s pásmovým provozem může být elektrizace vnitřního pásma s provozem EMU a provoz BEMU mezi vnitřním a vnějším pásmem vhodnou alternativou k provozu DMU. Z dlouhodobého hlediska mohou být provozními úsporami pokryty i dodatečné náklady na výstavbu trakčního vedení a související infrastruktury pro umožnění provozu vozidel EMU a BEMU. Varianta provozu BEMU pak maximalizuje užitek díky možnosti provozování na elektrizovaném i neelektrizovaném úseku a tím přináší také eliminaci vynucených přestupů či navýšení potřeby vozidel oproti kombinaci DMU a EMU. S prodlužujícím se intervalem a tím nižším proběhem vozidel však jejich efektivita klesá a pro relace s nízkým využitím tak nejsou příliš vhodná.

Na základě obou modelů je zřejmé, že výhodnost provozu BEMU nastává díky vysokému proběhu vozidel. Hranicí pro výhodné provozování BEMU je dle modelu v současném stavu průměr přibližně 300 km na 1 vozidlo denně (110 000 km ročně). Pokud je tedy průměrný denní proběh vyšší než tato hranice, jsou dostatečně využity investiční náklady vzhledem k provozním a s každým dalším nárůstem proběhu se výhodnost zvyšuje. Naopak při nižším proběhu se jeví výhodněji vozidla s nižšími investičními náklady i přes vysoké náklady na provoz.

Je také nutné podotknout, že odhadovaná životnost vozidel 30 let je spíše na dolní hranici jejich možností a jedná se tak o konzervativní odhad. Při delší životnosti vozidel, která může přesahovat 35 let, pak dále narůstá výhodnost využití vozidel s nízkými provozními náklady, jako jsou EMU a BEMU. Je tak možné dosáhnout vyšších úspor i při nižším proběhu vozidel, než je znázorněno v modelu.

5 Možnosti využití BEMU v ČR

V této kapitole jsou uvedeny konkrétní lokality v rámci ČR, ve kterých by bylo možné BEMU využít s ohledem na současný stav infrastruktury a přepravní poptávku. Na uvedených relacích by bylo možné provozovat BEMU obdobně jako na relacích využitých pro model v kapitole 4.

Možnosti využití BEMU v této části jsou uvažovány se zahájením provozu v období 2020–2030. V úvahu jsou tak brána současná vozidla a současný stav infrastruktury, případně aktuálně plánované modernizace a elektrizace tratí, které již mají reálný základ a mohou být v tomto časovém horizontu dokončeny.

Na závěr jsou uvedena konkrétní doporučení vedoucí k vhodnému využití BEMU v podmínkách ČR. Tato doporučení vycházejí z jednotlivých částí této práce, kde je možné k nim dohledat bližší informace.

5.1 Lokality s potenciálem využití BEMU v ČR

Na základě poznatků získaných v předchozích částech práce lze určit doporučení pro provoz BEMU v podmínkách ČR. Jednotky BEMU jsou však velmi specifické a jejich konkrétní technické parametry (především kapacita baterií a tím ovlivněný dojezd) jsou vždy upraveny pro podmínky konkrétní trasy, na které mají být provozovány.

Výhodnost použití BEMU je nutné posoudit pro každou trasu a zvolený provozní koncept jednotlivě. Důležité je především zda ekonomika provozu BEMU a benefity získané jejich provozem jsou kladné v horizontu konce životního cyklu vozidla. Při vhodně zvoleném provozním konceptu s důrazem na vysoký proběh vozidel lze předpokládat, že využití BEMU může být nejvýhodnější variantou.

Využití BEMU je dle závěrů kapitoly 3 vhodné spíše v regionální dopravě než v dopravě dálkové. Pro nasazení BEMU na dálkových linkách by se dalo uvažovat jako s dočasným řešením v průběhu jejich elektrizace. V cílovém stavu by však neměly být BEMU provozovány na žádné z dálkových linek v ČR. Z toho důvodu se ani nepředpokládá jejich provozování v komerční dopravě.

Využití BEMU se dá spíše předpokládat u linek v závazku veřejné služby. V souladu s úvahami Ministerstva dopravy by se o provozu BEMU dalo uvažovat alespoň jako s dočasným řešením na rychlíkových linkách R21, R22, R24, R26 a R27. K tomu by však bylo nutné přizpůsobit potřebnou infrastrukturu, především zvýšení míry elektrizace na dotčených tratích. V rámci regionální železniční dopravy objednávané kraji jsou možnosti rozsáhlejší.

Vzhledem k tomu, že v ČR je elektrizováno pouze 34 % délky sítě, je možností pro nasazení BEMU opravdu mnoho. Nutné je ale zmínit, že ze specifik provozu BEMU také vychází, že pro

jejich provoz je výhodné, pokud je úsek elektrizován soustavou AC 25 kV, 50 Hz. Při splnění těchto podmínek se v současném stavu rozsah uvažovaných tratí značně zužuje. Jedná se o neelektrizované úseky tratí navazující na tratě elektrizované zmíněnou střídavou soustavou. Ty se nacházejí především v jižní a západní části ČR.

Za určitých podmínek je možné provozovat BEMU i na zcela neelektrizované trati. Takto je od roku 2023 zamýšlen provoz v německém Sasku na 80 km dlouhé neelektrizované trati mezi Lipskem a Saskou Kamenicí. V takovém případě je však nutno počítat s jistými omezeními provozního konceptu a s vyššími riziky v případě mimořádností. Především je nutné zohlednit delší dobu obratu, což snižuje možný proběh vozidel a tím je zhoršená celková ekonomika jejich provozu. Provozovat BEMU tak lze s jistými omezeními na téměř libovolné neelektrizované trati v ČR s možností dobíjení baterií v koncových stanicích.

Dalším omezením pak může být dovolená traťová třída zatížení na konkrétní trati. BEMU mohou být obvykle bez omezení provozovány na tratích s dovolenými traťovými třídami zatížení D a C. Pro provoz na tratích třídy B je obvykle nutné použít odlehčenou verzi BEMU s nižší kapacitou baterií a tím limitovaným dojezdem. Traťové třídy zatížení D a C však mají na železniční síti ČR naprostou převahu a nižší třídy se vyskytují pouze na několika úsecích především regionálních tratí.

Níže jsou uvedeny příklady relací s potenciálem využití BEMU při současném stavu infrastruktury, případně pouze s minimální investicí do infrastruktury v rozdělení po krajích.

5.1.1 Karlovarský kraj

Využití BEMU v Karlovarském kraji přichází v úvahu pro relace mezi regionálními centry ležícími na tratích 140 a 178 (Karlovy Vary, Sokolov, Cheb, Mariánské lázně) a městy v regionu ležícími mimo tyto elektrizované tratě (Aš, Nejdek) při vhodně nastaveném provozním konceptu (dostatečná délka elektrizovaného úseku, dostatečné proběhy vozidel).

5.1.2 Plzeňský kraj:

Pro využití BEMU v Plzeňském kraji se jeví jako vhodné především diametrální linky procházející skrze Plzeňskou aglomeraci. Možností jejich využití je také obsluha dalších relací v okolí tratí 170, 178 a 191, na kterých bude identifikována dostatečná poptávka cestujících.

Příklady možného využití BEMU na relacích v Plzeňském kraji:

- (Přeštice –) Plzeň – Plasy
- (Rokycany –) Plzeň – Nýřany – Holýšov
- (Plzeň –) Horažďovice předměstí – Sušice

5.1.3 Jihočeský kraj

Využití BEMU v Jihočeském kraji se jeví jako výhodné při využití současných elektrizovaných tratí 190 a 220. Většina vytížených relací v kraji je však již v současném stavu vedena v elektrické trakci a dieselové provozní soubory (např. Šumava) nemají dostatečné průniky s elektrizovanou sítí, aby na nich bylo možné BEMU v současném stavu provozovat. U níže zmíněných příkladů je také nutno brát ohled na dovolenou traťovou třídu zatížení, která je na všech zmíněných relacích v některém úseku třídou B. V takovém případě není možné využít maximální možnou hmotnost baterií a může tím být limitován dojezd vozidel.

Příklady možného využití BEMU na relacích v Jihočeském kraji:

- (České Budějovice –) Strakonice – Blatná
- (Tábor – Veselí nad Lužnicí –) České Budějovice – Český Krumlov

Při elektrizaci úseku Tábor – Milevsko by bylo možné provozovat BEMU i na relaci:

- (Tábor –) Milevsko – Písek (– Strakonice)

5.1.4 Vysočina

Jedním z nejzajímavějších krajů pro provoz BEMU v aktuálním stavu je kraj Vysočina. Hlavní elektrizované trati 225, 230 a 250 v několika případech míjejí regionální centra a ta tak leží na neelektrizovaných tratích. S pomocí BEMU by je bylo možné propojit přímým spojením. V případě elektrizace některých dalších úseků (Jihlava – Okříšky – Třebíč, Kostelec u Jihlavy – Telč) by bylo možné zajistit provoz v kraji téměř výhradně pomocí vozidel elektrické trakce (kombinace EMU a BEMU).

Příklady možného využití BEMU na relacích v kraji Vysočina:

- (Jihlava –) Horní Cerekev – Pelhřimov – Tábor
- (Jihlava –) Havlíčkův Brod – Chotěboř – Hlinsko
- (Havlíčkův Brod – Jihlava –) Kostelec u Jihlavy – Třešť – Telč
- (Havlíčkův Brod –) Světlá nad Sázavou – Ledec nad Sázavou
- (Havlíčkův Brod –) Žďár nad Sázavou – Nové Město na Moravě – Bystřice nad Pernštejnem
- (Žďár nad Sázavou –) Křižanov – Velké Meziříčí

5.1.5 Jihomoravský kraj

Na území Jihomoravského kraje se při současném stavu infrastruktury nabízejí omezené možnosti využití BEMU. Ty jsou limitovány především faktem, že nejdůležitější regionální centra již na elektrizované trati leží, případně je plánována elektrizace nebo je železnice v dané relaci nekonkurenceschopná. Při využití stávajících elektrizovaných tratí 250, 260, 340 je pomocí BEMU možné obsloužit alespoň některé relace mezi městy v regionu a Brněnskou

aglomerací. Další možnosti se pak nabízejí po dokončení elektrizace dílčích úseků, případně v průběhu jejich elektrizace.

Příklady možného využití BEMU na relacích v Jihomoravském kraji:

- (Brno –) Tišnov – Nedvědice – Bystřice nad Pernštejnem

Po dokončení elektrizace úseku Brno – Střelice by bylo možné provozovat BEMU i na relaci:

- (Brno –) Střelice – Ivančice

Po dokončení elektrizace úseku (Brno –) Střelice – Zastávka u Brna by bylo možné provozovat BEMU i na relaci:

- (Brno – Střelice –) Zastávka u Brna – Náměšť nad Oslavou – Třebíč

Přechodně (do dokončení elektrizace) by mohly být BEMU provozovány i na relaci:

- (Brno –) Skalice nad Svitavou – Boskovice

Přechodně (v průběhu elektrizace úseku Blažovice – Veselí nad Moravou) by bylo možné provozovat BEMU i na relaci:

- (Brno –) Blažovice – Slavkov u Brna – Bučovice – Kyjov – Veselí nad Moravou

5.1.6 Ostatní kraje ČR

V případě využití BEMU v jiných než výše uvedených krajích je třeba nutné napájení méně výkonnou soustavou DC 3 kV. Specifika provozování BEMU s ohledem na trakční napájecí soustavu jsou uvedena v kapitole 3.2.2. Obecně je třeba počítat s jistými omezeními, která mohou využití BEMU na těchto trasách značně limitovat.

Příklady možného využití BEMU na relacích v ostatních krajích ČR:

- (Ústí nad Labem –) Děčín – Česká Lípa
- (Hradec Králové –) Týniště nad Orlicí – Letohrad
- (Ústí nad Orlicí –) Lichkov – Králíky
- (Česká Třebová –) Rudoltice v Čechách – Lanškroun
- (Ostrava –) Opava – Krnov

5.1.7 Budoucnost využití BEMU v ČR

Vzhledem k postupnému přechodu na jednotnou napájecí soustavu se možnosti využití BEMU budou do budoucna rozšiřovat. A právě při konverzi napájecí soustavy je ideální příležitost pro rozhodnutí, které tratě elektrizovat a na kterých úsecích využít BEMU. Vzhledem k časovému horizontu této konverze by však navrhování tohoto stavu při současném rychlém vývoji technologií nebylo přesné. Za 10–20 let, kdy by měla být konverze reálně na větší části území dokončena, již mohou být technické možnosti BEMU na zcela jiné úrovni.

V horizontu 20–30 let by s pomocí BEMU bylo možné dosáhnout v podstatě plně bezemisní železniční osobní dopravy na území ČR. Při elektrizaci všech úseků tratí mezinárodního a celostátního významu a také většiny páteřních regionálních spojení by mohla být doprava na ostatních tratích zajištěna pomocí BEMU. Na zbylých tratích, které by vykazovaly velmi nízkou poptávku po osobní přepravě, a nejevilo by se výhodné provozovat žádná vozidla elektrické trakce, by bylo vhodné uvažovat o ukončení provoz železniční osobní dopravy a nahrazení jinou alternativou. Takové tratě by pak mohly zůstat ponechány pouze pro nákladní dopravu či být zcela zrušeny. Dieselová trakce by pak byla využívána výhradně v nákladní dopravě, pro kterou se prozatím zdají být alternativní pohony i do budoucna neefektivní.

Volbu vhodných relací pro využití BEMU může ovlivnit také již připravovaná výstavba vysokorychlostních tratí (VRT). Díky novým VRT může vzniknout řada přímých spojení, která lze pomocí BEMU zajistit. Kombinovat lze jízdu po VRT s následným přejezdem na neelektrizovanou vedlejší trať a tím pomocí VRT efektivně obsloužit další relace, které na ní přímo neleží. Jednat se může o obsluhu měst v blízkosti plánované vysokorychlostní trati na současné neelektrizované nebo částečně elektrizované trati, u které se nepředpokládá nutnost elektrizace z důvodu nízké frekvence vlaků osobní či nákladní dopravy.

5.2 Doporučení pro využití BEMU v podmínkách ČR

Na základě teoretických poznatků získaných analýzou specifik provozu BEMU a závěrů získaných z modelu využití BEMU na příkladech konkrétních tratí je možné shrnout následující doporučení k vhodnému využití BEMU v podmínkách České republiky.

5.2.1 Infrastruktura

- Délka neelektrizovaných úseků, kterou je možno pomocí BEMU překonat je dána především kapacitou baterií s ohledem na sklonové a směrové parametry trati či počet zastavení na trase. Obecně se pohybuje se okolo 50–100 km, pokud je možné napájení na obou koncích úseku, případně 25–40 km, pokud je napájení možné pouze na jednom konci úseku (jedná se o koncový úsek trati, na baterii je nutné ho projet v obou směrech). Alternativně je možné do neelektrizovaných úseků vložit tzv. „trolejové ostrovy“, tedy elektrizované kratší úseky či stanice. V koncových stanicích bez elektrizace je pak při delším odstavení vhodné využít dobíjení vozidel pomocí nabíjecího kabelu (např. při temperování vozidla přes noc).
- Elektrizované úseky by měly být co nejkratší, ale zároveň dostatečné pro plné nabití baterií. Jejich délka závisí především na kapacitě použitých baterií a obecně ji lze stanovit na přibližně 15–20 km. Existuje možnost provozovat BEMU také na plně neelektrizovaných tratích, ale v takovém případě jsou značně limitovány možnosti

provozního konceptu a také efektivita využití vozidel, kvůli delším obrátům nutným pro nabíjení baterií.

- Elektrizace tratí by měla probíhat s důrazem na maximální využití trakčních transformoven (TT), které jsou velmi nákladné na vybudování. Samotné trolejové vedení již tak nákladné není a v situaci kdy by pro plnou elektrizaci určité trati byla nutná výstavba nové TT, je elektrizace pouze části trati a využití BEMU vhodnou variantou.
- Vhodnou trakční napájecí soustavou je střídavá soustava AC 25 kV, 50 Hz, která oproti stejnosměrné soustavě DC 3 kV poskytuje vyšší elektrický výkon potřebný především k nabíjení baterií. Kromě toho i všechny aktuálně testované BEMU v Evropě jsou napájeny pomocí střídavé napájecí soustavy AC 15 kV, 16,7 Hz, která je střídavé soustavě používané na území ČR velmi podobná, oproti tomu na provoz na stejnosměrné soustavě by musela být tato vozidla značně modifikována.
- Velkou příležitostí pro rozšíření BEMU je konverze na jednotnou napájecí soustavu v celé ČR. Pokud by při konverzi na jednotnou soustavu AC 25 kV, 50 Hz bylo uvažováno i s provozem BEMU a byl tomu vhodně přizpůsoben rozsah elektrizace, bylo by poté možné prakticky celé území ČR obsluhovat vozidly v elektrické trakci, a to na plně elektrizovaných relacích pomocí EMU, a na částečně elektrizovaných úsecích pomocí BEMU. Na úsecích s nízkou poptávkou cestujících, na kterých by se ukázala vozba v elektrické trakci (EMU či BEMU) jako neekonomická, by pak mohl být zvolen alternativní způsob přepravy cestujících. Takové tratě by pak mohly být ponechány pro nákladní dopravu nebo být zrušeny.
- Využití BEMU je vhodné při průběhu elektrizace, kdy mohou být provozovány i v případě, že by elektrizace byla dokončena pouze z malé části. Po dokončení elektrizace je navíc stále možné BEMU na této trase zachovat, protože při elektrizaci trávající několik let by pravděpodobně mohlo dojít i ke konci životnosti baterií. BEMU by pak při nenahrazení baterií za nové mohla být konvertována na čistě elektrickou EMU. Dále je využití BEMU vhodné na tratích či úsecích, u kterých by byla elektrizace neúměrně nákladná vůči získaným benefitům například z důvodu nízké přepravní poptávky a dlouhých intervalů mezi spoji. Využití BEMU se také nabízí jako vhodná alternativa na úsecích tratí, kde není technicky možné provést elektrizaci. To může nastat například u tunelů s nevyhovujícími parametry či u jiných překážek v obvodu kolejiště.
- Kvůli zvýšené hmotnosti vozidla z důvodu přítomnosti bateriového ústrojí jsou zvýšeny i nápravové tlaky. Standardně BEMU vyhovují pro jízdu na tratích s dovolenou traťovou třídou zatížení C (20 t na nápravu) nebo vyšší. Odlehčené verze BEMU s nižší

kapacitou baterií a tím i sníženým dojezdem pak vyhovují pro provoz i na tratích třídy B (18 t na nápravu).

5.2.2 Provozní koncept

- Provoz BEMU je vhodný k zajištění spíše regionální dopravy než dopravy dálkové, protože s narůstající ujetou vzdáleností pod trakčním vedením se stále více projevuje zvýšená spotřeba energie z důvodu jejich vyšší hmotnosti. Ideální z tohoto pohledu je využívání BEMU na regionálních spojích o délce trasy do 100 km, pokud je zajištěna dostatečná délka úseků pro nabíjení.
- Při využití BEMU je možné nabídnout nová přímá spojení, která jsou dosud realizována s přestupem mezi vozidly rozdílné trakce. Tím se zvyšuje atraktivita železniční dopravy pro cestující a je možné zvýšit využití vozového parku i provozního personálu.
- Při návrhu provozního konceptu pro provoz BEMU je nutné dbát zvýšenou pozornost na dostatečný podíl úseků, kde je umožněno nabíjení baterií, a to na trati či ve stanicích. Pokud by elektrizované úseky na trati nebyly dostatečně dlouhé, bylo by nutné prodloužit pobyty v elektrizovaných stanicích a tím by bylo značně limitováno využití vozidel.
- Provozování BEMU je ekonomicky výhodné, pokud jsou díky úsporám provozních nákladů efektivně využity zvýšené investiční náklady. K tomu je potřebné vhodně zvolit provozní koncept s důrazem na vysoké proběhy vozidel. Na základě modelu nákladů provozu BEMU by pro zaručení jejich nákladové efektivity měl být průměrný proběh alespoň 300 km na vozidlo denně (110 000 km ročně). To zároveň odpovídá obecné snaze o optimalizaci využití vozidel, která je stěžejní pro ekonomiku provozu jakéhokoliv nového vozidla.
- Jízdní dynamika BEMU je v elektrickém režimu podobná EMU s tím, že je omezena jejich vyšší hmotností. V bateriovém režimu pak může být mírně snížena. Některé BEMU mohou mít v bateriovém režimu například sníženu maximální rychlost na 100–140 km/h či sníženo maximální zrychlení z přibližně 1,0–1,2 m/s² na 0,7–0,8 m/s². I s těmito hodnotami však stále převyšují jízdní dynamikou srovnatelné DMU.
- Z hlediska konstrukce vozidel je vhodné provozování BEMU o kapacitě nejméně 120–140 cestujících. Aktuálně testovaná vozidla mají kapacitu přibližně 150–250 míst k sezení. S vyšší kapacitou a tím vyšším počtem vozů je možné do vozidel umístit více bateriových článků a zvýšit tím dojezd vozidla. Díky lepšímu rozložení hmotnosti je pak možné dosáhnout i nižších nápravových tlaků. Pro vozidla o nižší kapacitě než 120 cestujících se v současném stavu nezdá koncepce BEMU vhodná.
- Provozování BEMU je vhodné na tratích, kde je dostatečná poptávka cestujících pro provoz vozidel o kapacitě alespoň 120–140 cestujících, v intervalu přibližně

30–120 minut. Optimální se ukázal být interval 30–60 minut, kdy s kratším intervalem se zvyšuje výhodnost plné elektrizace trati. Při provozu v intervalu 120 minut a delším je pravděpodobné, že z důvodu nízkého využití vozidel na takových relacích nebude využito potenciálu těchto vozidel. BEMU v současném stavu nejsou vhodnými vozidly pro tratě s nízkou poptávkou cestujících jako náhrada stávajících motorových vozů.

- Benefitem provozu BEMU je možnost sdílení údržbových technologií s EMU. Díky podobnosti vozidel elektrické trakce je možné využívat stejné údržbové zázemí pro údržbu BEMU i EMU. Odpadá nutnost zvláštních údržbových kapacit (prostor, personálu, technologií) pro údržbu vozidel se spalovacím motorem.
- Možností, jak dosáhnout úspor při současném provozu BEMU a DMU (např. u provozních souborů v rámci jedné oblasti), je poskytování vozidel provozní zálohy ve formě DMU i pro provozní soubor s provozem BEMU. Bude tím minimalizována neefektivita nižšího proběhu, z důvodu držení málo využívaného záložního vozidla.

5.2.3 Energetika a ekologie

- Provozováním BEMU je možné zajistit vysoký komfort pro cestující díky nízké míře hluku a vibrací ve srovnání s DMU. Cestující i okolí provozu tak nejsou vystavováni těmto negativním vlivům.
- Při provozu neprodukují BEMU emise škodlivých látek. Veškerá ekologická zátěž je však přenesena do místa výroby elektrické energie a do místa výroby baterií. Baterie, které mají omezenou životnost, je po jejím konci vhodné recyklovat, což je v současnosti stále komplikovaný a nákladný proces.
- Celkové emise vyprodukované v důsledku provozu BEMU (i se započítáním výroby a distribuce elektrické energie, při současném energetickém mixu ČR) mohou být až o 30 % nižší, než u srovnatelné DMU. Tento poměr se bude s rostoucím podílem nízkoemisních zdrojů energie zvyšovat.
- Díky vyšší účinnosti elektromotoru a možnosti rekuperace je možné u BEMU oproti DMU dosáhnout úspory spotřeby energie až o 30 %.
- Provozování BEMU společně s obecným rozvojem elektromobility přináší zvýšené požadavky na elektrickou přenosovou soustavu. Je nutné zajištění její dostatečné kapacity a stability, aby zvládla pokrýt zvýšenou spotřebu elektrické energie v dopravě.

5.2.4 Ekonomika

- BEMU se vyznačují vysokými investičními náklady kvůli nutnosti konstrukčních úprav vozidel na základě EMU z důvodu umístění baterií a souvisejících technologií. Pořizovací cena BEMU se aktuálně odhaduje o 30–50 % vyšší než u srovnatelné DMU. Tyto náklady se však s postupem vývoje technologií, a především s vyšším rozšířením provozovaných vozidel, budou pravděpodobně snižovat. Oproti tomu u DMU se,

vzhledem ke stále zpřísňujícím se emisním normám a klesající poptávce, očekává nárůst pořizovací ceny.

- Výroba DMU je aktuálně považována za neperspektivní a mnoho výrobců už výrobu DMU ukončuje. Zároveň i u objednatelů vlivem rozvoje alternativních pohonů klesá poptávka po dieselových vozidlech. Proto se cena nových DMU zvyšuje a při nákupu nových DMU existuje reálné riziko, že nebudou plně využity po dobu své životnosti.
- Provozní náklady BEMU se odhadují až o 50 % nižší než u srovnatelné DMU z důvodu vyšší účinnosti pohonu, možnosti rekuperace a levnější trakční energii (elektřině) na 1 kWh. Oproti srovnatelné EMU mají BEMU spotřebu vyšší přibližně o 10–15 % z důvodu vyšší hmotnosti a nižší účinnosti bateriového systému.
- Rozdíly v nákladech životního cyklu mezi BEMU a DMU jsou relativně nízké. Velký vliv do budoucna bude mít především další vývoj technologií (především baterií), situace na trhu s ropou, případně restrikce vůči vozidlům se spalovacím motorem (zdanění, emisní povolenky).

5.2.5 Organizační zajištění

- Na výhodnost BEMU je důležité nahlížet v dostatečně dlouhých horizontech. V horizontu 15 let (maximální délka standardní závazkové smlouvy), který vnímají jako klíčový především objednatelé, nebude pravděpodobně využití BEMU výhodnější, než využití DMU. Za takto krátkou dobu totiž nejsou vysoké investiční náklady BEMU plně kompenzovány úsporami provozních nákladů. Ekonomická výhodnost BEMU se začíná projevovat až několik let před koncem životnosti vozidel po zhruba 20–25 letech provozu. V celkových nákladech pak BEMU vycházejí výhodněji než DMU, ale je k tomu třeba zajistit dostatečné využívání vozidel po celou dobu jejich životnosti.
- Výhodným modelem provozování BEMU může být vlastnictví vozidel objednatelem, případně prostřednictvím leasingové společnosti, protože tak může být sníženo riziko neupotřebení vozidel po konci smlouvy s dopravcem. Alternativním řešením by mohlo být definování povinnosti objednatele k odkupu vozidel po ukončení trvání smlouvy. Pokud majitel vozidel (dopravce) bude mít jistotu využití vozidel po celou dobu životnosti, bude moci nabídnout nejvýhodnější cenu dopravního výkonu. Pokud tuto jistotu mít nebude, bude nucen vyžadovat vyšší kompenzaci, aby mohl pokrýt případnou neefektivitu způsobenou nejistým využitím vozidel po konci smlouvy.
- Každé vozidlo BEMU je v současnosti vyráběno na přání zákazníka pro konkrétní trasu, na které bude provozováno. K dosažení nejvýhodnějších podmínek pro pořízení těchto vozidel, je vhodné nakupovat je v co největších sériích. Ideální by byl například nákup BEMU pro provoz na vybraných relacích v rámci celého kraje.

5.2.6 Doporučené kroky pro úspěšné využití BEMU

Technologie, které BEMU využívají, neustále procházejí vývojem a tato vozidla zatím nebyla uvedena do pravidelného provozu. Současná vozidla jsou prozatím testována, jejich uvedení do pravidelného provozu se očekává v roce 2022. Kvůli absenci zkušeností z jejich reálného nasazení je známo pouze minimum ověřených dat o jejich skutečných nákladech a provozních vlastnostech v delším časovém horizontu. Je proto vhodné zajímat se o jejich další vývoj, a především ho aktivně podporovat.

Z hlediska potřebné infrastruktury by bylo vhodné, kdyby Správa železnic spolupracovala s Ministerstvem dopravy a krajskými objednateli na možnostech rozvoje infrastruktury vzhledem k možnostem využití BEMU. Často by se totiž jednalo o relativně málo nákladné investiční akce, které by díky nasazení BEMU mohly přinést veliký užitek. Jedná se především o elektrizaci úseků v dosahu stávajících trakčních transformoven, které nemají dostatečný dosah k propojení celých relací, ale díky využití BEMU může být chybějící úsek překonán v bateriovém režimu. V konečném důsledku to bude pravděpodobně levnější než výstavba chybějící TT pro plnou elektrizaci a zároveň bude umožněn provoz v elektrické trakci. Tímto způsobem by bylo maximalizováno využití již vybudované infrastruktury s minimálními dodatečnými náklady.

Aktuálně je iniciativa k rozvoji BEMU vyvíjena především ze strany výrobců. Možností k urychlení rozvoje jejich technologií by mohla být iniciativa ze strany Ministerstva dopravy i krajských objednatelů železniční dopravy. Měla by být definována koncepce budoucnosti železniční osobní dopravy na úrovni ČR i jednotlivých krajů. V rámci této koncepce by měly být zahrnuty cíle vedoucí ke zvyšování atraktivity pro cestující, snižování energetické náročnosti a snižování negativních dopadů při provozování železniční dopravy. Využívání BEMU by cíle stanovené touto koncepcí nepochybně naplňovalo. Při výhledu do budoucna by pak bylo vhodné se touto problematikou zabývat co nejrychleji, protože se dá předpokládat, že jak cena investic, tak cena na odstraňování negativních dopadů z provozování vozidel s vysokými emisemi se bude nadále zvyšovat.

S tímto vědomím by i objednatelé železniční dopravy mohli začít důkladněji analyzovat možnosti, které by jim provozování BEMU přineslo a rozhodnout se pro jejich pořízení ať už do svého majetku či jako požadavku do soutěže na dopravce. Existuje také možnost vypsání soutěže bez definovaného preferovaného pohonu vozidel a nejvýhodnější druh trakce by mohl vzejít právě z této soutěže. V krajním případě by pak mohlo být uvažováno s pobídkami ze strany Ministerstva dopravy, protože díky využití BEMU jsou minimalizovány externality při provozu a tím jsou fakticky šetřeny náklady státu vynakládané na odstraňování důsledků těchto externalit.

Závěr

Diplomová práce se zabývá určením možností využití bateriových elektrických jednotek (BEMU) v podmínkách České republiky. Cílem práce bylo vyhodnocení vhodnosti této koncepce vozidel, návrh konkrétních lokalit pro jejich provoz na železniční síti ČR a nalezení podmínek, za kterých je využívání BEMU v ČR výhodné. S využitím veřejně dostupných podkladů (především z německých zdrojů) i osobními konzultacemi se zástupci výrobců železničních vozidel, zástupci dopravců i zástupci objednatelů veřejné dopravy byly tyto podmínky určeny a podrobněji jsou rozpracovány v jednotlivých částech práce. Shrnutí těch nejdůležitějších je uvedeno níže.

Analýza současného stavu pohonů železniční jednotek v první části této práce vymezila jednotlivé konvenční i alternativní pohony, které aktuálně přicházejí do úvahy pro provozování železniční osobní dopravy. Vzhledem k zaměření této práce byla dále podrobněji analyzována specifika bateriových elektrických jednotek (BEMU). Ty se v určitých případech zdají být vhodnou alternativou k dieselovým jednotkám (DMU) a vhodným doplňkem k elektrickým jednotkám (EMU).

Z historie je zřejmé, že již před víc než 100 lety byly baterie v železničních vozidlech využívány a v některých případech se tehdy použité technologie podobaly těm moderním. Po druhé světové válce však tento vývoj téměř zcela ustal, a to s nástupem dieselové trakce, která v té době byla považována za nejperspektivnější. Bateriové elektrické vozy však byly provozovány například v Německu i během druhé poloviny 20. století.

Moderní koncepce současných BEMU, které na rozdíl od historických bateriových vozů mohou být dobíjeny i za jízdy, se začaly vyvíjet až na začátku 21. století. Prototypy takových jednotek vznikly například v Japonsku či Velké Británii, ale pro využití ve větším měřítku byl zásadní především vývoj výrobců Siemens, Stadler a Bombardier po roce 2015. Na základě běžně vyráběných elektrických jednotek byly postaveny prototypy BEMU, konkrétně Siemens Desiro ML BEMU (Cityjet Eco), Stadler Flirt Akku a Bombardier Talent 3 BEMU. Tato vozidla byla podrobována testování a začaly být vyvíjeny další typy BEMU také od jiných výrobců. Od roku 2019 byla první vozidla BEMU objednána i pro provoz v konkrétních lokalitách, především v Německu. V současné době nejsou žádné BEMU provozovány v pravidelném provozu a aktuálně objednané BEMU by se měly v pravidelném provozu objevovat postupně od roku 2022. Současné objednávky zahrnují minimálně 86 ks BEMU od 3 různých výrobců (Alstom, Siemens, Stadler) pro provoz v různých částech Spolkové republiky Německo.

Pro možnost co nejkonkrétnějšího určení využití BEMU byla analyzována specifika jejich využití z několika hledisek, zahrnujících mimo jiné nároky na infrastrukturu, provozní koncept, energetiku a ekologii, ekonomiku a organizační zajištění.

Poznatky získané analýzou specifik provozu BEMU byly aplikovány na dvou příkladech konkrétních tratí v ČR. Jedná se o modely investičních a provozních nákladů vozidel a dodatečně vybudované infrastruktury. Ty zahrnují investiční a provozní náklady vozidel, případně jsou připočítány i náklady na stavbu a údržbu napájecí infrastruktury, která je k jejich provozu nutná nad rámec současného stavu. Oba modely byly zpracovány v časových horizontech 15, 30, a 60 let. Horizont 15 let je standardní maximální doba trvání smlouvy o závazku veřejné služby pro přepravu cestujících na železnici a je tedy zásadní z pohledu smluvního zajištění. Horizont 30 let je standardní doba životnosti nových vozidel, a je zásadní z důvodu určení výhodnosti za celý životní cyklus vozidla. Horizont 60 let je odhadovaná doba životnosti infrastruktury, kterou by z důvodu elektrizace bylo nutno vybudovat.

Prvním modelovým příkladem byla relace, která je již v současném stavu pro provoz BEMU vhodná. Pro ukázkou byla zvolena relace Havlíčkův Brod – Žďár nad Sázavou – Nové Město na Moravě v kraji Vysočina, na které je elektrizováno 33 km z celkových 47 km. V tomto modelovém příkladu byla porovnána výhodnost využití BEMU s vozidly DMU a EMU.

Druhým modelovým příkladem byla relace, která by pro umožnění provozu BEMU musela být upravena. Zvolena byla relace mezi Starým Městem u Uherského Hradiště a Valašským Meziříčím přes Bylnici a Horní Lideč ve Zlínském kraji. Na této trase by byl umožněn provoz BEMU po dokončení již plánovaných infrastrukturních akcí. Při těch by na této relaci mělo dojít k elektrizaci 35 km trati a konverzi napájecí soustavy na dalších 37 km. Na této relaci bylo uvažováno s pásmovým provozem, kdy by v případě elektrizace byl elektrizován pouze úsek s nejsilnější dopravním zatížením. To by znamenalo, že provoz EMU by byl umožněn v kombinaci s přestupem na DMU na zbytek trasy. Při provozu BEMU by byly na elektrizovaný úsek vloženy spoje vedené pomocí EMU.

Na základě obou modelových příkladů bylo zhodnoceno, že BEMU mohou být ekonomicky výhodné po dobu své životnosti, pokud mají průměrný proběh na vozidlo alespoň 300 km denně. Za dobu trvání standardní smlouvy o závazku veřejné služby s objednateli však nedokáží prokázat svoji výhodnost. Naopak v horizontu 60 let dokáží při intenzivním provozu vyvážit i náklady na výstavbu potřebné napájecí infrastruktury. Na elektrizovaných úsecích je však při intenzivním provozu nejvýhodnější provoz v čistě elektrické trakci. Proto se využití BEMU hodí především pro úseky, které v dohledné době není možné plně elektrizovat, a to ať z důvodů ekonomických, technických či jiných.

Na základě získaných znalostí byly pro využití BEMU identifikovány konkrétní relace v rámci ČR, na nichž by bylo vhodné s jejich provozem uvažovat. Ty jsou ovlivněny především dostupnou trakční napájecí soustavou, kterou by preferovaně měla být střídavá soustava AC 25 kV, 50 Hz, zastoupená v jižní a západní části republiky. Nejvíce příležitostí při

současném stavu infrastruktury bylo proto identifikováno v krajích Plzeňském, Jihočeském, Jihomoravském a především na Vysočině. V ostatních krajích je využití BEMU v současnosti limitováno kvůli využívání stejnosměrné trakční napájecí soustavy DC 3 kV, která není pro provoz BEMU ideální především z důvodu nízkého elektrického výkonu. Velkou příležitostí pro provozování BEMU je plánovaná konverze na jednotnou napájecí soustavu AC 25 kV. V rámci té by mohlo dojít jak k rozšíření oblastí, kde je možné BEMU výhodně provozovat, ale také by mohla být nově budovaná elektrizace již vhodně konfigurována pro umožnění maximálního potenciálu provozu BEMU. To by umožnilo, na úsecích s neúměrně nákladnou elektrizací či úsecích s nižším provozem, namísto elektrizace provozovat BEMU. V neposlední řadě je pak možné provozovat BEMU v rámci průběhu elektrizace, kdy k jejich provozu postačuje i menší množství elektrizovaných úseků.

V poslední části diplomové práce pak byla formulována konkrétní doporučení pro využití potenciálu, který provoz BEMU nabízí. Jedná se především o doporučení z hledisek provozního a organizačního a jsou určena všem aktérům zajištění železniční dopravy, tedy od Ministerstva dopravy, přes Správu železnic a objednatele dopravy až po dopravce. Tato doporučení vycházejí z poznatků získaných v průběhu zpracování této práce a podrobnější informace k nim je možno nalézt v jednotlivých kapitolách.

Vzhledem k zjištěním získaným v rámci této diplomové práce lze předpokládat, že v budoucnu bude význam využívání BEMU vzrůstat. Díky dalšímu vývoji technologií a s ohledem na současnou environmentální politiku budou stále narůstat benefity, které tato koncepce nabízí. Je třeba zdůraznit, že použití BEMU je poměrně specifické a nehodí se pro plošné nahrazení ostatních druhů pohonu. Jedná se však o vhodný doplněk provozu vozidel v elektrické trakci. V kombinaci s EMU by využití BEMU spolu s elektrizací stěžejních traťových úseků mohlo dopomoci k plně elektrické osobní železniční dopravě na území ČR. Cílovým stavem by měla být elektrizace všech tratí, na kterých je provozována intenzivnější osobní či nákladní doprava a zároveň v takovém rozsahu, aby doprava na zbytku sítě mohla být zajištěna právě pomocí BEMU. Je tedy vhodné se BEMU nadále zabývat, podporovat rozvoj jejich technologií a dbát důraz na efektivní budování infrastruktury, která bude využívat jejich plný potenciál.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Marktanalyse alternativer Antriebe im deutschen Schienen- personennahverkehr. In: *NOW GmbH* [online]. 2020 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/6-querschnittsthemen/now_marktanalyse-schienenverkehr.pdf
- [2] VUCHIC, Vukan R. *Urban transit systems and technology*. Hoboken: Wiley, 2007. ISBN 978-0-471-75823-5.
- [3] Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV. In: *VDE* [online]. 2019 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://www.vde.com/resource/blob/1889656/5f42b90859412b8590d0c7539604b0bc/pr-essemitteilung---studie-alternative-antriebssysteme-im-spnv--1--data.pdf>
- [4] Passenger tram train realistic set with isolated images of public transport railroad cars and electric trams illustration Free Vector. *Freepik.com* [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://www.freepik.com/free-vector/passenger-tram-train-realistic-set-with-isolated-images-public-transport-railroad-cars-electric-trams-illustration_6852143.htm#page=1&query=electric%20train&position=13
- [5] Spalovací motory, přenosy výkonu. *Atlas lokomotiv* [online]. [cit. 2019-10-05]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/page-prenosy.html>
- [6] STAFFELL, Iain. The Energy and Fuel Data Sheet. In: *University of Birmingham* [online]. 2011 [cit. 2020-01-11]. Dostupné z: https://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf
- [7] Trolejové vedení s přívodní kolejnicí pro trakční soustavy AC 25 kV a DC 3 kV. In: *Správa železnic* [online]. [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/documents/50004227/50176572/ts9-2009-e.pdf>
- [8] FENDRICH, Lothar. *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-29581-5.
- [9] ŠTĚNIČKA, Petr. *Současný stav a vývojové tendence v konstrukci hybridních pohonů pro osobní automobily*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] HEDRICHOVÁ, Helen. *Hybridní pohony kolejových vozidel*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Josef MORKUS, CSc.
- [11] Bewertung von konventionellen und alternativen Antrieben für den Rheinland-Pfalz Takt 2030 unter besonderer Betrachtung des Pilotprojekts „Pfalznetz“. In: *Technische Universität Dresden* [online]. 2019 [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: https://www.zspnv-sued.de/fileadmin/user_upload/Endbericht_alternative_Antriebe_Pfalznetz_O_.pdf

- [12] Hybrid drive demonstrates 15% fuel saving. *Railway Gazette* [online]. 2015 [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/hybrid-drive-demonstrates-15-fuel-saving/40806.article>
- [13] Bi-mode trains: Unlocking opportunity? *RailEngineer* [online]. 2017 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.railengineer.co.uk/2017/10/24/bi-mode-trains-unlocking-opportunity/>
- [14] FLIRT BMU for Greater Anglia in Velim. In: *Vladanfoto* [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://www.vladanfoto.cz/clanky-flirt-bmu-for-greater-anglia-in-velim.html>
- [15] Alstom Régiolis Regional Trains. *Railway Technology* [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/projects/alstom-rgiolis-regional-trains/>
- [16] Automoteurs à Grande Capacité (AGC) SNCF. *Trains d'Europe* [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.trains-europe.fr/sncf/automoteurs/agc.htm>
- [17] Greater Anglia's first bi-mode FLIRT enters regular service. *Railcolornews.com* [online]. 2019 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://railcolornews.com/2019/07/29/uk-greater-anglias-first-bi-mode-flirt-enters-regular-service/>
- [18] Stadler FLIRT BMUs for Valle d'Aosta enter service. *Railcolornews.com* [online]. 2019 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://railcolornews.com/2019/10/30/it-stadler-flirt-bemus-for-valle-daosta-enters-service-but-not-without-problems/>
- [19] Regional Rail. *Transport for NSW* [online]. 2020 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.transport.nsw.gov.au/projects/current-projects/regional-rail>
- [20] POHL, Jiří. *Poskytnuté podklady, osobní a e-mailová konzultace*.
- [21] Jak nakládat s elektroodpadem a proč? *energyglobe.cz* [online]. 2016 [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.energyglobe.cz/temata-a-novinky/jak-nakladat-s-elektroodpadem-a-proc>
- [22] The fuel cells and #hydrogen tanks. *Twitter.com* [online]. 2017 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://twitter.com/AlstomUK/status/928938156946313217>
- [23] 'World's largest fleet of fuel cell trains' ordered. *Railway Gazette* [online]. 2019 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.railwaygazette.com/news/traction-rolling-stock/single-view/view/worlds-largest-fleet-of-fuel-cell-trains-ordered.html>
- [24] Zillertalbahn will als Wasserstoff-Pionier durchstarten. *DER STANDARD* [online]. 2019 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.derstandard.at/story/2000109792438/zillertalbahn-will-als-wasserstoff-pionier-durchstarten>
- [25] US hydrogen train contract awarded. *Railway Gazette* [online]. 2019 [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/us-hydrogen-train-contract-awarded/55124.article>

- [26] Jakub Unucka: Budoucnost železnice je také ve vodíku. *Železničář* [online]. 2019 [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/rozhovor/jakub-unucka--budoucnost-zeleznice-je-take-ve-vodiku/-21100/>
- [27] History Bendigo's trams as public transport. *Bendigo Tramways* [online]. [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <http://www.bendigotramways.com/about/history>
- [28] Qatar's first Education City tram rolls out. *Railway Gazette* [online]. 2015 [cit. 2010-02-02]. Dostupné z: <https://www.railwaygazette.com/news/urban/single-view/view/qatars-first-education-city-tram-rolls-out.html>
- [29] RailBaar – Rapid Charge Station. *RailEngineer* [online]. 2017 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.railengineer.co.uk/2017/04/06/railbaar-rapid-charge-station/>
- [30] Dual-mode tramway: how Nice is reinventing urban mobility. *ALTEN* [online]. 2019 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://www.alten.com/dual-mode-tramway-how-nice-is-reinventing-urban-mobility/>
- [31] SRS: Innovative, safe and automatic charging for trams and electric buses. *Alstom* [online]. 2020 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/our-solutions/infrastructure/srs-innovative-safe-and-automatic-charging-trams-and-electric-buses>
- [32] První česká bateriová tramvaj určená pro Turecko bude k vidění v Plzni. *FCC Public* [online]. 2015 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/clanek/prvni-ceska-bateriova-tramvaj-urcena-pro-turecko-bude-k-videni-v-plzni--889>
- [33] Baterky na kolejích. *Vlaky.net* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/6071-Baterky-na-kolejich//?najdi=792093>
- [34] Toshiba unveils hybrid locomotive in Munich. *International Railway Journal* [online]. 2019 [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://www.railjournal.com/fleet/toshiba-unveils-hybrid-locomotive-in-munich/>
- [35] První hybridní lokomotiva od CZ LOKO. Hlavní jsou baterie, diesel jen jako záloha. *Zdopravy.cz* [online]. 2019 [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/prvni-hybridni-lokomotiva-od-cz-loko-hlavni-jsou-baterie-diesel-jen-jako-zaloha-29852/>
- [36] CZ LOKO chystá novou trojživelnou lokomotivu. Veřejnost napíná, podrobnosti tají. *i-doprava.com* [online]. 2020 [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://i-doprava.com/2020/01/10/cz-loko-chysta-novou-trojzivelnou-lokomotivu-verejnost-napina-podrobnosti-taji/>
- [37] Akumulátorová tramvaj František Křížík. In: *iDNES.cz* [online]. [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/archiv/vizionar-ktery-rozsvitil-ceske-ulice.A111112_1683859_kavarna_bar/foto/KUZ3c7abf_120_ED_13A.jpg

- [38] Edison-Beach railcar. *Project Gutenberg* [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: http://www.gutenberg.us/articles/edison-beach_railcar
- [39] What is the Future of Battery Trains in New Zealand? *Medium* [online]. 2018 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://medium.com/land-buildings-identity-and-values/electric-battery-powered-public-transport-722b5c9c5361>
- [40] Flashback 1931 - first journey of battery-powered train. *Independent.ie* [online]. 2015 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.independent.ie/life/flashback-1931-first-journey-of-batterypowered-train-34252634.html>
- [41] Derby Lightweight Battery Unit. *The Railcar Association* [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://preserved.railcar.co.uk/79998.html>
- [42] Class 419 MLV: Motor Luggage Van. *Kent Rail* [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: https://www.kentrail.org.uk/class_419_MLV.htm
- [43] ZSCHECH, Rainer. *Akku- und Elektrotriebwagen*. Berlin: transpress, 1992. ISBN 3344707531.
- [44] 515 016 + 815 708 beim Energietanken. In: *ETA im Norden* [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <https://www.bilder-hochladen.net/files/big/k856-9b-73e2.jpg>
- [45] NE Train. *Jreast.co.jp* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.jreast.co.jp/press/2011/20120204.pdf>
- [46] DENCHA. *Jrkyushu.co.jp* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: http://www.jrkyushu.co.jp/news/___icsFiles/afieldfile/2018/12/14/181214Newsrelease01.pdf
- [47] Kyushu Railway Company type BEC819 EMU. In: *Japan Railfan Club* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <http://www.jrc.gr.jp/e/award/bl/bl2017>
- [48] EV-E801. *Jreast.co.jp* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.jreast.co.jp/akita/press/pdf/20151120-1.pdf>
- [49] Auckland approves order for battery-electric trains. *International Railway Journal* [online]. 2017 [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.railjournal.com/regions/australia-nz/auckland-council-approves-order-for-caf-battery-electric-trains/>
- [50] Battery-powered Electrostar enters traffic. *RAIL magazine* [online]. 2015 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.railmagazine.com/news/network/2015/01/13/battery-powered-electrostar-enters-traffic>
- [51] Batteries included. *RailEngineer* [online]. 2015 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.railengineer.co.uk/2015/02/25/batteries-included/>
- [52] Electric alternatives. *Railfuture* [online]. 2019 [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <https://www.railfuture.org.uk/article1825-Electric-alternatives>

- [53] LAPERRIÈRE, Yves. Realize your vision with Bombardier TALENT 3 BEMU. In: *APTA* [online]. 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://www.apta.com/wp-content/uploads/Realize-your-vision-with-Bombardier-TALENT-3-BEMU_Yves_Lappierre.pdf
- [54] Baden-Württemberg: Siemens liefert BEMU für Ortenau-Netz. *Eurail press* [online]. 2019 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.eurailpress.de/nachrichten/fahrzeuge-komponenten/detail/news/baden-wuerttemberg-siemens-liefert-bemu-fuer-ortenau-netz.html>
- [55] SCHULZE, Burkhard. *Decarbonize rail transport in Schleswig-Holstein*. Konference ELEKTROMOBILITA NA ŽELEZNICI 2020 – 2030, Žďár nad Sázavou, 2019.
- [56] Alstom signs first contract for battery-electric regional trains in Germany. *Alstom* [online]. 2020 [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2020/2/alstom-signs-first-contract-battery-electric-regional-trains-germany>
- [57] GERSTENMAYER, Thomas. *Project Cityjet eco battery-hybrid train for catenary free operation ÖBB Personenverkehr AG*. Konference ELEKTROMOBILITA NA ŽELEZNICI 2020 – 2030. Žďár nad Sázavou, 2019.
- [58] Service and maintenance contract for 69 trains of Arriva Nederland. *Stadler* [online]. 2018 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://www.stadlerrail.com/en/media/article/contract-signing-arriva-netherlands-will-see-stadler-provide-service-and-maintenance-69-trains-north-holland/150/>
- [59] České dráhy vyjedou s prvním hybridním vlakem, půjde o RegioPanter s baterií. *Zdopravy.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/ceske-drahy-vyjedou-s-prvnim-hybridnim-vlakem-pujde-o-regiopanter-s-baterii-20301/>
- [60] PLOMER, Jan a Jan ILÍK. *Alternativní bezemisní České dráhy*. Konference ELEKTROMOBILITA NA ŽELEZNICI 2020 – 2030. Žďár nad Sázavou, 2019.
- [61] Battery train energises race to replace diesel. *International Railway Journal* [online]. 2018 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: https://www.railjournal.com/in_depth/battery-train-energises-race-to-replace-diesel
- [62] Mireo Plus – Hybrid regional train by Siemens Mobility. In: *Siemens* [online]. [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <http://www.hdzi.hr/images/split2019/simens1.pdf>
- [63] *Battery University* [online]. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/>
- [64] BOMBARDIER MITRAC traction battery. In: *GlobeNewswire* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.globenewswire.com/NewsRoom/AttachmentNg/85ae68a1-3d0a-4194-bd97-f0edb8ae63bf>

- [65] Revoluční lithium-vzduch baterie: budoucnost nebo jen sny? *Hybrid.cz* [online]. 2014 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/soucasny-stav-lithium-vzduch-baterii>
- [66] Baterie lithium-kyslík to nebudou mít jednoduché. *SCIENCEmag.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/baterie-lithium-kyslik-to-nebudou-mit-jednoduche/>
- [67] Superkondenzátory: nahradí v budoucnu lithium-iontové baterie? *Hybrid.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/superkondenzatory-nahradi-v-budoucnu-lithium-iontove-baterie>
- [68] Hybrid supercapacitors are being developed to power rolling stock. *Global Railway Review* [online]. 2018 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://www.globalrailwayreview.com/news/68740/supercapacitors-power-rolling-stock/>
- [69] Statistická ročenka 2019. In: *Správa železnic* [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/documents/50004227/64057801/Statistick%C3%A1+ro%C4%8Denka+2019/2212bd66-c7e7-44d6-9a5b-f337df90f5eb>
- [70] Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV. In: *Technische Universität Dresden* [online]. 2017 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.smart-railway-owl.de/wp-content/uploads/2019/09/Technische-und-wirtschaftliche-Bewertung-alternativer-Antriebskonzepte.pdf>
- [71] SŽDC chystá „jízdni řád“ pro přepínání na střídavý proud v Polabí. *Zdopravy.cz* [online]. 2020 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/szdc-chysta-jizdni-rad-pro-prepinani-na-stridavy-proud-v-polabi-39705/>
- [72] Přejechání železnice na jednu napájecí soustavu má stát 40 miliard. *OEnergetice.cz* [online]. 2016 [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/rychle-zpravy/prechod-zeleznice-na-jednu-napajeci-soustavu-ma-stat-40-miliard>
- [73] E-mobility. In: *Furrer+Frey* [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.furrerfrey.ch/en/systems/rapid_charge_station.html
- [74] RÜGER, Siegfried. *Transporttechnologie städtischer öffentlicher Personenverkehr*. Berlin: Transpress, 1986.
- [75] Roční zpráva o provozu ES ČR 2018. In: *Energetický regulační úřad* [online]. 2019 [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf

- [76] Paris Agreement. *United Nations* [online]. [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en
- [77] Životní prostředí. *OTE* [online]. [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: <https://www.sand.ote-cr.cz/cs/statistika/dlouhodobá-rovnováha-elektrina/zivotni-prostredi>
- [78] Railway Transport 4.0 – Innovation within the railway industry for more climate protection and more customer quality. In: *Die Bahnindustrie* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://bahnindustrie.info/fileadmin/Sonstiges/180919_VDB_InnoTrans_Convention_presentation.pdf
- [79] Strom aus Erneuerbaren Energien. *Agentur für Erneuerbare Energien* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.foederal-erneuerbar.de/auf-einen-blick-detailseite/items/strom>
- [80] The spiralling environmental cost of our lithium battery addiction. *Wired* [online]. 2018 [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: <https://www.wired.co.uk/article/lithium-batteries-environment-impact>
- [81] Recyklace li-ion baterií – úvod. *OEnergetice* [online]. 2018 [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/recyklace-lithium-ion-baterii-uvod>
- [82] Bombardier's TALENT 3 battery electric multiple unit wins Berlin Brandenburg innovation award. *Bombardier* [online]. 2018 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://www.bombardier.com/en/media/newsList/details.bt-20181203-bombardierts-talent3-battery-electric-multiple-unit-wins-berlin-brandenburg-innovation-award.bombardiercom.html>
- [83] Electromobility: Battery-operated train to replace standard diesel vehicles from as early as 2019. *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* [online]. 2019 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/EN/News/2019/20190228-flirt-akku.html>
- [84] Country Highlights: Germany. In: *Österreichische Energieagentur* [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: https://www.energyagency.at/fileadmin/dam/image/projekte/energie_klimapolitik/Hylaw_ExCo_Nov18/Praesentationen/Highlights_Germany_2018.pdf
- [85] Systémy trakčních proudových soustav. In: *Ministerstvo dopravy* [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepce-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n/mapa_system.pdf.aspx

- [86] Cityjet-Eco-Prototyp startet in Oberösterreich. In: *Meinbezirk.at* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.meinbezirk.at/salzkammergut/c-lokales/cityjet-eco-prototyp-startet-in-oberoesterreich_a3664917
- [87] Siemens Press Release The new Mireo – Intelligence on rails. In: *Siemens* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:015a9c15-fd22-42a7-ada7-799501c1a51e/width:1200/im2018120126mo_300dpi.jpg
- [88] FLIRT Akku. In: *Tren y rail* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.trenyrail.com/wp-content/uploads/2019/06/190620-FLIRT-Akku.jpg>
- [89] Stadler Wink regional DMU revealed. In: *Railway Gazette* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/stadler-wink-regional-dmu-revealed/55855.article>
- [90] Bombardier Talent 3 BEMU. In: *Bombardier* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/News/BT/BT_20181203_Bombardier%20TALENT%20BEMU.jpg/_jcr_content/renditions/original
- [91] Alstom Coradia Continental. In: *Railmen* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.railmen.com/wp-content/uploads/2018/06/MRB_1_HBF_Chemnitz.jpg
- [92] 650.001-1. In: *Zelpage.cz* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/fotogalerie/big/650007.jpg>

Seznam obrázků

- Obrázek 1** Schéma rozdělení pohonů ucelených jednotek
- Obrázek 2** Koncepce pohonu DMU (diesel-mechanická)
- Obrázek 3** Koncepce pohonu DMU (diesel-elektrická)
- Obrázek 4** Koncepce pohonu EMU
- Obrázek 5** Koncepce pohonu DHEMU
- Obrázek 6** Koncepce pohonu BMU
- Obrázek 7** Článek obsahující „power pack“ BMU Stadler Flirt 3
- Obrázek 8** Koncepce pohonu BEMU
- Obrázek 9** Koncepce pohonu HMU
- Obrázek 10** Palivové články a vodíkové nádrže na střeše HMU Alstom iLint
- Obrázek 11** Koncepce pohonu BEMU+FC
- Obrázek 12** Zařízení SRS pro statické dobíjení tramvají v Nice
- Obrázek 13** Akumulátorová tramvaj Františka Křižíka (1899)
- Obrázek 14** Novozélandský prototyp bateriového vozu (1926)
- Obrázek 15** Nabíjení vozidla ETA 150 (1955)
- Obrázek 16** Japonská BEMU DENCHA (2016)
- Obrázek 17** Trakční baterie MITRAC využívaná u vozidla Bombardier Talent 3 BEMU
- Obrázek 19** Postup elektrizace: stav před zahájením elektrizace (provoz DMU)
- Obrázek 20** Postup elektrizace: průběh souvislé elektrizace (provoz BEMU)
- Obrázek 21** Postup elektrizace: elektrizované koncové úseky (provoz BEMU)
- Obrázek 21** Postup elektrizace: elektrizované „trolejové ostrovy“ (provoz BEMU)
- Obrázek 22** Postup elektrizace: elektrizace celého úseku (provoz EMU)
- Obrázek 23** Nabíjecí zařízení využitelné pro systém RailBaar
- Obrázek 24** Provozování BEMU na neelektrizovaném úseku s nabíjením v koncových úsecích
- Obrázek 25** Provozování BEMU na koncovém neelektrizovaném úseku
- Obrázek 26** Provozování BEMU na neelektrizovaném úseku s „trolejovými ostrovy“
- Obrázek 27** Aktéři zajištění železničního provozu v závazku veřejné služby
- Obrázek 28** Schématická mapa trasy pro model „Vysočina“
- Obrázek 29** Schématická mapa trasy pro model „Slovácko-Valašsko“
- Obrázek 30** Siemens Desiro ML (ÖBB Cityjet Eco)
- Obrázek 31** Siemens Mireo ve verzi EMU
- Obrázek 32** Testovací verze Stadler Flirt Akku
- Obrázek 33** Stadler Wink DMU ve verzi na HVO s možnou přestavbou na BEMU
- Obrázek 34** Bombardier Talent 3 BEMU

Obrázek 35 Alstom Coradia Continental ve verzi EMU

Obrázek 36 Škoda Regioplanter ve verzi EMU (řada 650)

Seznam tabulek

Tabulka 1	Výhody a nevýhody DMU
Tabulka 2	Výhody a nevýhody EMU
Tabulka 3	Výhody a nevýhody DHEMU
Tabulka 4	Výhody a nevýhody BMU
Tabulka 5	Výhody a nevýhody HMU
Tabulka 6	Výhody a nevýhody BEMU+FC
Tabulka 7	Délka železniční sítě ČR 2019
Tabulka 8	Dopravní výkon vlaků osobní dopravy v ČR 2019
Tabulka 9	Vstupní náklady vozidel pro model
Tabulka 10	Vstupní náklady na výstavbu infrastruktury pro model
Tabulka 11	Parametry infrastruktury pro model „Vysočina“
Tabulka 12	Parametry provozního konceptu pro model „Vysočina“
Tabulka 13	Vstupní náklady nezávislé na trakci pro model „Vysočina“
Tabulka 14	Položky nákladů modelu „Vysočina“ pro 30minutový interval
Tabulka 15	Položky nákladů modelu „Vysočina“ pro 60minutový interval
Tabulka 16	Položky nákladů modelu „Vysočina“ pro 120minutový interval
Tabulka 17	Výsledné rozdílové hodnoty nákladů DMU a BEMU dle modelu „Vysočina“
Tabulka 18	Parametry infrastruktury pro model „Slovácko-Valašsko“
Tabulka 19	Parametry provozního konceptu pro model „Slovácko-Valašsko“
Tabulka 20	Varianty provozního konceptu pro model „Slovácko-Valašsko“
Tabulka 21	Vstupní náklady nezávislé na trakci pro model „Slovácko-Valašsko“
Tabulka 22	Položky nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 30/60minutový interval
Tabulka 23	Položky nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 60/120minutový interval
Tabulka 24	Rozdílové hodnoty nákladů DMU a BEMU+EMU dle modelu „Slovácko-Valašsko“
Tabulka 25	Rozdílové hodnoty nákladů DMU+EMU a BEMU+EMU dle modelu „Slovácko-Valašsko“
Tabulka 26	Parametry Siemens Desiro ML (ÖBB Cityjet Eco)
Tabulka 27	Parametry Siemens Mireo
Tabulka 28	Parametry Stadler Flirt Akku
Tabulka 29	Parametry Stadler Wink
Tabulka 30	Parametry Bombardier Talent 3 BEMU
Tabulka 31	Parametry Alstom Coradia Continental BEMU
Tabulka 32	Parametry Škoda Regiopanter hybrid

Seznam grafů

- Graf 1** Specifická hustota energie pro různé typy baterií
- Graf 2** Počet nabíjecích cyklů Li-ion baterií
- Graf 3** Elektrizace na železniční síti ČR
- Graf 4** Limitní průběh nabíjení stojícího vozidla přes sběrač z trakčního vedení
- Graf 5** Dojezd vozidel dle trakce
- Graf 6** Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny v ČR – brutto 2018
- Graf 7** Ekvivalentní emise provozu ucelených jednotek
- Graf 8** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 30minutový interval v horizontu 15 let
- Graf 9** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 30minutový interval v horizontu 30 let
- Graf 10** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 60minutový interval v horizontu 15 let
- Graf 11** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 60minutový interval v horizontu 30 let
- Graf 12** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 120minutový interval v horizontu 15 let
- Graf 13** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 120minutový interval v horizontu 30 let
- Graf 14** Rozdíl výhodnosti provozu BEMU oproti provozu DMU dle modelu „Vysočina“
- Graf 15** Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 30/60minutový interval v horizontu 15 let
- Graf 16** Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 30/60minutový interval v horizontu 30 let
- Graf 17** Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 60/120minutový interval v horizontu 15 let
- Graf 18** Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 60/120minutový interval v horizontu 30 let
- Graf 19** Rozdíl výhodnosti provozu BEMU+EMU oproti provozu DMU dle modelu „Slovácko-Valašsko“
- Graf 20** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 30minutový interval v horizontu 60 let
- Graf 21** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 60minutový interval v horizontu 60 let
- Graf 22** Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 120minutový interval v horizontu 60 let
- Graf 23** Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 30/60minutový interval v horizontu 60 let
- Graf 24** Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 60/120minutový interval v horizontu 60 let

Seznam příloh

Příloha 1 Přehled současných vozidel BEMU

Příloha 2 Vývoj nákladů modelových příkladů v horizontu 60 let

Příloha 3 Mapa trakčních napájecích (proudových) soustav v České republice

Příloha 1 Přehled současných vozidel BEMU

Siemens

Německý výrobce Siemens aktuálně vyvíjí dva typy vozidel BEMU. První typ je odvozený od vozidla Desiro ML (obchodně označovaného jako ÖBB Cityjet) a je označen jako ÖBB Cityjet Eco. Druhý je postaven na platformě nazvané Mireo. Parametry typu Desiro ML (ÖBB Cityjet Eco) jsou uvedeny v tabulce 26 a zobrazen je na obrázku 30. Parametry typu Mireo Plus B jsou uvedeny v tabulce 27 (hodnoty jsou platné pro dvoučlávkovou jednotku, závorce jsou uvedeny hodnoty pro tříčlávkovou) a zobrazen je na obrázku 31.

Tabulka 26 Parametry Siemens Desiro ML (ÖBB Cityjet Eco)

Výrobce: Siemens	Typ: Desiro ML (ÖBB Cityjet Eco)
Kapacita:	244 míst k sezení
Počet vozů/článků:	3 vozy
Maximální rychlost:	140 km/h (120 km/h v bateriovém režimu)
Napájecí soustava:	AC 15 kV / AC 25 kV
Kapacita baterií:	528 kWh (LTO)
Dojezd na baterie:	80 km
Umístění baterií:	na střeše vozů
Aktuální rozšíření:	1ks testovací provoz (Dolní Rakousko, Rakousko)
Objednáno:	-
Uvedení do provozu:	testovací provoz 2019



Obrázek 30 Siemens Desiro ML (ÖBB Cityjet Eco) [86]

Tabulka 27 Parametry Siemens Mireo

Výrobce: Siemens	Typ: Mireo Plus B
Kapacita:	>120 (200) míst k sezení
Počet vozů/článků:	2 (3) články
Maximální rychlost:	160 km/h (140 km/h v bateriovém režimu)
Napájecí soustava:	AC 15 kV
Kapacita baterií:	cca 700 kWh
Dojezd na baterie:	80 (120) km
Umístění baterií:	pod podlahou vozů
Aktuální rozšíření:	-
Objednáno:	20 ks (Bádensko-Württembersko, Německo)
Uvedení do provozu:	2023



Obrázek 31 Siemens Mireo ve verzi EMU [87]

Stadler

Švýcarský výrobce Stadler aktuálně vyvíjí dva typy vozidel BEMU. Jedná se o Flirt Akku, který vychází ze sériového provedení jednotky Flirt a také Wink, který vychází z modulární koncepce známé například z typu GTW. Parametry typu Flirt Akku jsou uvedeny v tabulce 28 (v závorce jsou uvedeny hodnoty pro testovací verzi, která je zobrazena na obrázku 32). Parametry typu Wink jsou uvedeny v tabulce 29 a na obrázku 33 je zobrazen ve verzi DMU poháněné pomocí HVO, kterou je možno přestavět na BEMU.

Tabulka 28 Parametry Stadler Flirt Akku

Výrobce: Stadler	Typ: Flirt Akku
Kapacita:	124 (154) míst k sezení
Počet vozů/článků:	2 (3) články
Maximální rychlost:	160 km/h (140 km/h v bateriovém režimu)
Napájecí soustava:	AC 15 kV
Kapacita baterií:	?
Dojezd na baterie:	80 km (v optimálních podmínkách až 150 km)
Umístění baterií:	na střeše vozů
Aktuální rozšíření:	-
Objednáno:	55 ks (Šlesvicko-Holštýnsko, Německo)
Uvedení do provozu:	2022



Obrázek 32 Testovací verze Stadler Flirt Akku [88]

Tabulka 29 Parametry Stadler Wink

Výrobce: Stadler	Typ: Wink
Kapacita:	135 míst k sezení
Počet vozů/článků:	2 články (+ vložený článek pro umístění bateriového ústrojí)
Maximální rychlost:	140 km/h
Napájecí soustava:	DC 1,5 kV
Kapacita baterií:	?
Dojezd na baterie:	?
Umístění baterií:	samostatný článek
Aktuální rozšíření:	-
Objednáno:	18 ks (Arriva, Friesland a Groningen, Nizozemsko)
Uvedení do provozu:	předpokládáno 2025



Obrázek 33 Stadler Wink DMU ve verzi na HVO s možnou přestavbou na BEMU [89]

Bombardier

Kanadský výrobce Bombardier aktuálně vyvíjí BEMU odvozenou z typu Talent 3, jejíž parametry jsou uvedeny v tabulce 30 a zobrazena je na obrázku 34.

Tabulka 30 Parametry Bombardier Talent 3 BEMU

Výrobce: Bombardier	Typ: Talent 3 BEMU
Kapacita:	169 míst k sezení
Počet vozů/článků:	3 články
Maximální rychlost:	140 km/h
Napájecí soustava:	AC 15 kV
Kapacita baterií:	300–440 kWh (NMC)
Dojezd na baterie:	40–100 km
Umístění baterií:	na střeše vozů
Aktuální rozšíření:	1 ks testovací jednotka (Bádensko-Württembersko, Německo)
Objednáno:	-
Uvedení do provozu:	testovací provoz 2019



Obrázek 34 Bombardier Talent 3 BEMU [90]

Alstom

Francouzský výrobce Alstom aktuálně vyvíjí typ Coradia Continental BEMU, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 31 a je zobrazen na obrázku 35.

Tabulka 31 Parametry Alstom Coradia Continental BEMU

Výrobce: Alstom	Typ: Coradia Continental BEMU
Kapacita:	150 míst k sezení
Počet vozů/článků:	3 články
Výkon:	?
Maximální rychlost:	160 km/h
Napájecí soustava:	AC 15 kV
Kapacita baterií:	?
Dojezd na baterie:	120 km
Umístění baterií:	na střeše vozů
Aktuální rozšíření:	-
Objednáno:	11 ks (Sasko, Německo)
Uvedení do provozu:	2023



Obrázek 35 Alstom Coradia Continental ve verzi EMU [91]

Škoda

Český výrobce Škoda aktuálně vyvíjí prototyp BEMU s využitím vozidla Regiopanter doplněného o upravené bateriové kontejnery používané v tramvajích. Parametry tohoto vozidla jsou uvedeny v tabulce 32 a ve verzi EMU je zobrazeno na obrázku 36.

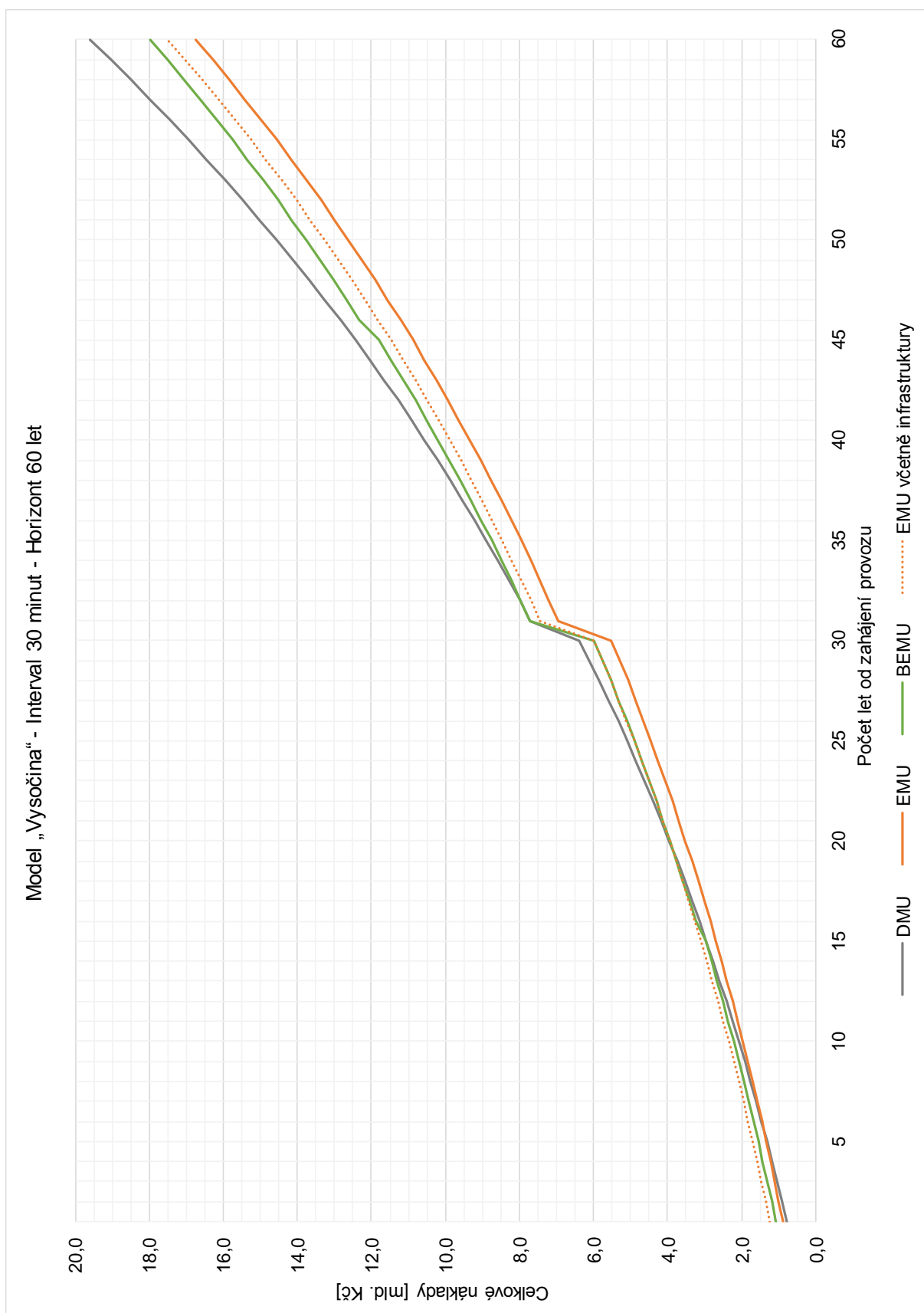
Tabulka 32 Parametry Škoda Regiopanter hybrid

Výrobce: Škoda	Typ: Regiopanter hybrid
Kapacita:	140 míst k sezení
Počet vozů/článků:	2 vozy
Maximální rychlost:	?
Napájecí soustava:	DC 3 kV / AC 25 kV
Kapacita baterií:	?
Dojezd na baterie:	40 km (pro sériovou výrobu 80–100 km)
Umístění baterií:	na střeše vozů
Aktuální rozšíření:	-
Objednáno:	-
Uvedení do provozu:	prototyp plánován 2020

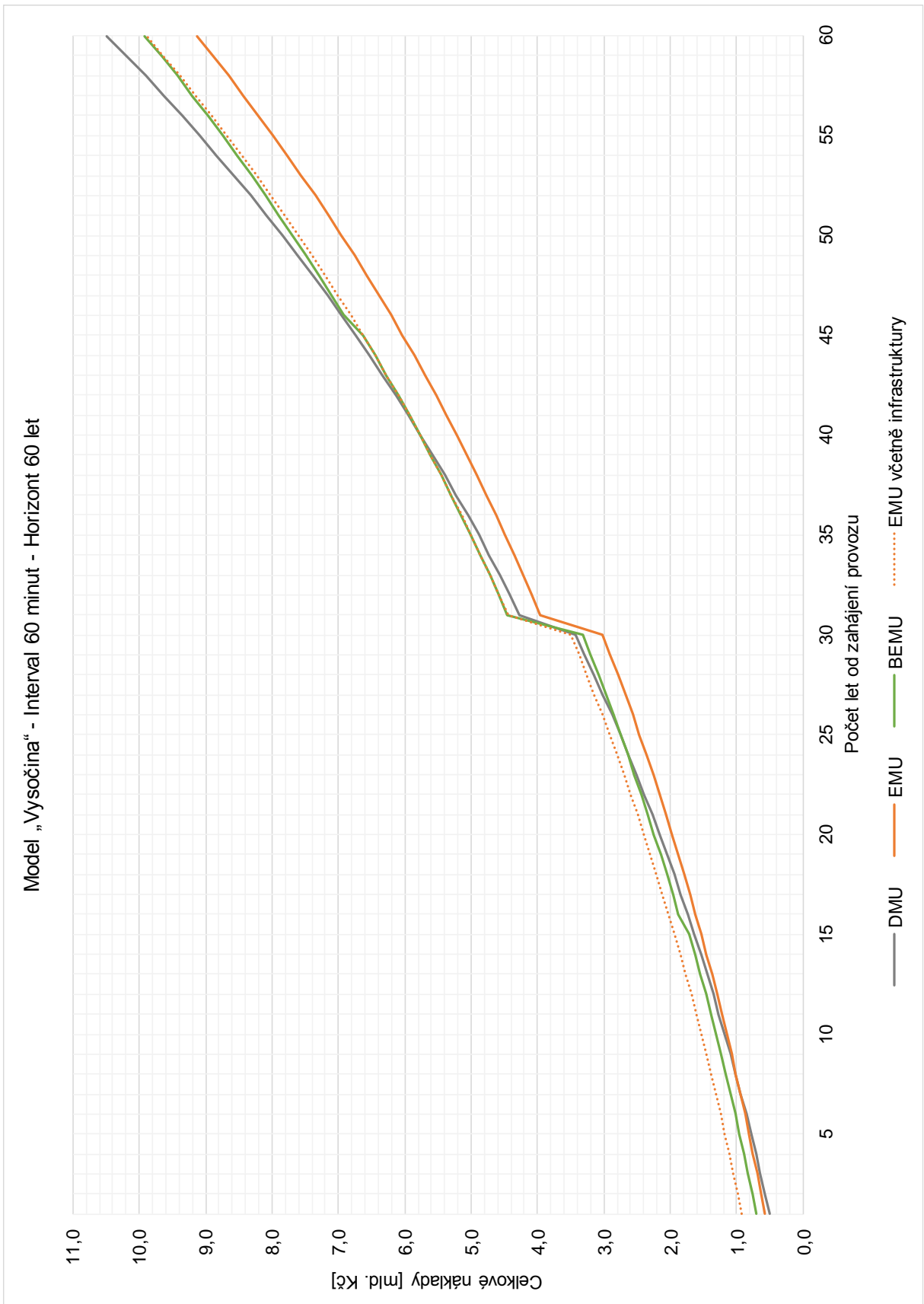


Obrázek 36 Škoda Regiopanter ve verzi EMU (řada 650) [92]

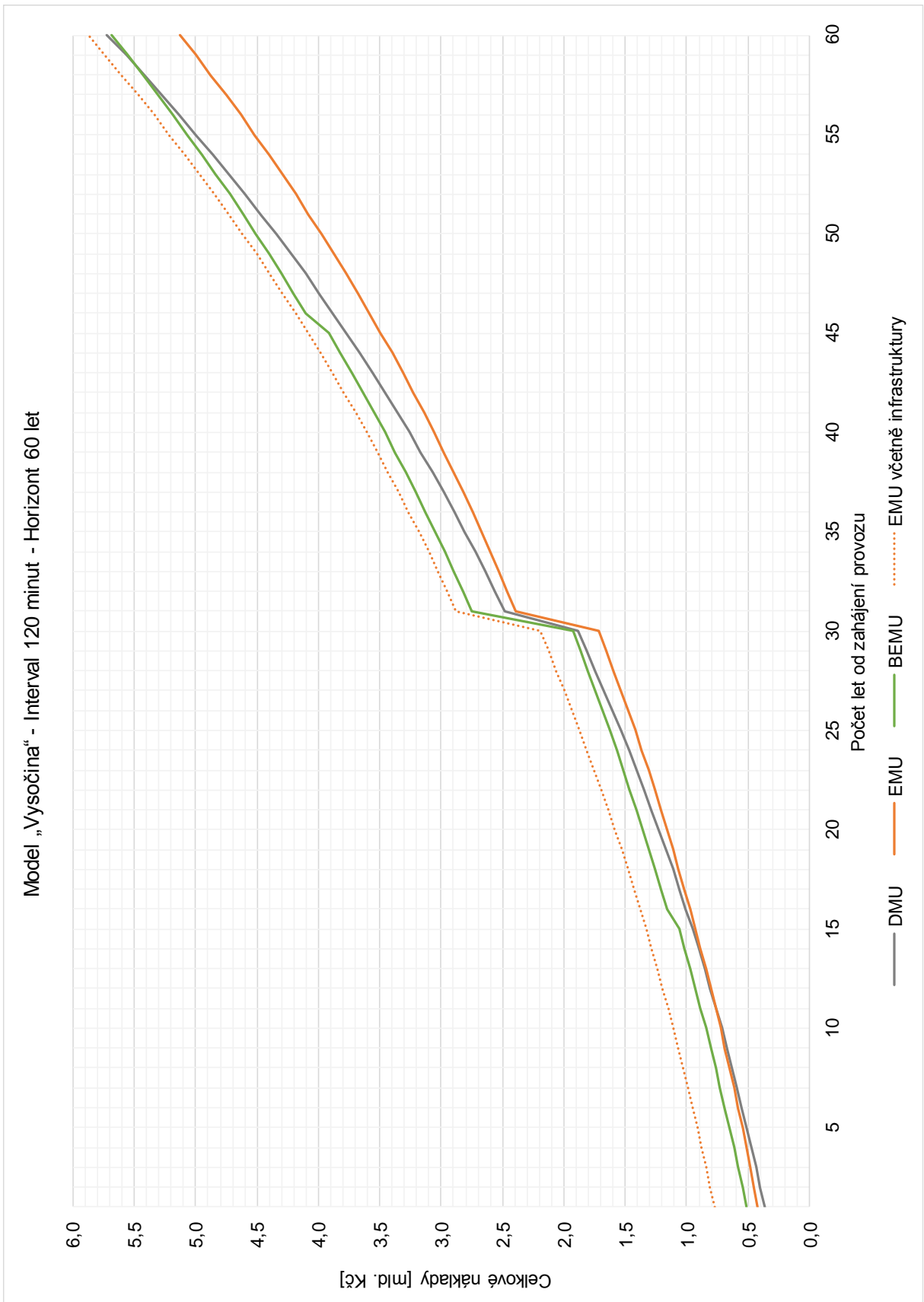
Příloha 2 Vývoj nákladů modelových příkladů v horizontu 60 let



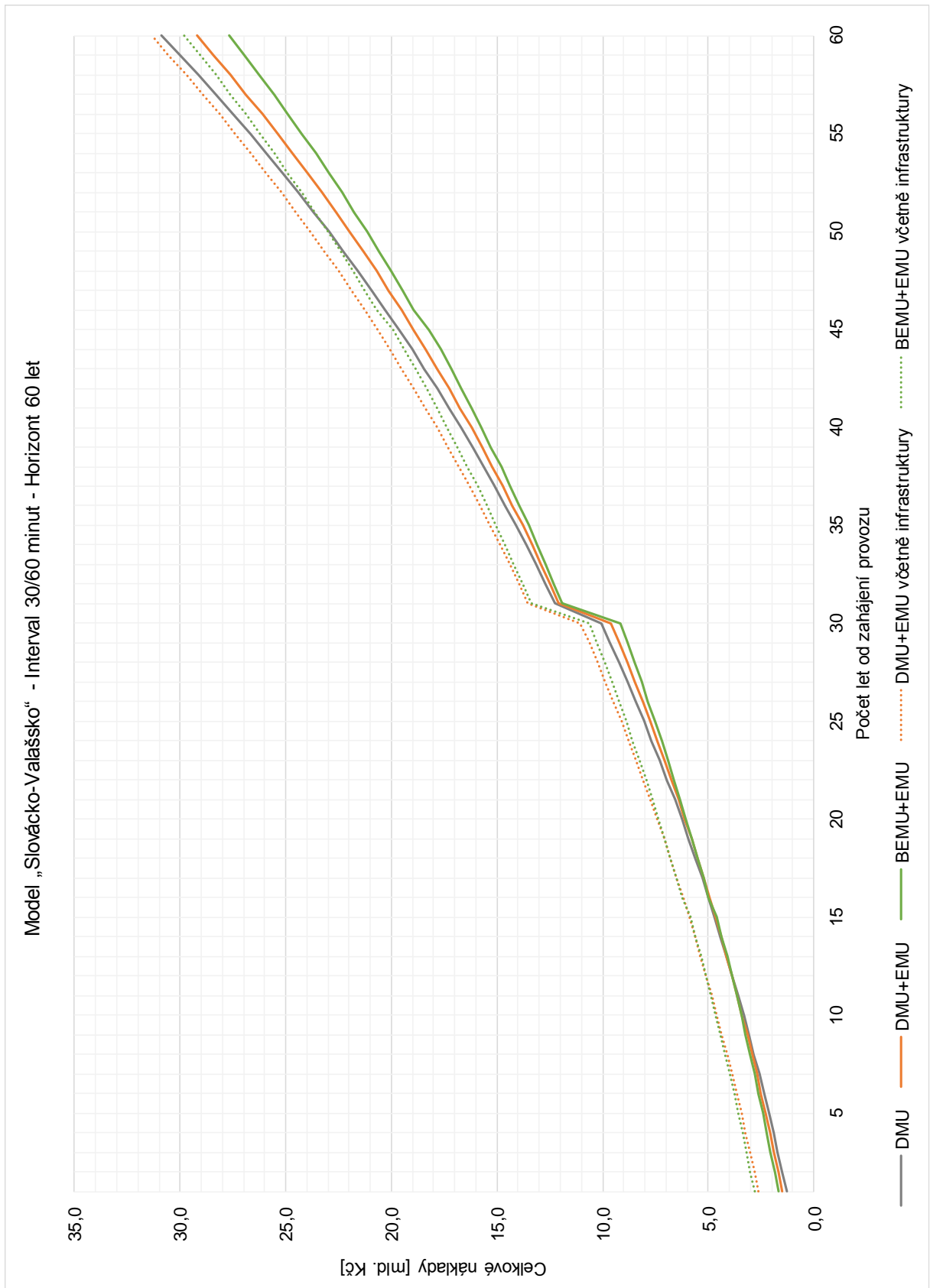
Graf 20 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 30minutový interval v horizontu 60 let



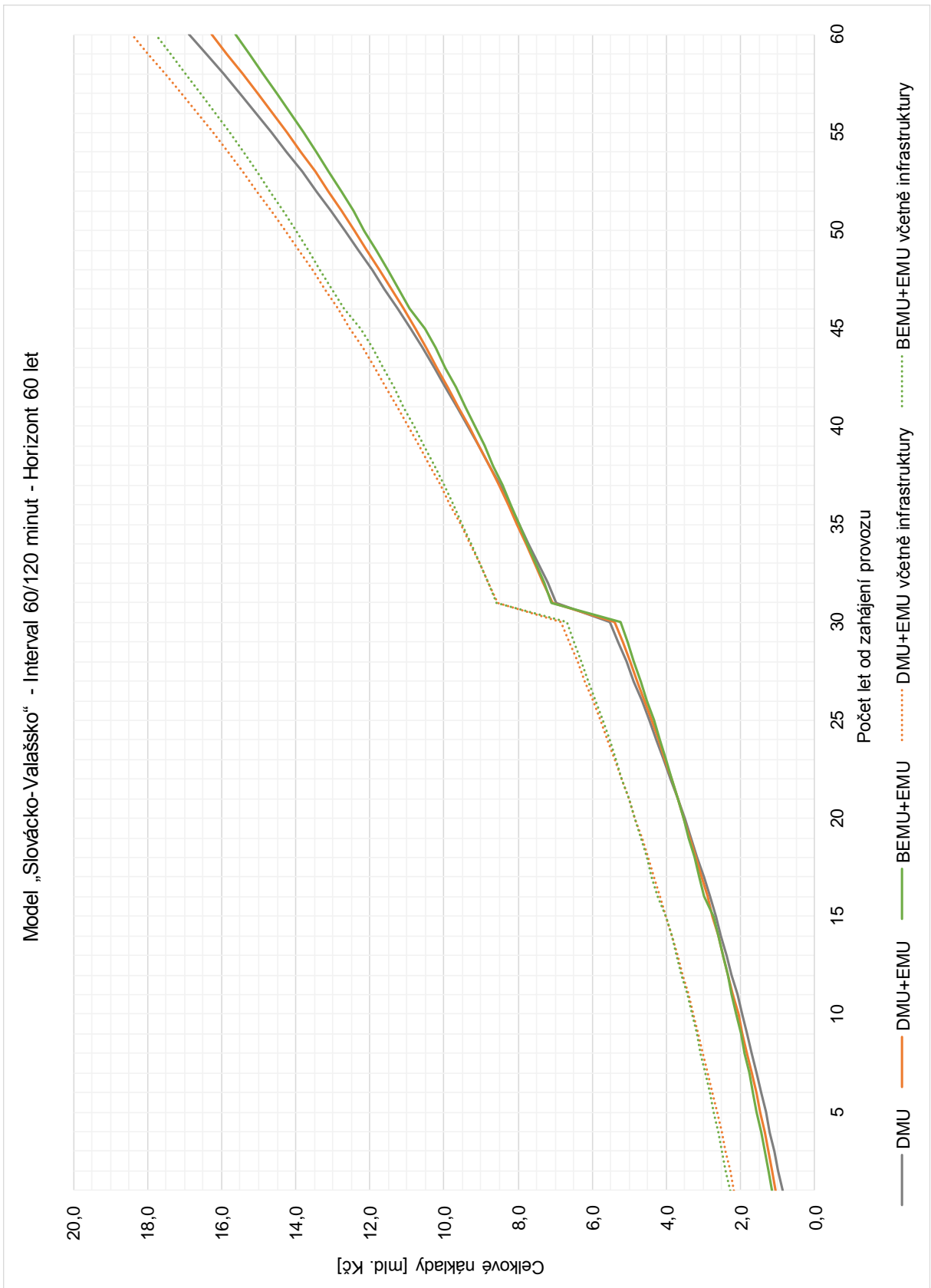
Graf 21 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 60minutový interval v horizontu 60 let



Graf 22 Vývoj nákladů modelu „Vysočina“ pro 120minutový interval v horizontu 60 let



Graf 23 Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 30/60minutový interval v horizontu 60 let



Graf 24 Vývoj nákladů modelu „Slovácko-Valašsko“ pro 60/120minutový interval v horizontu 60 let

