

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

**Studie energetiky provozu linky
s velkokapacitními trolejbusy
s pomocným akumulátorovým
napájením**

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **David Szotkowski**
Osobní číslo: **D21354**
Studijní program: **B0788A040001 Dopravní technika**
Specializace: **Elektrická trakce a elektromobilita**
Téma práce: **Studie energetiky provozu linky s velkokapacitními trolejbusy s pomocným akumulátorovým napájením**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

- a) Seznamte se s koncepcí velkokapacitních elektrobusů a trolejbusů s pomocným akumulátorovým napájením a s vlastnostmi hlavních komponent pohonné soustavy, srovnajte výhody a nevýhody tohoto dopravního módu
- b) Sestavte podrobný popis trasy linky tříčlánkových trolejbusů s pomocným akumulátorovým napájením ze stanice Nádraží Veveslavín na letiště v Ruzyni v Praze (výškový profil trasy, zastávky, křižovatky, úseky s trakčním vedením, jízdní řád)
- c) Sestavte jednoduchý výpočetní model pro určení energetických a trakčních parametrů při jízdě tříčlánkového trolejbusu s pomocným akumulátorovým napájením na uvedené trase
- d) Navrhněte kroky k možné optimalizaci energetiky provozu především
z hlediska šetrného využívání trakční baterie a příznivého profilu zatěžování
napájecí sítě na uvedené trase

Rozsah pracovní zprávy: **dle zadání**
Rozsah grafických prací: **dle zadání**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Lettl, J., Pavelka, J., Bauer, J.: *Výkonová elektronika*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2019
Kůs, V.: *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Skriptum ZČU v Plzni, FEL, 2016. ISBN 978-80-261-0639-5.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **24. ledna 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Vítězslav Krčmář, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem studie energetiky provozu linky s velkokapacitními trolejbusy s pomocným akumulátorovým napájením jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9. 8. 2024

David Szotkowski v. r.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé práce prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc. za cenné rady a připomínky, věnovaný čas, ochotu a velmi vstřícný přístup. Dále děkuji členům mé rodiny za jejich podporu při tvorbě práce a během celého studia.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá energetikou provozu trolejbusů s pomocným akumulátorovým napájením na lince spojující Nádraží Veleslavín s Mezinárodním letištěm Václava Havla v Praze. Nejdříve se věnuje koncepci velkokapacitních trolejbusů s pomocným akumulátorovým napájením a shrnuje jejich vlastnosti. Dále podrobně popisuje a parametrizuje trasu linky trolejbusů a vytváří výpočetní model pro určení trakčních a energických parametrů. Nakonec navrhuje možné kroky vedoucí k optimalizaci spotřeb energie při jízdě trolejbusu.

Klíčová slova

trolejbus, bateriový trolejbus, velkokapacitní trolejbus, trolejbusová linka, jízdní odpory, elektrická energie, energetika provozu, rekuperace, vytápění

Title

Energetic study of a line with large-capacity trolleybuses with auxiliary battery power supply

Abstract

The bachelor's thesis deals with the energetics of the operation of trolleybuses with auxiliary battery power supply on the line connecting Veleslavín Station with Václav Havel Prague International Airport. In the first part, it focuses on the concept of large-capacity trolleybuses with auxiliary battery power supply and summarizes their characteristics. Then it describes the route of the trolleybus line in detail and creates a computational model for determining traction and energetic parameters. Finally, it suggests possible steps leading to the optimization of energy consumption during trolleybus ride.

Keywords

trolleybus, battery trolleybus, large-capacity trolleybus, trolleybus line, vehicle resistance, electrical energy, energetics of the operation, recuperation, heating

Obsah

Seznam symbolů	8
1 Úvod.....	9
2 Koncepce elektrobuse a trolejbusu s akumulátorovým napájením.....	10
2.1 Pohonná soustava trolejbusu s bateriovým pohonem	11
2.2 Rozdělení trolejbusu z hlediska konstrukce karoserie a přepravní kapacity.....	13
2.3 Výhody a nevýhody elektrického pohonu a porovnání trolejbusu s jinými druhy dopravy	13
2.4 Využití trolejbusu s alternativním pohonem v Evropě a České republice.....	14
2.5 Popis velkokapacitních trolejbusu určených pro pražskou linku Nádraží Veveslavín – Letiště.....	15
3 Popis trasy linky velkokapacitních trolejbusu ze stanice Nádraží Veveslavín na Letiště v Praze-Ruzyni	17
3.1 Parametrizace trasy Nádraží Veveslavín – Letiště Václava Havla	19
3.2 Parametrizace trasy Letiště Václava Havla – Nádraží Veveslavín	22
4 Výpočet trakčních a energetických parametrů při jízdě trolejbusu.....	25
4.1 Provedení výpočtu	26
4.2 Výsledky výpočtů spotřebované energie při jízdě trolejbusu.....	29
4.2.1 Trasa Nádraží Veveslavín – Letiště.....	29
4.2.2 Trasa Letiště – Nádraží Veveslavín.....	31
5 Návrh optimalizace energetiky provozu	33
5.1 Vliv vytápění na celkovou spotřebu energie	33
5.2 Vliv maximální rychlosti na spotřebu energie a jízdni doby.....	35
5.3 Vliv velikosti zrychlení na spotřebu energie a jízdni doby	36
Závěr	38
Literatura	39
Seznam příloh.....	41

Seznam symbolů

V_i	[km/h]	rychlost na počátku úseku
v_i	[m/s]	rychlost na počátku úseku
x_i	[m]	délka úseku
t_i	[s]	doba jízdy v úseku
n_z	[-]	počet zastavení
t_z	[s]	doba zastavení
t_j	[s]	doba jízdy
t_s	[s]	doba stání
t_c	[s]	celková doba jízdy
m_v	[kg]	hmotnost vozidla
E_k	[kWh]	přírůstek kinetické energie
E_p	[kWh]	přírůstek polohové energie
P_{vo}	[kW]	výkon motorů pro překonání vozidlových odporů
E_{vo}	[kWh]	energie pro překonání vozidlových odporů
P_{ps}	[kW]	výkon pomocných spotřeb
E_{ps}	[kWh]	energie pro pomocné spotřeby
η	[-]	účinnost pohonného řetězce
P_{vyt}	[kW]	výkon vytápění
E_{vyt}	[kWh]	energie pro vytápění
E_{tr}	[kWh]	celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti pohonného řetězce a rekuperace

1 Úvod

Dnešní doba s sebou přináší stále větší důraz na ekologicky přívětivá řešení v dopravě a z důvodu vysokých cen energií také snahu o snížení jejich spotřeby. Jednou z možností dosažení těchto cílů pro dopravní podniky provozující městskou hromadnou dopravu je pořizování vozidel poháněných elektrickou energií a nahrazování vozidel poháněných spalovacím motorem. K tomuto účelu jsou vhodné mimo jiné trolejbusy s pomocným akumulátorovým napájením, které kombinují možnost napájení z trolejového vedení a napájení z baterie. Pro pořízení těchto vozidel ve velkokapacitní variantě (tříčlankovém provedení) bylo rozhodnuto pro pražskou linku spojující Nádraží Veleslavín s Mezinárodním letištěm Václava Havla. Tato linka v Praze tvoří páteř pro přepravu cestujících na letiště.

Práce si klade za cíl seznámit se s koncepcí trolejbusů s pomocným akumulátorovým napájením, dále sestavit podrobný popis trasy linky, provést výpočet energetických a trakčních parametrů při různých provozních podmínkách a nakonec navrhnout kroky směřující k možné optimalizaci energetiky provozu. Práce je rozčleněna na čtyři kapitoly věnující se postupně jednotlivým úkolům.

2 Koncepce elektrobuseů a trolejbusů s akumulátorovým napájením

V posledních letech se u dopravních podniků začaly rozšiřovat elektrobusey a u podniků provozujících trolejbusovou dopravu se staly trendem trolejbusy s alternativním pohonem – především pomocným akumulátorovým napájením. Tato snaha souvisí se snižováním emisí z dopravy a možností rozšiřovat linky MHD pomocí bateriových trolejbusů bez nutnosti budovat další trolejové vedení.

Elektrobus na rozdíl od trolejbusu ke svému provozu nepotřebuje trolejové vedení. Elektrickou energii dodává akumulátor, který je dobíjen za stání vozidla. Nabíjení může být pomalé – např. dobíjení ve vozovkách pomocí kabelu 3×400 V s příslušným konektorem. Nabíjení větším výkonem, tzv. rychlonabíjení, je zajišťováno pomocí speciálního stojanu a sběrače. Tento systém zajišťuje zpravidla nabíjení v průběhu dne při stání vozidla na konečných zastávkách. Dobíjení probíhá v řádu minut. Provozní podmínky nemusí vyžadovat plné dobití baterie – vůz je dobíjen několikrát v průběhu dne. V praxi jsou využívána provedení, kde je sběrač součástí vozidla a pro nabíjení se připojí k nabíjecímu stojanu. Jiný typ sběrače umožňuje využít trolejové vedení pro trolejbusy, pokud je k dispozici. Tento sběrač polopantografové konstrukce nicméně, na rozdíl od trolejbusového tyčového sběrače, neumožňuje dobíjení za jízdy vozidla, jelikož by při pohybu nebyl veden trolejovým vedením. Další konstrukce využívá opačného principu, kdy je pantograf součástí ramene rychlonabíjecího stojanu (obr. 1). Při nabíjení se pantograf spustí dolů a dosedne ke konektoru na střeše vozidla. Toto řešení přináší výhodu v podobě úspory počtu složitých zařízení (pantografů), protože zařízením disponuje nabíjecí stojan, nikoli každé vozidlo, což může snížit pořizovací náklady a náklady na údržbu. [1], [2], [3]



Obr. 1 Nabíjení elektrobuse u rychlonabíjecího stojanu (foto autor)

Trolejbus využívá ke svému napájení trolejové vedení a klasický trolejbus je na tomto vedení zcela závislý. Alespoň částečná nezávislost trolejbusů na trolejovém vedení může být dosažena pomocným alternativním pohonem. V minulosti se často jednalo o dieselaagregát. U současně vyráběných vozidel je zpravidla využívána trakční baterie umožňující dojezd alespoň několik kilometrů. Některé vozy mohou být vybaveny baterií pro nouzový pojezd, ta však na rozdíl od trakční baterie slouží pouze pro manipulaci s vozem na krátkou vzdálenost. Dalším alternativním pohonem, nepříliš využívaným, jsou superkapacitory. [3], [4]

Trolejbusy vybavené trakčním akumulátorem – bateriové trolejbusy v podstatě kombinují princip klasického trolejbusu (napájení z trakčního vedení) a princip elektrobuse (napájení z baterie – akumulátoru). Při jízdě s dostupným trakčním vedením se dobíjí akumulátor – tzv. dynamické nabíjení (rozdíl oproti statickému nabíjení elektrobuse). Ten pak funguje jako zdroj energie při jízdě v úseku, kde chybí pokrytí trolejovým vedením, a dokáže tak prodloužit trasu trolejbusu, která by jinak byla dosti omezená. V porovnání s elektrobusem se zpravidla akumulátor bateriového trolejbusu konstruuje s nižší kapacitou. Baterie tedy slouží zpravidla na napájení v krátkém úseku, čehož se často využívá na prodloužení linky bez nutnosti budování dalšího trolejového vedení. Akumulátor umožňuje také uchovat část energie při rekuperačním brzdění.

Trolejbusy s pomocným trakčním akumulátorem jsou často označovány pojmem parciální trolejbusy. Tento termín je hojně využíván např. v médiích. Lze očekávat, že se terminologie ustálí teprve v budoucnu. Pro účely této práce budou trolejbusy s trakčním akumulátorem označovány jako bateriové trolejbusy, což nejlépe vystihuje jejich podstatu.

Bateriové trolejbusy jsou dle českých právních předpisů považovány stejně jako klasické trolejbusy za drážní vozidlo, které je provozováno na trolejbusové dráze. Schvalování těchto vozidel do provozu je prováděno v gesci Drážního úřadu. Zároveň spadají do definice motorového vozidla (a tedy i silničního vozidla). Nemají však přiděleny státní poznávací značku. Trasy bez trolejového vedení, které bateriový trolejbus překonává, jsou zahrnuty do trolejbusových drah. Trolejbus se tedy z legislativního hlediska vždy pohybuje po trolejbusové dráze. v některých zemích se trolejbusy nepovažují za drážní vozidla, což celou legislativu značně zjednodušuje. [5], [6], [7], [8]

2.1 Pohonná soustava trolejbusů s bateriovým pohonem

Trolejbusy jsou napájeny z trolejového vedení stejnosměrným napětím o hodnotě 600 nebo 750 V. Vedení je dvoupólové, přenos energie na vozidlo zajišťuje tyčový sběrač, který je u bateriových trolejbusů ovládán pneumaticky, což umožňuje snadné snížení/zdvižení sběrače při přejezdu z nebo na úsek linky bez trolejového vedení. Často přímo v zastávce jsou na trolejovém vedení naistalovány stříšky, které při zdvižení sběrače usměrní jeho pohyb tak, aby dosedl na vedení (obr. 2). Zdvižení/snížení sběrače je ovládáno z kabiny řidiče. Takový sběrač se označuje jako poloautomatický. [4]



Obr. 2 Zdvžení sběrače trolejbusu a navedení pomocí stříšek (foto autor)

Pro pohon vozidel jsou standardně používány asynchronní třífázové čtyřpólové nebo šestipólové motory s kotvou nakrátko napájené z trakčních měničů. Asynchronní motory se vyznačují jednoduchou konstrukcí a minimálními nároky na údržbu (oproti v minulosti používaným stejnosměrným sériovým motorům). Jejich hlavní nevýhoda – složitá regulace momentu byla vyřešena s rozvojem polovodičové techniky založené na použití výkonových vypínatelných součástek, v minulosti například GTO tyristorů, v dnešní době IGBT tranzistorů. [4], [9]

Čtyř-kvadrantové trakční měniče (střídače) sestavené z těchto prvků umožňují plynulou regulaci momentu motoru od nulových otáček a obousměrný tok energie. Vozidlo je tak schopno při elektrodynamickém brzdění energii rekuperovat. V tomto režimu pracuje trakční motor jako generátor a rekuperovaná energie může být využita jednak pro vlastní spotřebu vozidla (topení, klimatizace, pomocné pohony), pro dobíjení trakční baterie nebo je rekuperována do trolejové sítě. Pokud napětí v troleji při rekuperaci dosáhne maximální přípustné hodnoty, přebytečná energie, kterou není možné využít v trolejové síti ani ve vlastní spotřebě vozidla, je mařena v brzdovém odporu. [10]

Technologie trakčních baterií prochází v současné době rychlým rozvojem. Od baterií založených na technologii NiCD (používaných spíše jako baterie pro krátký nouzový pojezd) se přešlo na LiON nebo LiPOL články umožňující konstrukci baterie, která poskytuje plnohodnotný výkon pohonu i při jízdě bez trolejového vedení. Baterie se dobíjí při jízdě pod trolejovým vedením nebo při stání vozidla, ovšem při stání může být nabíjecí proud omezen z důvodu lokálního oteplení vedení. [4]

Pomocné pohony vozidla zahrnují kompresor, ventilátory chlazení a pohon servořízení. Značná část komponentů elektrické výzbroje se umísťuje na střechu vozidla v kontejnerovém provedení. Jsou to především trakční měniče s řídicími obvody a jejich chlazení, měniče pro pomocné pohony, měnič pro trakční baterii, nabíječ palubní baterie, spínač topení atd. Na střechu se rovněž umísťuje brzdový odpor. Dalším prostorem využitelným pro uložení zařízení je zadní část vozu, kam se často umísťuje trakční baterie. Prostor pro baterii tak zabírá část prostoru jinak využitelného pro cestující. [10]

2.2 Rozdělení trolejbusů z hlediska konstrukce karoserie a přepravní kapacity

Trolejbusy v současnosti již využívají karoserie městských autobusů. Ty jsou dnes vyráběny výhradně v nízkopodlažním provedení s interiérem a dveřmi uzpůsobenými pro městský provoz s častou výměnou cestujících. Vzhledem k vyšším pořizovacím nákladům ve srovnání s autobusem, jsou trolejbusy vyráběny v minimální délkové kategorii 12 m se dvěma nápravami. Takové vozidlo nabízí okolo 30 míst k sezení a 60 až 70 míst k stání. Trakční motor pohání zadní nápravu s dvojmontáží kol a jeho výkon se pohybuje řádově okolo 160 až 175 kW. O něco vyšší obsaditelnost zajišťují třínápravové trolejbusy s délkou 15 m. Počet míst k sezení je okolo 40 a míst k stání okolo 90. Poháněna je střední náprava s dvojmontáží, poslední náprava je natáčecí. Více rozšířené je dvoučlankové třínápravové provedení o délce 18 m s 40 až 50 místy k sezení a 90 až 110 místy k stání. Vozidla jsou nejčastěji jednomotorová se zadní poháněnou nápravou (ojediněle se střední poháněnou nápravou). Trolejbus pohání oproti 12m verzi o něco výkonnější motor – řádově 240 až 250 kW. Vozidlo může být také realizováno jako dvoumotorové se střední a zadní hnací nápravou. Toto provedení poskytuje lepší trakční vlastnosti a je tak vhodné pro města s kopcovitým terénem. Nejvyšší kapacitu poskytují čtyřnápravová tříčlanková (dvoukloubová) vozidla s celkovou délkou okolo 24 m. Ze čtyř náprav jsou poháněny druhá a třetí, poslední náprava je natáčecí. [3], [4]

2.3 Výhody a nevýhody elektrického pohonu a porovnání trolejbusů s jinými druhy dopravy

Elektrický pohon (v městské hromadné dopravě využívaný u elektrobusů, trolejbusů, tramvají, případně vozidel metra a městské železnice) přináší v porovnání s pohonem pomocí spalovacího motoru nespornou výhodu v podobě nulových lokálních emisí. Především ve městech je důležité snížení emisí škodlivých látek jako jsou oxid uhelnatý, oxidy dusíku, uhlovodíky, pevné částice a další. Výrobou elektrické energie z nízkoemisních zdrojů je dále možné snížit emise skleníkového plynu oxidu uhličitého. Elektrický pohon se vyznačuje daleko vyšší účinností. Kromě toho dokáže uspořit energii rekuperačním brzděním. Oproti spalovacímu motoru se projeví také výrazné snížení hlučnosti. Nevýhodou vozidel s elektrickým pohonem jsou vyšší pořizovací náklady a potřeba příslušné infrastruktury k napájení nebo nabíjení vozidel. Zatímco cena naftového městského dvanáctimetrového autobusu se pohybuje řádově okolo 5,5 mil. Kč, pořizovací náklady srovnatelného elektrobusu nebo trolejbusu dosahují více než dvojnásobné hodnoty. Další nevýhodou elektrických vozidel je závislost na dodávkách elektrické energie a nízká operativnost. Na napájení nezávislé autobusy jsou často využívány k zajištění náhradní dopravy za trolejbusy, tramvaje nebo metro. Mohou být také využity k evakuaci obyvatelstva při mimořádných událostech nebo krizových situacích. Elektrobusy by bylo možné k těmto účelům využít jen omezeně vzhledem k nižšímu dojezdu. [11], [12], [13], [14]

V případě trolejbusového provozu je potřeba vzít v úvahu náklady na vybudování a údržbu trakčního vedení a měnění. Tyto aspekty předurčují budování trolejbusových provozů tam, kde je dostatečně vysoká přepravní poptávka. Pro linky s delším intervalem jsou obecně vhodnější autobusy, elektrobusy nebo je možné využít trolejbusy s alternativním pohonem. Právě ty jsou výhodné nejčastěji pro krátké úseky, kde by vybudování trakčního vedení nedávalo ekonomický

smysl. Dokáží tak i lépe zhodnotit investici do stávajícího trakčního vedení na páteřních trasách, protože mohou např. nahradit autobus se spalovacím motorem, jehož trasa by částečně vedla souběžně s trakčním vedením. Mohou tak tedy přispět k rozšíření trolejbusového provozu bez dodatečných nákladů na infrastrukturu. Trolejbusy s alternativním pohonem také odstraňují jednu z hlavních nevýhod trolejbusů – vazbu na trolejové vedení, a tedy omezenou volnost pohybu např. při objíždění překážky nebo uzavírky. Trolejbus s alternativním pohonem však oproti klasickému trolejbusu přináší nevýhodu v podobě hmotnosti agregátu nebo trakční baterie a případné zmenšení prostoru pro cestující. [11]

Při vyšší přepravní poptávce narazí autobusová nebo trolejbusová doprava na svá kapacitní omezení. Vysokou přepravní kapacitu nabízí systémy kolejové dopravy – tramvaje, pro dosažení ještě vyšší kapacity systém metra nebo městské železnice. Z hlediska obsaditelnosti jsou pro autobusovou nebo trolejbusovou dopravu limitem velkokapacitní článková vozidla s délkou blízcí se 25 m. Ta nabízí podobný počet míst pro cestující jako některé typy tramvají. Na rozdíl od tramvají, jejichž kolejová dráha bývá často uložena na samostatném tělese, využívají však trolejbusy silniční infrastrukturu, o kterou se dělí s ostatním provozem. Z toho pro trolejbusy pramení nevýhoda – případná dopravní kongesce se přenesla na hromadnou dopravu. Mezi další nevýhody trolejbusů oproti tramvajím patří vyšší odpor z valení a z toho pramenící vyšší měrná spotřeba elektrické energie, větší složitost trolejového vedení a nižší životnost vozidel. Tramvajový provoz však oproti trolejbusům přináší daleko vyšší investiční náklady, především na infrastrukturu, ale i na pořízení vozidel. Je charakterizován většími prostorovými nároky – trať bývá oddělená, minimální poloměry oblouků a maximální hodnoty stoupání jsou více omezující oproti silničním vozidlům. Zavedení trolejbusového provozu je tedy investičně, ale i časově méně náročné, ovšem nedokáže dosáhnout takových parametrů jako provoz tramvajový. [11]

Jednotlivé druhy městské hromadné dopravy mají své různé výhody a nevýhody. Rozhodování o využití daného systému v konkrétním městě závisí nejen na ekonomické kalkulaci a environmentálních hlediscích, ale také z velké míry na místních poměrech, historických okolnostech a zkušenostech, ale i na vnímání jednotlivých druhů dopravy veřejností nebo legislativních nárocích. Do budoucna lze očekávat větší důraz na zavádění bezemisních druhů dopravy a k tomu mohou trolejbusové nebo tramvajové systémy pomoci.

2.4 Využití trolejbusů s alternativním pohonem v Evropě a České republice

Jedna z hlavních nevýhod trolejbusů – vazba na trakční vedení vyústila během 2. poloviny 20. století v hledání vhodného alternativního pohonu a ve vznik hybridních vozidel. Zpočátku začala převažovat kombinace trolejbusu s dieselovým motorem, neboť baterie svými parametry byly vhodné spíše pro nouzový pojezd, a nikoli pro delší jízdu. Testování těchto vozidel probíhalo od 70. let v západní Evropě, ale zpočátku nebylo příliš úspěšné. Plynulá změna trakce byla problematická, zkoušely se různé systémy navedení sběračů na trolej, protože manuální nasazování by bylo pomalé. Nakonec zvítězilo použití naváděcích stříšek na troleji, což je systém využívaný dodnes. Jednou z nevýhod těchto vozidel v závislosti na konkrétním provedení může být i omezená maximální rychlost (a výkon) při jízdě pomocí dieselagregátu. Hybridní trolejbusy s pomocným spalovacím motorem se využívaly do doby, než se staly dostupnými dostatečně kapacitní baterie umožňující dojezd alespoň několik kilometrů. [3], [4]

V českých zemích se stal prvním pokusem o využití hybridního pohonu u trolejbusu přívěsný vozík s dieselaagregátem v Hradci Králové na počátku devadesátých let. Takto byly upraveny dva trolejbusy a byly nasazovány na linku Hlavní nádraží – Kluky. V roce 2001 dodala Škoda Ostrov do Hradce Králové vůz 21 Tr ACI, který se stal prvním českým trolejbusem vybaveným pomocným spalovacím motorem již z výroby. Tento typ byl dále dodán do Plzně v počtu téměř dvou desítek kusů. Novější vůz Škoda 24 Tr s již autobusovou karoserií byl rovněž vyráběn i ve verzi s dieselaagregátem nebo s pomocnou baterií (ta však sloužila pouze pro nouzový pojezd). Hybridní verze tohoto trolejbusu byla dodávána do Plzně, Mariánských Lázní a Zlína. Článeková verze Škoda 25 Tr s dieselaagregátem našla uplatnění rovněž v Plzni a Zlíně. Jiným novějším typem hybridního trolejbusu je vůz Škoda 30 TrDG, který byl v počtu dvou kusů v 2012 dodán dopravnímu podniku v Hradci Králové. [3]

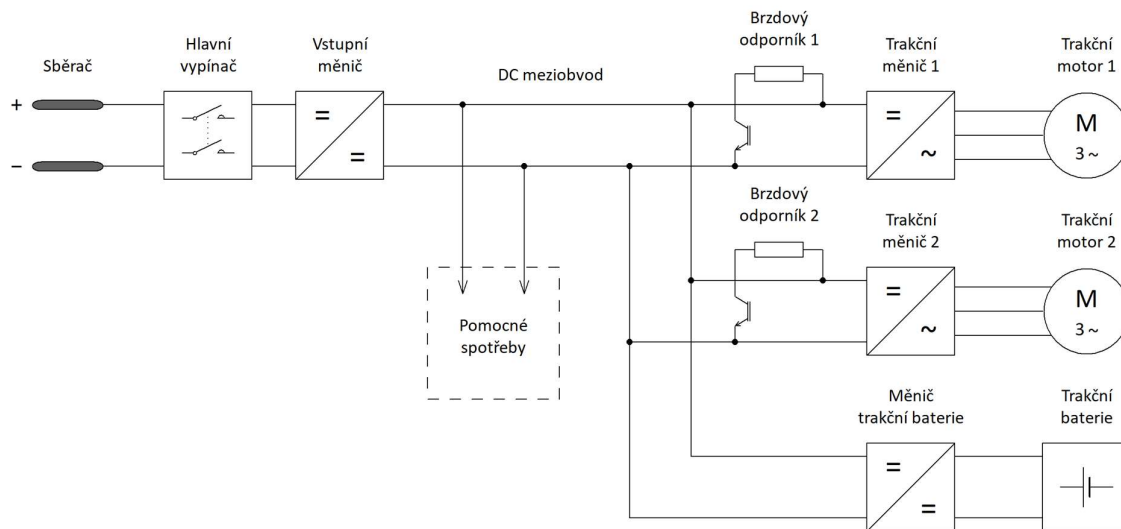
Hybridní trolejbusy s pomocným dieselovým pohonem se v České republice příliš nerozšířily. Naopak hybridní bateriové trolejbusy se v posledních letech staly součástí téměř všech trolejbusových provozů a tvoří významnou část vozového parku. První trolejbusy s plnohodnotnou trakční baterií umožňující dojezd přes deset kilometrů byly v Česku v roce 2016 dodány do Zlína (typ Škoda 26 Tr). Ve stejném roce se objevily první třínápravové článkové bateriové vozy typu Škoda 27 Tr v Českých Budějovicích. Od té doby se bateriové trolejbusy (ať už ve 12m nebo 18m článkovém provedení) rozšířily do všech trolejbusových provozů v České republice s výjimkou Dopravního podniku měst Chomutova a Jirkova. [3]

Trakční baterie našly uplatnění i mezi velkokapacitními čtyřnápravovými tříčlánkovými trolejbusy. Ty jsou provozovány zejména v zahraničí a nejvíce jsou rozšířeny ve Švýcarsku. Tamní výrobce autobusů a trolejbusů Hess vyrábí vůz typu lighTram, jehož různé generace byly dodány do trolejbusových provozů mnoha švýcarských měst. Verze s trakční baterií byla dodána např. do švýcarského města Lausanne nebo francouzského města Nancy. O další tyto vozy se rozšíří provoz v např. v Luzernu nebo Bernu, kde tamní dopravci plánují dále rozšířit trolejbusový provoz a nahradit autobusy na vytížených linkách. Díky využití bateriových trolejbusů pak nebude nutno stavět trakční vedení v celé délce linky, čímž se ušetří náklady. Na přelomu roku 2023/2024 začal zkušební provoz s velkokapacitními trolejbusy typu Škoda-Solaris Trollino 24 v Bratislavě, kde obsluhují linku 71 z hlavního nádraží do městské části Vrakuňa. Tyto vozy jsou také vybaveny bateriemi, nicméně pravidelně mimo trolejové vedení nezajíždějí. Do budoucna lze očekávat další rozšiřování provozů bateriových trolejbusů, včetně velkokapacitních, a další vývoj této technologie, který umožní např. zvýšení dojezdu. [3], [15], [16], [17], [18], [19], [20]

2.5 Popis velkokapacitních trolejbusů určených pro pražskou linku Nádraží Veleslavin – Letiště

Na přelomu let 2023 a 2024 byly pražskému dopravnímu podniku dodány velkokapacitní čtyřnápravové tříčlánkové bateriové trolejbusy Škoda-Solaris 24m. Karoserii vyrobila polská firma Solaris Bus & Coach S.A. a elektrickou výzbroj vozidla dodala společnost Škoda Electric a.s. Délka trolejbusu činí 24 700 mm. Nástup a výstup cestujících zajišťuje pětice dvoukřídlých dveří a celkem vozidlo nabízí 52 míst k sezení. Trolejbus dosahuje maximální rychlosti 70 km/h a ze čtyř náprav jsou poháněny druhá a třetí s dvojmontáží kol. První a poslední náprava je řiditelná. Výkon asynchronních trakčních motorů činí 2×180 kW. Vozidlo je vybaveno trakční baterií typu LTO o celkové využitelné kapacitě 60 kWh. [21]

Blokové schéma trakční výzbroje trolejbusu Škoda-Solaris 24m ve zjednodušené podobě se nachází na obr. 3. Jsou zde znázorněny pouze nejvýznamnější komponenty elektrické výzbroje.



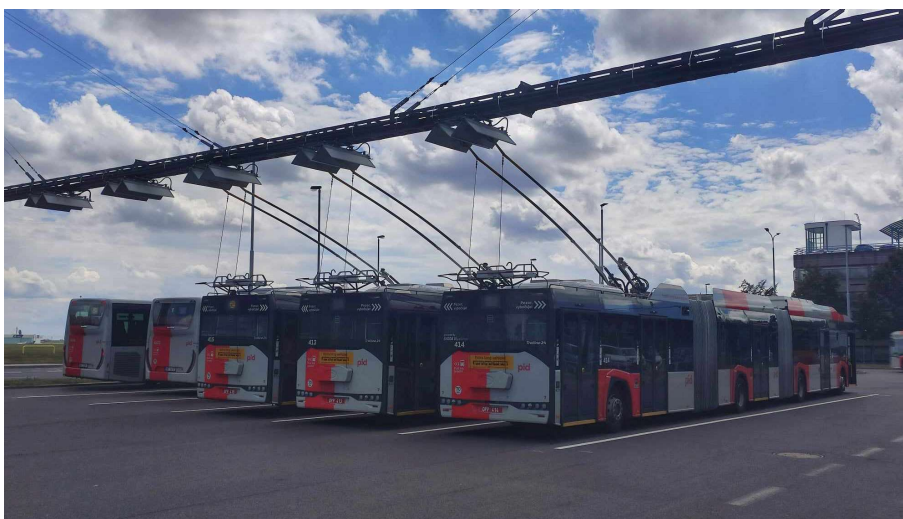
Obr. 3 Blokové schéma trakční výzbroje vozidla (autor)

3 Popis trasy linky velkokapacitních trolejbusů ze stanice Nádraží Veveslavín na Letiště v Praze-Ruzyni

Pražská trolejbusová linka č. 59 spojuje dopravní terminál Nádraží Veveslavín s Mezinárodním letištěm Václava Havla v Praze. Nahradila původní autobusovou linku 119. Spojení zajišťuje Dopravní podnik hl. m. Prahy pomocí dvaceti velkokapacitních tříčlánkových bateriových trolejbusů Škoda-Solaris 24m (obr. 4) dodaných na přelomu let 2023/2024. Trolejovým vedením je pokryta část trasy v úseku Nádraží Veveslavín – Terminál 3, a to v obou směrech. Dále trolejbusy využívají trakční baterie až do konečné zastávky Letiště. Tam je vybudována krátká trolej (délky cca 100 m) a dalších 5 stání pro nabíjení vozidel (obr. 5). [22]

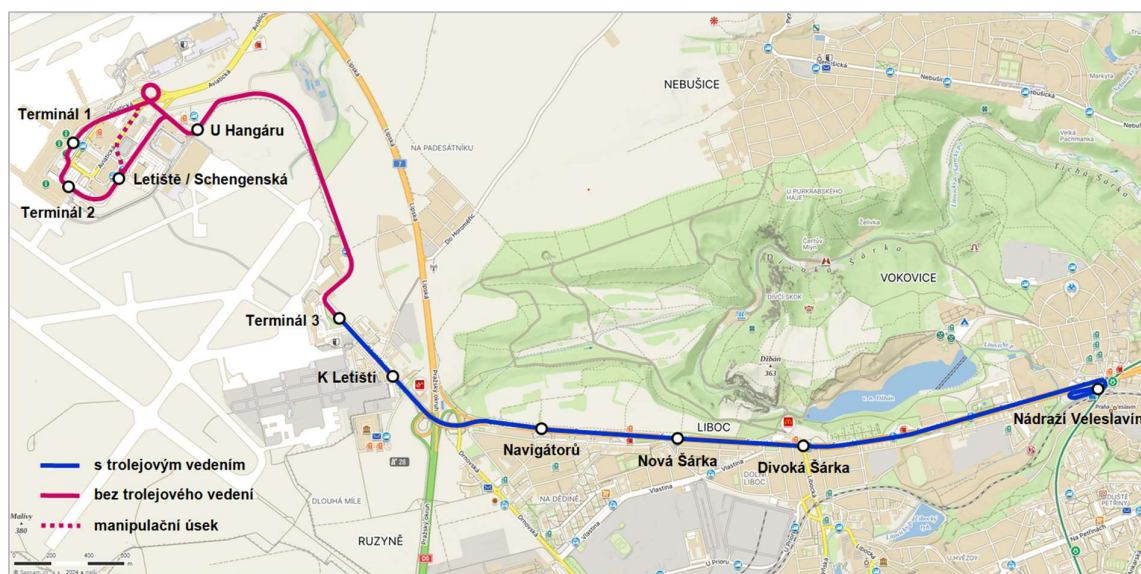


Obr. 4 Trolejbus Škoda-Solaris 24m přijíždí do zastávky Nádraží Veveslavín (foto autor)



Obr. 5 Nabíjení trolejbusů na konečné zastávce Letiště (foto autor)

Nádraží Veleslavín je významnou přestupní stanicí pro metro A, vlakové spoje, tramvajové a další autobusové linky. Přestup na tramvaje je možný rovněž v zastávce Divoká Šárka. Dalšími významnými zastávkami jsou Terminál 1, který na pražském letišti zajišťuje odbavení letů do států mimo Schengenský prostor, a Terminál 2 odbavující lety do států Schengenského prostoru. Celkově linka 59 obsluhuje ve směru Nádraží Veleslavín – Letiště tyto zastávky: Nádraží Veleslavín (nástupiště 2), Divoká Šárka, Nová Šárka, Navigátorů, K Letišti, Terminál 3, U Hangáru, Terminál 1 (nástupiště C), Terminál 2 (nástupiště C) a Letiště, kde svou jízdu končí. Zpáteční trasu z letiště na Nádraží Veleslavín linka začíná manipulačním přejezdem od trolejbusových stání na zastávce Letiště k Terminálu 1 (nástupiště E), což je první zastávka pro nástup cestujících. Následně obsluží zastávku Terminál 2 (nástupiště A), zastávku Schengenská (v blízkosti zastávky Letiště, kterou linka na zpáteční cestě neobsluhuje) a dále jsou zastávky shodné s opačným směrem jízdy. Trasa linky je na obr. 6. [23]



Obr. 6 Trasa trolejbusové linky [mapové podklady Mapy.cz, graficky upraveno]

Linka 59 se vyznačuje krátkými intervaly mezi spoji a dokáže tak nabídnout vysokou přepravní kapacitu. První spoj vyjíždí ze zastávky Nádraží Veleslavín v 5:13 a poslední v 0:22 hodin ve všední dny, soboty i neděle. Z Terminálu 1 vyjíždí první spoj ve 4:21 a poslední ve 23:31. Ve všední dny v brzkých ranních hodinách začíná linka s 20minutovým intervalem mezi spoji, který se postupně zkracuje na 5minutový během dne a 3minutový interval ve špičkách. O sobotách a nedělích je během dne interval 7 až 8 minut. Celková jízdní doba linky je 17 (všední dny) a 16 minut (soboty, neděle). [23]

3.1 Parametrizace trasy Nádraží Veleslavín – Letiště Václava Havla

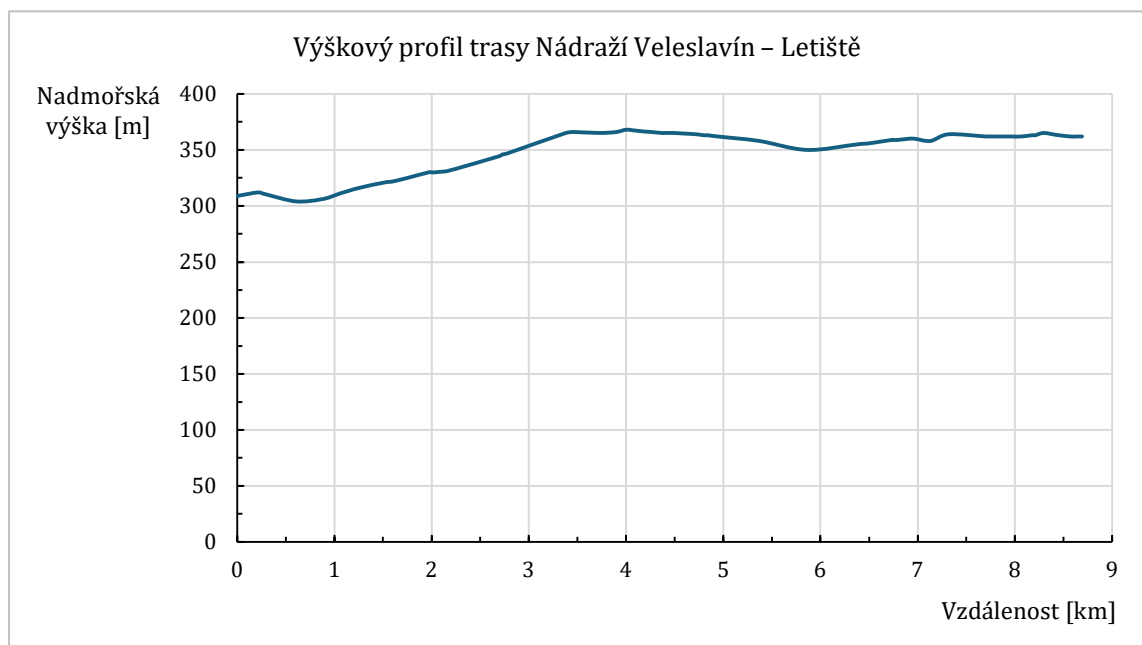
S využitím mapových podkladů Mapy.cz byl sestaven podrobný popis trasy trolejbusů z Nádraží Veleslavín na zastávku Letiště (tab. 1). Trasa je rozdělena na jednotlivé úseky s délkou zaokrouhlenou na desítky metrů. Hraničními body jednotlivých úseků jsou – místa zastavení (světelné křižovatky, zastávky, přechody pro chodce aj.), místa s výraznou změnou sklonu, místa se změnou maximální povolené rychlosti, místa s nutným snížením rychlosti (ostré zatáčky) a počátek nebo konec trolejového vedení. Pro každý úsek byla zaznamenána nadmořská výška, pomocí které byl vypočítán sklon v každém úseku. Dále byly doplněny hodnoty maximální povolené rychlosti a přítomnost nebo nepřítomnost trolejového vedení. Na obr. 7 je pak znázorněn výškový profil celé trasy.

Tab. 1 Parametrizace trasy Nádraží Veleslavín – Letiště

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku – hraniční bod	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]
0,00	stání pro trolejbus	309	210	+ 1,4	ano	50
0,21	zastávka Nádraží Veleslavín 2	312	60	- 1,6	ano	50
0,27	výjezd na ulici Veleslavínská	311	40	- 2,8	ano	50
0,31	světelná křižovatka Evropská – Veleslavínská	310	300	- 2,0	ano	60
0,61	změna sklonu	304	260	+ 0,8	ano	60
0,87	změna rychlosti	306	150	+ 2,7	ano	50
1,02	změna rychlosti	310	70	+ 3,0	ano	60
1,09	světelná křižovatka Evropská – José Martího	312	160	+ 2,4	ano	60
1,25	změna rychlosti	316	260	+ 1,9	ano	50
1,51	světelná křižovatka Evropská – Do Vozovny	321	100	+ 1,0	ano	50
1,61	změna rychlosti	322	270	+ 2,2	ano	60
1,88	světelná signalizace – křížení s tramvají	328	90	+ 2,2	ano	60
1,97	světelná signalizace – křížení s tramvají	330	60	0,0	ano	60
2,03	světelná křižovatka Evropská – Libocká	330	120	+ 0,8	ano	50
2,15	zastávka Divoká Šárka	331	90	+ 2,2	ano	50
2,24	světelná křižovatka Evropská – Vlastina	333	440	+ 2,5	ano	50

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku - hraniční bod	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]
2,68	světelná signalizace - přechod pro chodce	344	50	+ 3,8	ano	50
2,73	zastávka Nová Šárka	346	50	+ 1,9	ano	50
2,78	změna rychlosti	347	600	+ 3,0	ano	70
3,38	změna rychlosti	365	80	+ 1,3	ano	50
3,46	zastávka Navigátorů	366	260	- 0,4	ano	70
3,72	změna rychlosti	365	180	+ 0,5	ano	50
3,90	světelná křižovatka Evropská - K Letišti - Drnovská	366	100	+ 2,0	ano	50
4,00	změna sklonu	368	110	- 0,9	ano	50
4,11	světelná křižovatka K Letišti - Pražský okruh	367	150	- 0,7	ano	50
4,26	světelná křižovatka K Letišti - Fajtlova	366	110	- 0,9	ano	50
4,37	zastávka K Letišti	365	20	0,0	ano	50
4,39	přechod pro chodce	365	100	0,0	ano	50
4,49	přechod pro chodce	365	230	- 0,4	ano	50
4,72	přechod pro chodce	364	80	- 1,2	ano	50
4,80	přechod pro chodce	363	40	0,0	ano	50
4,84	zastávka Terminál 3	363	100	- 1,0	ne	50
4,94	kruhový objezd	362	430	- 0,9	ne	50
5,37	změna rychlosti	358	490	- 1,6	ne	70
5,86	změna sklonu	350	510	+ 1,0	ne	70
6,37	změna rychlosti	355	140	+ 0,7	ne	50
6,51	ostrá levotočivá zatáčka	356	220	+ 1,3	ne	50
6,73	zastávka U Hangáru	359	10	0,0	ne	50
6,74	přechod pro chodce, ostrá pravotočivá zatáčka	359	50	0,0	ne	50
6,79	přechod pro chodce	359	120	+ 0,9	ne	50
6,91	přechod pro chodce	360	60	0,0	ne	50
6,97	kruhový objezd	360	160	- 1,3	ne	50
7,13	nájezd na ulici Aviatická - počátek	358	190	+ 3,2	ne	50
7,32	nájezd na ulici Aviatická - konec	364	380	- 0,5	ne	50
7,70	závora - Terminál 1 vjezd	362	10	0,0	ne	50

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku - hraniční bod	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]
7,71	přechod pro chodce	362	40	0,0	ne	50
7,75	přechod pro chodce	362	40	0,0	ne	50
7,79	zastávka Terminál 1 C	362	10	0,0	ne	50
7,80	přechod pro chodce	362	80	0,0	ne	50
7,88	přechod pro chodce	362	30	0,0	ne	50
7,91	závora - Terminál 1 výjezd	362	60	0,0	ne	50
7,97	odbočení k Terminálu 2	362	100	0,0	ne	50
8,07	ostré zabočení doleva	362	110	+ 0,9	ne	50
8,18	zastávka Terminál 2 C	363	30	0,0	ne	50
8,21	přechod pro chodce	363	90	+ 2,2	ne	50
8,30	změna sklonu	365	150	- 1,3	ne	50
8,45	přechod pro chodce	363	120	- 0,8	ne	50
8,57	odbočení k zastávce Letiště	362	70	0,0	ne	50
8,64	zastávka Letiště	362	50	0,0	ne	50
8,69	stání pro trolejbus	362	konec trasy			



Obr. 7 Výškový profil trasy Nádraží Veleslavín – Letiště

3.2 Parametrizace trasy Letiště Václava Havla – Nádraží Veleslavín

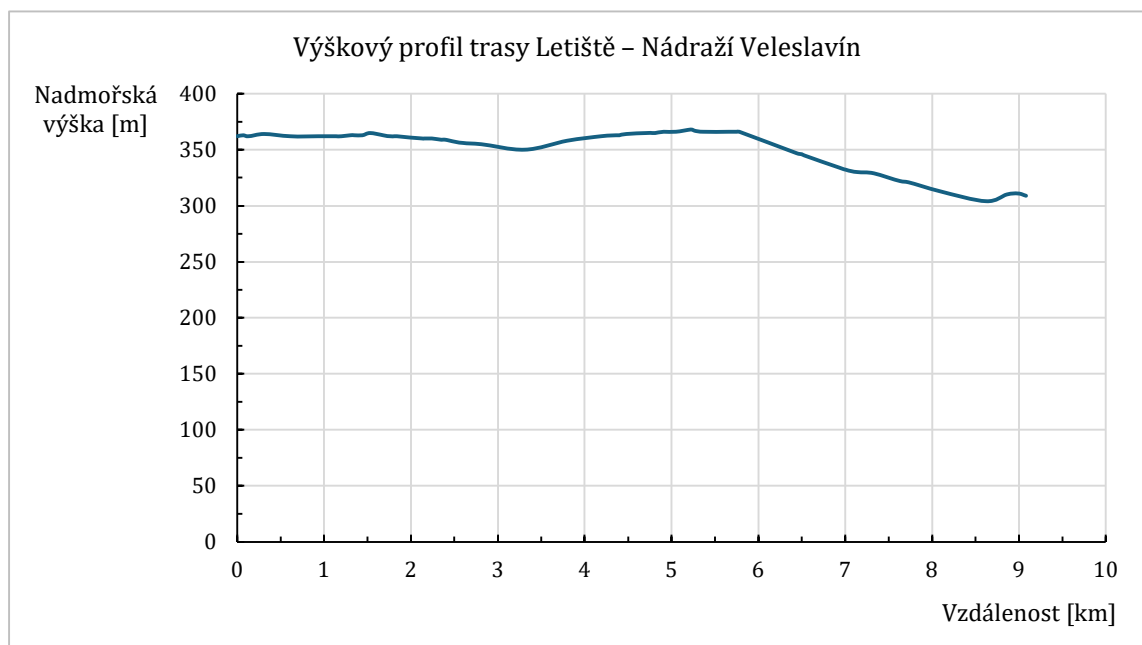
Obdobným způsobem jako v předcházejícím případě je sestaven popis trasy Letiště – Nádraží Veleslavín (tab. 2). Na obr. 8 je zobrazen výškový profil této trasy.

Tab. 2 Parametrizace trasy Letiště – Nádraží Veleslavín

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku – hraniční bod	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]
0,00	stání pro trolejbus	362	70	+ 1,4	ne	50
0,07	výjezd na ulici Schengenská	363	240	- 0,4	ne	50
0,31	přechod pro chodce	362	300	+ 0,7	ne	50
0,61	ostré odbočení vlevo	364	320	- 0,6	ne	50
0,93	závora – Terminál 1 výjezd	362	10	0,0	ne	50
0,94	přechod pro chodce	362	40	0,0	ne	50
0,98	přechod pro chodce	362	50	0,0	ne	50
1,03	přechod pro chodce	362	70	0,0	ne	50
1,10	zastávka Terminál 1 E	362	10	0,0	ne	50
1,11	přechod pro chodce	362	30	0,0	ne	50
1,14	závora – Terminál 1 výjezd	362	60	0,0	ne	50
1,20	odbočení k Terminálu 2	362	100	0,0	ne	50
1,30	ostré zabočení doleva	362	50	+ 2,0	ne	50
1,35	zastávka Terminál 2 A	363	90	0,0	ne	50
1,44	přechod pro chodce	363	90	+ 2,2	ne	50
1,53	změna sklonu	365	150	- 1,3	ne	50
1,68	přechod pro chodce	363	80	- 1,2	ne	50
1,76	zastávka Schengenská	362	50	0,0	ne	50
1,81	křižovatka Schengenská – Jana Kašpara	362	30	0,0	ne	50
1,84	přechod pro chodce	362	290	- 0,7	ne	50
2,13	přechod pro chodce	360	20	0,0	ne	50
2,15	kruhový objezd	360	90	0,0	ne	50
2,24	přechod pro chodce	360	110	- 0,9	ne	50
2,35	přechod pro chodce, ostrá levotočivá zatáčka	359	50	0,0	ne	50

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku – hraniční bod	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]
2,40	přechod pro chodce	359	50	- 2,0	ne	50
2,45	zastávka U Hangáru	358	150	- 1,4	ne	50
2,60	ostrá pravotočivá zatáčka	356	210	- 0,5	ne	50
2,81	změna rychlosti	355	500	- 1,0	ne	70
3,31	změna sklonu	350	490	+ 1,6	ne	70
3,80	změna rychlosti	358	390	+ 1,0	ne	50
4,19	kruhový objezd	362	200	+ 0,5	ne	50
4,39	zastávka Terminál 3	363	10	0,0	ano	50
4,40	přechod pro chodce	363	80	+ 1,2	ano	50
4,48	přechod pro chodce	364	230	+ 0,4	ano	50
4,71	přechod pro chodce	365	70	0,0	ano	50
4,78	zastávka K Letišti	365	30	0,0	ano	50
4,81	přechod pro chodce	365	100	+ 1,0	ano	50
4,91	světelná křižovatka K Letišti – Fajtlova	366	140	0,0	ano	50
5,05	světelná křižovatka K Letišti – Pražský okruh	366	170	+ 1,2	ano	50
5,22	změna sklonu	368	50	- 1,9	ano	50
5,27	světelná křižovatka Evropská – K Letišti – Drnovská	367	90	- 1,1	ano	50
5,36	změna rychlosti	366	300	0,0	ano	70
5,66	změna rychlosti	366	70	0,0	ano	50
5,73	zastávka Navigátorů	366	20	0,0	ano	50
5,75	světelná signalizace – přechod pro chodce	366	30	0,0	ano	50
5,78	změna rychlosti	366	660	- 2,9	ano	70
6,44	změna rychlosti	347	60	- 1,7	ano	50
6,50	zastávka Nová Šárka	346	30	- 2,9	ano	50
6,53	světelná signalizace – přechod pro chodce	345	400	- 2,7	ano	50
6,93	světelná křižovatka Evropská – Vlastina	334	80	- 2,5	ano	50
7,01	světelná signalizace – křížení s tramvají	332	130	- 1,6	ano	50
7,14	zastávka Divoká Šárka	330	190	- 0,5	ano	50

Kilometrická poloha [km]	Počátek úseku – hraniční bod	Nadmořská výška [m n. m.]	Délka úseku [m]	Sklon [%]	Trolejové vedení	Maximální povolená rychlost [km/h]
7,33	světelná signalizace – přechod pro chodce	329	300	- 2,3	ano	50
7,63	světelná křižovatka Evropská – Do Vozovny	322	100	- 1,0	ano	50
7,73	změna rychlosti	321	360	- 2,2	ano	60
8,09	světelná křižovatka Evropská – José Martího	313	530	- 1,7	ano	60
8,62	změna sklonu	304	240	+ 2,5	ano	60
8,86	světelná křižovatka Evropská – Veleslavínská	310	130	+ 0,8	ano	50
8,99	zastávka Nádraží Veleslavín V	311	90	- 2,3	ano	50
9,08	stání pro trolejbus	309	konec trasy			



Obr. 8 Výškový profil trasy Letiště – Nádraží Veleslavín

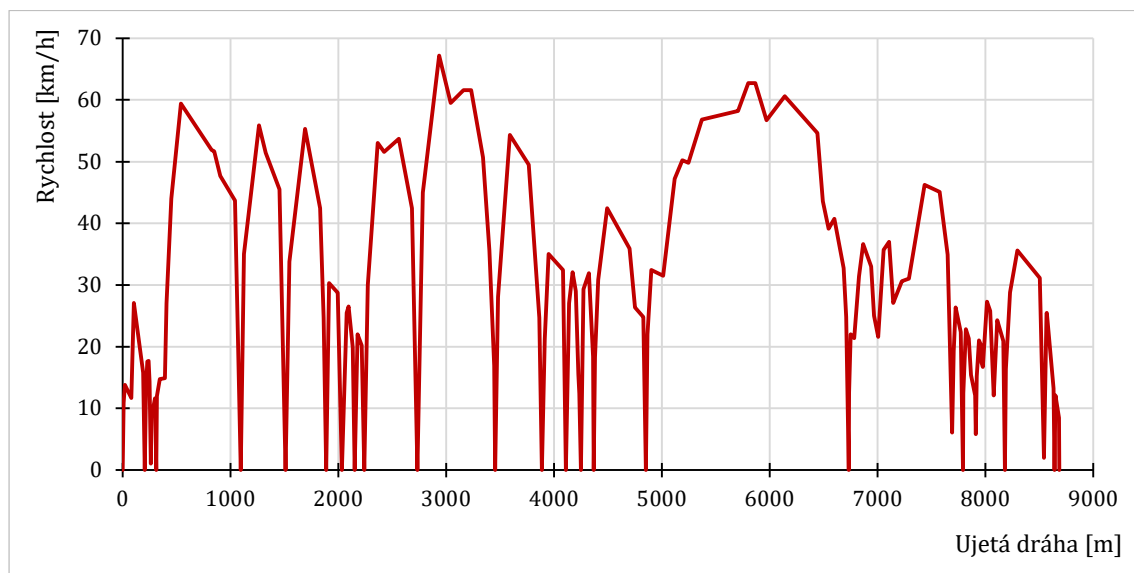
4 Výpočet trakčních a energetických parametrů při jízdě trolejbusu

V této části bakalářské práce jsou jednoduchým způsobem provedeny výpočty spotřeb energie při jízdě trolejbusu v trase Nádraží Veveslavín – Letiště a zpět, přičemž jsou zohledněny různé provozní a dopravní podmínky. Pro výpočet se pro každý z obou směrů uvažují tři průběhy jízdy – střední, pomalá a rychlá varianta, celkem tedy šest průběhů. Pro každý z nich byly na základě zkušeností z reálného provozu zkonstruovány jízdni profily (závislosti rychlosti na ujeté dráze) složené z přímkových úseků různé délky přibližně nahrazujících přirozené rozjezdové a brzdné křivky. Vytvořené jízdni profily rozdělují trasu na úseky s konstantní změnou rychlosti podle dráhy, přičemž jsou známy hodnoty rychlosti na začátku/konci každého úseku v_i a délka úseku x_i . Trasa je vždy počítána i s manipulačním přejezdem od místa odstavení trolejbusu do výchozí zastávky Terminál 1. Podle vytvořených jízdni profilů jsou provedeny výpočty. Veškeré výpočty a grafy byly vytvořeny s pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel.

Střední varianta průběhu jízdy zohledňuje běžný provoz v průběhu dne. Konkrétní varianta sestavená pro potřeby práce je založena na provozní situaci vysledované během pracovního dne mezi 12. a 13. hodinou. Počítá se zastavením na významných zastávkách a vybraných křižovatkách, případně přechodech.

Pomalá varianta je extrémní variantou, jejíž účelem je simulovat provoz ve špičce za zhoršené dopravní situace. Předpokládá se zastavení na všech zastávkách, všech světelných křižovatkách a vybraných přechodech pro chodce. Pomalá varianta rychlostního profilu pro trasu Nádraží Veveslavín – Letiště je na obr. 9.

Rychlá varianta je druhou extrémní variantou simulující naopak provoz v brzkých ranních nebo pozdních večerních hodinách. Uvažuje zastavení pouze na nejvýznamnějších zastávkách a průjezd všech křižovatek bez zastavení.



Obr. 9 Rychlostní profil trasy Nádraží Veveslavín – Letiště (pomalá varianta)

4.1 Provedení výpočtu

Celková energie potřebná pro jízdu vozidla v dané trase je vypočítána jako součet dílčích složek:

- přírůstku kinetické energie E_k , potřebné pro rozjezdy vozidla na požadovanou rychlost
- přírůstku potenciální energie E_p , dané změnou nadmořské výšky v rámci trasy
- energie potřebná pro překonání vozidlových odporů E_{vo}
- energie pro pomocné spotřeby vozu E_{ps} (osvětlení, řízení, pohon kompresoru, chlazení komponentů elektrické výzbroje)

Není zde tedy modelována jízda vozidla podle pohybových rovnic, nýbrž jsou zjednodušeným způsobem vypočítány jednotlivé složky spotřebované energie. Tato metoda poskytuje výhodu v možnosti porovnání podílu dílčích složek na celkové spotřebě energie.

V této části není ve výpočtech uvažována energie na vytápění/chlazení vozu. Vlivu vytápění na spotřebu energie se zvlášť věnuje kapitola 5.1.

Výpočet kinetické energie E_k

Pro výpočet přírůstku kinetické energie je použita celková hmotnost vozu m_v , která je součtem hmotnosti prázdného vozu a hmotnosti cestujících. Hmotnost cestujícího se uvažuje 85 kg spolu se zavazadlem a počet cestujících je odhadem průměrné obsazenosti vozidla vycházející ze zkušeností z reálných jízd. Údaje jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Uvažované údaje pro výpočet hmotnosti vozidla

Hmotnost vozidla bez cestujících [kg]	25 000
Hmotnost cestujícího [kg]	85
Počet cestujících	40
Celková hmotnost [kg]	28 400

Ve výpočtu je zanedbán součinitel rotačních hmot, který pro dané vozidlo není znám. Jeho zanedbaní z hlediska přesnosti výpočtu se nezdá být rozhodující (k dispozici jsou pouze přibližné jízdni profily).

Na základě parametrů vycházejících z jízdni profilů je pro každý úsek s kladným zrychlením vypočten přírůstek $E_{k,i}$ podle rovnice:

$$E_{k,i} = \frac{1}{2} \cdot m_v \cdot (v_{i+1}^2 - v_i^2). \quad (1)$$

Součet všech kladných dílčích přírůstků kinetické energie $E_{k,i}$ dá celkovou kinetickou energii E_k potřebnou pro rozjezdy vozidla dle vztahu:

$$E_k = \sum_{i=1}^n E_{k,i}. \quad (2)$$

Výpočet polohové energie E_p

Přírůstek polohové energie E_p je dán součtem všech kladných dílčích přírůstků polohové energie $E_{p,j}$, vypočtených ze změn nadmořské výšky uvedené v tabulkách parametrizace trasy (tab. 1 a tab. 2). Dílčí přírůstky $E_{p,j}$ lze vyjádřit vztahem:

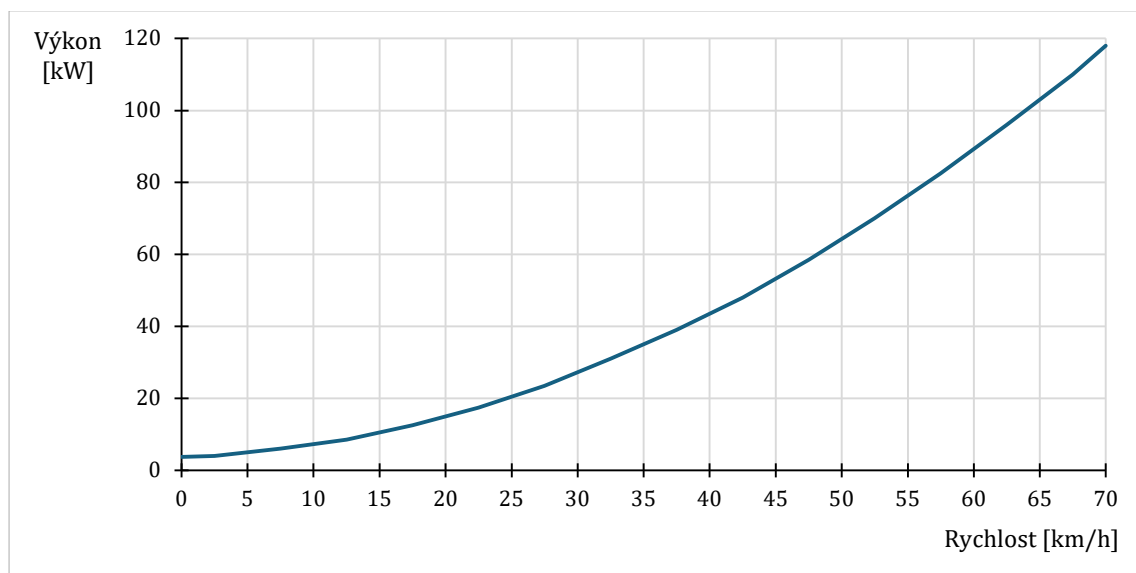
$$E_{p,j} = m_v \cdot g \cdot h_j. \quad (3)$$

Celková polohová energie E_p se vypočte:

$$E_p = \sum_{j=1}^m E_{p,j}. \quad (4)$$

Výpočet energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo}

Pro výpočet nejsou známy konkrétní hodnoty vozidlových odporů a není dána rovnice vozidlového odporu. Byly poskytnuty pouze některé přibližné hodnoty výkonu trakčních motorů při ustálené rychlosti a nulovém sklonu vozovky, které tedy odpovídají výkonu trakčních motorů potřebného pro překonání vozidlových odporů. Na základě těchto hodnot byla vytvořena přibližná závislost výkonu pro překonání vozidlových odporů P_{vo} na rychlosti V (obr. 10).



Obr. 10 Závislost výkonu pro překonání vozidlových odporů na rychlosti

V souladu s touto závislostí byly stanoveny střední hodnoty výkonu pro překonání vozidlových odporů P_{vo} pro každý interval rychlosti při nastavení přibližného stupňovitého rozložení rychlosti, přičemž byla zvolena velikost stupně rychlosti 5 km/h. Podle toho, do jakého intervalu spadá střední rychlost v každém úseku, je uvažována odpovídající hodnota výkonu pro překonání vozidlových odporů. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.

Vzhledem ke skutečnosti, že řidiči jezdí převážně výběhem namísto udržování konstantní rychlosti, což bylo odpozorováno během reálných jízd, je energie pro překonání vozidlových odporů počítána pouze pro úseky, kde vozidlo zrychluje.

Tab. 4 Hodnoty střední rychlosti a výkonu motorů pro překonání vozidlových odporů

Rychlost [km/h]	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5
Výkon [kW]	4	6	8,5	12,5	17,5	23,5	31	39	48	58,5	70	82,5	96	110

Pro samotný výpočet je nejdříve vyjádřena doba jízdy v každém úseku t_i podle vztahu:

$$t_i = \frac{x_i}{\frac{v_i + v_{i+1}}{2}}. \quad (5)$$

Dílčí energii pro překonání vozidlových odporů $E_{vo,i}$ v každém úseku s kladným zrychlením dá vztah:

$$E_{vo,i} = P_{vo,i} \cdot t_i. \quad (6)$$

Celková energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} se vypočte jako součet:

$$E_{vo} = \sum_{i=1}^n E_{vo,i}. \quad (7)$$

Výpočet energie pro pomocné spotřeby E_{ps}

Pro výpočet energie pro pomocné spotřeby jako je osvětlení vozidla, pohon kompresoru nebo chlazení komponent elektrické výzbroje je uvažován výkon:

$$P_{ps} = 3 \text{ kW}, \quad (8)$$

což je přibližná průměrná hodnota získaná ze zkušeností z provozu. Pro výpočet je potřeba nejdříve vyjádřit celkovou dobu jízdy t_c . Ta je dána jako součet doby jízdy t_j a doby stání t_s :

$$t_c = t_j + t_s = \sum_{i=0}^n t_i + n_z \cdot t_z, \quad (9)$$

přičemž t_i je doba jízdy v i -tém úseku, n_z je počet zastavení a t_z je doba každého zastavení, která je uvažována jako $t_z = 20$ s, což je průměrná doba zastavení vysledovaná v provozu. Celková energie pro pomocné spotřeby vozu E_{ps} se následně vypočte:

$$E_{ps} = P_{ps} \cdot t_c. \quad (10)$$

Výpočet celkové spotřebované energie E_{tr}

Pro výpočet celkové spotřebované energie E_{tr} při jízdě trolejbusu je uvažována účinnost pohonného řetězce $\eta = 80$ % a celková rekuperovaná energie jako 20% z celkové odebrané energie. Proto vztah pro výpočet celkové spotřebované energie E_{tr} je:

$$E_{tr} = \left(\frac{E_k + E_p + E_{vo}}{\eta} + E_{ps} \right) \cdot 0,8. \quad (11)$$

4.2 Výsledky výpočtů spotřebované energie při jízdě trolejbusu

V této části se nachází výsledky výpočtů spotřeb energie a jízdních dob pro všechny uvažované varianty. Ty jsou mezi sebou pro každý směr jízdy podrobně porovnány z hlediska vlivu počtu zastavení na celkovou spotřebu energie, podílu dílčích složek spotřebované energie a jízdní doby. Uvedené hodnoty dílčích složek spotřebované energie jsou bez zohlednění účinnosti pohonného řetězce. Ta je společně s rekuperací zohledněna až při výpočtu celkové spotřebované energie E_{tr} . Příklad provedení výpočtu pro střední variantu trasy Nádraží Veveslavín – Letiště je uveden v příloze 1.

4.2.1 Trasa Nádraží Veveslavín – Letiště

Střední varianta

Střední varianta rychlostního profilu pro trasu Nádraží Veveslavín – Letiště (viz příloha 2a) počítá se zastavením na vybraných zastávkách a křižovatkách. Jako konkrétní místa zastavení jsou vybrána ta, u kterých bylo na základě několika jízd v reálném provozu sledováno časté zastavování. Při uvažované jízdě trolejbus zastavuje na všech zastávkách kromě Nové Šárky. Celkem se jedná o devět zastavení (tab. 5) a několik zpomalení (typicky před křižovatkou).

Celková spotřebovaná energie E_{tr} pro střední variantu trasy Nádraží Veveslavín – Letiště dosahuje přibližně 22,3 kWh (tab. 5). Na spotřebě energie má největší podíl přírůstek kinetické energie E_k , který bez zohlednění účinnosti pohonu činí bezmála 10,3 kWh. Další významnou položkou je přírůstek polohové energie E_p o hodnotě 6,7 kWh. Menším podílem se projevuje energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} , a to 4,5 kWh. Malý vliv má spotřeba energie pro pomocné spotřeby E_{ps} , která dosahuje necelé 1 kWh.

Celková jízdní doba činí 1 143 s, což odpovídá přibližně 19 minutám. Vezmeme-li v potaz přejezd od místa odstavení trolejbusu k zastávce, bude mít trolejbus na své trase zanedbatelné zpoždění do 2 minut (17minutová jízdní doba podle jízdního řádu).

Tab. 5 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdních dob pro trasu Nádraží Veveslavín – Letiště (střední varianta)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	10,311
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	6,733
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	4,533
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	0,952
Počet zastavení n_z	9
Celková doba jízdy t_c [s]	1 143
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	22,339

Pomalá varianta

Pomalá varianta rychlostního profilu pro trasu Nádraží Veveslavín – Letiště (viz příloha 2a) vychází ze střední varianty, která byla upravena tak, aby zohlednila zastavení na všech zastávkách a světelných křižovatkách. Počet zastavení se zvýšil na 19 (tab. 6).

Spotřeba elektrické energie E_{tr} se zvýšila přibližně o 2,1 kWh na celkových 24,4 kWh (tab. 6). Hlavní podíl na zvýšení spotřeby má přírůstek kinetické energie E_k , který se zvýšil na 12,7 kWh. To odpovídá většímu počtu rozjezdů. Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} se naopak snížila o cca 0,5 kWh, což je následek snížení střední rychlosti. Energie pro pomocné spotřeby se zvýšila z důvodu delší celkové jízdní doby. Ta se zvýšila na 1 454 s, což odpovídá přibližně 24 minutám. Trolejbus by tedy dorazil do cílové zastávky se zpožděním přesahujícím 5 minut.

Tab. 6 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdní doby pro trasu Nádraží Veveslavín – Letiště (pomalá varianta)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	12,694
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	6,733
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	4,025
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	1,211
Počet zastavení n_z	19
Celková doba jízdy t_c [s]	1 454
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	24,422

Rychlá varianta

Rychlá varianta rychlostního profilu pro trasu Nádraží Veveslavín – Letiště (viz příloha 2b) vychází rovněž z původní střední varianty, ale naopak zohledňuje zastavení pouze na nejvýznamnějších zastávkách – Nádraží Veveslavín, Divoká Šárka, Terminál 3, Terminál 1 a Terminál 2. Je uvažován průjezd všemi křižovatkami bez zastavení. Počet zastavení se tedy snížil na pět (tab. 7).

Oproti střední variantě se snížila celková spotřeba energie E_{tr} o necelých 1,7 kWh na 8,6 kWh (tab. 7). Největší snížení potřebné energie je patrné u přírůstku kinetické energie E_k , což odpovídá menšímu počtu rozjezdů. Další položky, jmenovitě energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} a energie pro pomocné spotřeby E_{ps} , vykazují menší snížení.

Celková jízdní doba se zkrátila na 1 011 s, tedy necelých 17 minut. Trolejbus by dorazil na konečnou zastávku včas i s menší rezervou.

Tab. 7 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdní doby pro trasu Nádraží Veveslavín – Letiště (rychlá varianta)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	8,641
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	6,733
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	4,343
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	0,843
Počet zastavení n_z	5
Celková doba jízdy t_c [s]	1 011
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	20,391

4.2.2 Trasa Letiště – Nádraží Veveslavín

Střední varianta

Střední varianta rychlostního profilu pro trasu Letiště – Nádraží Veveslavín (viz příloha 2b) uvažuje projetí zastávek Navigátorů a Nová Šárka. Trolejbus zastavuje na všech ostatních zastávkách a dále na některých křižovatkách. Počet zastavení je 13 (tab. 8).

Celková spotřeba energie E_{tr} pro střední variantu profilu trasy Letiště – Nádraží Veveslavín dosahuje 19,3 kWh a je asi o 3 kWh nižší oproti srovnatelné variantě opačného směru (tab. 8). To je dáno zejména snížením přírůstku polohové energie E_p o cca 4,3 kWh na pouhých 2,4 kWh. V tomto směru jízdy převažuje klesání (viz obr. 8 na straně 24). Ostatní dílčí spotřeby se oproti opačnému směru významně nezměnily.

Celková doba jízdy je oproti variantě pro opačný směr vyšší – 1 354 s, což odpovídá přibližně 22,5 minutám. To je způsobeno především nutným manipulačním přejezdem od trolejbusových stání na zastávce Letiště na výchozí zastávku linky Terminál 1 a dále vyšším počtem zastavení vůči variantě pro opačný směr.

Tab. 8 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdní doby pro trasu Letiště – Nádraží Veveslavín (střední varianta)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	11,628
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	2,399
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	4,374
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	1,129
Počet zastavení n_z	13
Celková doba jízdy t_c [s]	1 354
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	19,303

Pomalá varianta

Rychlostní profil pro pomalou variantu zobrazuje příloha 2c. Spotřeba energie E_{tr} je u pomalé varianty vyšší asi o 1,7 kWh a dosahuje celkem přibližně 21,3 kWh (tab. 9). Velikost energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} se oproti střední variantě téměř nemění a energie nutná pro pomocné spotřeby E_{ps} je o něco vyšší z důvodu delší jízdní doby.

Ta činí celkově 1 712 s, tedy cca 28,5 minuty, takže trolejbus by dorazil na konečnou zastávku se značným zpožděním. S delší jízdní dobou souvisí vyšší počet zastavení, a to 24.

Tab. 9 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdní doby pro trasu Letiště – Nádraží Veleslavín (pomalá varianta)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	13,370
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	2,399
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	4,356
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	1,427
Počet zastavení n_z	24
Celková doba jízdy t_c [s]	1 712
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	21,266

Rychlá varianta

U rychlé varianty rychlostního profilu pro trasu Letiště – Nádraží Veleslavín (viz příloha 2c) dosahuje celková spotřebovaná energie E_{tr} přibližně 16,3 kWh a je tedy asi o 2 kWh nižší než u střední varianty (Tab. 10). Snížil se zejména přírůstek kinetické energie E_k na bezmála 8,7 kWh, energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} se mírně zvýšila kvůli vyšší střední rychlosti.

S celkem pěti zastaveními je celková jízdní doba 1 094 s, tedy o něco více než 18 minut. Vezmeme-li v úvahu čas potřebný na manipulační přejezd, trolejbus by dorazil na konečnou zastávku s mírným náskokem.

Tab. 10 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdní doby pro trasu Letiště – Nádraží Veleslavín (rychlá varianta)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	8,697
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	2,399
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	4,458
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	0,911
Počet zastavení n_z	5
Celková doba jízdy t_c [s]	1 094
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	16,284

5 Návrh optimalizace energetiky provozu

V této části bakalářské práce je cílem zhodnocení vlivu vytápění na spotřebu energie a vlivu změn některých provozních parametrů, jako je maximální rychlost nebo zrychlení, na spotřebu energie a jízdní dobu. Na základě výsledků pro tyto upravené varianty je formulováno doporučení směřující k optimalizaci provozu vedoucí ke snížení spotřeby energie.

5.1 Vliv vytápění na celkovou spotřebu energie

Spotřeba energie na vytápění nebo klimatizování vozu je velmi významnou položkou, ale její hodnota je značně variabilní v závislosti na počasí a ročním období. Protože by bylo nemožné pokrýt všechny možné situace je pro výpočet zvolena pouze extrémní hodnota odpovídající vysokému příkonu vytápění v zimních měsících, která se nejvíce projeví na spotřebě energie, a to:

$$P_{vyt} = 30 \text{ kW}. \quad (12)$$

Spotřeba energie na vytápění vozu E_{vyt} se vypočte podle vztahu:

$$E_{vyt} = P_{vyt} \cdot t_c. \quad (13)$$

Rovnice (11), která vyjadřuje celkovou spotřebu energie, je upravena přičtením energie na vytápění E_{vyt} ve tvaru:

$$E_{tr} = \left(\frac{E_k + E_p + E_{vo}}{\eta} + E_{ps} \right) \cdot 0,8 + E_{vyt}. \quad (14)$$

Výsledky výpočtu spotřeby energie na vytápění E_{vyt}

Vliv spotřeby energie na vytápění E_{vyt} je názorně vidět v tab. 11 (pro trasu Nádraží Veleslavin – Letiště) a v tab. 12 (pro trasu Letiště – Nádraží Veleslavin). Celková spotřeba energie E_{tr} se oproti variantám bez vytápění značně zvýší. Energie na vytápění dosahuje podobných hodnot jako přírůstek kinetické energie E_k bez zohlednění účinnosti pohonného řetězce a řadí se tak mezi nevýznamnější položky spotřeby energie. Ve variantách rychlostního průběhu pro trasu Nádraží Veleslavin – Letiště tvoří 29 až 33 % celkové spotřeby energie. Pro trasu Letiště – Nádraží Veleslavin dosahuje v jednotlivých variantách dokonce 36 až 40 % celkové spotřeby. Velikost energie potřebné pro vytápění závisí na celkové době jízdy t_c , a dosahuje tedy největších hodnot u pomalých variant, zároveň je vždy vyšší u trasy Letiště – Nádraží Veleslavin, která je charakteristická delší jízdní dobou.

Tab. 11 Spotřeby energie pro vytápění v trase Nádraží Veveslavín – Letiště

Střední varianta	
Energie na vytápění E_{vyt} [kWh]	9,523
Celková spotřebovaná energie E_{tr} [kWh]	31,862
Pomalá varianta	
Energie na vytápění E_{vyt} [kWh]	12,114
Celková spotřebovaná energie E_{tr} [kWh]	36,536
Rychlá varianta	
Energie na vytápění E_{vyt} [kWh]	8,426
Celková spotřebovaná energie E_{tr} [kWh]	28,817

Tab. 12 Spotřeby energie pro vytápění v trase Letiště – Nádraží Veveslavín

Střední varianta	
Energie na vytápění E_{vyt} [kWh]	11,286
Celková spotřebovaná energie E_{tr} [kWh]	30,589
Pomalá varianta	
Energie na vytápění E_{vyt} [kWh]	14,267
Celková spotřebovaná energie E_{tr} [kWh]	35,533
Rychlá varianta	
Energie na vytápění E_{vyt} [kWh]	9,115
Celková spotřebovaná energie E_{tr} [kWh]	25,399

Zhodnocení

Vliv vytápění na celkovou spotřebu energie je značný a v zimních měsících může tvořit velmi významnou část celkové spotřeby. U vozidel napájených z trakční baterie, tedy elektrobusů a bateriových trolejbusů, může významně snižovat dojezd. Proto je žádoucí zabývat se při optimalizaci spotřeby energie právě touto položkou. Možné kroky k optimalizaci spotřeby energie na vytápění jsou: úprava topného režimu, zlepšení tepelné izolace vozidla a zvážení použití tepelného čerpadla.

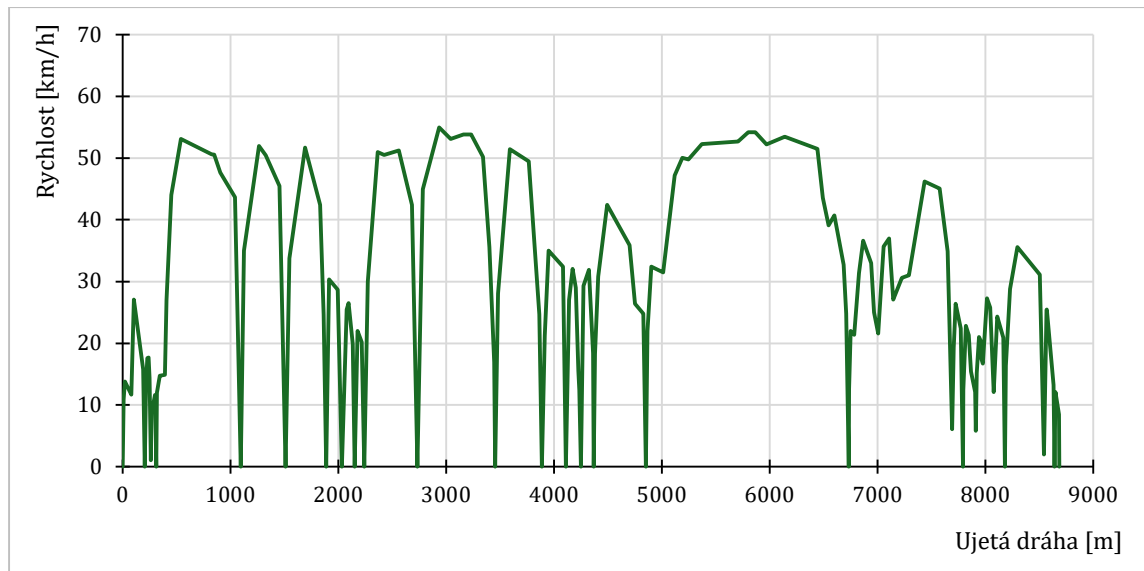
Část trasy linky nepokrytou trolejovým vedením by bylo vhodné překonávat se sníženým výkonem topení, což by vedlo ke snížení zatížení trakční baterie. Ke snížení ztrát tepla při pobytu na zastávkách přispívá použití poptávkového otevírání dveří, kdy si cestující sami otevírají dveře stisknutím tlačítka. Po uplynutí nastaveného časového intervalu se dveře automaticky zavřou. Lze očekávat, že velmi vysoké tepelné ztráty budou v místech, kde doléhají dveře ke karoserii vozu. V případě snahy o zlepšení tepelné izolace vozu by bylo žádoucí zaměřit se právě na tato místa. Systémem, který dokáže uspořit až desítky procent energie na vytápění je tepelné čerpadlo. Jeho účinnost se zvyšuje s rostoucí venkovní teplotou. Tepelným čerpadlem jsou vybavovány některé elektrobusy. [24]

5.2 Vliv maximální rychlosti na spotřebu energie a jízdní doby

Pro stanovení vlivu snížení maximální rychlosti na celkovou spotřebu energie při jízdě trolejbusu byl vybrán rychlostní profil pomalé varianty pro trasu Nádraží Veveslavín – Letiště. K tomuto účelu jej bylo potřeba upravit. Hodnoty rychlosti přesahující 50 km/h byly sníženy způsobem vyjádřeným v rovnici:

$$V_{nová} = (V_{původní} - 50) \cdot \frac{1}{3} + 50 \text{ [km/h]}. \quad (15)$$

Maximální rychlost tak nepřesahuje 55 km/h. Zvolený způsob zachovává původní úseky se zrychlením i zpomalením (jejichž hodnoty se však v důsledku snížení rychlosti změnily). Upravený profil je uveden na obr. 11.



Obr. 11 Rychlostní profil Nádraží Veveslavín – Letiště (pomalá varianta – snížená maximální rychlost)

Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} se oproti původní variantě (tab. 6 na straně 30) snížila o necelých 1,8 kWh na přibližně 22,7 kWh (tab. 13). Z jednotlivých dílčích složek poklesl především přírůstek kinetické energie E_k o cca 1,7 kWh na 11,1 kWh. Menší pokles lze zaznamenat také u energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} . Ta se snížila o 0,2 kWh.

Celková doba jízdy t_c se zvýšila jen nepatrně, a to o 17 s. Lze tedy konstatovat, že snížení maximální rychlosti způsobí mírné snížení spotřeby energie a zároveň nezpůsobí znatelné zvýšení jízdní doby. Proto není nutné, aby se řidiči rozjížděli na maximální možnou rychlost, mohou ji udržovat o něco nižší, aniž by kvůli tomu vznikalo zpoždění, a zároveň uspoří část energie.

Tab. 13 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdní doby pro trasu Nádraží Veleslavín – Letiště (snížená maximální rychlost)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	11,118
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	6,733
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	3,836
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	1,226
Počet zastavení n_z	19
Celková doba jízdy t_c [s]	1 471
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	22,668

5.3 Vliv velikosti zrychlení na spotřebu energie a jízdní doby

Tato část je věnována vlivu velikosti zrychlení na celkovou spotřebu energie a jízdní dobu. Pro jeho stanovení byl rovněž vybrán rychlostní profil pomalé varianty pro trasu Nádraží Veleslavín – Letiště shodně jako v kapitole 5.2. Tentokrát byl původní rychlostní profil změněn tak, že byly upraveny délky některých úseků, aby se dosáhlo snížení zrychlení při rozjezdech na přibližně 80 % původní hodnoty. Ve druhém uvažovaném případě bylo zrychlení naopak zvýšeno na 120 % původní hodnoty. V tomto případě zanedbáváme výkonovou zatížitelnost motorů a krátkodobě může tedy v některých úsecích vycházet potřebný výkon vyšší. Příloha 3 obsahuje upravené rychlostní profily.

Snížená hodnota zrychlení

Při zmenšení zrychlení o 20 % se celková spotřeba energie E_{tr} oproti původní variantě (tab. 6 na straně 30) nepatrně zvýší na přibližně 24,5 kWh. Přírůstek kinetické energie E_k , který je závislý na zrychlení vozidla se sníží o cca 0,4 kWh. Naopak energie potřebná pro překonání vozidlových odporů E_{vo} se o téměř 0,5 kWh zvýší, protože se prodlužují úseky, ve kterých musí trolejbus jízdní odpory překonávat.

Celková doba jízdy t_c se při zmenšení zrychlení o 20 % zvýší o 45 s.

Tab. 14 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdní doby pro trasu Nádraží Veleslavín – Letiště (zmenšené zrychlení)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	12,237
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	6,733
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	4,497
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	1,249
Počet zastavení n_z	19
Celková doba jízdy t_c [s]	1 499
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	24,466

Zvýšená hodnota zrychlení

Při zvětšení zrychlení o 20 % se celková spotřebovaná energie oproti původní variantě (tab. 6 na straně 30) sníží jen velmi nepatrně. Z jednotlivých dílčích složek vzroste přírůstek kinetické energie E_k , a to o necelých 0,4 kWh. Naopak se o podobnou hodnotu sníží spotřeba energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} , protože se prodlouží úseky, kde jede vozidlo výběhem.

Celková doba jízdy t_c se při zvětšení zrychlení o 20 % sníží o 25 s. Ačkoli změny spotřebované energie a jízdnicích dob jsou v počítaných variantách relativně nízké, lze obecně vyslovit závěr, že z hlediska stylu jízdy je vhodné dosahovat velkých zrychlení při rozjezdech a využívat následně výběhu.

Tab. 15 Výsledky výpočtu spotřeb energie a jízdnicích dob pro trasu Nádraží Veleslavín – Letiště (zvětšené zrychlení)

Přírůstek kinetické energie E_k [kWh]	13,063
Přírůstek polohové energie E_p [kWh]	6,733
Energie pro překonání vozidlových odporů E_{vo} [kWh]	3,665
Energie pro pomocné spotřeby E_{ps} [kWh]	1,191
Počet zastavení n_z	19
Celková doba jízdy t_c [s]	1 429
Celková spotřebovaná energie se zohledněním účinnosti a rekuperace E_{tr} [kWh]	24,414

Závěr

Trolejbusy s pomocným bateriovým pohonem získaly mezi dopravními podniky značnou oblibu, jakmile se staly dostupnými dostatečně kapacitní trakční baterie. Díky tomu mohou podniky provozující trolejbusovou dopravu disponovat vozidly umožňujícími jízdu jak při napájení z trolejového vedení, tak mimo něj, a to bez zatěžujících negativních vlivů spojených s pohonem pomocí spalovacího motoru. Dávají možnost uspořit finanční náklady, protože trolejovým vedením nemusí být pokryta celá trasa linky. Bateriové trolejbusy se rozšířily téměř do všech trolejbusových provozů v České republice a jsou oblíbené i v zahraničí. Bylo jen otázkou času, kdy se trakční baterie uplatní i u velkokapacitních (tříčlankových) vozidel. Na přelomu let 2023 a 2024 bylo dvacet těchto trolejbusů dodáno Dopravnímu podniku hl. m. Prahy, aby obsluhovaly vytíženou linku č. 59 spojující Nádraží Veveřská a Mezinárodní letiště Václava Havla v Praze.

Zatímco první část práce popsala koncepci bateriových trolejbusů, ve druhé části byl vytvořen podrobný popis trasy trolejbusové linky č. 59. Místa zastavení (zastávky, křižovatky, přechody a další) byla spolu s významnými změnami parametrů trasy (změny sklonu a maximální povolené rychlosti) zaznamenána do tabulek. Jednotlivé významné body rozdělují trasu na úseky, přičemž jsou uvedeny jejich délkové a výškové parametry. Podle nich je zobrazen výškový profil trasy.

Další část práce se věnovala samotnému provedení výpočtu spotřeby energie pro různé provozní varianty. Výpočet vychází z jízdních profilů (závislostí rychlosti na ujeté dráze) sestavených na základě dat získaných ze zkušeností z reálného provozu při několika jízdách v celé trase. Pro každý směr byly zvoleny tři varianty jízdních profilů – střední varianta (provoz během dne, středně vysoký počet zastavení), pomalá varianta (provoz ve špičce, vysoký počet zastavení) a rychlá varianta (večerní provoz, nízký počet zastavení). Celková spotřeba energie a jízdní doba vychází podle očekávání u pomalé varianty největší. Naopak nejnižší spotřeby energie a velikosti jízdní doby dosahuje rychlá varianta. Vypočtené hodnoty pro střední variantu byly porovnány s neověřenými naměřenými daty a lze říci, že se vypočtené hodnoty odchylují od naměřených dat přibližně o 10 až 15 %. Přesnost se i přes zvolený jednoduchý způsob výpočtu zdá dostatečná pro orientační určení spotřeby energie.

V poslední části je pomocí alternativních variant porovnán vliv změn vybraných parametrů na spotřebu energie a jízdní doby. Velká pozornost byla věnována vlivu vytápění vozidla. Podíl energie potřebné na vytápění při uvažovaném výkonu topení 30 kW dosahuje v mnohých případech více než třetiny celkové spotřeby energie. Má smysl se zabývat zlepšením tepelné izolace vozidla nebo použitím tepelného čerpadla. S ohledem na optimální zatížení trakční baterie bylo navrženo snížení výkonu topení při jízdě v úseku bez trolejového vedení. Další varianty porovnávaly vliv změn parametrů jako je maximální dosahovaná rychlost a velikost zrychlení. Z výpočtů vyplývá, že snížení maximální rychlosti na 55 km/h vyvolá mírné snížení spotřeby energie bez podstatného prodloužení jízdních dob. Velikost celkové spotřeby energie není příliš citlivá na změnu zrychlení. Při zvětšení zrychlení se sice spotřebovaná energie sníží jen nepatrně, ale dokazuje to, že z hlediska stylu jízdy jsou obecně vyšší hodnoty dosahovaného zrychlení vhodnější, protože vozidlo pak může jet delší čas výběhem, a tak je výsledná spotřebovaná energie menší a zároveň je dosaženo kratších jízdních dob.

Literatura

- [1] ČERNÝ, Pavel. *Jed'te elektrobusem*. Online. In: Časopis Elektro. [2020]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jedte-elektrobusem--17089>. [cit. 2024-05-13].
- [2] *Jak nabíjet největší českou flotilu elektrobuseů*. Online. In: SIEMENS Visions. 2022. Dostupné z: <https://www.visionsmag.cz/jak-nabijet-nejvetsi-ceskou-flotilu-elektrobusu>. [cit. 2024-05-13].
- [3] HARÁK, Martin. *Trolejbusy v České a Slovenské republice a ve světě*. Praha: Grada Publishing, 2020. ISBN 978-80-271-2839-6.
- [4] HELLER, Petr. *Kolejová vozidla III*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2021. ISBN 978-80-261-0773-6.
- [5] *Zákon č. 266/1994 Sb., o dráhách*. Online. In: Zákony pro lidi. AION CS, 2010–2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1994-266>. [cit. 2024-05-20].
- [6] *Zákon č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích*. Online. In: Zákony pro lidi. AION CS, 2010–2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-361>. [cit. 2024-05-20].
- [7] *Zákon č. 56/2001 Sb., o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích*. Online. In: Zákony pro lidi. AION CS, 2010–2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-56?text=z%C3%A1kon+o+provozu>. [cit. 2024-05-20].
- [8] *Účelně, ekologicky, ekonomicky: nad mapou budoucí trolejbusové linky 58*. Online. In: Smartcityvpraxi.cz. [2021]. Dostupné z: https://www.smartcityvpraxi.cz/rozhovory_komentare_146.php. [cit. 2024-05-24].
- [9] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Druhé vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. ISBN 978-80-261-0639-5.
- [10] *Příloha č. 1 - Technická specifikace Vozidla*. Online. In: Registr smluv. 2018. Dostupné z: <https://smlouvy.gov.cz/smlouva/5249700?backlink=xdiox>. [cit. 2024-03-01].
- [11] KOČÁRKOVÁ, Dagmar; KOCOUREK, Josef a JACURA, Martin. *Základy dopravního inženýrství*. v Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04233-5.
- [12] SŮRA, Jan. *Iveco dodá šest naftových autobusů pro pardubickou MHD*. Online. In: Zdopravy.cz. 2023. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/iveco-doda-sest-naftovych-autobusu-pro-pardubickou-mhd-173921/>. [cit. 2024-04-05].
- [13] ŠINDELÁŘ, Jan. *Pardubice koupí dalších osm trolejbusů Škoda 32Tr*. Online. In: Zdopravy.cz. 2024. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/pardubice-koupi-dalsich-osm-trolejbusu-skoda-32tr-202805/>. [cit. 2024-04-06].
- [14] OČADLÝ, Vojtěch. *3ČSAD shání pro Frýdek-Místek 12 elektrobuseů*. Online. In: Zdopravy.cz. 2023. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/3csad-shani-pro-frydek-mistek-12-elektrobusu-148239/>. [cit. 2024-04-06].
- [15] *Lausanne starts double-articulated trolleybus operation*. Online. In: Urban Transport Magazine. 2020. Dostupné z: <https://www.urban-transport-magazine.com/en/lausanne-starts-double-articulated-trolleybus-operation/>. [cit. 2024-06-13].

- [16] BUCH, Erik. *Nancy: The first HESS battery-trolleybus has just arrived!*. Online. In: Urban Transport Magazine. 2024. Dostupné z: <https://www.urban-transport-magazine.com/en/nancy-the-first-hess-battery-trolleybus-has-arrived/>. [cit. 2024-06-14].
- [17] HINČICA, Libor. *Luzern vypsal soutěž na až 53 parciálních trolejbusů*. Online. In: Československý Dopravák. 2023. Dostupné z: <https://www.cs-dopravak.cz/luzern-vypsal-soutez-na-az-53-parcialnich-trolejbusu/>. [cit. 2024-06-09].
- [18] *New trolleybus line (and thirteen 24-metre double-articulated by Hess) in Bern*. Online. In: Sustainable Bus. 2024. Dostupné z: <https://www.sustainable-bus.com/trolleybus-tramway/new-trolleybus-line-and-thirteen-24-metre-double-articulated-by-hess-in-bern/>. [cit. 2024-06-14].
- [19] DUFEK, Martin. *Bratislavský tříčlánkový trolejbus vyjel do zkušebního provozu s cestujícími*. Online. In: Dopraváček. 2023. Dostupné z: <https://dopravacek.eu/2023/11/16/bratislavsky-triclankovy-trolejbus-vyjel-do-zkusebniho-provozu-s-cestujicimi/>. [cit. 2024-06-17].
- [20] OČADLÝ, Vojtěch. *Megatrolejbusy mají problémy i v Bratislavě. Vozidlo je náročnější na údržbu a opravu, říká dodavatel*. Online. In: Zdopravy.cz. 2024. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/megatrolejbusy-maji-problemy-i-v-bratislave-vozidlo-je-narocnejsi-na-udrzbu-a-opravu-rika-dodavatel-205134/>. [cit. 2024-06-17].
- [21] SŮRA, Jan. *DPP ukázal první 24 metrů dlouhý trolejbus pro linku na letiště*. Online. In: Zdopravy.cz. 2023. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/dpp-ukazal-prvni-24-metru-dlouhy-trolejbus-pro-linku-na-letiste-149510/>. [cit. 2024-08-08].
- [22] *Na letiště nejdelším trolejbusem v ČR*. Online. In: Dopravní podnik hl. m. Prahy. 2024. Dostupné z: https://www.dpp.cz/spolecnost/aktuality/detail/66_2519-na-letiste-nejdelsim-trolejbusem-v-cr. [cit. 2024-07-09].
- [23] *Denní provoz*. Online. In: Dopravní podnik hl. m. Prahy. [2024]. Dostupné z: https://www.dpp.cz/spolecnost/aktuality/detail/66_2519-na-letiste-nejdelsim-trolejbusem-v-cr. [cit. 2024-07-09].
- [24] *Tepelné čerpadlo šetří netrakční spotřebu elektrobusů*. Online. In: Smartcityvpraxi.cz. 2020. Dostupné z: https://www.smartcityvpraxi.cz/moderni_techologie_120.php. [cit. 2024-08-01].

Seznam příloh

Příloha 1: Výpočty pro pomalou variantu trasy Nádraží veleslavín – Letiště

Příloha 1a

Příloha 1b

Příloha 1c

Příloha 2: Rychlostní profily

Příloha 2a

Příloha 2b

Příloha 2c

Příloha 3: Rychlostní profily s upravenými hodnotami zrychlení

Úsek	Délka úseku [m]	Rychlost na počátku úseku [km/h]	Doba jízdy [s]	Přírůstek kinetické energie [kWh]	Výkon pro překonání jízdnicích odporů [kW]	Energie pro překonání jízdnicích odporů [kWh]
1	10	0,0	6,6	0,036	6,0	0,011
2	10	10,9	2,9	0,022	8,5	0,007
3	60	13,8	16,9	0,000	0,0	0,000
4	25	11,7	4,6	0,182	12,5	0,016
5	85	27,1	14,3	0,000	0,0	0,000
6	15	15,8	6,8	0,000	0,0	0,000
7	10	0,0	5,4	0,054	6,0	0,009
8	15	13,3	3,5	0,040	12,5	0,012
9	10	17,6	2,0	0,001	12,5	0,007
10	10	17,7	2,2	0,000	0,0	0,000
11	10	14,4	4,7	0,000	0,0	0,000
12	5	1,0	3,8	0,022	4,0	0,004
13	35	8,6	9,6	0,072	8,5	0,023
14	10	17,6	2,1	0,000	0,0	0,000
15	10	16,0	2,6	0,000	0,0	0,000
16	25	12,0	6,7	0,022	8,5	0,016
17	45	14,7	10,9	0,002	8,5	0,026
18	15	14,9	2,6	0,154	17,5	0,013
19	45	27,0	4,6	0,367	39,0	0,049
20	90	44,0	6,3	0,485	70,0	0,122
21	285	59,4	18,4	0,000	0,0	0,000
22	25	51,9	1,7	0,000	0,0	0,000
23	55	51,7	4,0	0,000	0,0	0,000
24	135	47,7	10,6	0,000	0,0	0,000
25	55	43,7	4,9	0,000	0,0	0,000
26	170	37,1	13,2	0,532	58,5	0,214
27	60	55,9	4,0	0,000	0,0	0,000
28	95	51,4	6,6	0,003	70,0	0,129
29	100	51,5	7,6	0,000	0,0	0,000
30	170	43,8	12,4	0,347	58,5	0,201
31	140	55,3	10,3	0,000	0,0	0,000
32	45	42,4	4,8	0,000	0,0	0,000
33	10	24,6	1,5	0,000	0,0	0,000
34	30	23,2	3,8	0,194	23,5	0,025
35	20	34,3	2,0	0,052	39,0	0,022
36	140	36,7	16,2	0,000	0,0	0,000
37	20	25,5	2,8	0,016	23,5	0,018
38	40	26,5	6,2	0,000	0,0	0,000
39	15	19,9	5,4	0,000	0,0	0,000
40	30	0,0	8,6	0,193	8,5	0,020
41	60	25,2	6,7	0,284	31,0	0,057
42	135	39,6	10,4	0,410	58,5	0,169
43	50	54,0	3,4	0,000	0,0	0,000
44	135	51,6	9,2	0,067	70,0	0,179
45	120	53,7	8,1	0,000	0,0	0,000
46	255	53,4	15,2	0,507	96,0	0,406
47	105	67,2	6,0	0,000	0,0	0,000
48	120	59,5	7,1	0,077	96,0	0,190
49	70	61,6	4,1	0,000	0,0	0,000

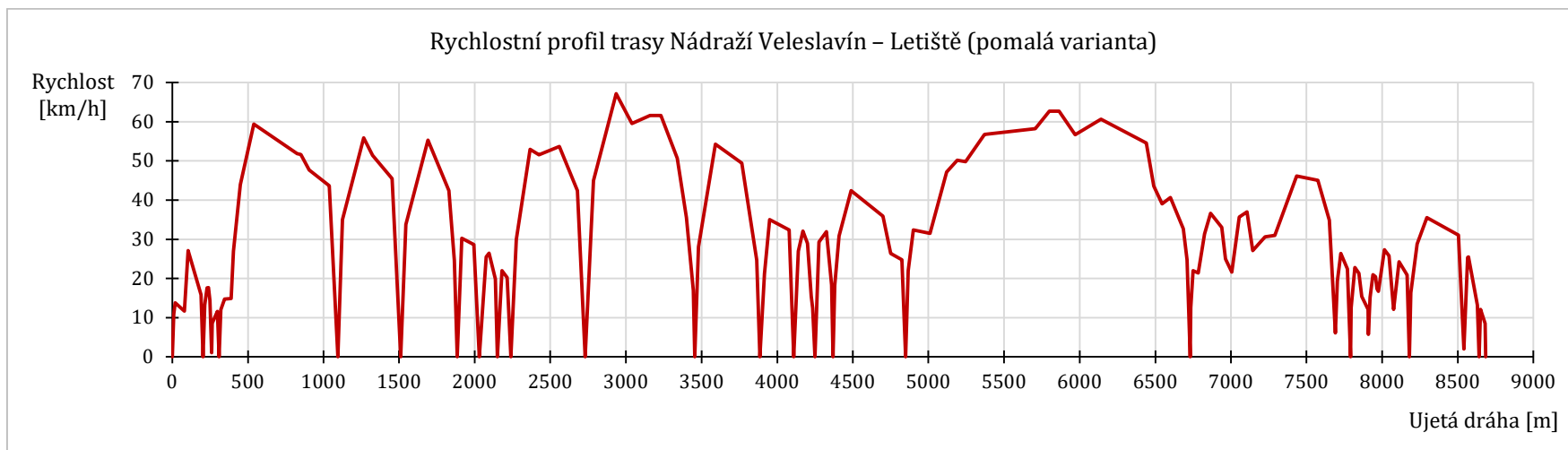
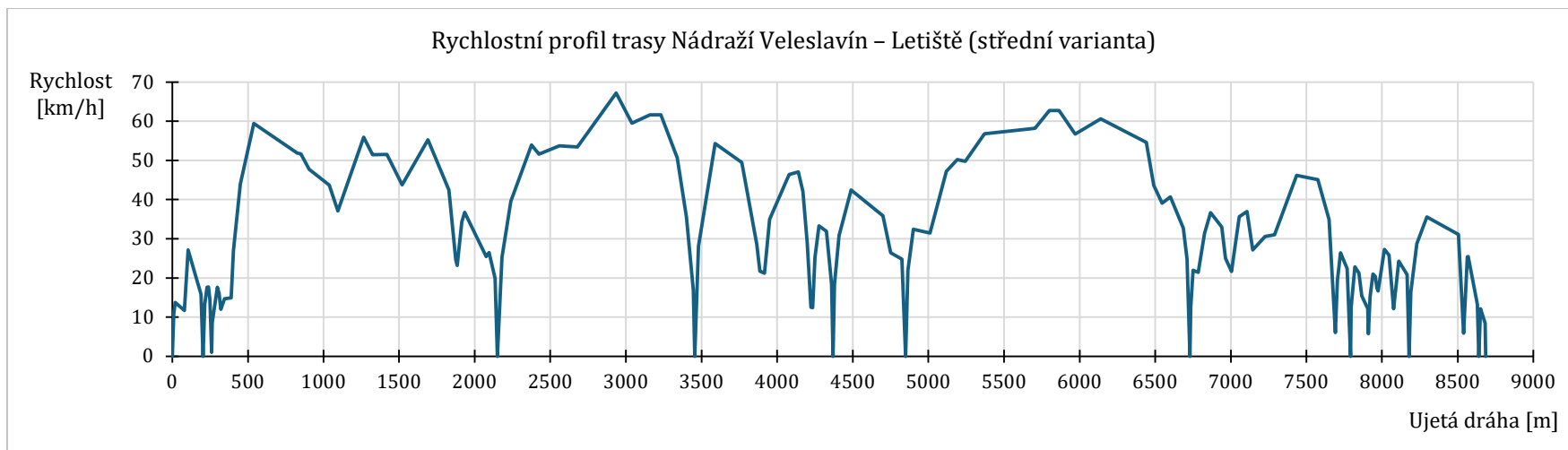
Příloha 1a: Výpočty pro pomalou variantu trasy Nádraží veleslavin – Letiště

Úsek	Délka úseku [m]	Rychlost na počátku úseku [km/h]	Doba jízdy [s]	Přírůstek kinetické energie [kWh]	Výkon pro překonání jízdních odporů [kW]	Energie pro překonání jízdních odporů [kWh]
50	110	61,6	7,1	0,000	0,0	0,000
51	60	50,7	5,0	0,000	0,0	0,000
52	45	35,6	6,2	0,000	0,0	0,000
53	10	16,9	4,3	0,000	0,0	0,000
54	25	0,0	6,4	0,240	8,5	0,015
55	110	28,1	9,6	0,657	48,0	0,128
56	175	54,3	12,1	0,000	0,0	0,000
57	100	49,5	9,2	0,000	0,0	0,000
58	20	28,7	2,9	0,000	0,0	0,000
59	30	21,7	5,0	0,000	0,0	0,000
60	35	21,2	4,5	0,236	23,5	0,029
61	130	35,0	11,5	0,282	48,0	0,153
62	60	46,4	4,6	0,017	58,5	0,075
63	30	47,0	2,4	0,000	0,0	0,000
64	30	42,1	3,0	0,000	0,0	0,000
65	25	29,0	4,3	0,000	0,0	0,000
66	10	12,5	2,9	0,000	0,0	0,000
67	15	12,4	2,9	0,146	12,5	0,010
68	25	25,2	3,1	0,144	23,5	0,020
69	50	33,3	5,5	0,000	0,0	0,000
70	35	31,9	5,0	0,000	0,0	0,000
71	10	18,4	3,9	0,000	0,0	0,000
72	10	0,0	3,9	0,102	6,0	0,007
73	30	18,3	4,4	0,187	17,5	0,021
74	80	30,8	7,9	0,258	39,0	0,085
75	210	42,4	19,3	0,000	0,0	0,000
76	50	35,9	5,8	0,000	0,0	0,000
77	75	26,4	10,5	0,000	0,0	0,000
78	25	24,8	7,3	0,000	0,0	0,000
79	15	0,0	4,9	0,147	8,5	0,012
80	35	22,0	4,6	0,172	23,5	0,030
81	110	32,4	12,4	0,000	0,0	0,000
82	110	31,5	10,1	0,376	39,0	0,109
83	70	47,2	5,2	0,089	58,5	0,084
84	55	50,2	4,0	0,000	0,0	0,000
85	125	49,8	8,4	0,227	70,0	0,164
86	335	56,8	21,0	0,049	82,5	0,481
87	95	58,2	5,7	0,166	96,0	0,151
88	65	62,7	3,7	0,000	0,0	0,000
89	105	62,7	6,3	0,000	0,0	0,000
90	170	56,7	10,4	0,139	82,5	0,239
91	300	60,6	18,8	0,000	0,0	0,000
92	50	54,6	3,7	0,000	0,0	0,000
93	55	43,6	4,8	0,000	0,0	0,000
94	55	39,1	5,0	0,039	39,0	0,054
95	85	40,7	8,3	0,000	0,0	0,000
96	25	32,7	3,1	0,000	0,0	0,000
97	20	24,8	5,8	0,000	0,0	0,000
98	5	0,0	2,9	0,048	6,0	0,005

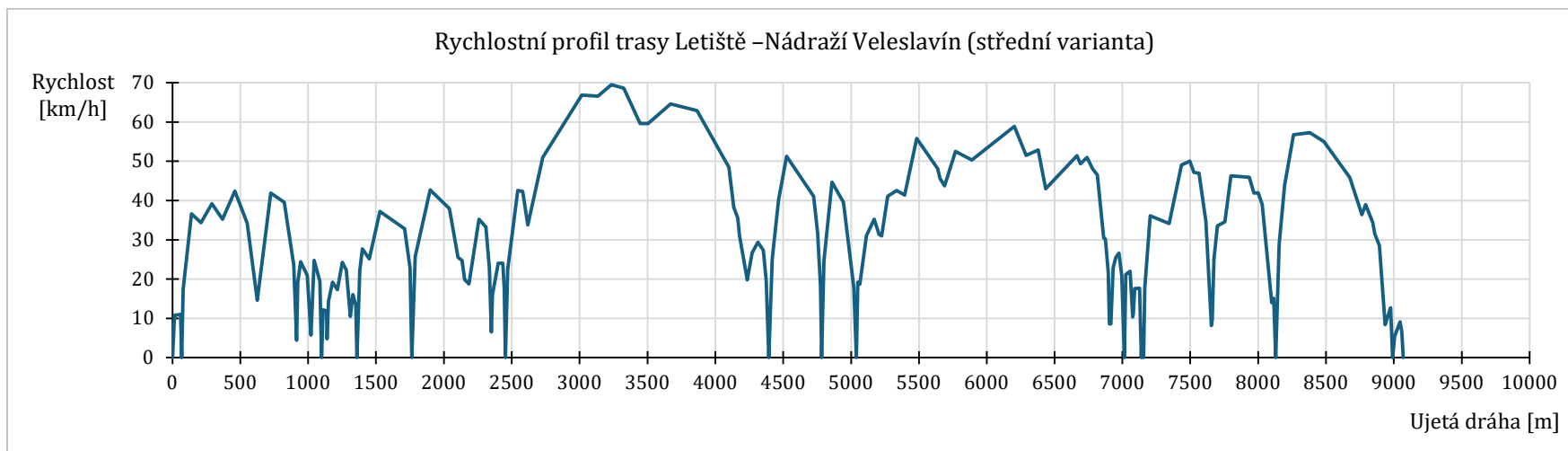
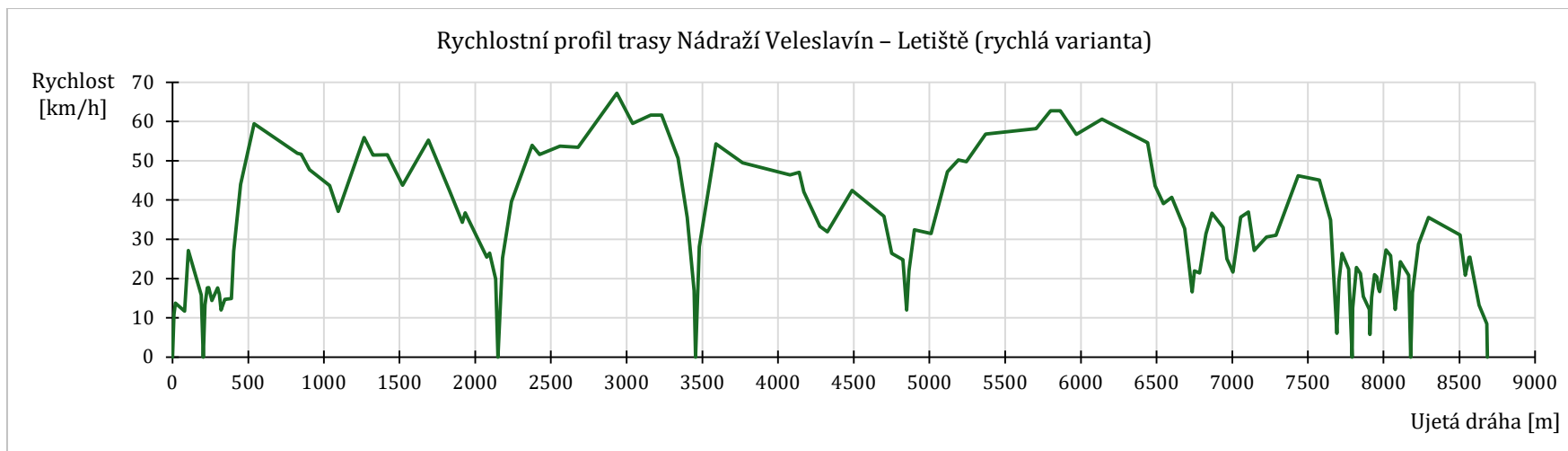
Příloha 1b: Výpočty pro pomalou variantu trasy Nádraží veleslavin – Letiště

Úsek	Délka úseku [m]	Rychlost na počátku úseku [km/h]	Doba jízdy [s]	Přírůstek kinetické energie [kWh]	Výkon pro překonání jízdnicích odporů [kW]	Energie pro překonání jízdnicích odporů [kWh]
99	15	12,6	3,1	0,099	12,5	0,011
100	35	22,0	5,8	0,000	0,0	0,000
101	40	21,4	5,5	0,161	23,5	0,036
102	40	31,4	4,2	0,108	31,0	0,036
103	75	36,6	7,8	0,000	0,0	0,000
104	25	33,0	3,1	0,000	0,0	0,000
105	40	25,0	6,2	0,000	0,0	0,000
106	50	21,6	6,3	0,246	23,5	0,041
107	50	35,7	5,0	0,029	39,0	0,054
108	40	37,0	4,5	0,000	0,0	0,000
109	80	27,1	10,0	0,061	23,5	0,065
110	65	30,6	7,6	0,007	31,0	0,065
111	145	31,0	13,5	0,357	39,0	0,147
112	140	46,2	11,0	0,000	0,0	0,000
113	75	45,1	6,8	0,000	0,0	0,000
114	40	34,9	7,0	0,000	0,0	0,000
115	15	6,1	4,3	0,102	8,5	0,010
116	20	19,3	3,2	0,099	17,5	0,015
117	45	26,4	6,6	0,000	0,0	0,000
118	20	22,4	6,4	0,000	0,0	0,000
119	5	0,0	2,9	0,048	6,0	0,005
120	25	12,5	5,1	0,111	12,5	0,018
121	25	22,8	4,1	0,000	0,0	0,000
122	20	21,3	3,9	0,000	0,0	0,000
123	40	15,4	10,5	0,000	0,0	0,000
124	5	12,1	2,0	0,000	0,0	0,000
125	10	5,8	3,4	0,060	8,5	0,008
126	20	15,2	4,0	0,064	12,5	0,014
127	15	21,0	2,6	0,000	0,0	0,000
128	10	20,4	1,9	0,000	0,0	0,000
129	10	17,4	2,1	0,000	0,0	0,000
130	40	16,7	6,5	0,142	17,5	0,032
131	30	27,3	4,1	0,000	0,0	0,000
132	30	25,8	5,7	0,000	0,0	0,000
133	35	12,1	6,9	0,135	12,5	0,024
134	55	24,3	8,8	0,000	0,0	0,000
135	15	20,9	5,2	0,000	0,0	0,000
136	10	0,0	4,4	0,082	6,0	0,007
137	40	16,4	6,4	0,171	17,5	0,031
138	65	28,8	7,3	0,133	31,0	0,063
139	210	35,6	22,7	0,000	0,0	0,000
140	35	31,1	6,8	0,000	0,0	0,000
141	25	5,9	5,8	0,186	12,5	0,020
142	5	25,4	0,7	0,002	23,5	0,005
143	60	25,5	11,2	0,000	0,0	0,000
144	10	13,2	5,5	0,000	0,0	0,000
145	10	0,0	6,0	0,045	6,0	0,010
146	30	12,1	10,5	0,000	0,0	0,000
147	5	8,5	4,2	0,000	0,0	0,000
Celkem:	8690		962,7	10,311		4,533

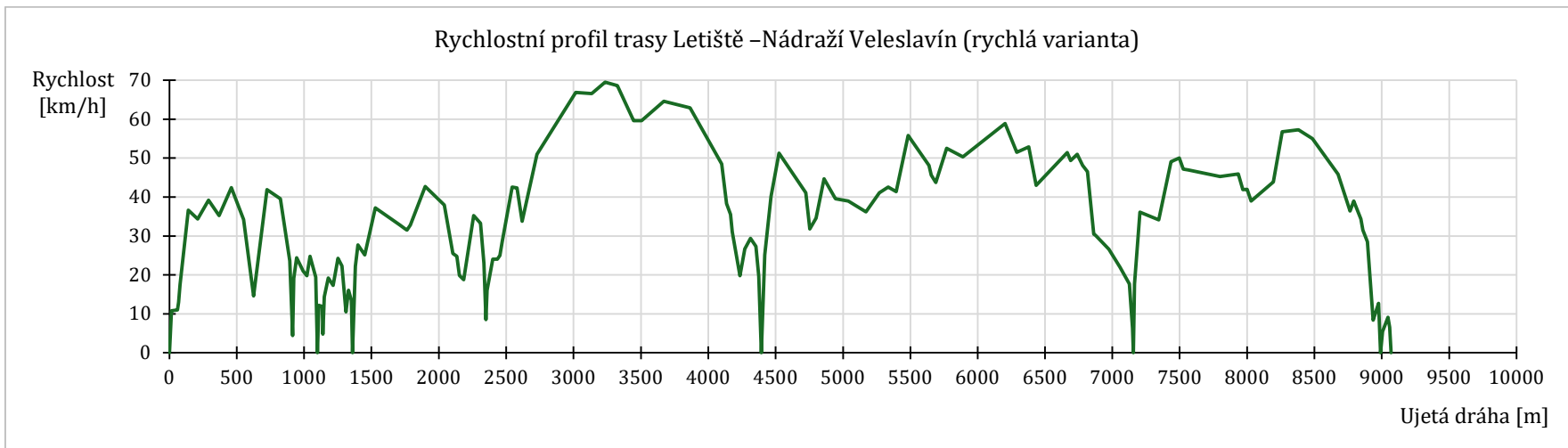
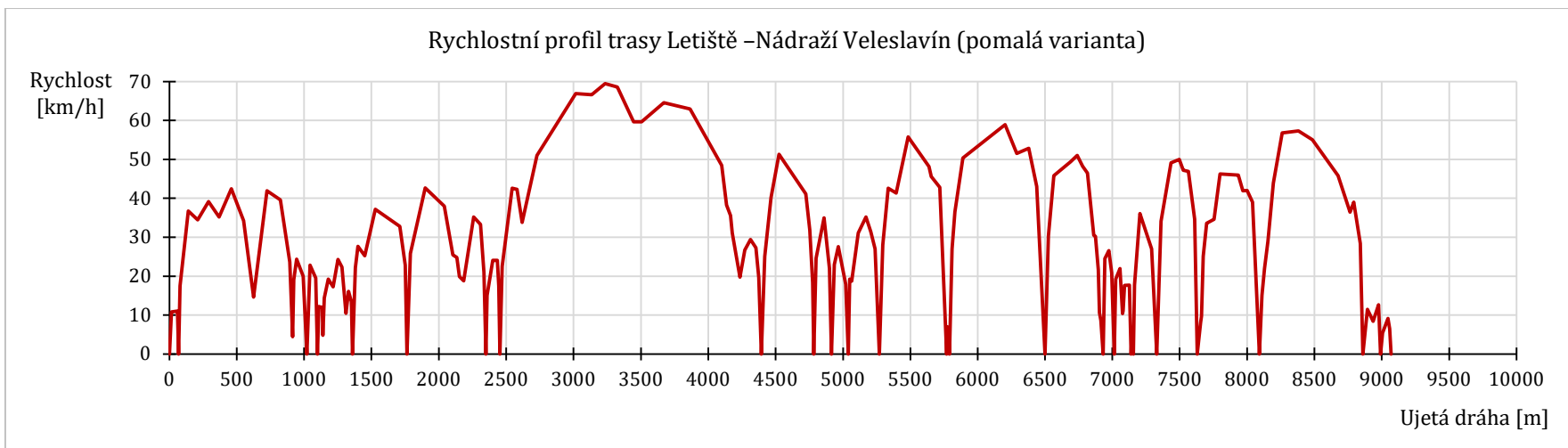
Příloha 1c: Výpočty pro pomalou variantu trasy Nádraží veleslavín – Letiště



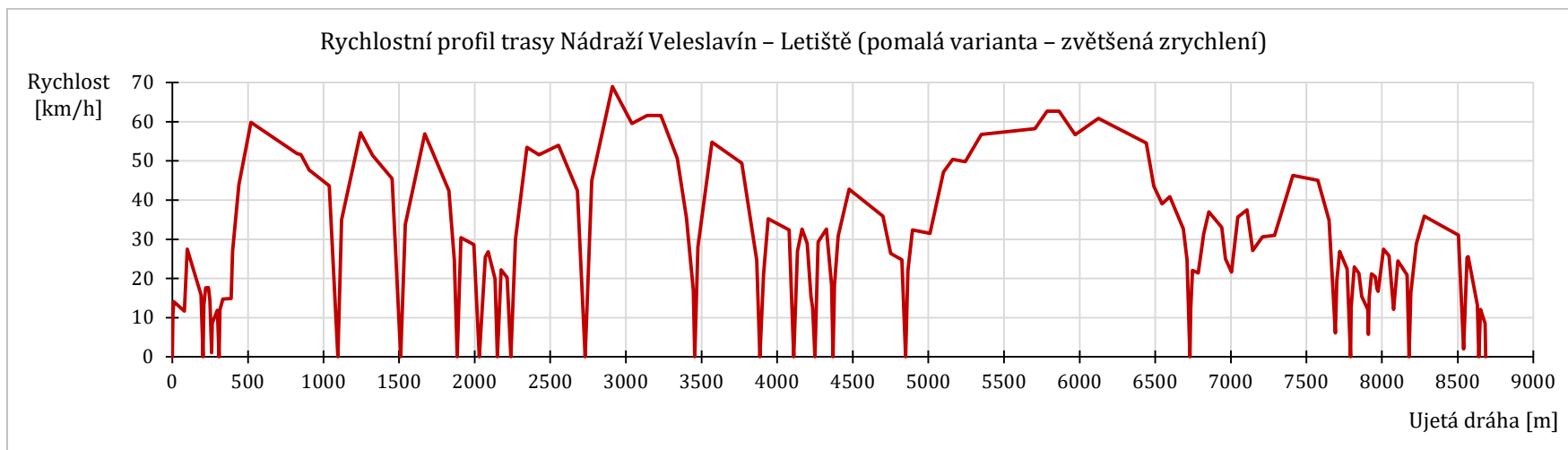
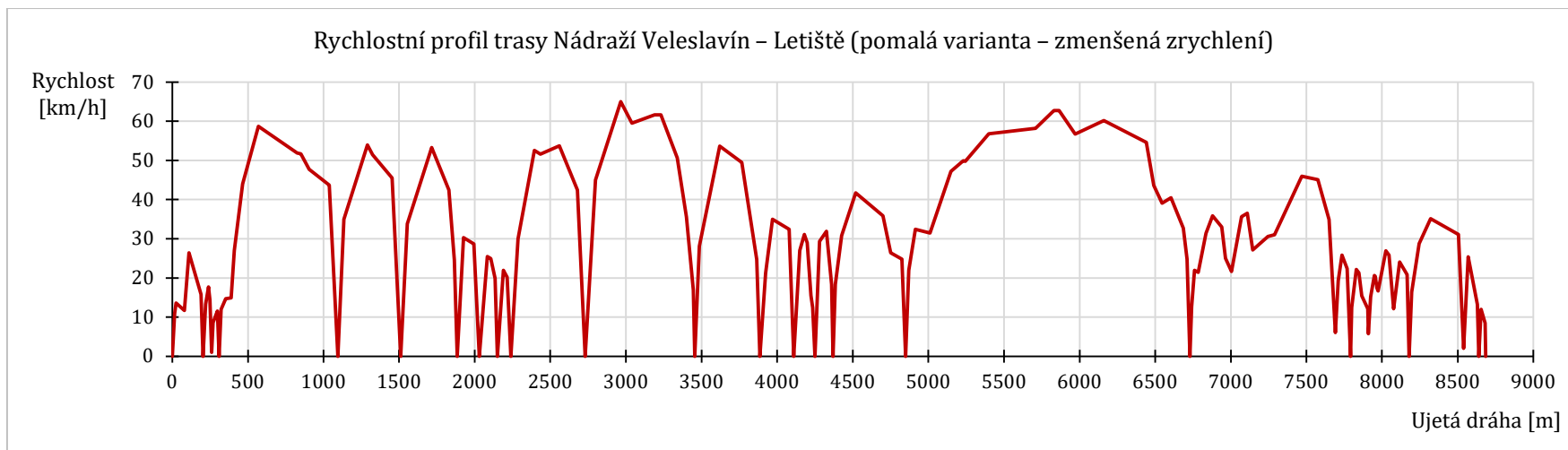
Příloha 2a: Rychlostní profily



Příloha 2b: Rychlostní profily



Příloha 2c: Rychlostní profily



Příloha 3: Rychlostní profily s upravenými hodnotami zrychlení