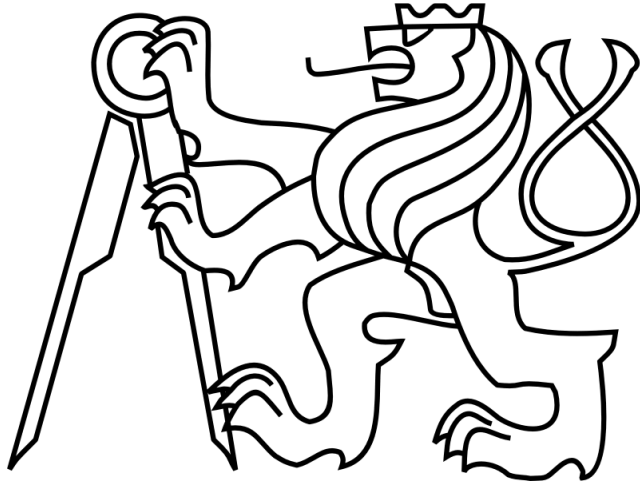


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Ústav logistiky a managementu dopravy



Milan Kříž

Modifikace makroskopického dopravního modelu

DISERTAČNÍ PRÁCE

Doktorský studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Technologie a management v dopravě a telekomunikacích

Školitel: Ing. Vít Janoš, Ph.D.

Praha, květen 2020

Poděkování

Děkuji svým kolegům na ČVUT FD a zejména kolegům z naší technologické skupiny na Ústavu logistiky a managementu dopravy za zajímavé a inspirativní debaty při psaní této disertační práce.

Chtěl bych také poděkovat profesoru Kayi Werneru Axhausenovi za možnost inspirativního studijního pobytu na IVT ETH Zürich a za jeho cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat všem členům skupiny dopravního plánování na IVT ETH Zürich, zejména děkuji Felixu Beckerovi a Basilu Schmidovi za jejich cenné rady v problematice modelování diskrétní volby.

Děkuji TSK Praha za umožnění využití dat z průzkumů dopravního chování a aktuální verze dopravního modelu současného stavu Pražského metropolitního regionu. Dále děkuji všem kolegům z TSK Praha a zejména těm z Oddělení modelování dopravy, se kterými jsem se během zpracování této disertační práce mohl setkávat a diskutovat. Jmenovitě bych chtěl poděkovat Janu Kremlovi, Jiřímu Zemanovi a Jiřímu Dytrychovi.

Chtěl bych také poděkovat své mamince za důmyslně aplikovanou metodu cukru a biče, která vznikla kombinací citového vydírání a vaření velice dobrých snídaní, obědů a večeří. Na závěr bych chtěl poděkovat svému školiteli panu doktoru Vítu Janošovi za přátelské vedení, rady v pravý čas a psychickou podporu. Díky Víto!

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci, zpracovanou na závěr doktorského studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze dne

.....

Abstrakt

Tato disertační se zabývá problematikou makroskopického dopravního modelování. Cílem této disertační práce je rozšířit standardní postup výpočtu makroskopického dopravního modelu o model, který pro každou zónu dopravního modelu určuje podíl jednotlivců vlastnících předplatní jízdenku na veřejnou dopravu nebo disponujících osobním automobilem. Využívání těchto nástrojů mobility není uvažováno jako pouhý vstup do dopravního modelu, ale používání těchto nástrojů je uvažováno jako závislé na různých faktorech popsaných v této práci. Hypotézy byly ověřeny multinomiálním logitovým modelem, nested-logit modelem a smíšeným logitovým modelem. Disertační práce představuje nový postup, který zahrnuje tyto faktory do makroskopického dopravního modelu.

Abstract

This dissertation deals with the issue of macroscopic transport modelling. The aim of this dissertation is to extend the standard procedure for calculating the macroscopic transport model by a model that determines for each zone of the transport model the share of individuals with public transport season tickets or an available car. The use of these mobility tools is not considered as a mere input into the transport model, but the use of these tools is considered as dependent on the various factors described in this thesis. The hypotheses were verified by the multinomial logit model, the nested-logit model and the mixed logit model. The thesis presents a new procedure that includes these factors in the macroscopic transport model.

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Úvodní vymezení pojmů	9
2	Stav poznání a stávající praxe	15
2.1	Dopravní plánování.....	15
2.2	Makroskopické dopravní modelování.....	16
2.2.1	Analýza dopravního systému	18
2.2.2	Modelování dopravní nabídky.....	25
2.2.3	Modelování dopravní poptávky.....	31
2.2.4	Interakce poptávky a nabídky.....	41
2.3	Dostupnost.....	43
3	Formulace problému	48
4	Stávající přístupy k řešení problému.....	52
4.1	Volba nástrojů mobility	52
4.2	Současný přístup v České republice.....	53
4.3	Modely na úrovni rozhodování jednotlivců.....	58
5	Návrh modifikace modelu.....	62
5.1	Modely rozhodování jednotlivců	62
5.1.1	Stanovení hypotéz	64
5.1.2	Metodologie – teorie diskrétní volby.....	65
5.1.3	Příprava dat.....	71
5.1.4	Binární modely volby nástrojů mobility.....	77
5.1.5	Spojené modely volby nástrojů mobility	89
5.2	Agregace modelu chování a prognóza na úrovni zón	100
5.2.1	Agregace volby nástrojů mobility na úroveň dopravních zón.....	100
5.2.2	Integrace do makroskopického dopravního modelu	106
6	Závěr	109
7	Použité zdroje	111

Seznam tabulek

Tabulka 1 Různé úrovně modelování dopravy	14
Tabulka 2 Matice přemístovacích vztahů	32
Tabulka 3 Ukázka specifických hybností – výsledky SrV 2013	37
Tabulka 4 Sumární charakteristiky použitých proměnných	77
Tabulka 5 Použitý mód pro cestu z domova do práce a využívané nástroje mobility	77
Tabulka 6 Formální úpravy proměnných a jejich označení v R.....	78
Tabulka 7 Výsledky binárního logitového modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky se všemi dostupnými nezávisle proměnnými.....	80
Tabulka 8 Výsledky konečného binárního logitového modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky.....	80
Tabulka 9 Výsledky binárního logitového modelu pro disponování osobním automobilem se všemi dostupnými nezávisle proměnnými	85
Tabulka 10 Výsledky konečného binárního logitového modelu pro disponování osobním automobilem.....	85
Tabulka 11 Výsledky multinomiálního logitového modelu pro volbu nástrojů mobility se všemi dostupnými nezávisle proměnnými.....	91
Tabulka 12 Výsledky konečného multinomiálního logitového modelu pro volbu nástrojů mobility	92
Tabulka 13 Výsledky smíšeného logitového modelu pro volbu nástrojů mobility se všemi dostupnými nezávisle proměnnými	98
Tabulka 14 Výsledky zjednodušeného multinomiálního logitového modelu pro volbu nástrojů mobility pro účely agregace chování do dopravních zón pomocí segmentace	102

Seznam obrázků

Obrázek 1 Analýza dopravních systémů podle Mannheima/Floriana	17
Obrázek 2 Soustava územních prvků a územně evidenčních jednotek v RSO.....	19
Obrázek 3 Cestovní deník z celostátního průzkumu dopravního chování Česko v pohybu.....	23
Obrázek 4 Srovnání hybností obyvatel z různých průzkumů z ČR a Německa.....	24
Obrázek 5 Doporučená velikost zón pro modely měst podle Lohseho	27
Obrázek 6 Ukázka nabídkového modelu v prostředí PTV VISUM.....	29
Obrázek 7 Možnosti interpretace přemístění v rámci jednoho dne	33
Obrázek 8 Princip iterativního výpočtu dopravní nabídky a poptávky.....	42
Obrázek 9 Kumulativní dostupnost – počet pracovních míst dostupných z SO ORP do 60 minut pro severní variantu RS Praha – Brno a „hradeckou“ variantu RS směr Vratislav.....	45
Obrázek 10 Relativní změna potenciální dostupnosti pro jižní variantu RS Praha – Brno a „hradeckou“ variantu RS směr Vratislav	46
Obrázek 11 Rozsah dopravního modelu TSK Praha	48
Obrázek 12 Dlouhodobý vývoj úrovně automobilizace v závislosti na HDP na obyvatele	54
Obrázek 13 Vývoj stupně automobilizace v Praze a České republice.....	55
Obrázek 14 Vývoj stupně automobilizace ve Švýcarsku a vybraných kantonech.....	56
Obrázek 15 Pravděpodobnost vlastnictví automobilu podle příjmu domácnosti.....	57
Obrázek 16 Průběh funkce distance-decay pro VHD	73
Obrázek 17 Průběh funkce distance-decay pro IAD	74
Obrázek 18 Potenciální dostupnost pracovních míst (VHD)	75
Obrázek 19 Potenciální dostupnost pracovních míst (IAD).....	76
Obrázek 20 Závislost pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky na dostupnosti pracovních míst VHD pro čtyři modelové osoby podle výsledků binárního modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky.....	82
Obrázek 21 Závislost pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky na věku pro čtyři modelové osoby podle výsledků binárního modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky.....	83
Obrázek 22 Závislost pravděpodobnosti disponování osobním automobilem na dostupnosti pracovních míst VHD pro čtyři modelové osoby podle výsledků binárního modelu pro disponování osobním automobilem.....	87
Obrázek 23 Závislost pravděpodobnosti disponování osobním automobilem na věku pro čtyři modelové osoby podle výsledků binárního modelu pro disponování osobním automobilem.....	88
Obrázek 24 Testované struktury modelu nested logit.....	95
Obrázek 25 Testované struktury zobecněného modelu nested logit.....	96
Obrázek 26 Podíly výdělečně činných osob v jednotlivých dopravních zónách, které mají pouze předplatní jízdenku	103
Obrázek 27 Podíly výdělečně činných osob v jednotlivých dopravních zónách, které disponují pouze osobním automobilem.....	104
Obrázek 28 Podíly výdělečně činných osob v jednotlivých dopravních zónách, které mají k dispozici oba nástroje mobility	105

Obrázek 29 Podíly výdělečně činných osob v jednotlivých dopravních zónách, které nemají k dispozici žádný nástroj mobility	106
Obrázek 30 Modifikace iterativního výpočtu dopravní nabídky a poptávky v makroskopickém dopravním modelu se zohledněním modelu nástrojů dostupnosti.....	107

Seznam zkratek

AD	automobilová doprava
CATI	computer assisted telephone interviewing – dotazník vyplňován tazatelem při telefonickém rozhovoru s respondentem
CAWI	computer assisted web interviewing – vyplňování webového dotazníku respondentem
CR	capacity-restraint (popis typu funkcí)
ČR	Česká republika
ČSÚ	Český statistický úřad
ČVUT FD	České vysoké učení technické v Praze Fakulta dopravní
DPP	Dopravní podniky hl. m. Prahy
ESP	Electronic Stability Program (elektronický stabilizační program)
GIS	Geografický informační systém
GNL	generalized nested logit
HD	hromadná doprava
HDP	hrubý domácí produkt
IAD	individuální automobilová doprava
IPR Praha	Institut plánování a rozvoje hlavního města Prahy
IVT ETH	Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme – Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
JRT	journey time – celková cestovní doby VHD „ode dveří ke dveřím“, resp. mezi zdrojovou a cílovou zónou (názvosloví programu PTV VISUM)
JASPERS	Joint Assistance to Support Projects in European Regions
MDV SR	Ministerstvo dopravy a výstavby Slovenskej republiky
MHD	městská hromadná doprava
MMNL	mixed multinomial logit
MNL	multinomial logit
NL	nested logit
OA	osobní automobil
OD	origin – destination (zdroj – cíl)

PID	Pražská integrovaná doprava
PK	pozemní komunikace
PMO	Pražská metropolitní oblast
PMR	Pražský metropolitní region
PTV	Planung Transport Verkehr AG – společnost zabývající se vývojem programů v oblasti dopravního plánování
ROPID	Regionální organizátor Pražské integrované dopravy
RS	Rychlá spojení – souhrnný název pro systém VRT v ČR
RSO	Registr sčítacích obvodů a budov
RUM	random utility model – model náhodného užítka
SLDB	Sčítání lidu, domů a bytů
SO ORP	správní obvod obce s rozšířenou působností
SrV	System repräsentativer Verkehrsbefragungen – standardizovaný systém průzkumů dopravního chování, opakující se každý 5 let na území Německa
SVI	Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten
TP	Technické podmínky Ministerstva dopravy
TSK Praha	Technická správa komunikací hlavního města Prahy, a.s.
TTC	travel time (current) – cestovní doba na zatížené síti, zda pro IAD (názvosloví PTV VISUM)
TU	Technische Universität
VD	veřejná doprava
VISUM	Verkehr in Städten – Umlegungsmodell (název počítačového programu)
VHD	veřejná hromadná doprava
VRT	vysokorychlostní trať
VOŠ	vyšší odborná škola
VŠ	vysoká škola
ZCS	zdroj-cílová skupina
ZSJ	základní sídelní jednotka
ZSJD	základní sídelní jednotka díl

1 Úvod

Modelování dopravní poptávky je důležitým procesem v rámci jakéhokoli typu dopravního plánování. Janoš a Baudyš (2013) považují zjišťování proudů cestujících, které jsou jedním z hlavních výsledků modelování dopravní poptávky v případě veřejné dopravy (VD), za základní výchozí krok v rámci procesu jejího plánování. Od určité úrovně významu se v současné době plánování a projektování žádné dopravní stavby neobejde bez výpočtů dopravního modelu.

V inženýrské praxi dosud převažují makroskopické dopravní modely. V rámci aplikace těchto modelů se ukazuje, že na rozhodování osob zejména v rámci volby dopravního módu mají vliv jejich sociodemografické atributy, mezi které se řadí rovněž to, zda daná osoba vlastní předplatní jízdenku nebo disponuje osobním automobilem. Tyto skutečnosti se obvykle nazývají souhrnným pojmem *nástroje mobility*. Modelování rozložení těchto nástrojů mobility v populaci se však děje obvykle na základě agregátních dat pro celé skupiny dopravních zón modelu a není možné tímto způsobem zachytit lokální odlišnosti mezi jednotlivými zónami.

Cílem této disertační práce je ověření vlivu nástrojů mobility při volbě dopravního módu a doplnění standardního postupu výpočtu makroskopického dopravního modelu o model, který by pro každou zónu dopravního modelu určoval pro jednotlivé kombinace nástrojů mobility jim příslušné podíly v rámci populace.

Tato práce je členěna do pěti hlavních kapitol. V první kapitole jsou vymezeny základní pojmy oboru této disertační práce, kterým je makroskopické dopravní modelování. Ve druhé kapitole je shrnut stav poznání oboru dopravního plánování a jeho části nazývající se makroskopické dopravní modelování. Dále je také představen koncept dopravní dostupnosti.

Ve třetí kapitole je zformulována úloha na základě inženýrského problému z praxe, který vznikl při správě makroskopického dopravního modelu Pražského metropolitního regionu, jenž je spravován TSK Praha.

Ve čtvrté kapitole jsou shrnuty dosavadní způsoby řešení problému nejprve v rámci ČR, následně jsou představeny modely na bázi chování jednotlivců, užívané na základě nejnovějšího poznání ve světě.

Pátá kapitola představuje vlastní návrh řešení a ověření výběru vhodného modelu. Postupně je navržen způsob řešení stanoveného problému pro výdělečně činné osoby. Nejprve jsou analyzovány dostupné průzkumy dopravního chování a jsou definovány jednotlivé nástroje mobility. Následně jsou sestrojeny indikátory dostupnosti na úrovni dopravních zón makroskopického dopravního modelu. Poté jsou vytvořeny modely volby nástrojů mobility podle různých teoretických přístupů a je vybrán model s nejvyšší kvalitou. Tento model je pak využit pro agregaci chování na úroveň dopravní zón modelu. Na konci kapitoly je navržen postup pro výpočet obecného makroskopického dopravního modelu, který zohledňuje volbu nástrojů mobility.

1.1 Úvodní vymezení pojmů

Tato práce bude týkat oboru dopravního modelování. Z názvu je možné si udělat velice rychle představu, čím se tento obor zabývá. V práci budou řešeny vytváření a správa modelů, které se budou týkat dopravy. Avšak co si představit pod pojmem model? A pod pojmem doprava?

Model je možné definovat jako „*více či méně idealizovanou napodobeninu části reálného světa (záměrné zjednodušení skutečnosti)*“ (Bulíček, Mojžíš, Molková, Brožová, Hruban, Vízner, Hofhanzl, Súkenník, 2011). A modelování jako činnost, která se zabývá tvorbou a vyhodnocováním těchto modelů.

Hlavní snahou obvykle je modelováním vytvářet co nejvěrnější „obraz“ zkoumaného systému. Systém je možné definovat jako „*množinu věcí a vztahů mezi nimi*“ (Votruba, Klečáková, Kalika, 2004, s. 7). U systému se postupuje zpravidla tak, že se vymezí jeho hranice v reálném nebo myšleném prostředí, v jehož rámci se identifikují určité prvky a jejich vzájemné vazby. Dále systém se svým okolím interaguje pomocí vazeb, které je možné pojmenovat vstupy a výstupy.

Model určitého systému je zpravidla vytvářen proto, aby bylo možné odpovídat na určité otázky související s tímto systémem. Model se vytváří takovým způsobem, aby byly potlačeny nedůležité skutečnosti v systému, avšak aby byly zachovány, pokud možno, všechny důležité prvky a procesy v tomto systému.

Pokud by například zkoumaným systémem byla Praha se Středočeským krajem, mohla by být zajímavá odpověď na otázku: „*Kolik cestujících bude využívat plánovanou linku*

metra D v mezistaničním úseku Písnice – Depo Písnice?“. Zástupce iniciativy JASPERS¹ by se mohl zeptat: „Bude stavba metra linky D v úseku Pankrác – Depo Písnice efektivní z pohledu příslušných metodik schválených odpovědnými orgány Evropské unie?“.

Na první otázku by bylo možné odpovědět jednoduše tak, že by byla linka metra D skutečně v plánovaném úseku Pankrác – Depo Písnice postavena za několik desítek miliard korun a pak by byly počty cestujících v daném úseku změřeny. Poté by se mohlo řešit, jak byla otázka vlastně myšlena, tedy zda bylo v ohnisku zájmu celodenní zatížení v typickou středu, pátek, sobotu či neděli, nebo zda je potřeba řešit rozdíly mezi dopravní špičkou a sedlem. Nakonec by bylo možné po zjištění hledaných hodnot případně nabýt dojmu, že změřené zatížení odpovídá spíše průměrné tramvajové trati, a politická reprezentace hl. m. Prahy by mohla přijmout rozhodnutí, že metro bude opuštěno, stavby na povrchu zbourány, vozidla prodána a že bude postavena tramvajová trať.

Pro odpověď na druhou otázku by bylo nutné postupovat poněkud komplikovaněji. Stejně jako u první odpovědi by musela být nová linka metra postavena a zprovozněna. Dále by museli být po dobu 30 let od počátku výstavby sledováni všichni jednotlivci a organizace (firmy, samosprávy, spolky apod.), kteří by mohli být stavbou ovlivněni, a musela by u nich být měřena například celková doba strávená cestováním (případně by bylo nutné tuto dobu rozdělit podle toho, zda se jednalo o jízdu v dopravním prostředku, čekání nebo chůzi). Dále by u nich muselo být zaznamenáváno vystavení různým negativním vlivům, jako jsou hluk nebo imise. K tomu by dále bylo nutné vytvořit ještě jeden paralelní svět, kde by byly všechny tyto veličiny měřeny za situace, kdy by linka metra D postavena nebyla. Poté by musely být veškeré naměřené hodnoty zpracovány podle příslušné metodiky a bylo by nutné vybrat ten z paralelních světů, ve kterém bude lidstvo dále pokračovat.

Obě popsané odpovědi měly formu experimentu, který je rozšířen zejména v přírodních vědách. Chemik, fyzik nebo biolog má v mnoha případech možnost (nebo dokonce je nucen) provádět různé experimenty. Při řešení úloh v dopravě je experiment mnohdy nemožný. Buď proto, že by byl příliš drahý, jako když bylo potřeba odpovědět na první otázku, nebo proto, že by nebylo možné podle platných fyzikálních zákonů provést

¹ JASPERS neboli Joint Assistance to Support Projects in European Regions je iniciativa založená Evropskou komisí, Evropskou investiční bankou a Evropskou bankou pro obnovu a rozvoj v listopadu 2005. Jejím úkolem je urychlovat a zkvalitňovat čerpání Evropských strukturálních a investičních fondů, případně dalších typů transferů v rámci Evropské unie. Pro více informací viz: <https://jaspers.eib.org>.

takový experiment, který by mohl odpovědět na otázku druhou. Proto se při řešení úloh v dopravě odborná obec čím dál tím více (i s ohledem na rozvoj počítačové techniky) uchyluje k dopravním modelům (Baudyš, Janoš, Polák, Walla, 2008).

Pojem modelu byl na obecné úrovni vysvětlen, nyní je potřeba se ještě zabývat pojmem dopravy. Každého studenta školy vzdělávající ho se v oboru dopravy potkají již v jednom z úvodních kurzů tyto čtyři pojmy – doprava, přeprava, dopravce a přepravce.

Poslední dva jmenované pojmy se v běžné, ale i odborné literatuře poměrně často zaměňují. Obecně se vztahují k situaci, kdy jsou ve vztahu dva subjekty, přičemž jeden dopravu určitého objektu uskutečňuje a druhý ji požaduje. Tím prvním je dopravce, tím druhým přepravce. Pokud jsou oba dva subjekty totožné, hovoří se u jednotlivce o dopravě individuální, u podniku o dopravě vnitropodnikové (Pastor, Tuzar, 2007).

Přeprava je obecně vnímána jako určitý výsledek dopravy. Technický slovník naučný (Pflegerová, 2001) popisuje přepravu jako „*část dopravy z jednoho místa na druhé při přemístování surovin, zboží (věcí) a osob jako výsledek dopravního procesu a přepravních služeb...*“. Zpravidla je tento pojem spojen také s určitým obchodním vztahem. Když byl autor této práce studentem prvního ročníku Českého vysokého učení technického v Praze Fakulty dopravní (ČVUT FD), řešil obvykle úlohu přesunu z budovy v Konviktské ulici do budovy v ulici Horské. Nejjednodušším řešením pro něj bylo využít nabídky Dopravního podniku hl. m. Prahy (DPP) a použít tramvajovou linku 18 ze zastávky Národní třída do zastávky Albertov. K tomu bylo potřeba uzavřít přepravní smlouvu například zakoupením jízdenky a jejím označením v příslušném označovači po nástupu do tramvaje. Kromě jiného vykonal DPP tzv. přepravní práci o velikosti 1,44 osobokilometru, protože jednu osobu převezl na vzdálenost 1,44 kilometru².

Jak je známo z obecných kurzů fyziky, s pojmem práce jde ruku v ruce pojem výkonu. Výkon je uvažován jako práce vykonaná za určitý čas. V souvislosti s přepravou jsou počítány obvykle osobokilometry nebo v nákladní dopravě čisté tunokilometry (tedy tunokilometry vztahující se pouze k přepravě zboží), které jsou vykonány buď za jeden den, jeden typický pracovní den, jednu typickou sobotu (neděli), nebo jeden rok. Vzhledem k tomu, že v drtivé většině případů se jedná o údaje, které se vztahují vždy k určité časové jednotce, tak v běžném odborném dopravním jazyku autor této práce v poslední době nezaznamenal užívání pojmu přepravní práce. Stejně tak při uvádění

² Podle údajů ve vyhledávači spojení veřejné dopravy www.idos.cz dostupných dne 6. 9. 2019.

hodnot přepravních výkonů se poměrně často neuvádí časová jednotka, neboť se očekává, že všichni časovou jednotku znají.

Proti pojům osobokilometr nebo čistý tunokilometr stojí pojmy vozový kilometr nebo hrubý tunokilometr, které se již týkají dopravních výkonů. Dopravní výkony se k dopravě mají jako přepravní výkony k přepravě. Zbývá již jen si osvětlit pojem dopravy.

Dopravu je možné definovat jako *„souhrn všech činností pro cílený pohyb dopravních prostředků nebo zařízení po dopravních cestách, zajišťující přemístování surovin, zboží a osob, realizovaný dopravcem“* (Pflegerová, 2001). Tato definice, jako mnohé jiné, zdůrazňuje fakt, že se jedná o pohyb dopravních prostředků po dopravních cestách. Tím je z definice dopravy vyloučena například pěší doprava, což by mohlo být považováno za nepatřičné. Autor této práce proto považuje za lepší definici, která považuje dopravu za *„cílevědomý proces změny místa“* (Pastor, Tuzar, 2007).

I když definice od Pastora a Tuzara byla doposud hodnocena jako nejzdařilejší, tak stále je zde ještě jeden malý problém, a to *„cílevědomost“* dopravy. Postupy pro makroskopické modelování dopravní nabídky a poptávky³ zpravidla vycházejí právě z předpokladu této cílevědomosti. Obvykle je předpokládáno, že jednotlivec cestuje od určité aktivity za aktivitou jinou, například z domova do svého zaměstnání. Inženýrská praxe však přináší mnoho reálných úloh, kde tyto přístupy mohou částečně selhávat.

V současné době hl. m. Praha například plánuje zavedení tzv. vodní tramvaje na Vltavě (Český rozhlas, 2019). Mělo by se jednat o několik linek lodní dopravy, které by neměly jako doposud sloužit pouze pro spojení dvou protilehlých břehů Vltavy jako přívoz, ale Vltavu by měly využívat jako skutečnou dopravní cestu.

Je možné si teď představit situaci, kdy jde rodina po břehu Vltavy okolo přístaviště takové vodní tramvaje, všimne si právě přijíždějící lodě a manželka zvolá ke svému manželovi: *„Jéé táto. Pojď se projet lodí tam a zpátky!“*⁴. Provozovatel vodní tramvaje vykáže příslušný přepravní výkon, organizace ROPID spravující systém PID v rámci přepravního průzkumu vykáže takové cestující a okamžitě zažádá o přidělení dalších prostředků z veřejných rozpočtů na posílení provozu. Avšak jak takové cesty

³ Těmto termínům se práce bude věnovat prakticky ve všech následujících kapitolách.

⁴ Dá se předpokládat, že taková linka bude integrována do systému PID a budou zde platit všechny jízdenky platné obvykle v MHD na území Prahy.

namodelovat dopravním modelem spoléhajícím se pouze na cílevědomost, rozumnost a účelovost všech modelovaných cest?



Z těchto důvodů definoval Macejka ve své disertaci (Macejka, 2014) pojem *reziduální doprava*. Tímto konceptem je myšlena „*doprava, která má nesystematický zdroj a cíl, či doprava vznikající mimo definované výpočetní struktury modelu, ale v kalibraci modelu dle intenzit jsou tyto cesty zahrnuty*“. Pokud by byl autor této práce někdy nucen vytvořit svoji vlastní definici pojmu doprava, navázal by na definici Tuzara a Pastora, ale vypustil by slovo „cílevědomá“. Doprava by tedy byla pouze „proces změny místa“.

Tedy v této chvíli je již jasno, že dopravní modelování má za cíl vytvářet více či méně idealizované napodobeniny částí reálných dopravních systémů a provádět na nich experimenty, které pomáhají v rozhodování, co provést (nebo neprovést) v příslušných reálných dopravních systémech.

Dopravní modelování je možné rozdělit do tří kategorií – submikroskopické, mikroskopické a makroskopické (Treiber, 2017). Pod submikroskopickou úroveň lze zařadit všechny modely, které se týkají modelování procesů v rámci dopravních kompletů, typicky se jedná o dynamické procesy uvnitř jednotlivých vozidel – např. modelování procesů v motoru nebo na brzdách. V rámci mikroskopické úrovně je řešeno modelování pohybů jednotlivých dopravních kompletů (vozidel, chodců). Typickou úlohou je modelování dopravního proudu na dálnici při zohlednění interakcí jednotlivých vozidel, provozu úrovně křižovatky nebo pohybu cestujících po nástupišti. Poslední úroveň je makroskopická, kdy už nejsou sledovány jednotlivé dopravní komplety, ale počítá se souhrnnými veličinami, které se vztahují zpravidla k prvkům sítě – například s hodinovými intenzitami vozidel na pozemních komunikacích (PK). Tyto modely se zabývají jednak makroskopickými vztahy na dopravní síti, jednak tvorbou tzv. *matic přemístovacích vztahů* nebo někdy jen *OD matic* (anglicky *trip matrix* nebo *OD matrix*, německy *Verkehrstrommatrix*). Podrobnější informace poskytuje následující tabulka.

Modifikace makroskopického dopravního modelu

Tabulka 1 Různé úrovně modelování dopravy

Měřítko času	Předmět modelování	Typy modelů
0,1 s	Pohon, brzdy, ESP apod.	Submikroskopické
1 s	Reakční doba řidiče	Model následování vozidel (car-following model)  Makroskopické modely dopravního proudu
10 s	Doba zrychlování nebo brzdění	
1 min	VD: Pobyt na zastávce, AD: Signální plány	
10 min	VD: Intervaly na linkách, AD: Stop and Go vlna	
1 h	Část poptávky z celého dne	Modely přidělení na síť
1 den	Referenční den (typický pracovní den, sobota, neděle)	Poptávkové modely (čtyřstupňový dopravní model)  Statistické prognózy
1 rok	Posouzení dopravě-technického opatření nebo infrastrukturního opatření	
5 let	Posouzení infrastrukturního opatření nebo řešení změn ve využití území	
50 let	Demografie	

Zdroj: (Treiber, 2017), přeloženo a zjednodušeno

2 Stav poznání a stávající praxe

2.1 Dopravní plánování

Před rozborem pojmu makroskopického dopravního modelování je potřeba šířeji probrat ještě jeden na první pohled relativně obecný pojem. Tímto pojmem je dopravní plánování. Tento text se omezuje na definici podle Lohseho, který dopravní plánování definuje jako „*vědecký obor, který zkoumá zákonitosti vzniku a uskutečňování přemístování osob (pěšky nebo dopravním prostředkem) a zboží na určitém území v celém veřejném dopravním prostoru z hlediska prostorového i časového*“ (Lohse, 2011). Jak bude možno zjistit dále, pojmy dopravní plánování a makroskopické dopravní modelování se z pohledu této definice poměrně znatelně překrývají⁵. Dopravně plánovací proces lze rozdělit do tří základních fází (Lohse, 2011):

Analýza – její náplní je zjištění a popsání současného stavu dopravního systému a nalezení vnitřních souvislostí fungování dopravy ve sledovaném území. Jejím hlavním úkolem je získávání informací o dopravním systému ve sledovaném území, jeho vyhodnocování a tvorba modelů, postupů a proměnných sloužících pro další fáze.

Prognóza – jejím úkolem je předpovídat chování dopravního systému v určitém předem daném časovém horizontu (jako vhodné se jeví horizonty 15 až 25 let⁶). Vytváří zpravidla více variant skrze různé změny hodnot vstupů v analýze připravených modelů. Na základě těchto variant se vytvářejí scénáře chování sledovaného dopravního systému.

Terapie – v této fázi se již jedná o vypracovávání konkrétních návrhů řešících předpovídané stavy sledovaného dopravního systému.

Dopravní modelování provází dopravní plánování ve všech jeho třech částech. Při analýze dopravní modely vznikají. V prognóze slouží pro experimentování s chováním dopravního systému za daných okrajových podmínek. V terapii pak dopravní modely

⁵ Pro dokreslení je možno uvést, že příslušný kurz vyučovaný na TU Dresden byl po dlouhou dobu nazýván Theorie der Verkersplanung (Teorie dopravního plánování), než byl v nedávné době přejmenován na Verkehrsnachfragemodellierung (Modelování dopravní poptávky).

⁶ Pro účely ekonomického hodnocení dopravních staveb podle předpisů EU se často uvažuje období 30 let od začátku výstavby.

slouží jako podklad pro rozhodování a hodnocení jednotlivých návrhů řešení předložených úloh.

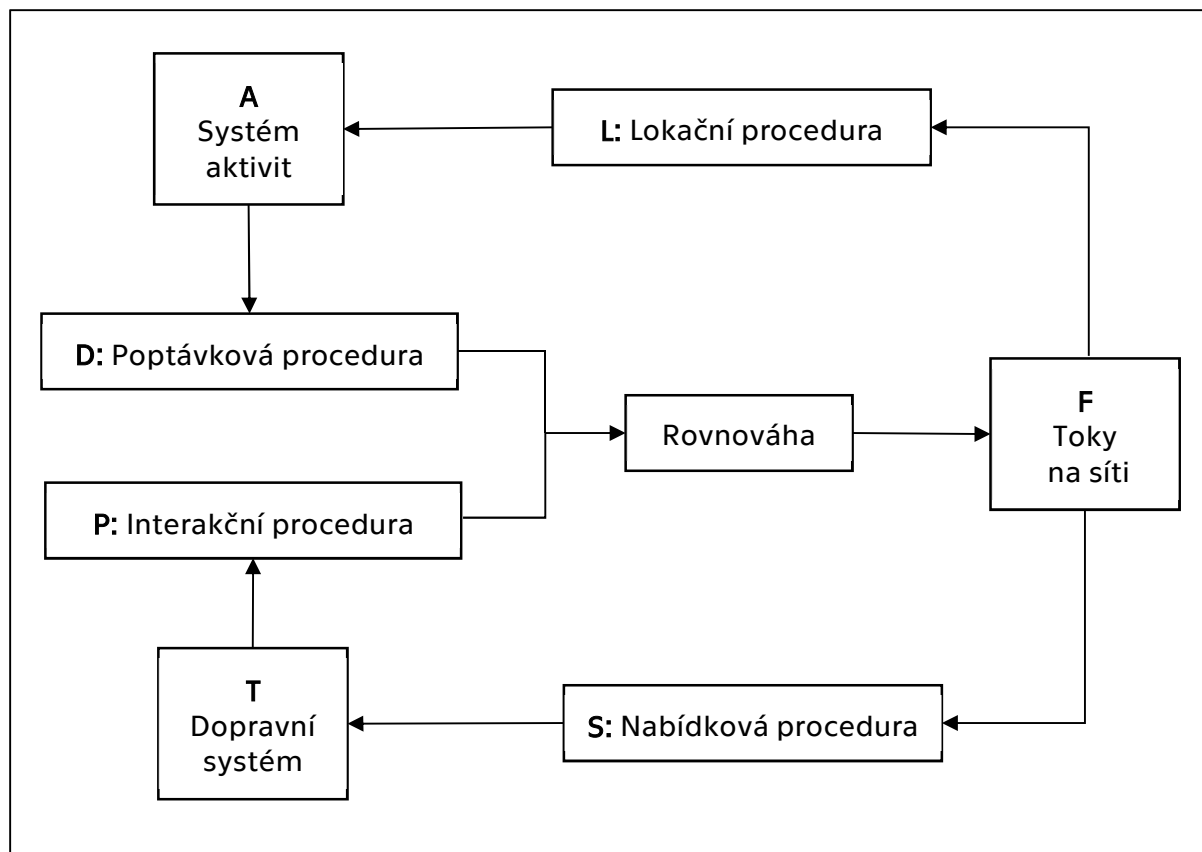
2.2 Makroskopické dopravní modelování

McNally (Hensher, Button, 2008) používá pro vysvětlení pojmů v oblasti makroskopického dopravního modelování koncept *Analýzy dopravních systémů* (Transportation systems analysis), který byl navržen Mannheimem (1980) a dále rozvinut Florianem a jeho kolegy (Florian, Gaudry, Lardinois, 1988). Podle tohoto přístupu je možné si dopravně plánovací úlohu představit jako osm vzájemně se ovlivňujících subsystémů nebo procesů (viz též následující obrázek).

V tomto přístupu mají zásadní roli dva subsystémy. Prvním je *dopravní systém T* (transportation system), který zahrnuje všechny prvky dopravní infrastruktury a služeb. Tedy nejedná se pouze o silniční nebo železniční síť, ale také například o jízdní řády VHD nebo o systém řízení dopravy na sítích. Dále je definován *systém aktivit A* (activity system), který se dá v podstatě definovat jako vše kromě dopravního systému. Jedná se zejména o popis využití území a s tím související demografický a ekonomický popis území.

Na systém aktivit navazuje *poptávková procedura D* (demand procedure), jejímž úkolem je výpočet poptávky po dopravě (např. počet cest z určité územní jednotky do jiné), a *interakční procedura P* (performance procedure), která zprostředkovává hodnoty různých veličin charakterizujících prvky dopravního systému (např. doba cesty na určitém úseku dopravní sítě na základě poptávky). Tyto dvě procedury se vzájemně ovlivňují a výsledkem je *rovnováha* (equilibrium).

Po dosažení rovnováhy je možné zjistit *toky na síti F* (network flows) jako obraz výsledné poptávky zatěžující dopravní systém. Na základě tohoto výsledku mohou být aktivovány *procedury lokační L* (location procedure) a *nabídková S* (supply procedure). První provádí změny na systému aktivit, druhá na dopravním systému.



Obrázek 1 Analýza dopravních systémů podle Mannheima/Floriana

Zdroj: (Hensher, Button, 2008, s. 37) , přeloženo

Úlohy makroskopického dopravního modelování pokrývají obvykle všechny subsystémy a procesy kromě lokační a nabídkové procedury. Nabídková procedura sama o sobě bývá zpravidla náplní různých dopravně plánovacích úloh. Tedy pokud by dopravně plánovací úloha měla za cíl vyřešit strategii rozvoje metra v Praze na nejbližších 30 let, tak by se začala řešit popsáním existujícího dopravního systému a systému aktivit a dospělo by se ve směru působení jednotlivých procedur až po toky na síti. Pak by se do tohoto rovnovážného modelu začalo vstupovat skrze nabídkovou proceduru vlastními návrhy jednak pro systém metra, jednak pro okolní dopravu (ať už změnou nabídky veřejné dopravy, nebo případně změnou silniční infrastruktury).

Lokační procedura je řešena převážně shodně s nabídkovou procedurou. Existují mnohé modely pro využití území, které se snaží modelovat rozhodování jednotlivců nebo organizací o změnách rozmístění v území na bázi různých pravděpodobnostních modelů. Problém však spočívá v tom, že důležitou roli hraje veřejná správa, která má na využití území podstatný vliv skrze různé formy územně plánovací dokumentace. Dalším

faktorem je skutečnost, že do této procedury vstupují další obory, které se podílejí na prognóze využití území⁷, proto je tato procedura spíše vstupem pro makroskopické dopravní modelování.

Zbylé systémy a procedury jsou zpravidla součástí makroskopických dopravních modelů. Obvykle jsou však makroskopické dopravní modely rozčleňovány na dva základní subsystémy, a to model dopravní nabídky a model dopravní poptávky. Před vlastním modelováním je však nutné provést analýzu dopravního systému.

2.2.1 Analýza dopravního systému

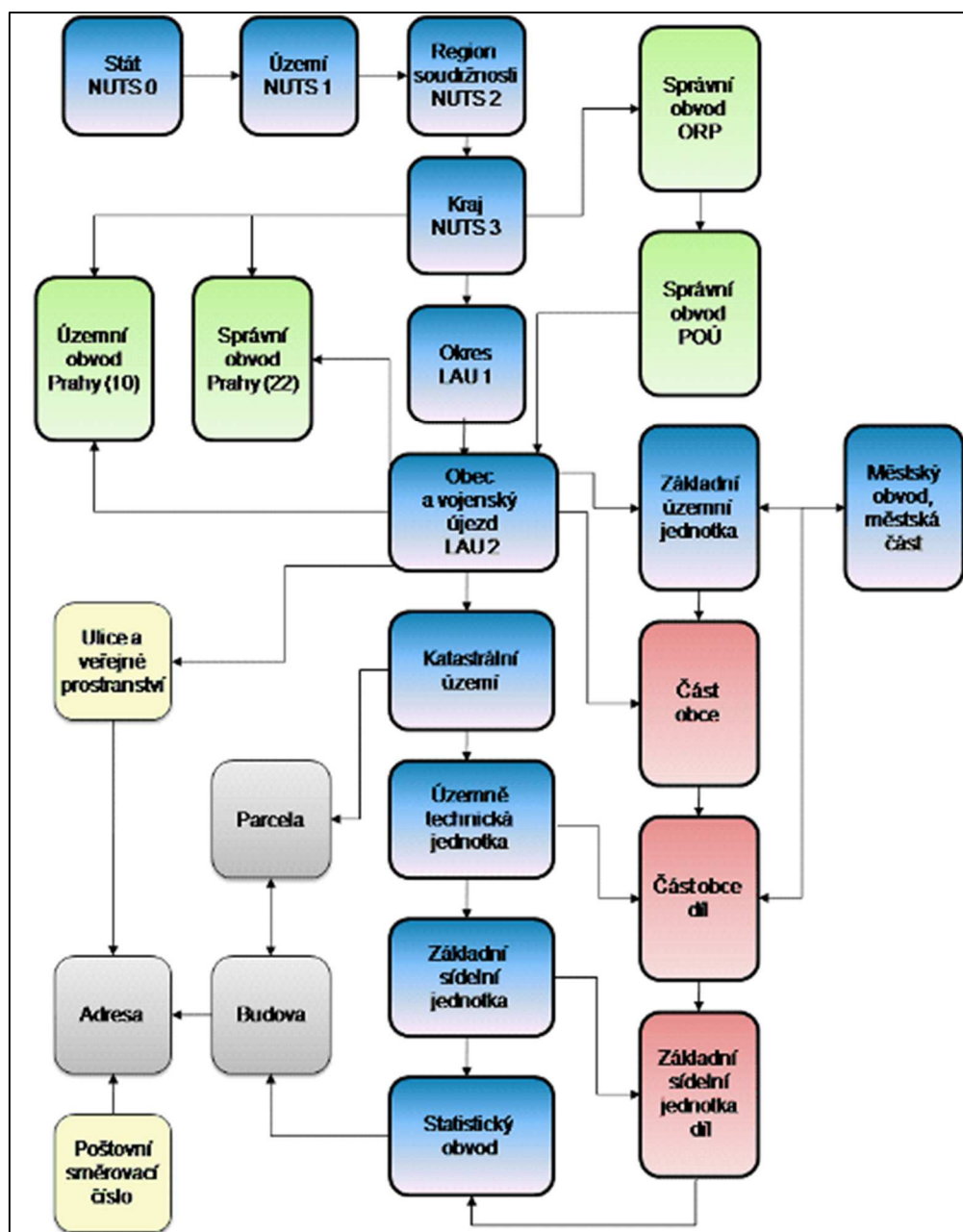
Prvním krokem při jakékoli dopravně plánovací úloze musí být odpovídající analýza dopravního systému. Část před tvorbou vlastního dopravního modelu je možné rozdělit na tři části. První částí je prostorová a sociodemografická analýza území, druhou analýza dopravní sítě a třetí analýza dopravních dat (Lohse, 2011).

2.2.1.1 Prostorová a sociodemografická analýza

Pro budoucí makroskopický dopravní model je nutné nejprve vymezit území, které bude modelováno, a toto území rozdělit na tzv. *dopravní zóny*⁸. Pro zonální strukturu je zpravidla užito členění území z určitého existujícího externího zdroje, který je k dispozici. Na následujícím obrázku je znázorněno schéma soustavy územních prvků a územně evidenčních jednotek, aplikované v Registru sčítacích obvodů a budov (RSO), který spravuje Český statistický úřad (ČSÚ).

⁷ Příkladem budiž demografie řešící mimo jiné vývoj počtu obyvatel v jednotlivých věkových skupinách.

⁸ V anglicky psané literatuře se kromě jednoduchého pojmu *zone* používá též zkratky TAZ – *traffic analysis zone*, viz např. (Hensher, Button, 2008, s. 38).



Obrázek 2 Soustava územních prvků a územně evidenčních jednotek v RSO

Zdroj: (Český statistický úřad, 2016)

V souvislostech České republiky je v případě městských modelů užívána úroveň základních sídelních jednotek nebo případně statistických obvodů, u regionálních modelů je používána úroveň obcí a u Strategického národního modelu ČR, jenž byl zpracován v rámci Dopravní sektorové strategie 2. fáze (Melzer, Němec, Urbánková, Kokeš, Dytrych), je základní jednotkou správní obvod obce s rozšířenou působností (SO ORP).

Pro určenou zonální strukturu je pak třeba získat data o veličinách, které mohou mít vliv na dopravní systém v daném území. Z pohledu fyzické geografie jsou důležité jednak obecné faktory společné zpravidla pro celé území nebo větší skupiny zón, jednak partikulární faktory týkající se jednotlivých zón. Mezi obecné se řadí zejména klima a reliéf, které celkově ovlivňují charakter dopravy v území. Mezi partikulární se řadí popis jednotlivých zón, zda se jedná o zastavěné nebo nezastavěné území. Dále je řešen charakter zástavby, tedy zda se jedná o obytné nebo produkční (průmyslové) plochy. Je možno říci, že tato část odpovídá problematice řešené v územním plánování, kde je řešeno právě prostorové a funkční uspořádání území.

V rámci analýzy je také potřebné zanalyzovat plánované zásahy do struktury využití území. Tyto údaje se využívají zpravidla až při aplikaci modelu, tedy v prognóze a terapii, ale jejich znalost již při analýze může zlepšit i vlastní tvorbu modelu. Například může být díky znalosti plánovaného využití území připravena zonální struktura pro prognózu již v analýze a ušetří se tím tak čas, který by byl potřeba pro případné přepracování modelu.

2.2.1.2 Analýza dopravní sítě

Dopravní síť zahrnuje nejen pevné části, jako jsou vozovka, most, kolej nebo nástupiště, ale i pohyblivá zařízení, jako je například parkovací věž na kola, a též v neposlední řadě celý systém řízení dopravy, tedy například různé dopravní dispečinky nebo zabezpečovací zařízení. Všechny tyto části dopravní sítě je třeba zanalyzovat a podle potřeby zohlednit v přípravě modelu.

Při analýze se zpravidla postupuje od pevných částí, které jsou určitým základem sítě a jejichž model má pak povahu grafu, tedy struktury skládající se ze vrcholů a hran. Na tuto analýzu pak navazuje analýza dalších doplňujících zařízení, jako jsou parkoviště, zastávky VHD apod. Poslední fází je pak analýza provozu, což je jednak analýza různých systémů řízení, jednak analýza provozu VHD, tedy analýza jízdních řádů, případně dalších forem provozu VHD.

Důležité je zde také v určité míře zopakovat prostorovou analýzu s ohledem na výskyt přírodních překážek v území. V makroskopických dopravních modelech jsou sítě nižší úrovně (někdy se používá pojmu *poslední míle*) modelovány velice zjednodušeně za předpokladu, že v určité oblasti je plocha pro dopravu obecně propustná. Typickou situací je modelování docházky na zastávku VHD. Pro tento předpoklad je nutné

příslušné oblasti zanalyzovat, zda se zde nenacházejí různé překážky buď přírodní (vodní tok, skála apod.), nebo pocházející z lidské činnosti (stavby, oplocení apod.).

2.2.1.3 Analýza dopravních dat

Při makroskopickém dopravním modelování je jeho hlavní náplní popis kauzality vzniku dopravy, která je pak viditelná a měřitelná na dopravní síti. Pro tento popis je nutné nadefinovat základní prvky, na které lze dopravu z pohledu jednotlivců rozčlenit. V osobní dopravě jednotlivec vykonává jednotlivá *přemístění*. Přemístění může mít formu pěší cesty nebo jízdy, která je vykonána za pomoci dopravního prostředku (Lohse, 2011). Používá se též ekvivalentního pojmu *cesta*. V českém prostředí vznikla v roce 2014 Metodika aktivně-cestovního průzkumu, která cestu definuje jako změnu místa za určitým účelem (Biler, Kouřil, Rusý, Staněk, Šenk, 2014). Dále je zde ještě užito termínu *etapa cesty*, která je definována jako část cesty, jež je absolvována jedním a tímž dopravním prostředkem. Při každé změně dopravního prostředku (včetně chůze) končí předchozí etapa a začíná etapa nová.

Úskalí definice etapy cesty podle této metodiky spočívá v problematice zahrnutí pěších etap. Při běžné cestě IAD je možné očekávat vždy minimálně dvě pěší etapy, a to docházku k automobilu a docházku do cíle cesty. Při běžné cestě VHD je možné očekávat pěší etapu při docházce i při každé změně dopravního prostředku. Tedy pokud například cestující využije pro cestu na území Prahy kombinaci autobus-metro-metro-autobus, lze očekávat minimálně 5 pěších etap v rámci cesty.

Proto je zpravidla etapa cesty v příslušných průzkumech specifikována přesněji. V průzkumu Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015 (Bundesamt für Statistik, 2017) je etapa definována jako nejmenší jednotka vydělitelná z cesty, která je vykonána jediným dopravním prostředkem nebo pěšky, avšak má minimální délku 25 metrů. Přemístění vykonaná uvnitř budov nejsou podle tohoto přístupu etapami cest. Naproti tomu v průzkumech pro TSK Praha je pěší etapa cesty zaznamenána pouze tehdy, pokud se jednalo o samostatnou pěší cestu nebo o docházku k jinému dopravnímu prostředku o délce přes 5 minut (Rajman, Matras, Tesař, 2015).


Tyto úvahy vedou k dalším dvěma pojmům spojeným s cestou. Každá cesta má *počátek* a *konec*. Místa spojená s počátkem a koncem cesty se v české a slovenské literatuře nazývají *zdroj* a *cíl* (Hollarek, Kušnierová, 2000). V anglicky psané literatuře se pak

používá pojmy *origin* a *destination* (Ortúzar, Willumsen, 2011), v německy psané *Quelle* a *Ziel* (Lohse, 2011).

Základem pro tvorbu makroskopického dopravního modelu jsou data z průzkumu dopravního chování. Dopravním chováním je v tomto případě myšlen popis chování v podobě projevu ve veřejném dopravním prostoru s ohledem na důvody a provedení jednotlivých cest.

Průzkum má podobu obvykle tří dotazníků – pro domácnost, pro jednotlivce a cestovní deník. V dotazníku pro domácnost jsou zjišťovány informace o celé domácnosti, jako jsou příjem domácnosti, počet a věk jednotlivých osob v domácnosti, vybavení osobními automobily a jinými dopravními prostředky v kontextu rodiny. V osobním dotazníku jsou zjišťovány základní sociodemografické údaje (pohlaví, věk, ekonomická aktivita, nejvyšší ukončené vzdělání), informace o hlavních aktivitách (rozsah a režim práce nebo studia) a dostupnost dopravních prostředků. V cestovním deníku pak jednotlivé osoby zpravidla popisují jeden svůj den⁹ z pohledu vykonaných cest. Zaznamenávají se všechny vykonané cesty, okamžik jejich začátku a konce, ujetá vzdálenost, použité dopravní prostředky, účel cesty a případně další informace (např. náklady na cestu). Ukázka deníku cest je na následujícím obrázku.

⁹ Obvykle je cílem průzkumu dopravního chování získat informace o typickém pracovním dnu, proto jednotlivci ze vzorku obyvatel daného území, vybraní buď náhodným, nebo kvótním výběrem, dostávají za úkol vyplnit cestovní deník v tzv. rozhodný den. Výběrem více rozhodných dnů by mělo být dosaženo vyrovnání různých náhodných vlivů (např. počasí) a výsledek by měl dát představu o dopravním chování během jednoho typického/průměrného pracovního dne v roce. Řidčeji cestovní deníky pokrývají delší období (týden nebo i více).

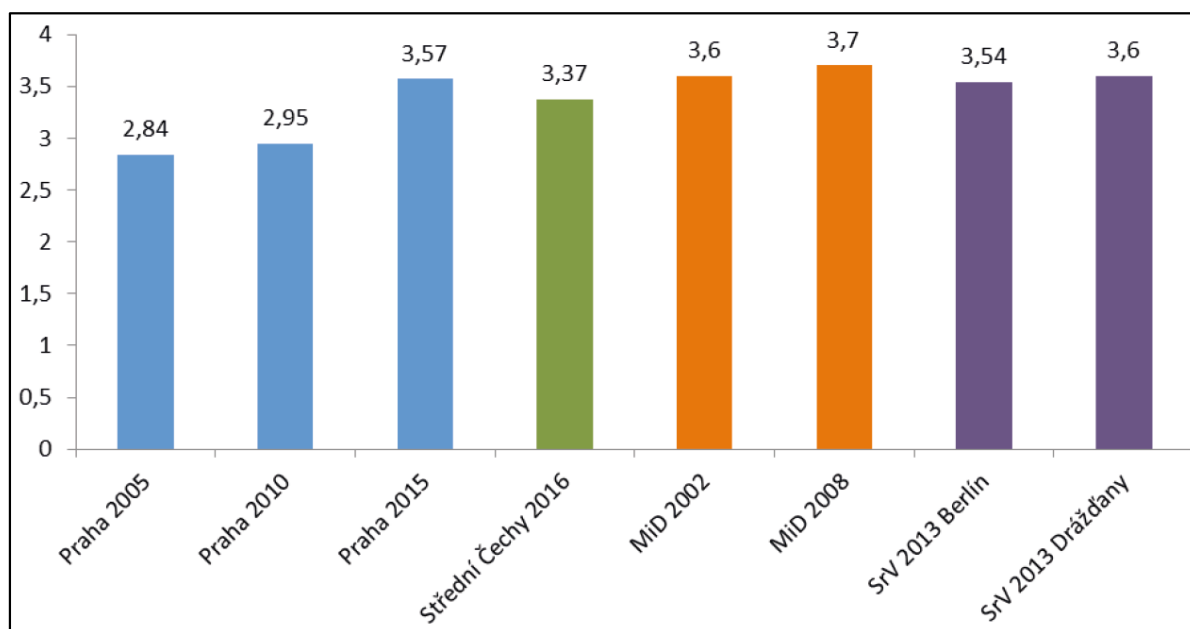
CESTOVNÍ DENÍK , osoba: [_____] č.o.: [____]			
DID: [_____]		GID: [_____]	
		TAZ: [_____]	
			
Ve sledovaný den [____].[____].201_ jsem:			
Vyplňte prosím všechny CESTY, které jste během SLEDOVANÉHO DNE uskutečnili. Uveďte i PĚŠÍ CESTY a CESTY DOMŮ. Cestou míníme pohyb za nějakým účelem definovaným níže.	<input type="radio"/> NECESTOVAL(A) → Z jakého důvodu? [_____] <i>Děkujeme, to je vše!</i>		
	<input type="radio"/> CESTOVAL(A) → Kde začala vaše cesta? [_____] Obec <input type="radio"/> V místě bydliště <input type="radio"/> Jinde [_____] Ulice, číslo		
1. CESTA			2. CESTA
3. CESTA			
Kdy vaše cesta začala?			
START			START
KDY JSTE VYRAZIL(A)? [____] h [____] min			KDY JSTE VYRAZIL(A)? [____] h [____] min
PROSTŘEDKY			PROSTŘEDKY
[____] min, Pěšky [____] min, Kolo [____] min, Městský bus [____] min, Regionální bus [____] min, Dálkový bus [____] min, Trolejbus [____] min, Tramvaj [____] min, Vlak [____] min, Auto, řidič [____] min, Auto, spolujezdec [____] min, Metro [____] min, Letadlo [____] min, Jiný (VYPIŠTE): ↓			[____] min, Pěšky [____] min, Kolo [____] min, Městský bus [____] min, Regionální bus [____] min, Dálkový bus [____] min, Trolejbus [____] min, Tramvaj [____] min, Vlak [____] min, Auto, řidič [____] min, Auto, spolujezdec [____] min, Metro [____] min, Letadlo [____] min, Jiný (VYPIŠTE): ↓
Jaké DOPRAVNÍ PROSTŘEDKY jste v průběhu této cesty použil(a)? Odhadněte prosím, kolik času (v minutách - např. 7 min) jste v každém z prostředků strávil/a.			
? ÚČEL			? ÚČEL
<input type="radio"/> Do práce <input type="radio"/> V rámci práce (služební) <input type="radio"/> Vzdělávání <input type="radio"/> Volnočasová aktivita <input type="radio"/> Nákupy, služby <input type="radio"/> Stravování <input type="radio"/> Soukromé zařízení <input type="radio"/> Návrat do bydliště <input type="radio"/> Jiný účel (VYPIŠTE): ↓			<input type="radio"/> Do práce <input type="radio"/> V rámci práce (služební) <input type="radio"/> Vzdělávání <input type="radio"/> Volnočasová aktivita <input type="radio"/> Nákupy, služby <input type="radio"/> Stravování <input type="radio"/> Soukromé zařízení <input type="radio"/> Návrat do bydliště <input type="radio"/> Jiný účel (VYPIŠTE): ↓
Proč jste tuto cestu podnikl(a)? Prosím uveďte JEN JEDEN ÚČEL. Cestou do práce se myslí přesun na místo obvyklého pracovního výkonu. Cestou v rámci práce se myslí přesun mezi jednotlivými místy kvůli výkonu práce.			
■ CÍL			■ CÍL
Vzdálenost v km (přibližně) [____] km			Vzdálenost v km (přibližně) [____] km
KAM JSTE DORAZIL(A)? [_____] Obec [_____] Ulice, číslo NEBO Popis <input type="radio"/> Do místa BYDLIŠTĚ			KAM JSTE DORAZIL(A)? [_____] Obec [_____] Ulice, číslo NEBO Popis <input type="radio"/> Do místa BYDLIŠTĚ
Jaký byl CÍL CESTY? Uveďte adresu, včetně ulice a čísla domu. Uveďte adresu, včetně ulice a čísla domu. Pokud ji neznáte, místa popište (např. "Praha, Tesco, Eden"). Při návratu domů stačí zaškrtnout políčko.			
KDY JSTE DORAZIL(A)? [____] h [____] min <input type="radio"/> Následujícího dne			KDY JSTE DORAZIL(A)? [____] h [____] min <input type="radio"/> Následujícího dne
Pokud jste do cíle dorazili až následujícího dne, označte prosím.			
Podnikl(a) jste další cestu? <input type="radio"/> Ano > přejděte k další cestě <input type="radio"/> Ne > KONEC			Podnikl(a) jste další cestu? <input type="radio"/> Ano > přejděte k další cestě <input type="radio"/> Ne > KONEC
Nezapomněli jste i na zpáteční cestu?			Podnikl(a) jste další cestu? <input type="radio"/> Ano > přejděte k další cestě <input type="radio"/> Ne > KONEC

Obrázek 3 Cestovní deník z celostátního průzkumu dopravního chování Česko v pohybu

Zdroj: <https://www.ceskovpohybu.cz/file/cestovni-denik-vzor/>

Platnost a spolehlivost prováděných průzkumů dopravního chování je důležitý a také složitý problém. Jako příklad může posloužit změna metodiky vyplňování deníku cest při

přípravě průzkumů dopravního chování pro Technickou správu komunikací hl. m. Prahy (TSK) v letech 2015 a 2016 (Kříž, 2018). Původní přístup spočíval v sekvenčním vyplňování jednotlivých cest respondenty. Avšak pro roky 2015 a 2016 byla použita odlišná metoda, kdy respondent nejdříve vypsal všechny cíle, které navštívil, a teprve pak podrobněji popsal jednotlivé cesty mezi těmito cíli. Mezi průzkumy zjišťujícími dopravní chování obyvatel Prahy v letech 2010 a 2015 došlo k nárůstu specifické hybnosti obyvatel¹⁰ o přibližně 20 % (viz následující obrázek). Jako vysvětlení zvýšení počtu cest na jednoho obyvatele a den se nabízí faktor únavy, který mohl před změnou metodiky způsobovat předčasné ukončení vyplňování deníku cest, zatímco při novém způsobu vyplňování byl respondent nucen vyplnit podrobnosti ke všem vykonaným cestám v rozhodný den. Nárůst počtu cest byl zaznamenán v největší míře u pěších cest.



Obrázek 4 Srovnání hybností obyvatel z různých průzkumů z ČR a Německa

Zdroj: (Kříž, 2018)

Pojem dopravního chování se může jevit jako poněkud zavádějící, i když je v rámci ČR pravděpodobně nejčastěji používán a je používán též v oficiální metodice pro tyto průzkumy (Biler, Kouřil, Rusý, Staněk, Šenk, 2014). Používá se též pojmu přepravní chování (Valeška, 2007) nebo cestovní chování (Braun Kohlová, Máca, 2016). Při použití výsledků těchto průzkumů dopravního chování je vždy nutné vědět, jak byla definována cesta, resp. etapa cesty, a podle toho příslušné výsledky interpretovat.

¹⁰ Tento pojem bude popsán v kapitole 2.2.3.2.

Dalšími důležitými průzkumy pro makroskopické dopravní modely jsou průzkumy popisující stav dopravy na síti. Tyto průzkumy již nemají povahu vstupu do makroskopických dopravních modelů, ale jsou používány k různému testování těchto modelů, když výstupy z modelů jsou s těmito hodnotami srovnávány (viz následující kapitoly). Z hlediska předmětu se jedná buď o dopravní průzkumy, kde zkoumanou jednotkou je vozidlo, případně více typů vozidel, nebo přepravní průzkumy, kdy zájmovou jednotkou je cestující.

Nejčastěji využívanými průzkumy jsou tzv. profilové (bodové) průzkumy, kdy jsou zjišťovány intenzity v jednotlivých bodech sítě, případně směrové průzkumy, pomocí kterých jsou zjišťovány intenzity na uzlech sítě (výsledkem je například tzv. grafikon křižovatky). Pro podrobnější popis jednotlivých typů průzkumů je možné odkázat na literaturu – např. (Kočárková, Kocourek, Jacura, 2009) nebo (Medelská, Jirava, Nop, Rojan, 1991).

2.2.2 Modelování dopravní nabídky

Modelování dopravní nabídky je možné definovat například takto (Schiller, 2007, s. 44): *„Modely dopravní nabídky mají za úkol dostatečně přesně zobrazovat síť jednotlivých druhů dopravy tak, aby byly modelovány všechny důležité síťové prvky pro příslušný výpočet. Stěžejním cílem je ocenění nákladů na překonání jednotlivých prvků sítě a s tím spojených rozhodnutí při volbách cílů, dopravních prostředků a tras, které jsou zobrazeny ve výpočtu dopravní poptávky.“*

Pod pojmem nákladů si lze představit všechny možné veličiny ovlivňující rozhodování jednotlivců o přemístění, které může (ale také nemusí) být podniknuto. Za stěžejní nákladovou veličinu se u dopravních modelů považuje celková cestovní doba přemístění. Dalšími důležitými veličinami bývají finanční náklady spojené s možným přemístěním a vzdálenost, která je však uvažována obvykle přeneseně též v podobě finančních nákladů. Obecně je tedy úkolem modelů dopravní nabídky zobrazovat všechny potřebné veličiny, které jsou využity jako vstupy do modelu dopravní poptávky.

V dalším textu je popsán princip tvorby modelu dopravní nabídky postupně po jednotlivých prvcích modelu, tento popis sleduje princip tvorby tohoto typu modelů v rámci programu PTV VISUM (PTV, 2019), avšak tento princip je velice podobný i jiným modelovacím prostředím, jakými jsou OmniTrans nebo CUBE. Navíc se tento program

patrně stává standardem makroskopického dopravního modelování v oblasti střední Evropy, neboť je například jediným programem citovaným v metodice pro dopravní modely a prognózy slovenského Ministerstva dopravy a výstavby (MDV SR).

Na začátku tvorby modelu je nutné vytvořit kategorie pro jednotlivé druhy dopravy, které mají být modelovány. Pro tento účel slouží sada tří prvků – *dopravní systém, mód a poptávkový segment*. Dopravní systém slouží zejména k technickému popisu sítě. Dopravním systémem mohou být například osobní automobil, nákladní automobil, autobus, tramvaj nebo metro. Obecně se dopravní systémy rozlišují na systémy individuální dopravy a systémy veřejné dopravy.

Mód označuje druh dopravy, který si jednotlivec může zvolit pro vykonání celého svého přemístění. Módu je přiřazen jeden nebo více dopravních systémů. Módem může být například veřejná doprava, které jsou přiřazeny dopravní systémy autobus, tramvaj a metro, nebo módem může být regionální vlak¹¹, který musí mít vytvořen odpovídající dopravní systém. Poptávkový segment označuje část poptávky, která se v jednom kroku přiděluje na dopravní síť¹². Jednomu módu může být přiřazen jeden nebo více poptávkových segmentů. Poptávkovým segmentem mohou být například školáci jedoucí veřejnou dopravou.

Prvotním krokem modelování vlastního území je rozdělení území na jednotlivé *dopravní zóny*. Každá dopravní zóna má své těžiště, které se stává modelovým zdrojem a cílem všech cest začínajících a končících na území této dopravní zóny. Požadavky na tvorbu zón v území lze rozdělit na tři skupiny – homogenitu geografickou, urbanistickou a geometrickou (Walla, 2006).

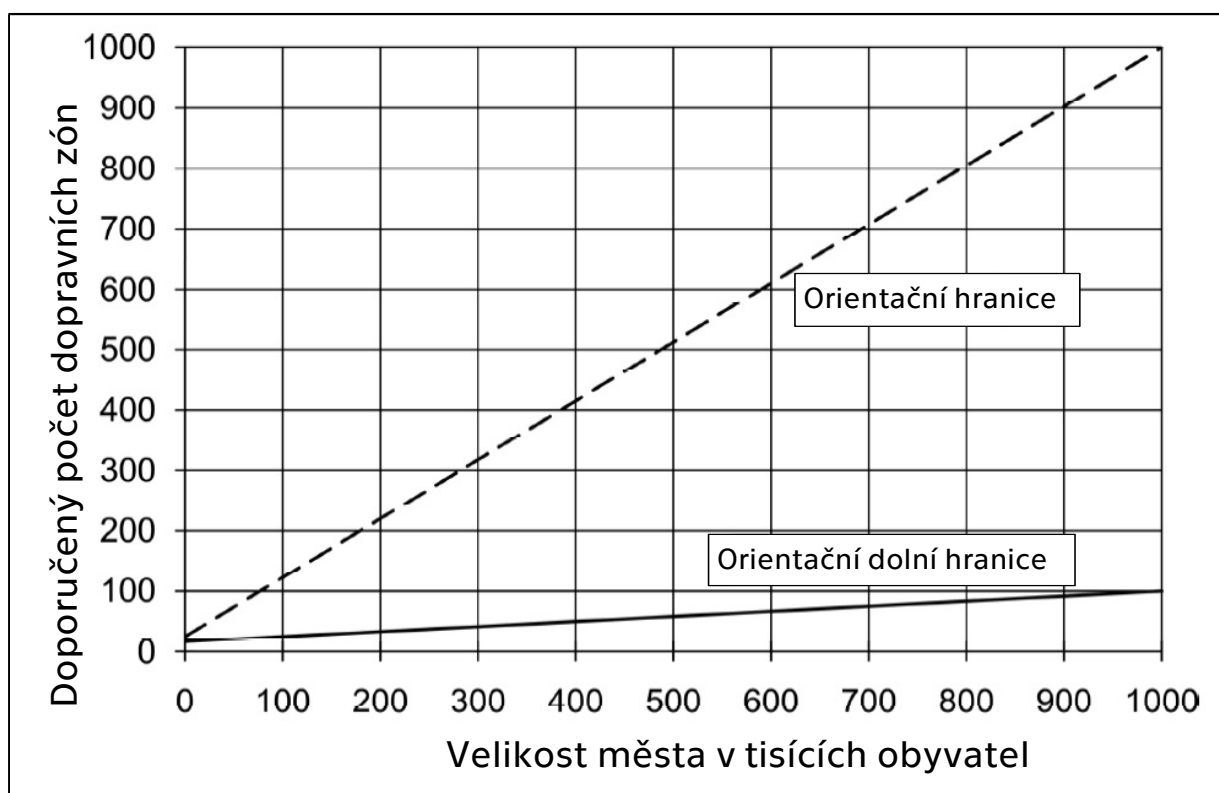
Geografická homogenita je určena zejména přírodními bariérami, jakými jsou vodní toky, povrchové zlomy nebo vrstevnicové hřbety. Urbanistická homogenita je určena využitím území, tedy zda jde o plochu určenou k bydlení, vzdělávání nebo produkci. Toto hledisko zajišťuje vhodnou reprezentativnost těžišť dopravních oblastí pro jednotlivé části poptávky. Geometrická homogenita řeší samotný plošný tvar dopravní zóny.

¹¹ Taková potřeba je typická například pro Německo, kdy dálková železniční doprava je v drtivé míře provozován dopravcem Deutsche Bahn na vlastní podnikatelské riziko, zatímco regionální doprava je v objednávce příslušných objednatelů veřejné dopravy. Tyto dva systémy jsou také často jasně tarifně odděleny.

¹² Tato struktura je obecně dána historickým vývojem programu VISUM. Samo jméno programu je zkratkou pro „Verkehr in Städten – Umlegungsmodell“, tedy „Doprava ve městech – model přidělení na síť“.

Nejvhodnějším tvarem z tohoto pohledu je pravidelný konvexní mnohoúhelník s těžištěm ve středu kružnice jemu opsané. Dále je však také třeba zohlednit vzájemnou polohu těžiště k dalším bodovým a liniovým prvkům dopravní sítě.

Každé modelované přemístění vede z jedné dopravní zóny do jiné dopravní zóny. Při definované struktuře dopravních zón je pak možné vytvářet matice, jejichž počet řádků a sloupců odpovídá počtu uvažovaných dopravních zón. Avšak intrazonální doprava, tedy doprava mající zdroj i cíl v jedné a té samé dopravní zóně, nemůže být modelována na dopravní síti modelu. Lohse (2011) obecně doporučuje vytvářet zóny o velikosti přibližně 1000 obyvatel při posuzování projektů na hlavní dopravní síti měst (viz následující obrázek).



Obrázek 5 Doporučená velikost zón pro modely měst podle Lohseho

Zdroj: (Lohse, 2011)

Ušpalytė-Vitkūnienė provedla s kolegy experiment na modelu VHD města Vilnius (Ušpalytė-Vitkūnienė, Grigonis, Paliulis, 2012), kdy z výchozího modelu o rozsahu 230 dopravních zón postupně vždy v každém kroku snížila počet zón v modelu o 10 % a sledovala, jak se v průměru relativně změní hodnoty celkových cestovní dob a dalších veličin počítaných v modelu pro jednotlivé relace tohoto modelu. Dospěla k závěru, že

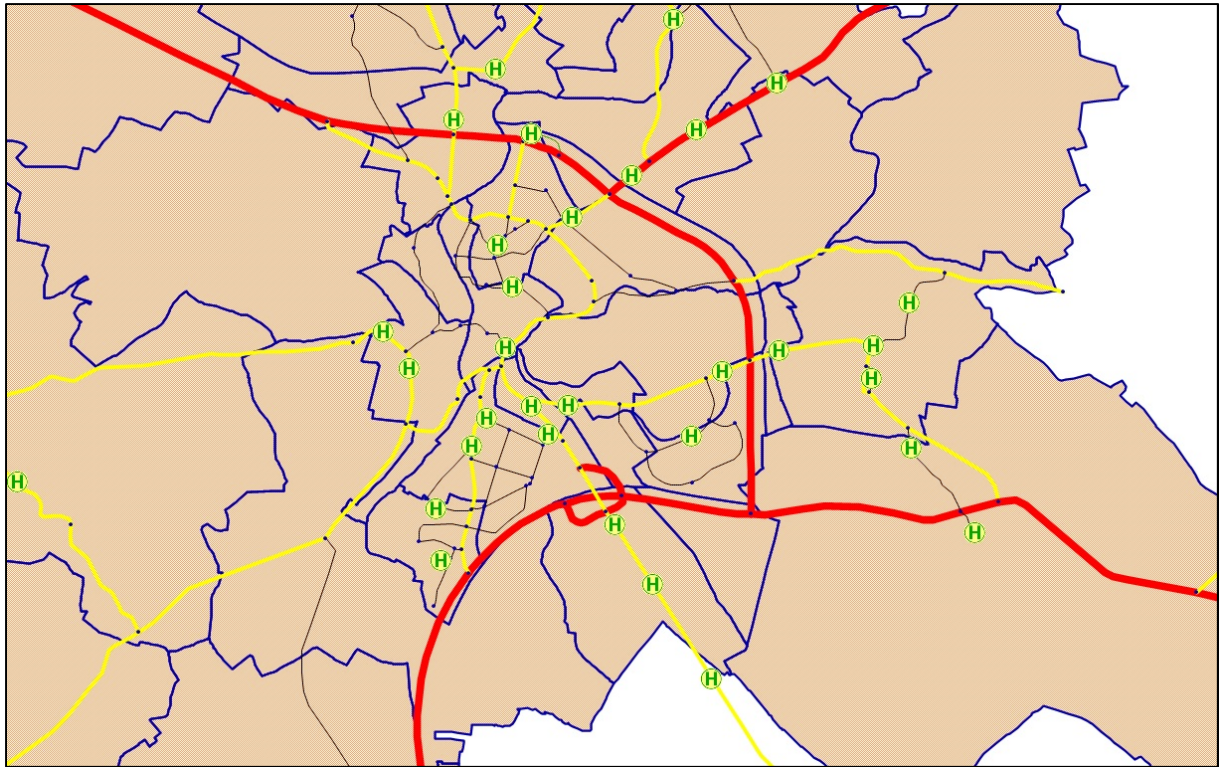
dopravní zóna by měla mít maximálně velikost přibližně 8700 obyvatel, neboť dále je již zkreslení vlivem velikosti zón značné.

Doposud bylo o dopravní zóně uvažováno jako o plošném útvaru. Toto však nemusí platit vždy. V některých případech může mít dopravní zóna podobu pouhého těžiště. Obvykle takovou podobu mají zóny na hranicích modelu, které slouží k modelování interakcí s okolím modelu. Tyto dopravní zóny slouží jako myšlené zdroje a cíle cest pro přemístění, která vedou přes hranice modelu. Někdy se pro tyto dopravní zóny používá pojmu *kordonové body*. V inženýrské praxi se též ujal jednoduchý pojem *vstupy*.

Dále může dojít k situaci, kdy jeden plošný útvar odpovídá dvěma dopravním zónám. Při zpracování přepravní prognózy na TSK Praha (Kříž, Kreml, Langerová, 2018) pro studii proveditelnosti železničního spojení Prahy, Letiště Václava Havla Praha a Kladna¹³ bylo na území předmětného letiště pro stejnou část – tzv. Nové letiště – užito dvou dopravních zón. Jedna zóna sloužila pro modelování běžné dopravy, tedy například cest zaměstnanců letiště. Druhá zóna sloužila jako zdroj a cíl cest letištních cestujících a jejich doprovodu.

Dalšími dvěma důležitými síťovými prvky jsou *uzly* a *úseky*. Z nejširšího úhlu pohledu je na tento systém uzlů a úseků možné pohlížet jako na klasický graf podle teorie grafů – tedy objekt složený z hran a vrcholů – viz např. (Demel, 2002). Při prvním pohledu na grafickou reprezentaci dopravního modelu (jako ukázka může sloužit následující obrázek) se systém uzlů a úseků jeví jako jednoduchý (obyčejný) graf. Mezi dvěma uzly může vést nejvýše jeden úsek a v grafu nejsou možné smyčky. Při podrobnějším pohledu je možné zjistit, že každý úsek je modelován jako dvojice orientovaných úseků opačného směru.

¹³ U odborné veřejnosti se pro tento projekt ujal jednoduchý název PRAK.



Obrázek 6 Ukázka nabídkového modelu v prostředí PTV VISUM

Zdroj: Vlastní demonstrativní model města Jindřichův Hradec

Účelem úseků je reprezentovat jednotlivé úseky komunikační sítě reálného dopravního systému. Nejdůležitějšími vlastnostmi jsou délka úseku (jednak délka přímé spojnice uzlů s úsekem incidentních, jednak skutečná délka podle průběhu v terénu), povolené dopravní systémy, maximální rychlost pro systémy individuální dopravy a výchozí rychlost pro systémy veřejné dopravy. Dalším důležitým faktorem je zobrazení existující závislosti mezi aktuální rychlostí dopravního proudu individuální dopravy a zatížením úseku. Pro popis této závislosti se užívá obvykle tzv. CR-funkcí. Obecně pro ně platí:

$$t_{akt} = f(t_0, I, C) \quad (2.1)$$

t_{akt} skutečná doba průjezdu; [čas. j.]

t_0 doba průjezdu prvkem při nulové intenzitě dopravního proudu; [čas. j.]

I aktuální intenzita na daném úseku; [jednotky dopravního proudu / čas. j.]

C kapacita/propustnost daného úseku; [jednotky dopravního proudu / čas. j.]

Uzly jsou síťové prvky, ve kterých se stýkají dva nebo více úseků¹⁴. Uzel je tedy reprezentantem křižovatky pozemních komunikací, ale může sloužit pro různé další účely. Například může sloužit jako místo změny vlastností pozemní komunikace. Takovou změnou může snížení nebo zvýšení počtu pruhů na komunikaci. Nebo může sloužit pro určení pozice zastávky VHD.

V případě VHD je další podstatnou částí nabídkového modelu nabídka VHD, a to jednak v podobě popisu příslušné infrastruktury, jednak v podobě popisu provozu. Infrastruktura veřejné dopravy se skládá z uzlů a úseků výlučně užívaných veřejnou dopravnou a dále ze zastávek veřejné dopravy. Pro zohlednění hierarchické struktury systému zastávek je obvykle nutné vytvořit systém sestávající z několika úrovní. V programu PTV VISUM je toto zajištěno třemi úrovněmi. Nejnižší úrovní jsou *místa zastavení*, která mohou reprezentovat polohu jednotlivých zastávkových označků nebo nástupištích hran v rámci autobusového nebo železničního nádraží. Střední úrovní jsou *zastávkové oblasti*, které představují skupinu nástupištích hran nebo označků, mezi nimiž je stejná přestupní doba. Nejvyšší úrovní jsou *zastávky*, které představují koncept zahrnující celý terminál VHD. Přestupní doby jsou pak modelovány maticí, která obsahuje doby přestupních dob pro jednotlivé dvojice zastávkových oblastí.

Samotná nabídka veřejné dopravy má obvykle podobu spojů. Spoj je z pohledu PTV VISUM sekvence zastávek obsluhovaná jedním vozidlem s určitou kapacitou. Dále jsou přiřazeny spoji doby jízdy mezi jednotlivými zastávkami a pobyty na těchto zastávkách. Spoje jsou sdružovány do linek. Je umožněno i zjednodušení nabídky veřejné dopravy, a to ve dvou úrovních. Prvním krokem je nahrazení jednotlivých spojů *časovými profily*, kterým přísluší doby jízdy a pobyty. Dále mají tyto časové profily přiřazeny průměrné intervaly spojů pro jednotlivá období během dne. Druhým krokem zjednodušení je pak zrušení samotné struktury linek a cestovní doby mají pouze podobu ohodnocení jednotlivých úseků, přičemž intervaly na linkách nejsou zohledněny.

Posledním z esenciálních síťových prvků jsou *konektory*. Konektor je v zásadě úsek, avšak úsek propojující uzel sítě s těžištěm dopravní zóny. Představuje tedy část

¹⁴ Občas dochází k případům, kdy je s uzlem incidentní pouze jeden úsek. Může se jednat například o slepou pozemní komunikaci. Obvykle je pak takový uzel ještě incidentní s dalším speciálním síťovým prvkem, tzv. konektorem, který bude popsán dále. Pokud tomu tak není, je modelování takové komunikace zbytečné.

přemístění od jeho počátku do vstupu na modelovanou síť a dále od opuštění sítě do konce přemístění. Někdy je tato část díky podobnosti s logistikou nebo telekomunikacemi nazývána poslední mílí. Do konektoru a jeho vlastností je tedy třeba zahrnout všechny charakteristiky odpovídající této části přemístění.

Poslední nedílnou součástí modelu dopravní nabídky je tvorba tzv. *nákladových matic*¹⁵. Někdy se v české literatuře užívá též pojmu *indikátorová matice* (Melzer, Němec, Urbánková, Kokeš, Dytrych). Do nákladových matic jsou ukládány jakékoli hodnoty veličin, které jsou potřeba pro výpočet poptávkového modelu. Typickými nákladovými veličinami jsou cestovní doba v různých podobách¹⁶, dále vzdálenost a finanční náklady v různých podobách. V maticích jsou hodnoty těchto veličin ukládány pro uspořádané dvojice dopravních zón. Na diagonálu jsou pak ukládány hodnoty týkající se intrazonálních vztahů. Tyto hodnoty není možné určit z modelové sítě, je nutné je tedy určit náhradním způsobem. Typicky se užívá minim příslušných řádků nebo sloupců v dané matici, atributů dopravních zón nebo zcela mimo modelovou strukturu určených konstantních hodnot.

2.2.3 Modelování dopravní poptávky

Komplementárním prvkem k dopravní nabídce je dopravní poptávka. Dopravní poptávku je možné definovat například takto (Schiller, 2007, s. 48): „Protože je poptávka ve smyslu ekonomie definována jako uspokojování potřeb, je možné o dopravní poptávce mluvit jako o uspokojování zprostředkované potřeby pohybovat se. Toto je způsobováno prostorovým oddělováním různých aktivit (např. bydlení, práce, nakupování). Za dopravní poptávku jsou proto považována všechna přemístění subjektů (např. osob) nebo objektů (např. vozidel), která jsou vykonána za daných politických, ekonomických a dopravně plánovacích okolností.“

Úkolem modelu dopravní poptávky je kauzálně vysvětlit vznik dopravy, kterou je následně možné měřit na dopravním modelu a srovnávat ji s hodnotami naměřenými v dopravním systému.

¹⁵ Originální pojem užívaný v PTV VISUM je *skim matrix*.

¹⁶ Je možné zjišťovat buď cestovní dobu celkovou, nebo dobu jízdy ve vozidle, dobu docházky k vozidlu, dobu chůze při přestupu, dobu čekání na první zastávce, dobu čekání při přestupu apod.

Nejtypičtějším zástupcem modelů dopravní poptávky je tzv. *čtyřstupňový dopravní model* (Ortúzar, Willumsen, 2011). Tento model se skládá ze čtyř kroků, které odpovídají na čtyři základní otázky týkající se vzniku dopravy v území – odkud, kam, jak a kudy. Těmto čtyřem otázkám odpovídají 4 kroky, které v anglicky psané literatuře jsou nazývány následovně: *trip generation, trip distribution, modal split, assignment*.

V první fázi, která se v češtině může označit jako *vznik přemístovacích vztahů*, jsou určeny objemy jednotlivých zdrojových přemístovacích vztahů O_i a cílových přemístovacích vztahů D_j v jednotlivých dopravních zónách, tedy kolik cest v určité zóně začíná a kolik končí.

Ve druhé fázi, která se v češtině obvykle označuje jako *volba cíle* nebo *distribuce cest*, jsou určeny jednotlivé přemístovací vztahy T_{ij} , tedy je určen počet přemístění pro každou relaci ze zdrojové zóny i do cílového zóny j . Výsledkem této fáze je tedy matice přemístovacích vztahů (viz následující tabulka).

Tabulka 2 Matice přemístovacích vztahů

	1	...	j	...	n	Σ
1			T_{1j}			O_1
...						
i	T_{i1}		T_{ij}		T_{in}	O_i
...						
n			T_{nj}			O_n
Σ	D_1		D_j		D_n	V

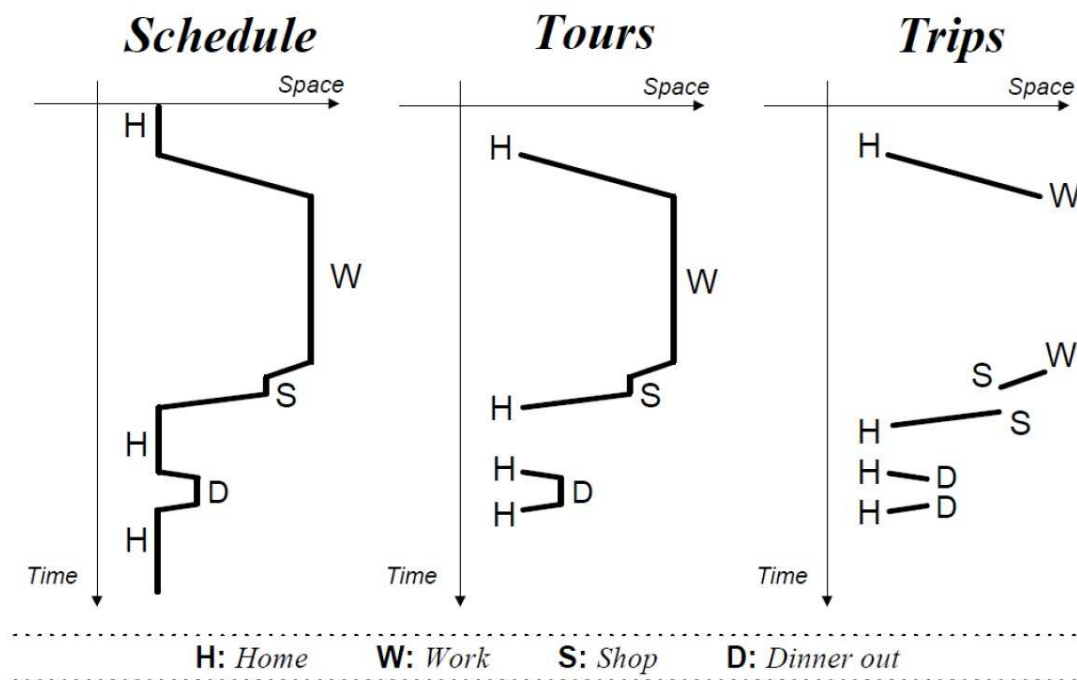
Zdroj: (Ortúzar, Willumsen, 2011, s. 164), zjednodušeno

Ve třetí fázi, která se v češtině může označovat jako *modální volba* nebo *dělbá přepravní práce*, je každý přemístovací vztah rozdělen na jednotlivé módy. Tím pádem z jedné matice přemístovacích vztahů vznikne tolik matic, kolik je módů.

V poslední fázi, která se v češtině obvykle označuje jako *přidělení na síť* nebo *rozvrhování na síť*, je poptávka přidělena na síť, je tedy určeno, kudy po síti budou přemístění vykonána.

2.2.3.1 Desagregace dopravní poptávky

Kromě v úvodu zmíněné definice je možné dopravu také definovat „jako prostředek k uspokojování potřeb, které nemohou být uspokojeny v místě“ (Becker et al. 2008, s. 12). Na základě tohoto principu dochází k tzv. *desagregaci* poptávkových modelů. Obecně každému zdroji a každému cíli přemístění je možné přiřadit určitou aktivitu, kterou chce jednotlivec na daném místě vykonat. Na pohyb jednotlivce v rámci jednoho dne pak lze nahlížet buď jako na plán aktivit (schedule), které chce daný jednotlivec vykonat v rámci jednoho dne, nebo jako na několik uzavřených řetězců (tours), které vykoná během tohoto dne, nebo jako na jednotlivé cesty (trips), které během dne vykoná (viz následující obrázek). Poslední přístup je typický pro většinu aplikací čtyřstupňového dopravního modelu.



Obrázek 7 Možnosti interpretace přemístění v rámci jednoho dne

Zdroj: (Ben-Akiva, 2008)

Tyto aktivity pro účely jednotlivých dopravních modelů jsou shlukovány do kategorií, aby byly lépe zpracovatelné. Struktura kategorií je definována zpravidla při návrhu průzkumů dopravního chování. Jednotlivé poptávkové modely pak vycházejí ze struktury aktivit, která byla definována v průzkumu dopravního chování. Kupříkladu v jednom z nejpoužívanějších průzkumů dopravního chování v Německu „Mobilität in

Städten – SrV 2013“ se základní struktura aktivit skládá z 19 kategorií (Ahrens, LieBke, Wittwer, Hubrich, Wittig, 2014):

- vlastní zaměstnání
- jiné místo výkonu práce/slужební cesta
- předškolní zařízení
- základní škola
- střední škola
- vysoká/vyšší odborná škola
- jiné vzdělávací zařízení
- nákup denní potřeby
- jiný nákup
- vyřizování (např. úřady, doktor, pošta, banka, holič)
- kulturní vyžití, divadlo, kino
- restaurace
- soukromá návštěva
- rekreace/sport ve volném prostoru
- návštěva sportoviště
- ostatní volnočasová aktivita
- ostatní
- doprovod jiných osob
- vlastní bydlení.

Další důležitým faktorem, podle kterého je možné poptávku desagregovat, je skutečnost, že určité typy osob mají tendenci vykonávat určité typy cest. Je zřejmé, že do vlastního zaměstnání budou cestovat pouze zaměstnané osoby apod. O takto zjištěných skupinách osob se pak hovoří jako o homogenních skupinách obyvatel z hlediska dopravního chování. Vztahy mezi jednotlivými typy osob a jimi vykonávanými typy přemístění se opět zjišťují pomocí různých průzkumů dopravního chování. Opět zde

platí, že rozdělení do homogenních skupin vytvořené při provádění těchto průzkumů musí být dodržováno při sestavování všech modelů z těchto průzkumů vycházejících.

U všech dělení do homogenních skupin obyvatel je možné vysledovat určité společné rysy. Jako zásadní princip dělení osob do homogenních skupin lze vysledovat, že záleží na skutečnosti, zda se osoba přemísťuje pravidelně za určitou (povinnou) aktivitou. Toto je typické pro zaměstnané osoby, žáky a studenty. Dalším důležitým faktorem je odpověď na otázku, zda má daná osoba k dispozici osobní automobil. Naopak věk spíše není považován za rozhodující faktor, resp. dá se za něj považovat pouze zprostředkovaně (žákem, studentem nebo zaměstnanou osobou je člověk zpravidla v určitém věku).

Po zvolení struktury desagregace poptávky je možné začít s tvorbou poptávkového modelu. Jednotlivé množiny přemístění příslušející k daným kategoriím desagregované poptávky pak slouží jako nejmenší části¹⁷ poptávky, pro které je možné vykonat výpočet čtyřstupňového dopravního modelu. Obvykle se pro tyto části provádí výpočet prvních tří fází čtyřstupňového dopravního modelu odděleně, pro čtvrtou fázi se pak obvykle agreguje poptávka podle jednotlivých druhů dopravy.

2.2.3.2 Vznik přemístovacích vztahů

Při užití čtyřstupňového dopravního modelu je první fází vznik přemístovacích vztahů. V tomto kroku je nutné určit hodnoty zdrojových a cílových přemístovacích vztahů O_i a D_j , přičemž obvykle platí (při n dopravních zónách):

$$\sum_{i=1}^n O_i = \sum_{j=1}^n D_j = T \quad (2.2)$$

kde T je celkový počet přemístění. Existují různé metody pro tuto fázi, avšak podle Lohseho (2011) jsou nejpoužívanější následující tři:

- metoda růstových koeficientů
- metoda lineární regrese
- metoda specifických hybností.

¹⁷ V PTV VISUM je tato část označena jako *poptávková vrstva* – demand stratum.

Růstové koeficienty

V tomto případě se vychází z předpokladu, že velikost zdrojového, resp. cílového přemístovacího vztahu dané zóny je přímo úměrná velikosti určité strukturní veličiny k této zóně se vztahující. Tato strukturní veličina může být například počet obyvatel, počet zaměstnaných osob nebo počet žáků v dané zóně žijících. Avšak může to být i počet pracovních míst, plocha nákupních zařízení apod. V případě zdrojového přemístovacího vztahu platí:

$$O_i(P) = f_i O_i(A)$$
$$f_i = \frac{SO_i(P)}{SO_i(A)} \quad (2.3)$$

SO_i velikost strukturní veličiny

f_i růstový koeficient

(A), (P) označení pro analyzovaný nebo prognózovaný časový horizont

Lineární regrese

Metoda lineární regrese je jednou za základních metod statistiky. V případě vzniku přemístovacích vztahů se vychází z předpokladu, že zdrojový (resp. cílový) přemístovací vztah je lineární funkcí několika strukturních veličin:

$$O_i = a_0 + a_1 SO_{1i} + \dots + a_n SO_{ni} \quad (2.4)$$

SO_{1i}, \dots, SO_{ni} velikosti strukturních veličin

a_0, \dots, a_n koeficienty lineárního modelu

Specifické hybnosti

Metoda specifických hybností vychází z rozdělení cest podle aktivit a z rozdělení obyvatel do homogenních skupin obyvatelstva. Z průzkumu dopravního chování jsou zjišťovány počty cest podle jednotlivých typů. Pak se specifická hybnost pro jeden typ cesty a jednu homogenní skupinu obyvatel vypočte jako souhrn cest tohoto typu (které vykonaly osoby dané homogenní skupiny) dělený počtem osob dané homogenní skupiny (za určitou časovou jednotku – zpravidla jeden typický pracovní den). V následující tabulce jsou ukázány specifické hybnosti pro skupinu osob od 18 do 65 let, zaměstnaných a bez přístupu k osobnímu automobilu, které žijí v menších sídlech nebo na venkově.

Tabulka 3 Ukázka specifických hybností – výsledky SrV 2013

Mobilität in Städten – SrV 2013		Unter-/Grund-/Kleinzentren/ländl. Gemeinden	
Zeitraum: Gesamtes Jahr		Tab 16.5	
Wochentag: Mittlerer Werktag		Anteile und spezifisches Verkehrsaufkommen nach 17 Quelle-Ziel-Gruppen (PG 4)	
Berechnet am: 20.05.2015			
Gruppe: Personen 18 bis unter 65 Jahre, erwerbstätig, ohne Pkw-Zugang			
Quelle-Ziel-Gruppe	Anteil an allen Wegen	Wege/P,d	
Wohnen-Arbeiten	25,1 %	0,78	
Wohnen-Kindereinrichtung	1,1 %	0,03	
Wohnen-Bildung	0,8 %	0,02	
Wohnen-Dienstlich	1,2 %	0,04	
Wohnen-Einkaufen	10,5 %	0,33	
Wohnen-Freizeit	5,1 %	0,16	
Wohnen-Sonstiges	0,6 %	0,02	
Arbeiten-Wohnen	22,9 %	0,71	
Kindereinrichtung-Wohnen	1,2 %	0,04	
Bildung-Wohnen	0,9 %	0,03	
Dienstlich-Wohnen	1,4 %	0,04	
Einkaufen-Wohnen	11,2 %	0,35	
Freizeit-Wohnen	6,6 %	0,20	
Sonstiges-Wohnen	0,6 %	0,02	
Sonstiges-Arbeiten	0,9 %	0,03	
Arbeiten-Sonstiges	3,2 %	0,10	
Sonstiges-Sonstiges	6,7 %	0,21	
Summe	100 %		

Zdroj: (Ahrens, Wittwer, Hubrich, Wittig, LieBke, 2015)

2.2.3.3 Volba cíle

Ve druhé fázi čtyřstupňového dopravního modelu jsou určeny jednotlivé přemístovací vztahy, tedy je určen počet přemístění pro každou relaci ze zdrojové zóny i do cílové zóny j . Je tedy vytvořena úplná matice přemístovacích vztahů.

V této fázi je nejpoužívanějším modelem tzv. *gravitační zákon*, který využívá analogie s Newtonovým gravitačním zákonem. Jeho základy postavil svým cestovním zákonem Lill (1891), který tento fyzikální princip aplikoval na data o poptávce cestujících na Rakouské severozápadní dráze. Gravitační zákon je možné psát ve tvaru:

$$T_{ij} = k \frac{O_i D_j}{c_{ij}^2} \quad (2.5)$$

k (gravitační) konstanta

c_{ij} zobecněné (generalizované) náklady pro relaci ze zóny i do zóny j

Gravitační zákon může nabývat mnoha podob. Dá se říci, že se jedná o celou rodinu různých modelů a přístupů. Hodnoty O_i a D_j nemusí být přímo zdrojový nebo cílový přemístovací vztah. Obecně se může jednat o potenciály charakterizující příslušné zóny. Janoš (2014) například použil odmocninu z počtu obyvatel jednotlivých sídel do modelu, který použil pro určení významnosti jednotlivých přemístovacích vztahů v rámci Ústeckého kraje. Na základě tohoto modelu pak vytvořil nový návrh nabídky v železniční dopravě v tomto kraji.

Zobecněné náklady, které vystupují ve jmenovateli gravitačního zákona, spojují všechny veličiny, které je možné z nabídkového modelu odvodit a které ovlivňují poptávku v rámci volby cíle. Nejčastěji mají podobu lineární funkce.

Tato funkce je dále transformována různými funkčními předpisy. Původní formou, která dodržuje literu původního fyzikálního zákona, je kvadratická funkce, avšak často je též používána exponenciální funkce nebo i jiné přístupy. O transformovaných generalizovaných nákladech se pak obecně hovoří jako o odporové funkci.

2.2.3.4 Modální volba

Po volbě cíle přichází další volba, a to volba módu. Tento krok úzce souvisí s předchozím krokem a jsou obecně možné tři způsoby, jak tyto dva kroky provádět (Ortúzar, Willumsen, 2011, kap. 6):

- Princip trip-interchange – v tomto případě jsou prováděny postupně po sobě kroky volba cíle a modální volba. Jde o situaci, kdy přemístovací vztah ze zóny i do zóny j je rozdělen na k módů. Jedna matice je tedy rozdělena na k matic.
- Princip trip-end – u tohoto postupu je pro kroky volba cíle a volba módu změněno jejich pořadí. Nejprve je po vzniku přemístovacích vztahů provedena modální volba a až poté volba cíle.

- Simultánní provádění – zde jsou prováděny jmenované dva kroky současně. Zpravidla se jedná o vytváření kubické matice (tři dimenze: zdroj, cíl, mód), která je pak rozdělena na jednotlivé módy.

Nejčastějším typem používaným v současné době je přístup trip-intechange. Jak už bylo řečeno, jedná se o úlohu, kdy přemístovací vztah ze zóny i do zóny j je rozdělen na k modů. Jedná se tedy o úlohu, kdy jednotlivec si vybírá z k možností a vybírá si právě jednu možnost, tedy jeden mód, který použije pro celé přemístění. Tento přístup vychází z teorie diskrétní volby, jejíž metodologie je podrobněji popsána v kapitole 5.1.2.

Výsledek volby módu je ovlivněn velkým počtem faktorů, které lze rozdělit do tří skupin. První skupinou jsou faktory týkající se jednotlivce, který se rozhoduje. Jedná se například o vlastnictví osobního automobilu nebo jeho dostupnost, vlastnictví řidičského oprávnění, strukturu domácnosti (např. počet dětí) nebo příjem. Druhou skupinou jsou faktory charakterizující samotnou cestu. V tomto případě může mít vliv účel cesty nebo čas během dne, kdy je cesta vykonána. Třetí skupinou jsou vlastnosti dopravní nabídky. Tyto faktory je možné rozdělit na kvantitativní, což je například cestovní doba v různých podobách nebo finanční náklady, a kvalitativní, mezi které lze zařadit znaky popisující pohodlí, spolehlivost nebo bezpečnost.

2.2.3.5 Přidělení na síť

Posledním krokem ze čtyřstupňového dopravního modelu je přidělení na síť. Až v této fázi dochází k přímé interakci mezi dopravní poptávkou a dopravní nabídkou. Vstupem této fáze jsou matice přemístovacích vztahů pro daný mód přepočítané na dané dopravní komplety (v případě AD) nebo dopravní elementy (v případě VD). Cílem této fáze je určení zatížení jednotlivých prvků dopravní sítě, popřípadě podrobnější výsledky v podobě například obrátů cestujících v jednotlivých stanicích nebo zatížení jednotlivých spojů VD.

Podle Schillera (2011) je možné krok přidělení na síť rozdělit na tři části:

- nalezení možných cest, resp. spojení v síti
- test přijatelnosti jednotlivých nalezených cest, resp. spojení
- vlastní přidělení na plausibilní cesty.

U první fáze se jedná o nalezení množiny cest, u kterých je možné očekávat, že by si je jednotlivci mohli vybrat. V nejjednodušším případě se jedná o klasické algoritmy hledání nejkratší cesty (např. Dijkstrův algoritmus), nebo algoritmy, které vyhledávají určitou množinu nejkratších cest (jejichž délka je například 1,5násobkem délky nejkratší cesty).

Druhá fáze je často spojena s fází první. Jedná se například o testy, které mají za cíl vyvarovat se tvorbě smyček při hledání cest delších, než je nejkratší cesta v grafu. Třetí fáze je výpočetně nejnáročnější.

Třetí fáze přidělení na síť u AD

Třetí fáze je jádrem fáze přidělení na síť. Existuje velké množství algoritmů, které přidělují dopravní poptávku na síť. Nejjednodušším případem u AD je algoritmus, kdy se celý přemístovací vztah přidělí na nejkratší cestu. Metoda je označována jako „všechno nebo nic“ (All-or-Nothing, Alles-oder-Nichts). Tuto metodu lze zjemnit iteračním postupem, kdy se celkový přemístovací vztah rozdělí na několik částí (mohou být různě velké) a v rámci každé iterace je přidělena pouze daná část. Tím pádem může být zohledněna závislost mezi zatížením prvku sítě a dobou nutnou k jeho překonání.

Dalším způsobem je přidělení na více tras současně, kdy je přemístovací vztah rozdělen na více cest pomocí určitého pravidla, které zohledňuje náklady jednotlivých cest. Užit se dá například klasický logitový model nebo tzv. C-LOGIT-model, který se snaží zohlednit problematiku IIA (Independence from Irrelevant Alternatives).

Další skupinou algoritmů pro přidělení na síť u AD jsou algoritmy, které se zabývají dosažením rovnováhy mezi generalizovanými náklady jednotlivců. Jedna část těchto algoritmů pracuje s premisou, že uživatelé mají 100 % informací o dopravní síti a jejím aktuálním stavu (deterministická rovnováha). Každý z uživatelů si vybere trasu tak, aby minimalizoval generalizované náklady spojené se svou trasou a zároveň si nemohl snížit tyto náklady výběrem jiné trasy. Druhá část algoritmů připouští, že uživatelé nemají plnou znalost sítě a jejího aktuálního stavu (stochastická rovnováha). Uživatelé opět hledají nejkratší cestu, myslí si, že ji našli, ale ve skutečnosti tomu tak být nemusí. Tím pádem někteří z nich mají vyšší náklady své cesty, než by museli mít.

Poslední skupinou jsou algoritmy, které se snaží o docílení optima celého systému. To může být například minimum součtu generalizovaných nákladů přes všechny trasy všech jednotlivců přes všechna přemístění. Výhodou tohoto systému je dosažení optimální průměrné hodnoty generalizovaných nákladů, avšak nevýhodou je

skutečnost, že někteří uživatelé jsou cíleně znevýhodňováni. Podmínkou pro tento systém je určitý centrální řídicí prvek, který může řídit všechny dopravní komplety v síti.

Třetí fáze přidělení na síť u VD

U VD obecně existují 3 přístupy k přidělení na síť:

- podle dopravních systémů
- linkový/taktový (intervalový)
- podle jízdního řádu.

U prvního způsobu se při přidělení zohledňují pouze doby přepravy na jednotlivých hranách, nejsou uvažovány jednotlivé linky. Tedy také není možné modelovat přestupní doby mezi nimi. Je však možné definovat přestupní doby mezi jednotlivými dopravními systémy. Algoritmus je rychlý, ale dává nepřesné výsledky.

U taktového přístupu je potřeba vytvořit síť linek s intervaly spojení na těchto linkách. Takto je možné modelovat přesněji generalizované náklady spojené s jednotlivými trasami v síti. Algoritmus je náročnější na vstupní data, ale dává přesnější výsledky.

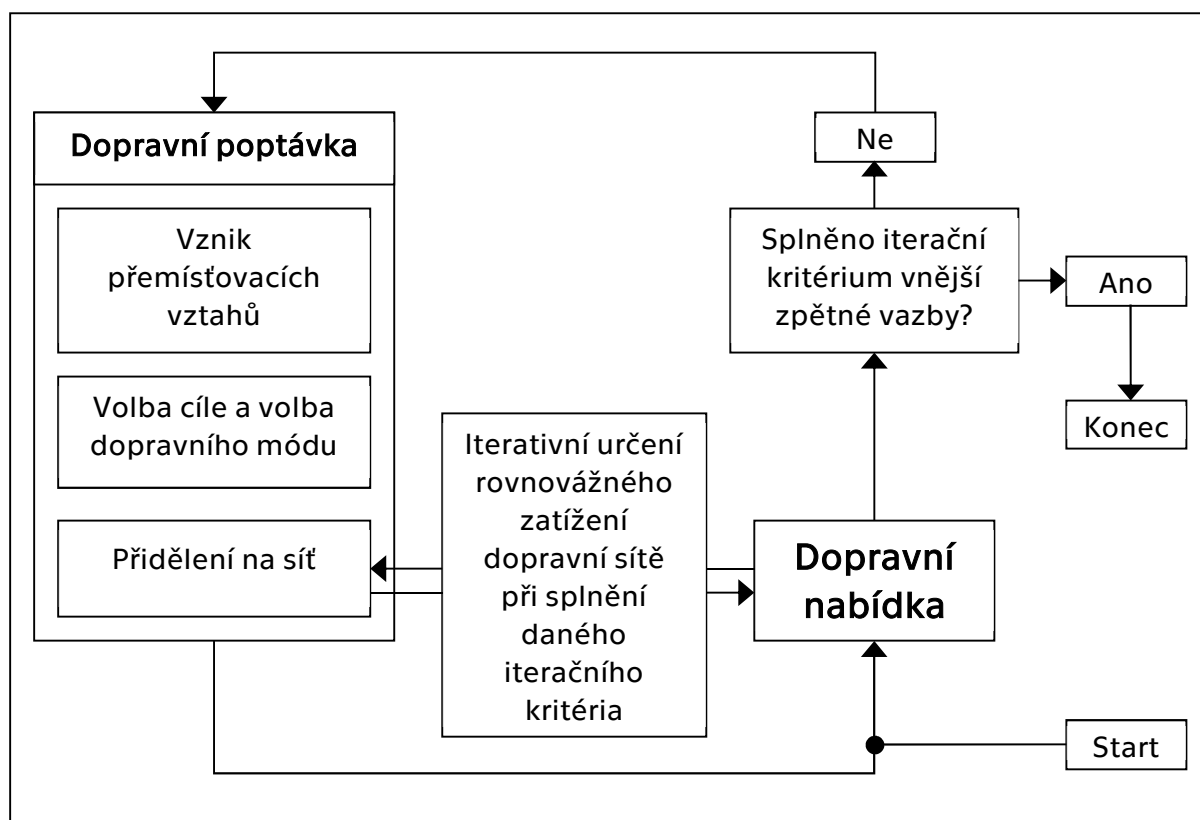
Posledním přístupem je přidělení podle jízdního řádu, které umožňuje nejpřesnější zobrazení generalizovaných nákladů, ale zároveň je i nejnáročnější na vstupní data.

2.2.4 Interakce poptávky a nabídky

Ve skutečném dopravním systému dochází k neustálým interakcím mezi poptávkou a nabídkou. Typickým příkladem je pohyb jednotlivých vozidel na síti. Řidič svým rozhodnutím (volbou trasy v síti) změní zatížení vybraných úseků na síti, resp. zvýší jejich zatížení o své vozidlo. Následkem toho se sníží rychlost na těchto úsecích a prodlouží se cestovní doby po těchto úsecích. To může způsobit různé změny v rozhodování ostatních jednotlivců. Někteří mohou změnit svoji trasu. Jiní mohou změnit čas odjezdu nebo příjezdu. Další mohou změnit mód nebo sekvenci vybraných dopravních prostředků. Ještě jiní mohou zvolit jiný zdroj nebo cíl cesty. Interakce, které postihuje čtyřstupňový dopravní model, je nutno do výpočtu makroskopického dopravního modelu zahrnout.

Výpočet modelu proto probíhá iterativně tak, že na začátku je vytvořen model dopravní nabídky a jsou spočteny (poprvé) nákladové veličiny na nezatížené síti. Poté je

vypočtena dopravní poptávka (případně desagregovaná) v prvních třech fázích čtyřstupňového modelu a tato je následně přidělena na síť. Poté jsou opět vypočteny náklady vstupující do poptávkového modelu. Takto se postupuje, dokud není splněno určité předem dané kritérium (například požadavek na maximální velikost změny poptávky na jednotlivých úsecích sítě). Při jeho splnění je výpočet modelu ukončen. Vzhledem k tomu, že kompletní propočet dopravní nabídky a poptávky může být výpočetně (a tedy i časově) poměrně náročný, bývá obvykle konvergenční kritérium nahrazeno pevným počtem iterací. Princip výpočtu zobrazuje také následující obrázek.



Obrázek 8 Princip iterativního výpočtu dopravní nabídky a poptávky

Zdroj: (Kříž, 2015)

2.3 Dostupnost

Pojem dostupnost je užíván velice často v běžném životě, a proto má pro každého intuitivně mnoho různých významů. V geografii tento pojem kromě jiného vychází z tzv. Toblerova prvního zákona geografie: „*Všechno souvisí se vším, ale blízké věci spolu souvisejí více než věci vzdálené*“ (Tobler, 1970). Dostupnost je možné obecně definovat jako potenciál dosáhnout prostorově rozdělených příležitostí (Páez, Scott, Morency, 2012). Jedná se vždy o společný výsledek působení dopravní nabídky a prostorového rozmístění jednotlivců a aktivit.

Pravděpodobně prvním, kdo definoval dostupnost v podobě formálních matematických vztahů, byl Hansen (1959). Ten definuje dostupnost jako „*potenciál příležitostí pro interakci*“. Jeho přístup vycházel z gravitačního zákona používaného ve volbě cíle, kdy cestovní doba (nebo vzdálenost) byla transformována mocninnou funkcí.

Na výsledné dostupnosti se podílí zpravidla dvě základní komponenty, a to cestovní náklady a kvantita nebo kvalita příležitostí. Dále dostupnost může být měřena z pohledu zdroje cesty, kdy je zjišťována dostupnost příležitostí (pracovních míst, obchodů, lékařů apod.), nebo cíle cesty, kdy je zjišťována dostupnost jednotlivců (zaměstnanců, zákazníků apod.) pro jednotlivé aktivity.

Obecně je možné definovat tři široké skupiny indikátorů dostupnosti: kumulativní dostupnost, potenciální dostupnost (nebo též dostupnost založenou na gravitačním principu) a dostupnost založenou na principu maximalizace užitku (Páez, Scott, Morency, 2012).

První dva typy dostupnosti je možné považovat za jednotlivé případy obecnějšího vztahu:

$$A_{ik}^p = \sum_j g(W_{jk})f(c_{ij}^p) \quad (2.6)$$

Rovnice (2.6) představuje vztah pro dostupnost z místa zdroje i vůči příležitostem typu k a z hlediska osoby typu p . Pravá strana rovnice představuje součet přes všechny dosažitelné cíle j , přičemž jednotlivé sčítance jsou součinem funkce $g(\bullet)$ transformující kvantitu nebo kvalitu příležitostí a funkce $f(\bullet)$ transformující generalizované náklady spojené s přemístěním mezi zdrojem i a cílem j .

Funkce $f(\bullet)$ se v zejména v geografické literatuře označuje jako tzv. *distance-decay funkce* (Taylor, 1971, Halás, Klapka, Kladio, 2014). Pojem vychází z obvyklého vztahu, kdy zvětšující se vzdálenost znamená snižující se intenzitu vzájemného vztahu.

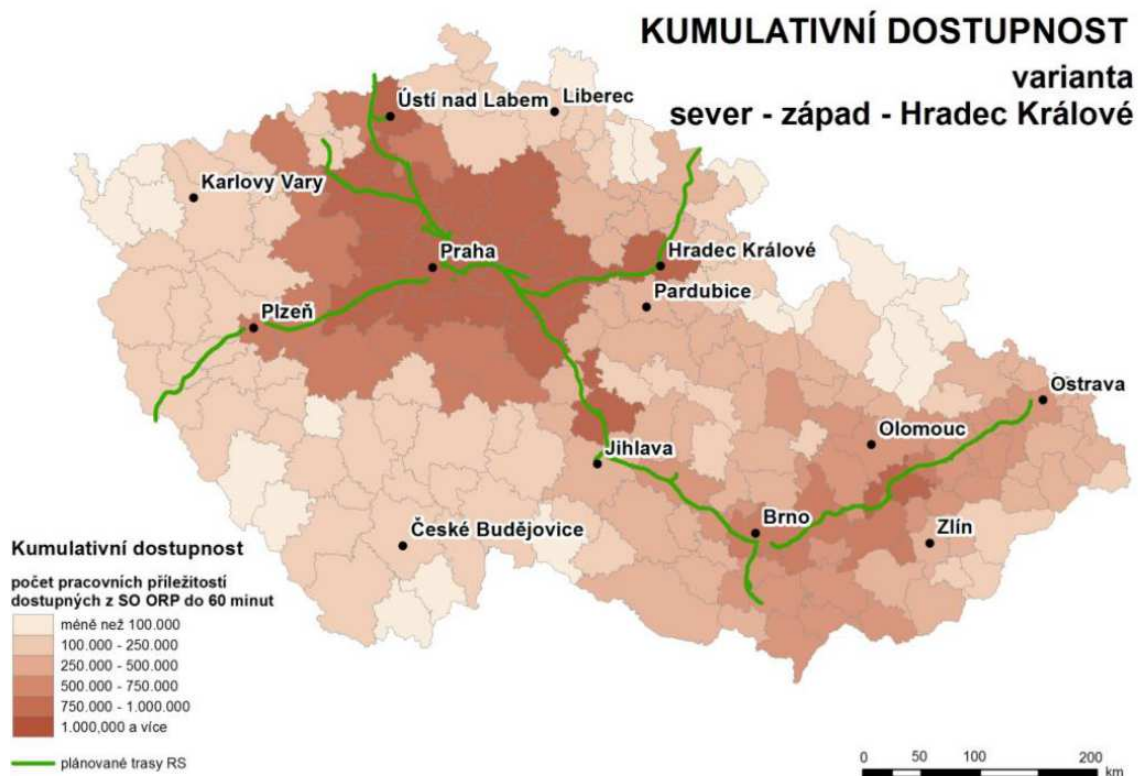
Kumulativní dostupnost je pak speciálním případem, kdy ve funkci $g(\bullet)$ vystupuje prostý počet příležitostí a funkce $f(\bullet)$ nabývá hodnoty 1, pokud náklady nabývají nižší hodnoty než je určitý práh, a hodnoty 0 v ostatních případech.

Dostupnost založená na principu maximalizace užitku je odvozena z teorie diskrétní volby, kdy je dostupnost počítána jako střední hodnota užitku z výběru mezi nabízejícími se alternativními příležitostmi. Princip teorie diskrétní volby je více rozebrán v kapitole 5.1.2.

Různé indikátory dostupnosti jsou aplikovány v rozličných dopravně plánovacích úlohách. Autor práce se podílel na zpracování certifikované metodiky pro účely dopravního plánování v rámci ČR (Marada, Fráně, Janoš, Jaroš, Kraft, Kříž, Kowalski, 2017). V rámci metodiky byl vytvořen postup využitelný při modelování dopadů zlepšené dopravní dostupnosti na pracovní trh v Česku. Centrálním metodologickým konceptem metodiky byla právě potenciální dostupnost.

V aplikační části metodiky byla posuzována změna dostupnosti v rámci ČR vlivem vybudování systému tzv. Rychlých spojení (RS), což je souhrnný název pro síť vysokorychlostních tratí (VRT) v ČR. Tratě RS Praha – Brno, Praha – Vratislav a RS Litoměřice – Drážďany byly uvažovány variantně podle dostupných podkladů.

Všechny výpočty byly prováděny na základě modelu GIS pro ČR s přesahem do sousedních zemí. V rámci ČR byly výpočty prováděny na úrovni SO ORP, které je možné považovat za dopravní zóny modelu. Na počátku prací byly provedeny výpočty kumulativní dostupnosti. Pro jednotlivé posuzované varianty byl proveden výpočet počtu pracovních míst dostupných z jednotlivých SO ORP do 60 minut.



Obrázek 9 Kumulativní dostupnost – počet pracovních míst dostupných z SO ORP do 60 minut pro severní variantu RS Praha – Brno a „hradeckou“ variantu RS směr Vratislav

Výpočet potenciální dostupnosti byl proveden na základě rovnice:

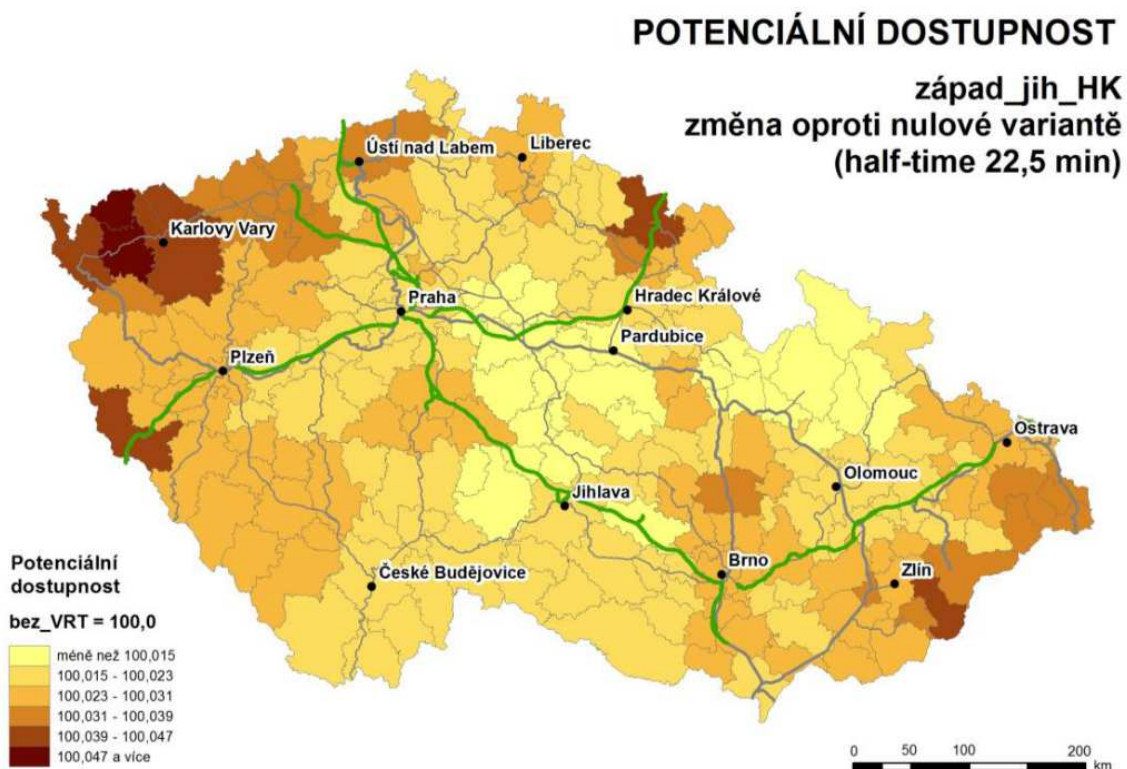
$$A_i = \sum_{j=1}^n P_j \cdot e^{-\beta c_{ij}} \quad (2.7)$$

V této rovnici je zdrojový SO ORP označen i a cílový označen j . P označuje počet pracovních příležitostí v cílovém SO ORP, c_{ij} cestovní dobu mezi danou dvojicí SO ORP a β je parametr. Pro konečných výpočet potenciální dostupnosti na národní úrovni byla použita pro parametr β hodnota 0,011552.

V rámci vyhodnocení se ukázal zajímavý paradox: Vybudování sítě RS by zvýšilo v největší míře potenciální dostupnost pro kraje Karlovarský a Zlínský, kterým by se samotná síť RS vyhnula. To ukazuje na obecnější fenomén, kdy jádrové oblasti jsou již samy o sobě dobře dopravně dostupné, ale periferním oblastem se může zlepšováním dopravní nabídky znatelně více zvýšit jejich dopravní dostupnost.

Při hodnocení alternativních variant vedení jednotlivých větví RS bylo u trati Praha – Brno ukázáno, že přínosnější je jižní varianta trasy přes Benešov a dále podél dálnice D1, která zlepšuje dostupnost dosud slabě dopravně obslužených jižních oblastí státu (jih

Vysočiny a jižní Čechy včetně Českých Budějovic). U trasy RS ve směru na polskou Vratislav nebyl identifikován výrazný rozdíl mezi variantami přes Liberec a přes Hradec Králové, avšak „hradecká“ varianta spojení podporovala zvýšení potenciálu relativně zaostávajícího Podorlicka a prochází kolem významné rekreační oblasti Krkonoš. Tím pádem ji lze považovat za přínosnější.



Obrázek 10 Relativní změna potenciální dostupnosti pro jižní variantu RS Praha – Brno a „hradeckou“ variantu RS směr Vratislav

Zdroj: (Marada, Fráně, Janoš, Jaroš, Kraft, Kříž, Kowalski, 2017)

Autor této práce se na metodice podílel kalibrací koeficientu β v rámci výpočtu potenciální dostupnosti na základě dat o dojížděci ze SLDB 2011. Na základě těchto dat vytvořil na úrovni SO ORP oboustranně omezený model volby cíle pro denní dojížděku do práce. Nákladovou veličinou byla cestovní doba mezi jednotlivými SO ORP, jejíž hodnoty byly exportovány z datového modelu GIS, který byl spravován v rámci pracovního týmu vytvářejícího předmětnou metodiku. Model byl kalibrován na základě průměrné doby dojížděky 26,501 minuty a výsledná hodnota 0,120304 parametru β byla kriticky srovnána s ostatními výsledky získanými jinými způsoby.

Odvození předpisu distance-decay funkce z oboustranně omezeného modelu volby cíle má nedostatek spočívající v obtížné intuitivní interpretaci a také v nutnosti samotný

model vytvořit. Sarlas a Axhausen (2018) navrhli jiný přístup k určení předpisu funkce transformující generalizované náklady. Jako výchozí zdroj dat pro popis poklesu intenzity použili množinu cest z průzkumu dopravního chování. Pro tuto množinu vypočetli zobecněné náklady a na tento znak aplikovali nástroje analýzy přežití.

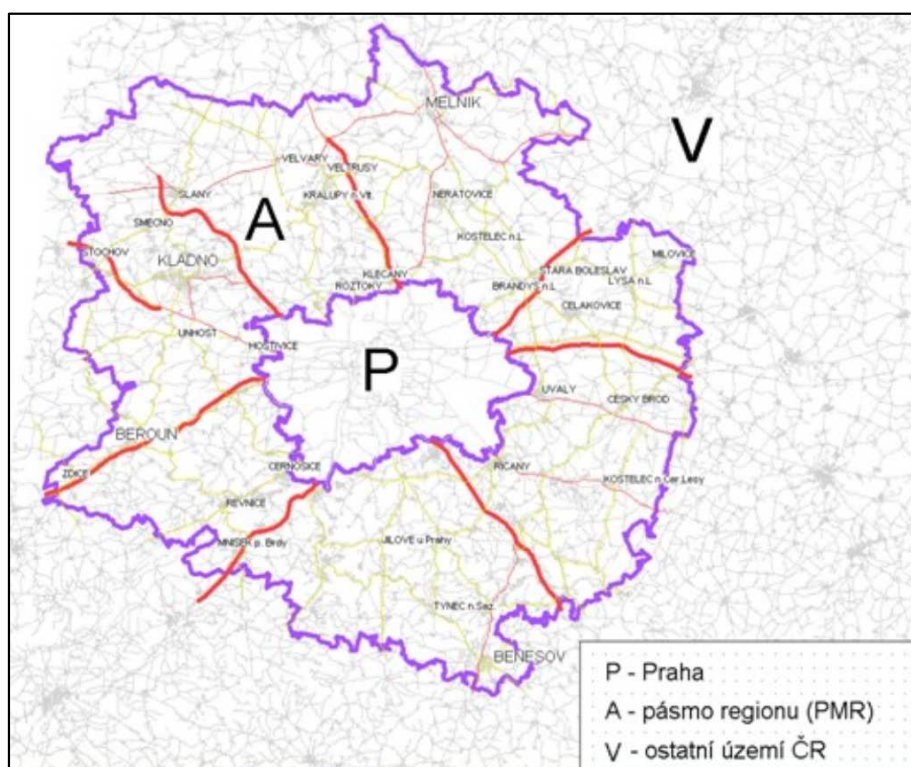
Analýza přežití obecně pracuje s náhodnou veličinou T s hustotou pravděpodobnosti $f(t)$ a distribuční funkcí $F(t) = Pr[T < t]$, která udává pravděpodobnost, s jakou nastala událost do časového okamžiku t ¹⁸. Doplnkem k distribuční funkcí je tzv. funkce přežití $S(t) = Pr[T \geq t] = 1 - F(t)$, která udává pravděpodobnost, že zkoumaný objekt je „ještě naživu“ v časovém okamžiku t (Rodríguez, 2007).

Pak je možné výslednou distance-decay funkci vysvětlit jako podíl lidí, kteří jsou ještě na danou vzdálenost ochotni jet, a tedy takto vzdálený cíl je pro ně ještě dostupný a lze ho do hodnoty potenciální dostupnosti zahrnout s příslušným podílem. Délka nebo cestovní doba jednotlivých cest mohou být nahrazeny jinou veličinou reprezentující generalizované náklady.

¹⁸ Analýza přežití nachází aplikaci zejména v lékařství nebo strojírenství, kde je řešena otázka, s jakou pravděpodobností po určité době přežije pacient od okamžiku nákazy nebo vydrží výrobek od začátku používání. Pak se onou událostí rozumí smrt pacienta nebo porucha výrobku.

3 Formulace problému

Základním impulsem pro formulaci problému řešeného v této disertační práci byl současný stav modelování dopravní poptávky v makroskopických modelech v ČR a zejména na území Prahy, respektive na území Pražské metropolitní oblasti (PMO). Na TSK Praha je spravován makroskopický dopravní model tzv. Pražského metropolitního regionu (PMR)¹⁹. Model dopravní poptávky obsahuje kompletní čtyřstupňový dopravní model, přičemž v modelu jsou obsaženy dva módy – hromadná doprava (HD) a automobilová doprava (AD). Pro každý z obou módů je vytvořen zvláštní model dopravní nabídky, stejně tak výpočet přidělení na síť probíhá odděleně, zbylé tři fáze modelu dopravní poptávky jsou obsaženy v modelu AD. Základní strukturou dopravních zón jsou na území Prahy základní sídelní jednotky (ZSJ), mimo Prahu se jedná obvykle o obce. Rozsah modelu je znázorněn na následujícím obrázku.



Obrázek 11 Rozsah dopravního modelu TSK Praha

Zdroj: (Kreml, 2014)

¹⁹ Pražský metropolitní region byl předchůdcem Pražské metropolitní oblasti (PMO), která vznikla úpravou PMR podle struktury SO ORP, aby byla do těchto obvodů skladebná.

Výpočet volby módu je postaven na binárním logitovém modelu. Při konstrukci, kalibraci a validaci tohoto modelu zjistil Kreml (2014) několik problémů. Aspekty zahrnuté v užitkovém modelu je možné rozdělit na časové a finanční. Finanční aspekty jsou v případě HD jízdné a v případě AD palivo, další provozní náklady, parkovné a mýto. U časových aspektů je uvažována zejména cestovní doba, buď celková (tzv. „od dveří ke dveřím“), nebo rozdělená na jednotlivé složky (doba jízdy ve vozidle, doba chůze, doba čekání na první zastávce, doba čekání při přestupování). Zejména finanční aspekty mohou být různými segmenty uživatelů dopravního systému vnímány různě. Například držitel předplatní jízdenky nevnímá cenu jednotlivého jízdného při rozhodování o přemístění, naopak cestující bez předplatní jízdenky je nucen za každou jednotlivou jízdu (nebo za sekvenci několika málo jízd) jízdné platit.

Z tohoto důvodu jsou v modelu spravovaném na TSK Praha osoby rozděleny do čtyř skupin pomocí dvou hledisek. Osoby jsou rozděleny jednak podle toho, zda vlastní nebo nevlastní předplatní jízdenku na VHD, jednak dle disponování osobním automobilem. Pro účely určení podílů jednotlivých segmentů populace dle těchto dvou faktorů je území Prahy rozděleno na 5 prstenců okolo centra města. Pro jednotlivé prstence jsou údaje získávány z pravidelných průzkumů dopravního chování jako souhrnné podíly za obyvatele těchto prstenců. Vzhledem k tomu, že území Prahy se skládá přibližně z 900 ZSJ, jeden prstenec obsahuje v průměru přibližně 180 ZSJ, pro které je použito společných hodnot podílů jednotlivých segmentů. Dále je nutné zmínit skutečnost, že není možné tyto podíly jakkoli predikovat, tedy v případě výpočtů budoucích časových horizontů je nutno použít stejných hodnot jako v modelu současného stavu.

Avšak intuitivně se zdá, že toto rozdělení de facto pouze podle vzdálenosti od centra Prahy nevysvětluje dostatečně všechny možné vlivy, kterými je možné vlastnictví předplatní jízdenky pro VHD vysvětlit. Proto byla stanovena výzkumná otázka O1.

Výzkumná otázka O1: Které proměnné z dostupných dat ze současných průzkumů dopravního chování v Pražské metropolitní oblasti ovlivňují držení předplatní jízdenky pro VHD?

Odpovědí na výzkumnou otázku O1 by měl být model, který by predikoval pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky pro VHD pro jednotlivce na základě různých atributů popisujících jeho situaci. Na základě pravděpodobnosti je pak možné odvodit též podíl předplatitelů v populaci. Proto byl stanoven výzkumný cíl C1.

Cíl C1: Vytvoření modelu pro volbu držení předplatní jízdenky pro VHD.

Podobným způsobem by mělo být přistoupeno i k řešení vlastnictví osobního automobilu. Byla tedy stanovena výzkumná otázka O2.

Výzkumná otázka O2: Které proměnné z dostupných dat ze současných průzkumů dopravního chování v Pražské metropolitní oblasti ovlivňují vlastnictví OA?

Odpovědí na výzkumnou otázku O2 by měl být podobně jako u výzkumné otázky O1 model, který by predikoval pravděpodobnost vlastnictví osobního automobilu pro jednotlivce na základě různých atributů popisujících jejich situaci. Na základě pravděpodobnosti je pak možné odvodit též podíl vlastníků OA v populaci. Proto byl stanoven výzkumný cíl C2.

Cíl C2: Vytvoření modelu pro volbu vlastnictví OA.

Je nutné si dále uvědomit, že rozhodování o pořízení předplatní jízdenky pro VHD a o vlastnictví OA nemusejí být nezávislá. Pokud jednotlivec vlastní předplatní jízdenku pro VHD, je možné očekávat, že spíše nebude vlastnit OA, než pokud by předplatní jízdenku neměl. Podobně může vypadat rozhodování u člověka, o kterém je známo, že vlastní OA. Tento vzájemný vliv je nutné řešit. Na základě této intuitivní úvahy byla proto stanovena výzkumná otázka O3.

Výzkumná otázka O3: Je možné vytvořit model popisující současně volbu předplatní jízdenky pro VHD a volbu vlastnictví OA?

Odpovědí na tuto otázku by měl být opět model vysvětlující rozhodování jednotlivců, které bude zohledňovat efekty vzájemného ovlivňování se jednotlivých možností. Proto byl stanoven cíl C3.

Cíl C3: Vytvoření spojeného modelu pro volbu držení předplatní jízdenky pro VHD a vlastnictví OA.

Doposud stanovenými cíli je možné vyřešit danou problematiku pouze na úrovni chování jednotlivců. Avšak makroskopické modely pracují obvykle s agregovanými veličinami, a tedy se skupinami osob, nikoli jednotlivci. Proto byla stanovena následující výzkumná otázka.

Výzkumná otázka O4: Jakým způsobem je možné rozhodování na úrovni jednotlivců začlenit do makroskopického dopravního modelu?

Tato otázka se na první pohled může zdát nepříliš důležitá, neboť když již existuje model na bázi chování jednotlivců, nabízí se jako první možnost využít tento v určitém modelu, který již chování jednotlivců popisuje. Avšak v současné inženýrské praxi budou velice pravděpodobně převažovat ještě určitou dobu makroskopické dopravní modely, a proto je nutné je neustále doplňovat a zlepšovat. Proto byl na základě této otázky stanoven cíl C4.

Cíl C4: Návrh způsobu začlenění spojeného modelu pro volbu držení předplatní jízdenky pro VHD a vlastnictví OA do makroskopického dopravního modelu s poptávkovou částí odpovídající klasickému čtyřstupňovému dopravnímu modelu.

V následujících kapitolách budou postupně jednotlivé výzkumné otázky zodpovězeny naplněním příslušných cílů.

4 Stávající přístupy k řešení problému

4.1 Volba nástrojů mobility

Vlastnictví OA nebo předplatní jízdenky VHD je možné zahrnout do společného pojmu *nástroj mobility*²⁰. Nástroj mobility je možné definovat jako „*objekt, který po zaplacení znatelného objemu finančních prostředků jako zálohy umožňuje trvalý přístup k určitému způsobu dopravy za nízkých nebo nulových mezních nákladů po dobu minimálně jednoho roku*“ (Becker, Loder, Schmid, Axhausen, 2017).

V případě vlastnictví OA je nejdříve nutné vynaložit peněžní prostředky na samotný nákup vozidla a dále platit pravidelné roční platby (pojištění odpovědnosti z provozu vozidla, pravidelný servis, technické prohlídky vozidla apod.), avšak o samotných jízdách je možné říci, že jsou spojeny pouze s náklady na palivo. Předplatní jízdenka na VHD opět představuje náklad v řádu tisíců korun ročně²¹, avšak poté umožňuje obvykle bezplatné využívání daného systému VHD. Dalšími nástroji mobility mohou být registrace do systémů carsharingu nebo bikesharingu.

Výše uvedená definice je poněkud problematická ze dvou hledisek. Patrně nejzásadnějším problémem je pojem znatelného objemu finančních prostředků, který není jasně definován. Skutečnost zaplacení určité zálohy a s tím souvisejícího administrativního aktu (registrace do systému) se vyskytuje i u takových systémů, jako jsou carsharing nebo bikesharing, avšak v současné době se například v Praze pohybují ceny prvotní registrace do systému carsharingu na úrovni 1000 Kč (nebo i nižší), což nemusí mnoho uživatelů považovat za znatelný obnos. Avšak se samotným rozhodnutím o registraci mohou souviset i značné kognitivní náklady spojené se zjišťováním informací a jejich zpracováním.

²⁰ V české literatuře zatím nebyl nalezen odpovídající pojem, proto bylo v této práci použito vlastního překladu pojmu *mobility tool*.

²¹ V lednu roku 2020 činila cena roční jízdenky na MHD v Praze 3650 Kč pro dospělé osobu, síťová jízdenka IN 100 pro 2. třídu vlaků ČD stála 19 990 Kč.

Stejně tak doba jednoho roku určitým způsobem zužuje definici oproti jejímu intuitivnímu vnímání. Např. student vysoké školy si kupuje předplatní jízdenku jenom na dobu 10 měsíců v roce, protože v červenci a srpnu předplatní jízdenku nepotřebuje.

Pro další práci byla proto výchozí definice od Beckera, Lodera, Schmida a Axhausena (2017) zobecněna. Podle této zobecněné definice je nástroj mobility objekt, který po určitém počátečním procesu rozhodnutí pro jeho obstarání, spojeném s možným zaplacením znatelného objemu finančních prostředků jako zálohy, umožňuje trvalý přístup k určitému způsobu dopravy za nízkých, případně až nulových mezních nákladů, po období, které je spojeno s pravidelným a více či méně přesným opakováním určitého denního nebo i řidšího vzorce dopravního chování. Toto opakované dopravní chování může být typicky dojíždění žáka nebo studenta z místa (přechodného) bydliště do místa školy a zpět v pracovní dny nebo týdenní rytmus dopravního chování matky v domácnosti, která řeší běžný provoz domácnosti.

4.2 Současný přístup v České republice

Při projektování pozemních komunikací jsou využívány tzv. Technické podmínky Ministerstva dopravy (zkráceně TP). Pro prognózu v oblasti intenzit jsou používány TP 225 (Bartoš, Richtr, Martolos, Hála, 2012). Tyto TP uvádějí, že prognózu intenzit automobilové dopravy je možné provádět dvojitým způsobem:

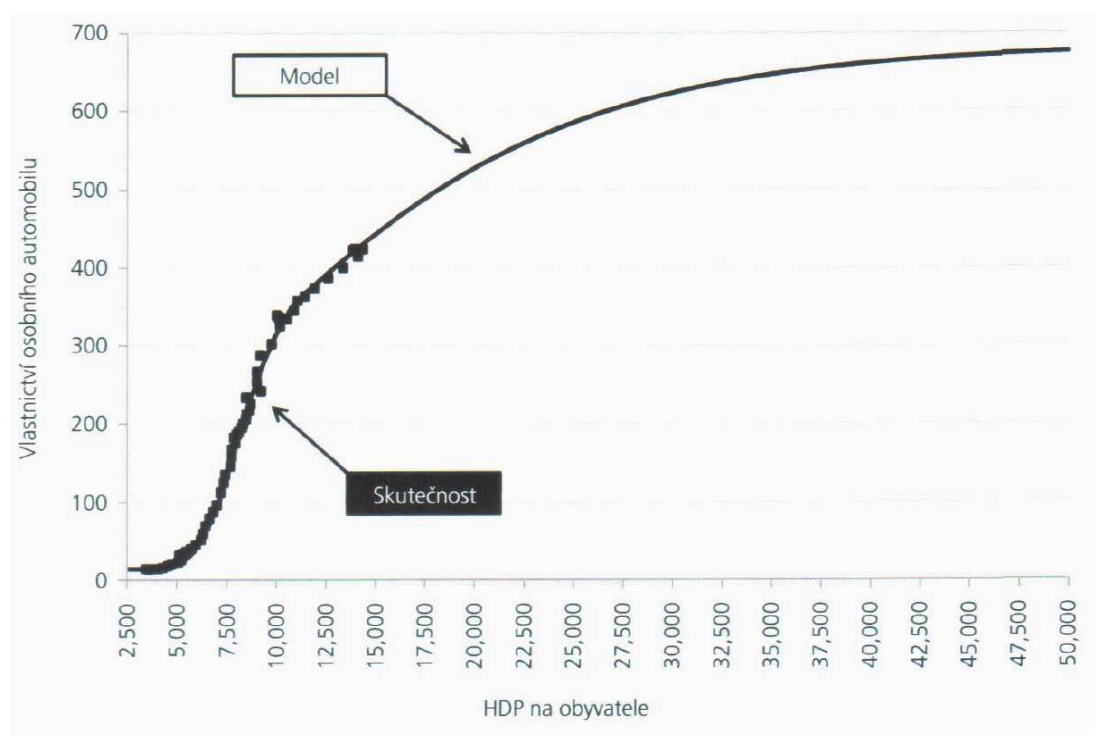
- metodou jednotného součinitele růstu, nebo
- matematickým modelem výhledového zatížení dopravní sítě.

Tyto TP jsou určeny jako podklady pro výpočet podle první výše uvedené metody, kterou je možno použít, pokud „...v období vymezeném výchozím a výhledovým rokem nedojde ke změnám s podstatným vlivem na intenzitu dopravy...“ (Bartoš, Richtr, Martolos, Hála, 2012).

Prognóza dopravního výkonu osobních automobilů pro tyto TP byla vytvořena na základě dvou veličin, a to prognózy vývoje počtu osobních automobilů a průměrného proběhu osobních automobilů. Pro prognózu počtu osobních automobilů bylo použito tzv. italské křivky s předpokladem saturace na úrovni 1,35 automobilu na domácnost. Využití tzv. italské křivky pro prognózu je v dopravně inženýrské praxi v ČR v současné době poměrně běžné. Z poslední doby je možné jmenovat Plán udržitelné městské

mobility měst Mostu a Litvínova (Hruška, Roháč, 2019) nebo Generel dopravy města Poděbrady (Roháč, Staněk, Roháč ml., 2018).

Také v odborných publikacích je v české literatuře obvykle řešeno pouze vlastnictví osobních automobilů. Tento fenomén se obvykle definuje jako počet osobních automobilů na 1000 obyvatel. Někdy se též uvádí pojem *stupeň automobilizace*. Mohelský (2011) použil pro prognózu stupně automobilizace kombinaci kauzálního modelu věkových skupin s extrapolačním modelem agregátních časových řad. Jako vysvětlující proměnnou použil ve svém modelu HDP na obyvatele, což dokládá i obrázek níže. Dále v modelu uvažoval podle zkušeností z jiných zemí, že mez saturace v určitých věkových skupinách neleží na hodnotě 100 % (tedy jeden osobní automobil na jednoho příslušníka dané věkové skupiny), ale je přibližně o dalších deset procentních bodů vyšší. Pro rok 2050 predikoval tento model dosažení meze saturace na úrovni 683 osobních automobilů na 1000 obyvatel, což odpovídalo úrovni HDP 50 000 USD.

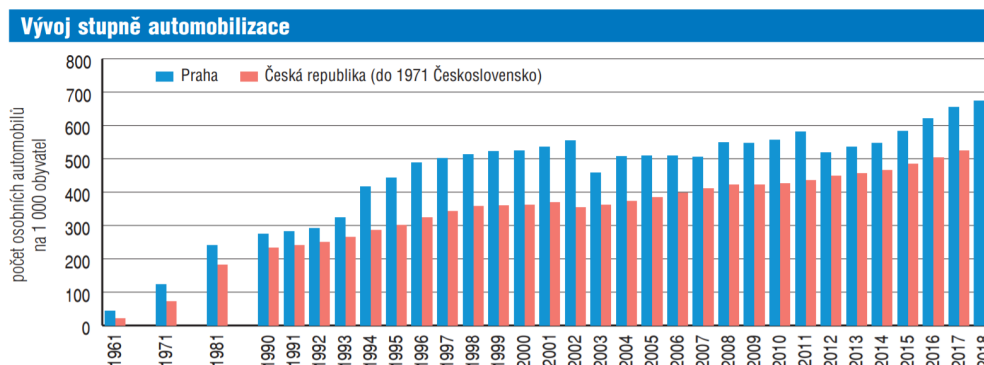


Obrázek 12 Dlouhodobý vývoj úrovně automobilizace v závislosti na HDP na obyvatele

Zdroj: (Mohelský, 2011)

Podobně k problému predikce stupně automobilizace přistoupil Hála (2009). Využil opět agregovaný přístup uvažující pouze s hodnotami za celou ČR. Dále aplikoval analýzu časových řad a jako vysvětlující proměnné modelu použil HDP na domácnost, průměrnou

velikost domácnosti a počet domácností v ČR. Pro rok 2050 predikoval tento model stupeň automobilizace přibližně 550 osobních automobilů na 1000 obyvatel. Tyto růstové tendence jsou více či méně v souladu s dosavadním vývojem v Praze i České republice jako celku (viz následující obrázek).

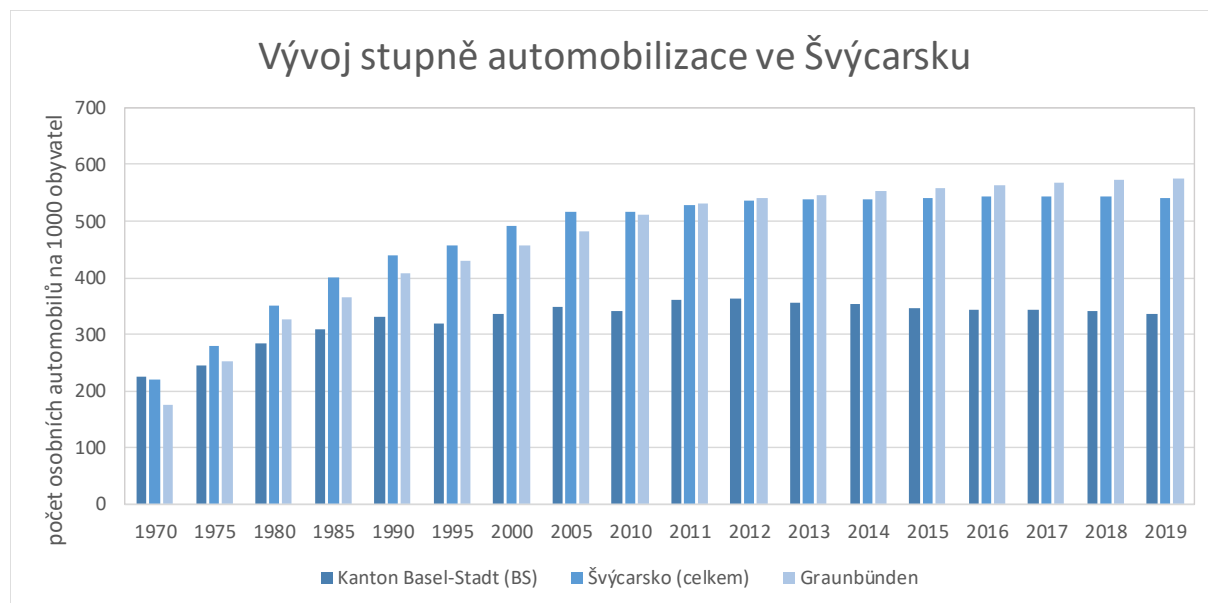


Obrázek 13 Vývoj stupně automobilizace v Praze a České republice

Zdroj: (TSK-ÚDI, 2019)

Všechny výše v této kapitole uvedené výsledky by se daly shrnout do intuitivně sestaveného tvrzení: „Nakonec budou vlastnit automobil všichni občané kromě těch, pro které to z důvodu věku nebo jiných omezení nebude mít smysl“. Toto tvrzení je však v rozporu se situací například ve Švýcarsku, které je zřejmě bohatší než Česká republika. Stupeň automobilizace ve Švýcarsku v posledních letech osciluje okolo hodnoty 540 osobních automobilů na 1000 obyvatel a v roce 2018 dosáhl hodnoty 543 osobních automobilů na 1000 obyvatel (Bundesamt für Statistik, 2020), která je shodná s hodnotou pro Českou republiku (TSK-ÚDI, 2019).

Další zajímavou skutečností je, že v oblasti Basileje (reprezentované kantonem Basel-Stadt) byl v roce 2018 stupeň automobilizace pouze 341 osobních automobilů na 1000 obyvatel, zatímco v Praze byla příslušná hodnota 734. Dále je nutné uvést, že v Praze hodnota stupně automobilizace stále roste, zatímco v Basileji osciluje okolo hodnoty 340 od roku 2000. Tedy městská oblast nadprůměrně bohatá v rámci státu má ve Švýcarsku zřetelně nižší stupeň automobilizace, než je hodnota v rámci celého Švýcarska, zatímco v České republice je tomu naopak. Z výše uvedených rozporů plyne, že agregátní přístupy založené zejména na HDP jako vysvětlující proměnné jsou nedostatečné a je nutné najít další vysvětlující proměnné.



Obrázek 14 Vývoj stupně automobilizace ve Švýcarsku a vybraných kantonech

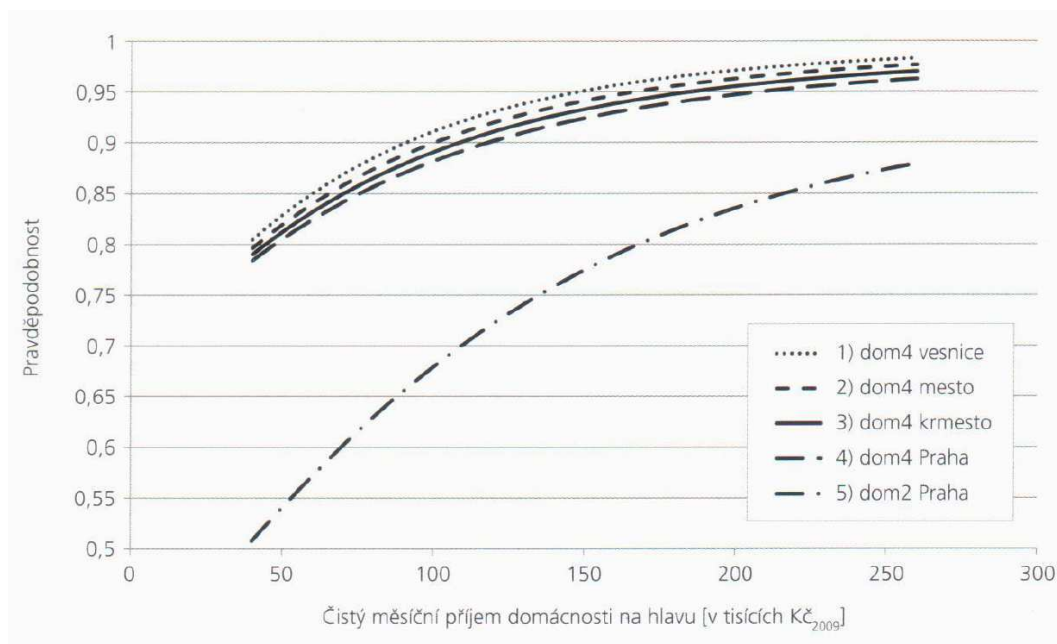
Zdroj dat: (Bundesamt für Statistik, 2020)

Zcela odlišným způsobem se k vlastnictví osobního automobilu a faktorům jej ovlivňujících postavili Urban a Ščasný (2011). Tito aplikovali binární logistický model na data ze šetření *Životní podmínky ČR 2009* uspořádaného v roce 2009 Český statistickým úřadem. Toto šetření proběhlo na vzorku přibližně 10 000 českých domácností, přičemž domácnosti byly vybírány stratifikovaným náhodným výběrem. Jako vysvětlovaná byla použita binární proměnná, zda (celá) domácnost vlastní, nebo nevlastní osobní automobil. Jako vysvětlující byly použity následující proměnné:

- příjem domácnosti – pozitivní vliv
- muž v čele domácnosti – pozitivní vliv
- průměrné vzdělání ekonomicky aktivních členů je středoškolské – pozitivní vliv
- průměrné vzdělání ekonomicky aktivních členů je vysokoškolské – pozitivní vliv
- celkový počet osob v domácnosti – pozitivní vliv
- celkový počet ekonomicky aktivních členů – pozitivní vliv
- domácnost obývá rodinný domek – pozitivní vliv
- domácnost důchodců – negativní vliv
- v domácnosti přítomny děti mladší 6 let – pozitivní vliv

- v domácnosti přítomny děti 6-15 let – pozitivní vliv (avšak jako jediný není statisticky signifikantní na běžně uvažované hladině významnosti)
- interakce příjmu a bydliště ve městě – negativní vliv
- interakce příjmu a bydliště v krajském městě – negativní vliv
- interakce příjmu a bydliště v Praze – negativní vliv
- (konstanta = vliv nepozorovaných proměnných) – negativní vliv.

Na následujícím grafu je ukázán modelový průběh vlivu příjmu na pravděpodobnost vlastnictví osobního automobilu domácností pro 5 typů domácností: 1) čtyřčlenná domácnost se dvěma dětmi, jedním ve věku do 5 let a jedním starším a dvěma ekonomicky aktivními členy se středním vzděláním žijící v bytovém domě na vesnici; 2) tatáž domácnost žijící na malém městě; 3) tatáž domácnost žijící v krajském městě; 4) tatáž domácnost žijící v Praze; 5) domácnost jako v bodě 4), avšak bez dětí. Tento graf ukazuje, že vliv struktury domácnosti je zřetelně významnější ve srovnání s vlivem bydliště.



Obrázek 15 Pravděpodobnost vlastnictví automobilu podle příjmu domácnosti

Zdroj: (Urban, Ščasný, 2011)

S výsledky Urbana a Ščasného je ve shodě ohledně struktury bydlení také Macejka (2019), který při zpracovávání plánů udržitelné městské mobility různých měst v ČR zjistil, že ve městech na Moravě v rámci historické sídlištní zástavby, která je typická pro

období 50. až 80. let 20. stol., je stupeň automobilizace mezi 220 a 260 vozidly na 1000 obyvatel, což je zřetelně níže než průměr za celou ČR.

Z výše uvedených citací je zřejmé, že v rámci určité oblasti není možné provádět pouze souhrnné predikce stupně automobilizace za celou oblast (například kraj nebo stát). Takové výstupy udávají velmi nepřesný obraz o rozložení vlastnictví automobilů v rámci populace a tím i v rámci zkoumaného území.

Kromě vlastnictví osobního automobilu nebyly v rámci České republiky nalezeny žádné publikace, které by na reprezentativních vzorcích obyvatel řešily rozhodování o dalších nástrojích mobility.

4.3 Modely na úrovni rozhodování jednotlivců

Obecně modelování nástrojů mobility prošlo dlouhodobým vývojem, který započal u agregovaných modelů vlastnictví automobilů. Účelem prvních modelů byla agregovaná předpověď celkového počtu automobilů na národní úrovni (Kain, Beesley, 1965).

S přibývajícimi možnostmi získávání a analýzy dat dochází k desagregaci modelů. Podle klasifikace modelů vlastnictví osobního automobilu dle de Jonga et al. (2004) je převažující část desagregovaných modelů založena na teorii diskrétní volby. Tyto modely se soustřeďují obvykle na modelování rozhodování domácností nebo jednotlivců, přičemž se užívá obou hlavních přístupů k získávání dat pro modely diskrétní volby, tedy odhalených preferencí (Beige, 2008, Loder, Axhausen, 2018, Becker, Loder, Schmid, Axhausen, 2017) a stanovených preferencí (Erath, Axhausen, 2010), případně jejich kombinace (Akbari, Hasnine, Papaioannou, Bernardino, Habib, 2020).

Faktory ovlivňující vlastnictví osobního automobilu lze rozdělit do několika základních skupin (Whelan, 2007): příjem domácnosti nebo jednotlivce, struktura a velikost domácnosti, finanční náklady na IAD, životní styl a umístění pravidelných aktivit (obvykle bydliště nebo pracoviště), širší prostředí (legislativa, trendy ve společnosti apod.).

Domácnosti nebo jednotlivci s relativně větším disponibilním příjmem vlastní automobil častěji, resp. mají více osobních automobilů. Disponibilní příjem tedy pozitivně souvisí s dostupností osobního automobilu (Beige, 2008, Bhat, Guo, 2007).

Větší domácnosti a rodiny s dětmi využívají osobní automobil spíše než menší domácnosti a domácnosti bez dětí (Bhat, Guo, 2007). Také se ukazuje, že muži mají dostupný automobil obvykle častěji než ženy (Simma, Axhausen, 2001, Loder, Axhausen, 2018). Závislost na věku není lineární. Maximální pravděpodobnost vlastnictví osobního automobilu bývá okolo 40. až 50. roku života, naopak nejnižší je okolo 20. a 80. roku života (Kowald, Kieser, Mathys, Justen, 2017).

Umístění domácnosti nebo pracoviště je definováno pomocí různých indikátorů dostupnosti. V nejjednodušších případech bývá rozděleno na dichotomickou proměnnou pro zachycení rozdílu mezi „městskými“ a „venkovskými“ oblastmi. Někdy bývá využíváno kategorií definovaných určitým (statistickým) úřadem (Beige, 2008, Loder, Axhausen, 2018), nebo je využíváno vypočtených indikátorů potenciální dostupnosti na základě dostupných (dopravních) modelů území. Obvykle platí, že čím více je oblast venkovská, tím spíše využívají jednotlivci a domácnosti osobní automobil. Naopak oblasti s dobrou dopravní dostupností, resp. dobrou dostupností VHD mají negativní vliv na disponování osobním automobilem (Bhat, Guo, 2007, Becker, Loder, Schmid, Axhausen, 2017).

Modelování vlastnictví předplatní jízdenky nemá tak hlubokou historii, jako je tomu v případě modelování vlastnictví osobního automobilu. Kromě několika průkopnických děl (Axhausen, Köll, Bader, 1998, Monheim, 1987) nebylo vlastnictví předplatní jízdenky modelováno odděleně od vlastnictví osobního automobilu.

Pravděpodobně prvními, kteří zkoumali současně vlastnictví předplatní jízdenky i osobního automobilu, byli Simma a Axhausen (2001). Jejich primárním cílem bylo popsat vztahy mezi vlastnictvím osobního automobilu, resp. předplatní jízdenky, na jedné straně a používáním příslušných módů na straně druhé. Používání popsali pomocí dvou proměnných pro každý mód – jednak jako počet cest, jednak jako ujetou vzdálenost.

Pro popis závislostí použili metodu *modelování pomocí strukturních rovnic* (SEM – Structural equation modelling), přičemž exogenními proměnnými modelu byly sociodemografické proměnné věk, pohlaví, ekonomická aktivita (zda je respondent zaměstnaný), počet členů domácnosti, počet dětí v domácnosti a bydliště v městském prostředí. Následovaly dvě binární endogenní proměnné pro vlastnictví předplatní jízdenky a osobního automobilu. Dále byly vytvořeny čtyři proměnné pro charakteristiku využití jednotlivých módů – pro každý z módů počet cest a počet ujetých kilometrů.

Posledně jmenované proměnné byly vysvětlovány pomocí všech předtím uvedených proměnných.

Autoři použili výsledky tří průzkumů dopravního chování ze tří různých zemí (Švýcarsko, Německo, Velká Británie). Na každý datový soubor aplikovali stejný strukturální model a modely mezi sebou pak porovnali.

Oba nástroje mobility měly pozitivní vliv na používání příslušných módů ve všech třech průzkumech. Vlastnictví osobního automobilu mělo negativní vliv na využívání veřejné dopravy v obou sledovaných znacích. Vlastnictví předplatní jízdenky mělo negativní vliv na používání osobního automobilu, ale tento vliv byl relativně nízký a v případě ujeté vzdálenosti ve Švýcarsku a Německu dokonce statisticky nevýznamný.

Skutečnost, že je člověk zaměstnaný, měla pozitivní vliv na využívání osobního automobilu, ale také na ujetou vzdálenost ve veřejné dopravě. Muži ve srovnání se ženami spíše vlastnili automobil a spíše neměli předplatní jízdenku. Věk neměl jednoznačný efekt. Skutečnost, že člověk žil v městské oblasti, měla pozitivní vliv na vlastnictví předplatní jízdenky a negativní vliv na vlastnictví osobního automobilu.

Patrně prvními, kdo použili pojem nástroj mobility, byli Scott a Axhausen (2006). Ti ve své práci analyzovali pomocí jednorozměrných a dvourozměrných probit modelů, jaké proměnné ovlivňují vlastnictví osobního automobilu, resp. vlastnictví předplatní jízdenky. Ukázali, že existuje silná korelace mezi vlastnictvím osobního automobilu a vlastnictvím předplatní jízdenky a že je tedy nutné modelovat simultánní rozhodování o obou nástrojích současně.

Práce obvykle ukazují na substituční vztah vlastnictví různých druhů předplatní jízdenky a vlastnictví osobního automobilu (Beige, 2008, Loder, Axhausen, 2018). V případě potřeby je pojem vlastnictví předplatní jízdenky rozčleněn do více kategorií. U dat vztahujících se ke Švýcarsku jsou ve VHD používány kategorie celonárodní síťová jízdenka (tzv. Generalabonnement – GA), jízdenka na 50% slevu na celé síti VHD (tzv. Halbtax) a regionální síťová jízdenka (Beige, 2008).

Pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky s věkem nejdříve klesá a následně roste, přičemž nejnižších hodnot dosahuje přibližně v rozmezí 40 až 60 let (Becker, Loder, Schmid, Axhausen, 2017, Loder, Axhausen, 2018).

U jednotlivců s růstem relativně lepší dopravní dostupnosti VHD roste i pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky (Becker, Loder, Schmid, Axhausen,

2017). Stejně tak lidé bydlící v městských oblastech spíše vlastní předplatní jízdenku než lidé žijící na venkově (Loder, Axhausen, 2018).

Vyšší dosažené formální vzdělání má pozitivní vliv na vlastnictví předplatní jízdenky (Beige, 2008).

S rozvojem nových dopravních módů se dále rozvíjejí i modely řešící nové druhy nástrojů mobility. Do těchto modelů jsou zahrnována členství v různých systémech sdílené ekonomiky, jako jsou carsharing (Becker, Loder, Schmid, Axhausen, 2017).

5 Návrh modifikace modelu

5.1 Modely rozhodování jednotlivců

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, základem pro tuto práci byl existující dopravní model Pražského metropolitního regionu, na jehož správě se autor podílí, a dostupné průzkumy dopravního chování. Průzkumy dopravního chování si správce modelu TSK Praha nechává zpracovávat obvykle s periodicitou 10 let. V mezidobí případně objednává různé kontrolní nebo srovnávací průzkumy. Poslední průzkumy byly pro oblast Prahy pořízeny v roce 2015 (Rajman, Matras, Tesař, 2015) a pro oblast Středočeského kraje v roce 2016 (Rajman, Matras, Tesař, 2016).

Oba tyto průzkumy byly prováděny kombinací metod CAWI (Computer Assisted Web Interviewing – vyplňování webového dotazníku respondentem) a CATI (Computer Assisted Telephone Interviewing – dotazník vyplňován tazatelem při telefonickém rozhovoru s respondentem). Údaje byly zjišťovány pro tzv. typický (průměrný) pracovní den, který mohl být úterým, středou nebo čtvrtkem v měsících březen až květen a září až listopad v týdnech, ve kterých nejsou svátky, mimořádné dny pracovního klidu nebo zvláštní události, které by mohly ovlivnit dopravní chování respondentů.

V obou dvou dotaznících byl požadován vzorek 5000 jednotlivců od 6 let. Vzorek byl v obou případech získán metodou kvótního výběru. Kritérii pro dosažení jednotlivých kvót byly pohlaví, věková kategorie, ekonomická aktivita, rozložení bydliště v rámci oblasti a velikost obce bydliště (ta pouze u průzkumu ve Středočeském kraji).

Respondenti odpovídali v první části na otázky týkající se jejich sociodemografických charakteristik, jejich bydlení a využívání různých dopravních prostředků (pohlaví, věk, ekonomická aktivita, bydliště, charakter bydliště, charakter zástavby v okolí bydliště, počet osob v domácnosti, nejvyšší ukončené vzdělání, využívání předplatní jízdenky, využívání osobních automobilů, využívání kola apod.). Ve druhé části pak odpovídali na otázky k cestování v jeden vybraný pracovní den, přičemž popsali všechny cesty, které ten den vykonali.

Vzhledem k tomu, že popsané průzkumy byly postaveny na zjišťování chování jednotlivců, tedy nikoli domácností, byly všechny dále vytvářené modely rozhodování postaveny též na principu rozhodování jednotlivců.

Pro další zkoumání byla vybrána skupina výdělečně činných osob²², neboť se jedná o nejpočetnější skupinu osob (přibližně 55 % populace), která vykoná v pracovní den převážnou část cest (přibližně 60 %).

V rámci průzkumů byly pokládány kromě jiných otázky, které je možno považovat za otázky na využívání nástrojů mobility. V případě vlastnictví předplatní jízdenky byla v Praze položena otázka:

Využíváte Vy osobně předplatní jízdenku pro MHD (tramvajenku)?

- *ano, platnou pouze pro Prahu*
- *ano, platnou pouze pro vnější pásma*
- *ano, platnou pro Prahu i vnější pásma*
- *ne, nevyužívám*
- *ne, nevyužívám – mám jízdné zdarma.*

A ve Středočeském kraji byla položena otázka:

Využíváte Vy osobně předplatní časovou (měsíční/čtvrtletní/roční) jízdenku pro Pražskou integrovanou dopravu (PID) nebo pro Středočeskou integrovanou dopravu (SID)?

- *ano, tarif PID*
- *ano, tarif SID*
- *ano, pro oba tarify PID i SID*
- *ne, nevyužívám*
- *ne, nevyužívám – mám jízdné zdarma.*

Předplatní časovou jízdenku PID využíváte:

- *pouze pro Prahu*

²² Jedná se o souhrnnou skupinu pro kategorie: zaměstnanec, živnostník nebo svobodné povolání a podnikatel se zaměstnanci.

- pouze pro vnější pásma
- pro Prahu i vnější pásma.

Zpočátku, aby mohla být pro další výzkum využita případně i spojená databáze obou průzkumů, byl nástroj mobility *vlastnictví předplatní jízdenky* definován jako „ano, vlastní předplatní jízdenku“, pokud respondent odpověděl, že využívá jakýkoli typ předplatní jízdenky nebo že má jízdné zdarma, neboť tím pádem také může využívat VHD a nemusí platit jednotlivé jízdné.

V případě vlastnictví osobního automobilu byla položena následující otázka:

Kolik osobních nebo dodávkových automobilů máte k dispozici pro svoji osobní potřebu jako hlavní uživatel, řidič, případně spolujezdec (ať už služebních nebo soukromých)? (Pokud žádné vozidlo pro daný způsob k dispozici nemáte, запиšte hodnotu 0.)

- *jsem hlavní uživatel:* XY vozidel
- *nejsem hlavní uživatel, ale mohu automobil řídit:* XY vozidel
- *mohu využít pouze jako spolujezdec:* XY vozidel

Zde je potřeba si uvědomit rozdíl mezi vlastnictvím a skutečným disponováním (používáním) osobním automobilem. Vlastnictví osobního automobilu samo o sobě nepředurčuje jeho vlastníka k disponování tímto nástrojem mobility. Disponování dále znamená, že jednotlivec může s osobním automobilem volně nakládat. Toho je zpravidla schopen pouze hlavní uživatel v rámci výše uvedené otázky. Dále byl proto nástroj mobility pojmenován *disponování osobním automobilem* a definován jako „*hlavní uživatel alespoň jednoho osobního nebo dodávkového automobilu*“.

Otázky týkající se dalších nástrojů mobility pokládány nebyly. Vzhledem k tomu, že mezitím došlo k poměrně značnému rozvoji například systémů carsharingu nebo i bikesharingu, bylo by vhodné do příštích průzkumů dopravního chování zařadit i otázky na využívání těchto nástrojů.

5.1.1 Stanovení hypotéz

Modely chování jednotlivců, které jsou popsány v rámci této kapitoly, jsou splněním výzkumných cílů C1, C2 a C3. Na základě předešlých prací shrnutých v kapitole 4 byly pro

faktory ovlivňující rozhodování o volbě nástrojů mobility stanoveny následující hypotézy:

- **Pohlaví:** Muži budou mít tendenci disponovat spíše osobním automobilem oproti ženám. Ženy budou mít naopak tendenci vlastnit předplatní jízdenku.
- **Věk:** Nejvyšší pravděpodobnost disponování osobním automobilem budou mít lidé v produktivním věku, kdy mají rodinu, tedy přibližně mezi 30 a 50 lety věku.
- **Vzdělání:** Lidé s vysokoškolským nebo vyšším odborným vzděláním budou mít tendenci spíše vlastnit předplatní jízdenku.
- **Dostupnost VHD:** Dobrá dostupnost bydliště VHD bude mít pozitivní vliv na vlastnictví předplatní jízdenky. Dobrá dostupnost pracoviště VHD bude mít pozitivní vliv na vlastnictví předplatní jízdenky.
- **Dostupnost IAD:** Dobrá dostupnost bydliště IAD bude mít pozitivní vliv na vlastnictví předplatní jízdenky. Dobrá dostupnost pracoviště IAD bude mít pozitivní vliv na vlastnictví předplatní jízdenky.
- **Vzájemné působení dvou sledovaných nástrojů mobility:** Nástroje budou vystupovat jako substituty, tedy disponování osobním automobilem bude snižovat pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky a naopak.

5.1.2 Metodologie – teorie diskrétní volby

Pro model chování jednotlivců byla použita tzv. *teorie diskrétní volby*. V následující části bude krátce popsána metodologie tohoto přístupu. Tento krátký výklad bude sledovat díla Ben-Akivy a Lermana (1985) a Traina (2009).

Proces rozhodování je možné při použití teorie diskrétní volby rozdělit do pěti na sebe navazujících kroků: definice rozhodovacího problému, vytvoření alternativ, zhodnocení atributů alternativ, samotný výběr alternativy a implementace tohoto výběru. Příkladem může být člověk, který se právě přestěhoval do nového bydliště a rozhoduje se o způsobu dojíždění do práce.

Vzhledem ke vzdálenosti bydliště a pracoviště si dopředu stanoví, že jedinými dvěma možnými alternativami jsou osobní automobil nebo veřejná doprava. Pak si zjistí co nejvíce informací o těchto dvou způsobech cestování. V případě osobního automobilu

se může jednat o vzdálenost, cestovní dobu, cenu pohonných hmot v okolí, možnost parkovat na pracovišti nebo cenu tohoto parkování. U veřejné dopravy pak může zjišťovat cestovní dobu, interval, počet přestupů, cenu jednotlivé nebo předplatní jízdenky. Zváží tyto atributy, tedy například porovná cestovní dobu a finanční náklady na přemístění, a rozhodne se pro jednu z těchto alternativ. Následně již provede kroky, kterými toto rozhodnutí implementuje, tedy koupí si například předplatní jízdenku na VHD a začne dojíždět.

Zpravidla určitá teorie volby pracuje se čtyřmi základními elementy:

- rozhodovatel
- alternativy
- atributy alternativ
- rozhodovací pravidlo.

Rozhodovatel je souhrnný název pro jednotku, která provádí rozhodování. Touto jednotkou může být jednotlivec, ale může se také jednat o skupinu osob. Typicky je možné řešit rozhodování rodin, obchodních společností nebo vládních organizací, ale také samospráv. Každý jednotlivec se obvykle poněkud liší ve svých preferencích a pokud je účelem modelování rozhodování předpovídat chování agregované poptávky pro určitou skupinu jednotlivců, je nutné tyto rozdíly v preferencích řešit.

Rozhodování je prováděno výběrem z neprázdné množiny alternativ. Prostředí, ve kterém se rozhodovatel nachází, utváří univerzální množinu alternativ, přičemž každý rozhodovatel se rozhoduje z určité podmnožiny této univerzální množiny. Tyto jednotlivé podmnožiny jsou tvořeny alternativami, které jsou pro daného rozhodovatele dostupné. U těchto alternativ je zároveň předpokládáno, že jsou rozhodovateli známy. Vždy platí, že množina alternativ je vyčerpávající, tedy že obsahuje všechny možné alternativy, ze kterých může rozhodovatel vybírat. Dále platí, že každé dvě alternativy se vzájemně vylučují, tedy že rozhodovatel vybírá vždy právě jednu alternativu. Množina alternativ je vždy konečná, alternativy je tedy možné indexovat přirozenými čísly.

Pro hodnocení jednotlivých alternativ je nutné získat informace o attributech jednotlivých alternativ. Tyto informace mají zpravidla podobu vektoru hodnot sledovaných atributů pro danou alternativu. Hodnoty atributů je možné měřit v libovolné škále, tedy nominální, ordinální, intervalové nebo poměrové.

Rozhodovací pravidla mohou být rozdělena do čtyř kategorií. První kategorií je dominance, kdy alternativa je dominantní ve vztahu k jiné, pokud je lepší alespoň v jednom atributu a není horší v žádném z ostatních atributů. Toto pravidlo je relativně jednoduché a obecně přijímané, avšak často nevede k jednoznačnému rozhodnutí.

Druhou kategorií je satisfakce, která pro každý atribut předpokládá určitou úroveň, která musí být splněna. Určitá alternativa může být eliminována, pokud není splněna předepsaná úroveň u hodnoty alespoň jednoho atributu. Opět tento přístup obvykle nevede k jednoznačnému rozhodnutí.

Třetí kategorií jsou tzv. lexikografická pravidla. Předpokladem je srovnání atributů dle jejich důležitosti. Hodnocení se pak provádí postupně od nejdůležitějšího atributu. Srovnají se hodnoty u tohoto atributu a vybere se alternativa s nejlepší hodnotou tohoto atributu. Pokud je takových alternativ více, poměřují se u druhého nejdůležitějšího atributu. Takto se postupuje do té doby, než je možné určit jednu nejlepší alternativu.

Čtvrtou kategorií je užitek. Tento přístup vychází z předpokladu souměřitelnosti jednotlivých atributů. To znamená, že atraktivitu jedné alternativy vyjádřenou vektorem hodnot atributů je možné převést pomocí určité funkce na skalární veličinu. Užitek je obecně míra, kterou se snaží rozhodovatel svým rozhodnutím maximalizovat.

Teorie racionální volby vysvětluje chování jednotlivců tím způsobem, že rozumně jednající jednotlivec vykazuje konzistentní a tranzitivní preference u nabízených alternativ. Konzistentní preference znamenají, že při opakujících se situacích, které vykazují naprosto stejné okolnosti a při nichž mají alternativy naprosto stejné hodnoty atributů, jednotlivec stále opakuje tentýž výběr. Tranzitivní preference splňují následující pravidlo: Pokud je alternativa A z pohledu daného jednotlivce preferována před alternativou B a alternativa B před alternativou C, bude jednotlivec též preferovat alternativu A před alternativou C.

Avšak v průběhu času bylo nutné přijít s vysvětlením, proč některé preference rozhodovatelů nejsou konzistentní nebo nejsou tranzitivní. Nekonzistence měla podobu buď různých výběrů při opakovaném rozhodování stejného rozhodovatele, nebo se dva rozhodovatelé při stejné množině alternativ, stejných hodnotách atributů a stejných sociodemografických charakteristikách rozhodovali jinak.

Jednou z odpovědí na tyto problémy se stal *model náhodného užitku* (RUM – random utility model). Tento model předpokládá, že potenciální užitek z výběru dané alternativy

není deterministický, ale má povahu náhodné veličiny. Zdroje této náhodnosti je možné rozdělit do čtyř kategorií – nepozorované atributy, nepozorované variace preferencí, chyby v měření a nekompletní informace a instrumentální proměnné.

Univerzální množina alternativ bývá označována jako C a rozhodovatel indexem n . Množina alternativ, ze které si může vybírat daný rozhodovatel n , se pak označuje C_n . Tato množina obsahuje J alternativ. Užitek, který může rozhodovatel n získat z výběru alternativy j , je možné označit U_{nj} , $j = 1, \dots, J$. Rozhodovatel si vybere alternativu s pro něj největším užitekem. Tento model chování je možné zapsat takto: Vyber alternativu i právě tehdy, když $U_{ni} > U_{nj} \forall j \neq i$.

Při modelování chování je však do modelu možno zahrnout jen některé atributy alternativ, které je možné popsat jako vektor $\mathbf{x}_{nj} \forall j$, a některé atributy rozhodovatele, které je možné označit jako vektor \mathbf{s}_n . Je pak možné vytvořit funkci, která vytváří vztah mezi těmito proměnnými a užitekem. Tuto funkci je možné označit jako $V_{nj} = V(\mathbf{x}_{nj}, \mathbf{s}_n)$ a obvykle se nazývá *reprezentativní užitek* nebo *systematická část užitku*.

Je zřejmé, že platí $V_{nj} \neq U_{nj}$. Užitek je rozložen podle vztahu $U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj}$ na systematickou a náhodnou část. Tato náhodná část reprezentuje všechny faktory způsobující náhodnou povahu užitku. Náhodné části užitku pro jednotlivé alternativy opět tvoří vektor $\boldsymbol{\varepsilon}_n = (\varepsilon_{n1}, \dots, \varepsilon_{nJ})$.

Pravděpodobnost, že rozhodovatel n vybere alternativu i , má hodnotu

$$\begin{aligned} P_{ni} &= \Pr(U_{ni} > U_{nj} \forall j \neq i) \\ &= \Pr(V_{ni} + \varepsilon_{ni} > V_{nj} + \varepsilon_{nj} \forall j \neq i) \\ &= \Pr(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} < V_{ni} - V_{nj} \forall j \neq i). \end{aligned} \tag{5.1}$$

Vztah (5.1) ukazuje, že výsledná pravděpodobnost záleží pouze na rozdílu velikostí užiteků, nikoli na jejich absolutní velikosti. Také to znamená, že do reprezentativní složky užitku vstupují atributy jen v takové formě, která zachycuje rozdílné působení atributu na reprezentativní složky užitku jednotlivých alternativ. Pokud atribut působí na všechny reprezentativní složky všech alternativ shodně, nemá smysl takový atribut do modelu zahrnovat.

Je důležité uvést, že náhodná část není definována nezávisle, ale vždy závisí na složení systematické části užitkové funkce. Při využití vektoru sdružené hustoty

pravděpodobnosti $f(\boldsymbol{\varepsilon}_n)$ je možné pravděpodobnost výběru alternativy i rozhodovatelem n přepsat takto:

$$\begin{aligned} P_{ni} &= \Pr(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} > V_{ni} - V_{nj} \forall j \neq i) \\ &= \int_{\boldsymbol{\varepsilon}} I(\varepsilon_{nj} - \varepsilon_{ni} < V_{ni} - V_{nj} \forall j \neq i) f(\boldsymbol{\varepsilon}_n) d\boldsymbol{\varepsilon}_n \end{aligned} \quad (5.2)$$

V tomto vztahu je $I(\cdot)$ indikátorová funkce nabývající hodnoty 1, když je podmínka v argumentu funkce splněna, a hodnoty 0, pokud podmínka v závorce splněna není. Jednotlivé modely se liší definicí sdružené pravděpodobnosti $f(\boldsymbol{\varepsilon}_n)$.

V případě modelu logit je vektor $\boldsymbol{\varepsilon}_n$ n -ticí vzájemně nezávislých a stejně rozdělených náhodných veličin rozdělených podle Gumbelova rozdělení. Pak vztah uvedený v rovnici (5.2) přejde v uzavřenou formu

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_j e^{V_{nj}}} \quad (5.3)$$

Je důležité ještě jednou uvést, že výsledná pravděpodobnost, že rozhodovatel n si vybere alternativu i , se váže na daného rozhodovatele s jeho atributy. Avšak v praxi jsou požadovaným výsledkem modelů hodnoty pravděpodobností za celé určité skupiny jednotlivců, které pak znamenají, jaká část příslušníků určité skupiny si danou alternativu zvolí.

Nejpřesnější metodou je vyčíslení pro celou populaci. Tento přístup předpokládá, že je možné získat potřebné hodnoty atributů pro každého příslušníka dané populace. Po získání těchto hodnot jsou pro každého příslušníka populace vypočteny pravděpodobnosti volby jednotlivých alternativ. Z těchto hodnot je pak možné pro každou alternativu vypočítat skrze prostý průměr pravděpodobnost výběru za celou populaci a tyto hodnoty pak odpovídají středním hodnotám podílů jednotlivých alternativ v celé populaci.

Použití výpočet pro každého jednotlivce z populace však není vždy možné, neboť se jedná o metodu náročnou jednak výpočetně, jednak z hlediska získání dat pro výpočet. Někdy je tento způsob výpočtu dokonce nemožný z důvodu nemožnosti zjistit hodnoty všech atributů pro každého jednotlivce z populace. Proto se využívá různých metod agregace.

Nejjednodušším způsobem je vytvoření průměrného jednotlivce z populace, vypočtení podílu jednotlivých alternativ pro tohoto jednotlivce a přiřazení těchto hodnot celé populaci. Tento přístup je však věcně i výpočetně nepřesný. Obecně platí, že při nízkých hodnotách pravděpodobnosti výběru daných alternativ dochází k podhodnocování průměrných pravděpodobností a při vysokých hodnotách naopak k nadhodnocování.

Problematické je také intuitivní přijetí tohoto přístupu. Jedním ze znaků jednotlivce může být například pohlaví, které se zpravidla uvažuje jako binární proměnná. Pokud by se vzal v úvahu náhodný vzorek z obyvatel ČR, tak v něm bude přibližně 51 % žen. To znamená, že průměrný jednotlivec by měl být z 51 % žena, k čemuž ve skutečnosti nemůže dojít.

Dalším přístupem je segmentace, která je využívána, pokud je vysvětlujících proměnných relativně malý počet a tyto navíc nabývají jen několik málo hodnot. Populace je rozdělena do segmentů, přičemž každý segment obsahuje pouze jednotlivce se stejnými hodnotami všech znaků. Například při třech znacích, přičemž každý může nabývat pouze 4 hodnot, se jedná celkově o 64 segmentů. Pro každý segment jsou vypočteny pravděpodobnosti výběru jednotlivých alternativ. Výsledné pravděpodobnosti pro celou populaci jsou pak vypočteny pomocí váženého průměru, kde jednotlivé váhy jsou počty příslušníků jednotlivých segmentů.

Nejoblíbenější metodou je výpočet podílů jednotlivých alternativ na vzorku z populace. Tento vzorek může být shodný se vzorkem, na kterém byl model vypočten, ale nemusí tomu tak být. Každý rozhodovatel n ze vzorku má přiřazenou váhu w_n , která reprezentuje jemu odpovídající počet rozhodovatelů v populaci. Odhad celkového počtu rozhodovatelů v populaci, kteří si vybrali alternativu i , je pak dán vztahem:

$$\hat{N}_i = \sum_n w_n P_{ni} \quad (5.4)$$

Průměrná pravděpodobnost pro alternativu i je pak vypočtena jako \hat{N}_i/N , kde N reprezentuje počet rozhodovatelů v populaci.

Pro predikce jsou používány shodné metody jako pro agregaci, avšak jsou doplněny o přístupy zohledňující faktor času. V případě použití výpočtu na vzorku z populace se mění jednak hodnoty proměnných u každého rozhodovatele ze vzorku, jednak váhy popisující zastoupení jednotlivých rozhodovatelů ze vzorku v populaci. V segmentaci jsou změny v čase reprezentovány změnami počtů příslušníků jednotlivých skupin.

Hodnoty vysvětlujících proměnných se z principu nemění, ty definují jednotlivé segmenty.

5.1.3 Příprava dat

Základem pro tvorbu modelů rozhodování jednotlivců byla spojená databáze jednotlivých cest z průzkumů dopravního chování z let 2015 a 2016, které byly podrobněji popsány na začátku kapitoly 5.1. Pro zpracování dat a vyhodnocení modelů byl využit programovací jazyk R (R Core Team, 2019) v rámci vývojového prostředí RStudio (RStudio Team, 2016).

Jak již bylo uvedeno v téže kapitole, modely byly omezeny pouze na výdělečně činné osoby. Dále s ohledem na dostupná data a s ohledem na předpoklad užívaný v dopravně inženýrské praxi, že osoby, které v rozhodný den průzkumu nevykonaly žádnou cestu, cestují v průměrný pracovní den „v průměru“ stejně jako osoby, které v rozhodný den cestovaly, byly dále sledovány pouze ty osoby, které v rozhodný den alespoň jednu cestu vykonaly.

Pro výpočet indikátorů potenciální dostupnosti byla pro každou sledovanou osobu sledována vždy první cesta z vlastního bydliště na vlastní pracoviště. Výpočet indikátorů potenciální dostupnosti probíhal na základě dopravního modelu Pražského metropolitního regionu provozovaného TSK a popsaných průzkumů dopravního chování. Díky struktuře zdrojových průzkumů dopravního chování byla v rámci průzkumu každé cestě přiřazena odpovídající dvojice zón. Této dvojici pak byly z dopravního modelu přiřazeny odpovídající hodnoty celkové cestovní doby VHD (tzv. „ode dveří ke dveřím“) a cestovní doby na silniční síti pro IAD.

Podle Sarlase a Axhausena (2018) byly spočteny čtyři indikátory dostupnosti:

$$\begin{aligned} A_{i,VHD}^{PRAC} &= \sum_{j=1}^N PRAC_j * f(JRT_{ij}) \\ A_{j,VHD}^{OBY} &= \sum_{i=1}^N OBY_i * f(JRT_{ij}) \\ A_{i,IAD}^{PRAC} &= \sum_{j=1}^N PRAC_j * f(TTC_{ij}) \end{aligned} \tag{5.5}$$

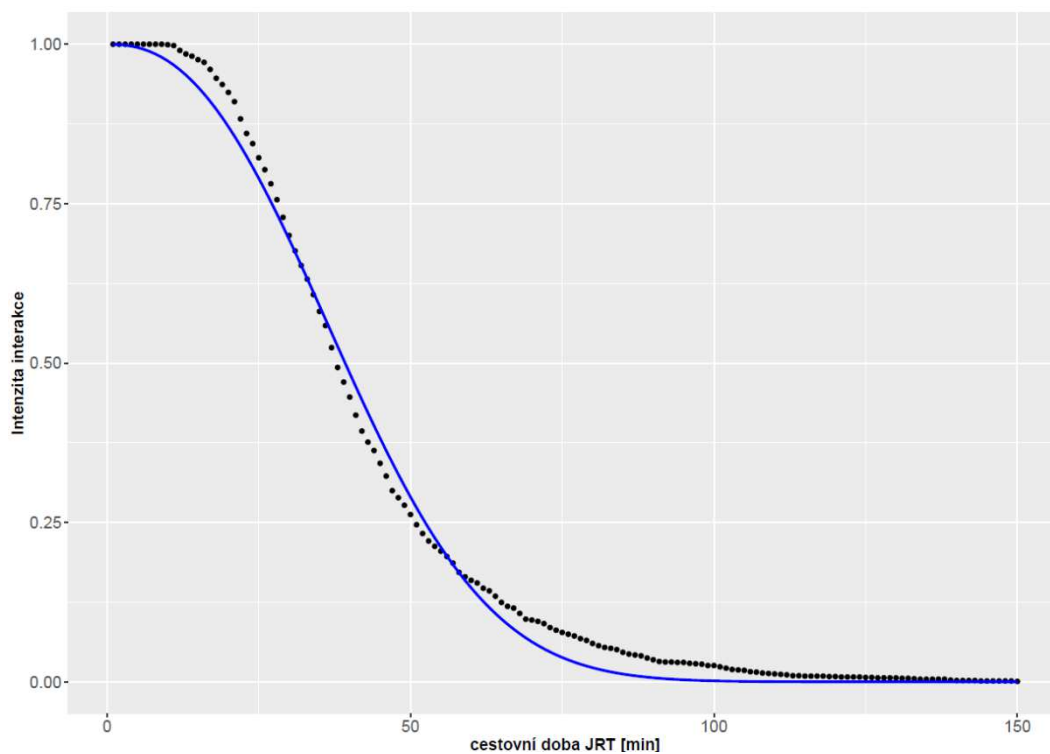
$$A_{j,IAD}^{OBY} = \sum_{i=1}^N OBY_i * f(TTC_{ij})$$

První dvojice indikátorů popisuje potenciální dostupnost v rámci VHD, druhá dvojice v rámci IAD. A_i^{PRAC} značí potenciální dostupnost pracovních míst (z pohledu zdroje cesty z bydliště na pracoviště), A_j^{OBY} pak potenciální dostupnost populace (z pohledu cíle cesty z bydliště na pracoviště). $PRAC$ označuje počet pracovních míst v jednotlivých zónách, OBY pak počet obyvatel v zónách dopravního modelu. JRT_{ij} představuje celkovou cestovní dobu „ode dveří ke dveřím“ mezi dvojicí zón, TTC_{ij} představuje cestovní dobu po modelované části silniční sítě pro danou dvojici zón. Dostupnost je počítána na úrovni zón dopravního modelu.

Pro určení předpisu funkce transformující generalizované náklady byl použit princip analýzy přežití v podobě popsané v závěru kapitoly 2.3. Pro funkci transformující generalizované náklady byla zvolena negativní exponenciální funkce v podobě, v jaké ji použili Halás et al. ve svém článku (2014), přičemž bylo nutné kalibrovat parametry této funkce a_1 a a_2 . Funkce měla tvar:

$$f(c_{ij}) = \exp(-a_1 c_{ij}^{a_2}) \quad (5.6)$$

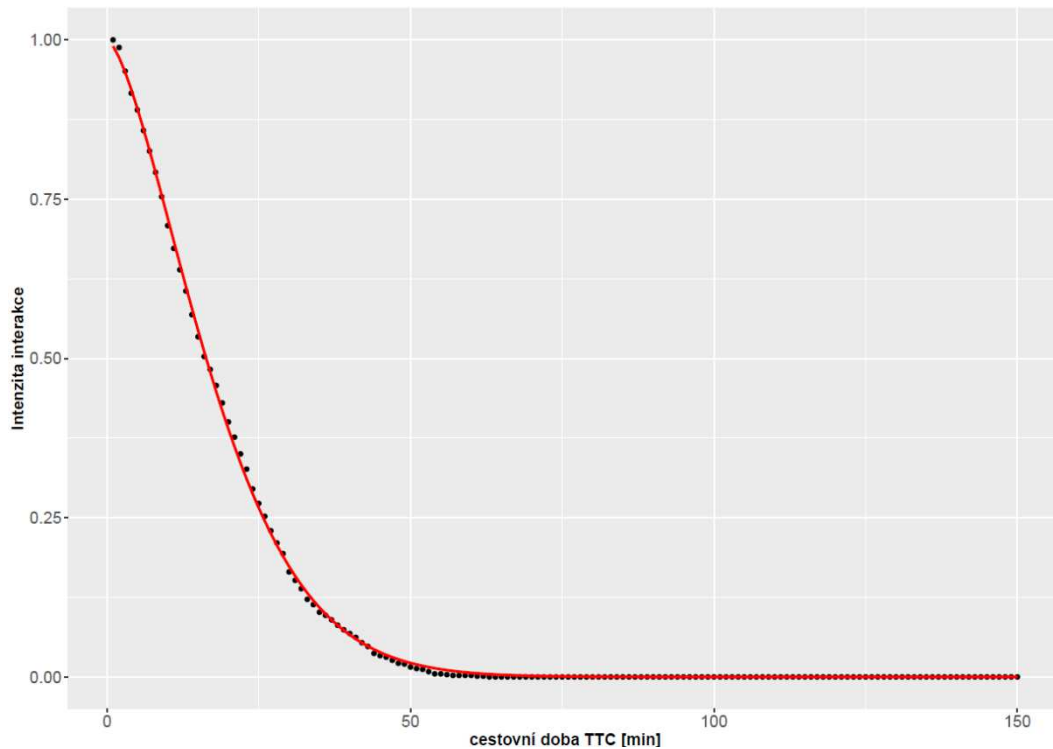
Pro určení parametrů funkce byla užita metoda nelineárních nejmenších čtverců a pro generalizované hodnoty byla použita hodnota JRT_{ij} . V případě VHD byly výsledné parametry $a_1 = 0,000107$ a $a_2 = 2,391$. Srovnání empirických datových bodů a výsledné funkce je zobrazeno na následujícím obrázku



Obrázek 16 Průběh funkce distance-decay pro VHD

Zdroj: Vlastní zpracování

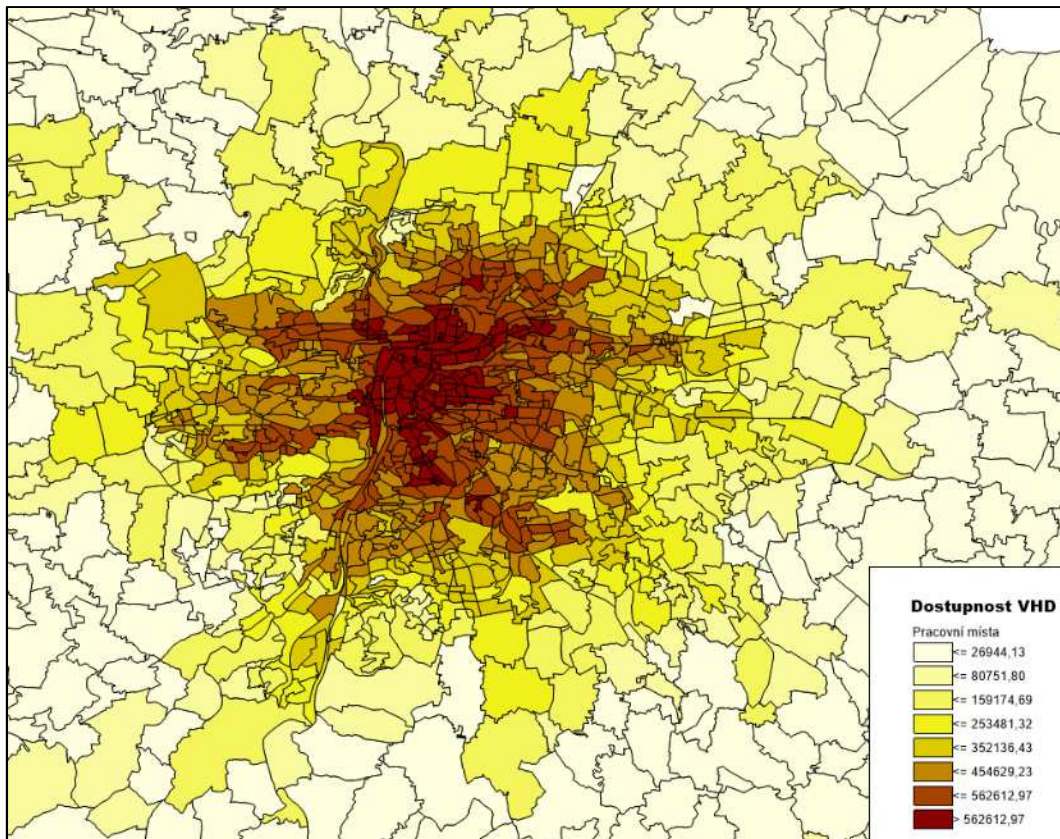
Pro IAD byla použita analogická metoda, přičemž pro hodnotu generalizovaných nákladů byla použita hodnota TTC_{ij} . Výsledné parametry byly $a_1 = 0,009767$ a $a_2 = 1,526$. Srovnání empirických datových bodů a výsledné funkce je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obrázek 17 Průběh funkce distance-decay pro IAD

Zdroj: Vlastní zpracování

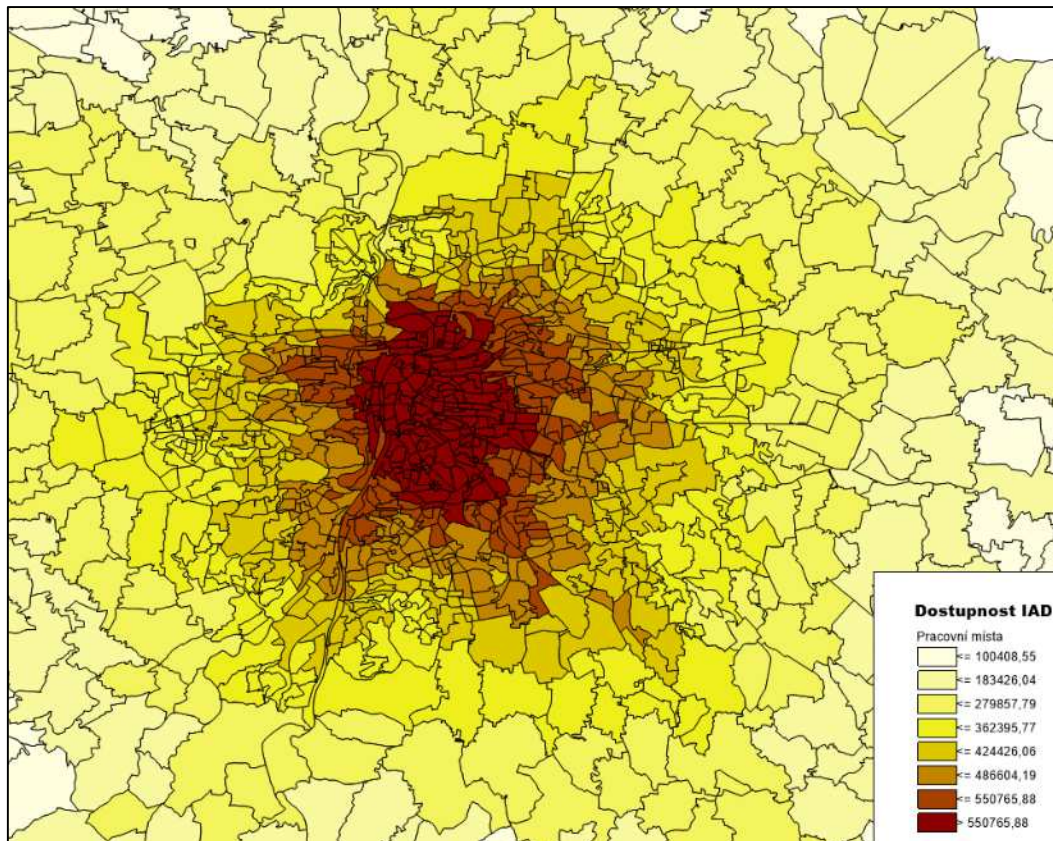
Po určení koeficientů bylo možné spočítat čtyři výše uvedené indikátory dostupnosti. Na následujících dvou obrázcích jsou na centrální části dopravního modelu Pražského metropolitního regionu (Praha a nejbližší okolí) ukázány obecné rozdíly mezi potenciální dostupností VHD a potenciální dostupností IAD. V obou případech se jedná o dostupnost pracovních míst.



Obrázek 18 Potenciální dostupnost pracovních míst (VHD)

Zdroj: Vlastní zpracování

Z obrázku s potenciální dostupností VHD je možné rozpoznat základní osy VHD v rámci Prahy. Nejzřetelnější jsou jednotlivé linky metra, dále je možné rozeznat i některé tramvajové trati. V regionu jsou pak rozpoznatelné jednotlivé hlavní osy železniční dopravy, ale rovněž také autobusové dopravy. Tento grafický efekt dokládá skutečnost, že cestovní doba ve veřejné dopravě nezávisí pouze na době strávené ve vozidle, ale také kromě jiného na době strávené přestupováním a čekáním na jednotlivé spoje.



Obrázek 19 Potenciální dostupnost pracovních míst (IAD)

Zdroj: Vlastní zpracování

V případě potenciální dostupnosti IAD je efekt jednotlivých hlavních os zřetelně nižší a je možné říci, že změny v rámci území jsou hladší. Také je vidět, že maximální hodnoty si u obou indikátorů přibližně odpovídají, ale u VHD dochází k relativně většímu poklesu u hůře dostupných zón. Nejmarkantnější se jeví tyto rozdíly u zón sousedících s Prahou.

Z dostupných datových zdrojů byly pro další analýzu vybrány následující proměnné, jejichž hodnoty byly zjištěny pro každou osobu ze zkoumaného vzorku:

- pohlaví
- věk (také ve druhé mocnině)
- počet členů domácnosti
- vzdělání (zda má titul VŠ nebo VOŠ)
- vlastnictví předplatní jízdenky
- disponování osobním automobilem

- dva indikátory dostupnosti pracovních míst pro zónu jejich bydliště (VHD a IAD)
- dva indikátory dostupnosti obyvatel pro zónu jejich pracoviště (VHD a IAD).

V následující tabulce jsou uvedeny sumární charakteristiky jednotlivých proměnných vzorku po výše uvedených krocích přípravy dat. Celkově je ve vzorku 2495 pozorování.

Tabulka 4 Sumární charakteristiky použitých proměnných

Proměnná	Průměr	Sm. odchylka	Min.	Max.
Dostupnost pracovních míst VHD	336376	215865	0,03	706751
Dostupnost populace VHD	583145	275071	271	934723
Dostupnost pracovních míst IAD	381279	175192	21463	624218
Dostupnost populace IAD	649437	195727	37285	854720
Věk	41,65	12,25	19	85
Muž	0,57	0,50	0	1
Počet členů domácnosti	2,66	1,24	1	18
Titul VŠ nebo VOŠ	0,43	0,50	0	1
Disponování osobním automobilem	0,61	0,49	0	1
Vlastnictví předplatní jízdenky	0,68	0,47	0	1

Zdroj: Vlastní zpracování

Na závěr je pro stejný vzorek dat uvedena ještě tabulka popisující vztah mezi vybraným módem pro cestu z bydliště na pracoviště a jednotlivými nástroji mobility, kterými jednotlivci ve vzorku disponují.

Tabulka 5 Použitý mód pro cestu z domova do práce a využívané nástroje mobility

Nástroj mobility	Použitý mód (cesta z domova do práce)						Suma
	IAD	IAD + VHD	VHD	Jiné	Kolo	Pěšky	
Žádný nástroj	32	1	48	1	7	42	131
Pouze předplatní jízdenka	29	16	768	3	2	35	853
Pouze automobil	576	4	30	2	19	34	665
Oba nástroje	193	60	571	0	3	19	846
Suma	830	81	1417	6	31	130	2495

Zdroj: Vlastní zpracování

5.1.4 Binární modely volby nástrojů mobility

Nejprve byly na vzorku, jehož příprava byla popsána v předchozí kapitole, zpracovány binární modely volby – jeden pro vlastnictví předplatní jízdenky a druhý pro disponování osobním automobilem. Vysvětlovanou proměnnou byla v obou případech proměnná

popisující disponování příslušným nástrojem mobility. Jedna z raných verzí modelu pro předplatní jízdenku byla taktéž publikována na konferenci Transport Means 2019 (Kříž, Janoš, 2019). V následujícím textu bude nejprve popsán model pro vlastnictví předplatní jízdenky a následně model pro disponování osobním automobilem.

Pro výpočty modelů byl v rámci prostředí R použit balíček Apollo (Hess, Palma, 2019). Následující tabulka ukazuje pojmenování jednotlivých atributů v datovém setu a formální matematické úpravy před vlastním výpočtem modelů. Tyto úpravy byly provedeny zejména pro lepší souměřitelnost jednotlivých výsledných koeficientů modelů a na základě rešerše literatury.

Tabulka 6 Formální úpravy proměnných a jejich označení v R

Proměnná	Dodatečná úprava	Označení proměnné v R
Dostupnost pracovních míst VHD	vyděleno 10^6	home_A_emp1_PT_e06
Dostupnost populace VHD	vyděleno 10^6	work_A_pop_PT_e06
Dostupnost pracovních míst IAD	vyděleno 10^6	home_A_emp1_Car_e06
Dostupnost populace IAD	vyděleno 10^6	work_A_pop_Car_e06
Věk	vyděleno 10, uvažováno jako polynom druhého stupně	age_div10, age_sq_div100
Muž	žádná	gender
Počet členů domácnosti	logaritmičká transformace přirozeným logaritmem	household_size_log
Titul VŠ nebo VOŠ	žádná	college
Disponování osobním automobilem	žádná	car_main_user
Vlastnictví předplatní jízdenky	žádná	PT_season

Zdroj: Vlastní zpracování

Výsledky získaných modelů je pak možné použít pro predikci pravděpodobnosti disponování příslušným nástrojem mobility na základě použitých vysvětlujících proměnných v jednotlivých modelech. Predikce je použito v následujících kapitolách pro zobrazení vlivu některých proměnných na pravděpodobnost disponování určitým nástrojem mobility při zachování konstantních hodnot ostatních vysvětlujících proměnných (tzv. podmínka *ceteris paribus*).

5.1.4.1 Model pro vlastnictví předplatní jízdenky

V modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky byl tedy použit binární logitový model, přičemž v podobě pro zpracování v balíčku Apollo měly reprezentativní složky užítka následující podobu²³:

$$\begin{aligned} V[['NoPT']] &= asc_NoPT = 0 \\ V[['PT']] &= asc_PT + \\ &\quad b_home_A_empl_PT_e06 * home_A_empl_PT_e06 + \\ &\quad b_work_A_pop_PT_e06 * work_A_pop_PT_e06 + \\ &\quad b_home_A_empl_Car_e06 * home_A_empl_Car_e06 + \\ &\quad b_work_A_pop_Car_e06 * work_A_pop_Car_e06 + \\ &\quad b_age_div10 * age_div10 + \\ &\quad b_age_sq_div100 * age_sq_div100 + \\ &\quad b_gender * gender + \\ &\quad b_household_size_log * household_size_log + \\ &\quad b_college * college + \\ &\quad b_car_main_user * car_main_user \end{aligned}$$

Do výchozího modelu byly použity všechny proměnné podle výše uvedeného vztahu, jednalo se tedy o model lineární v parametrech.

²³ Členy začínající „asc_“ označují alternativně specifické konstanty, členy začínající „b_“ označují koeficienty u jednotlivých proměnných. Vzhledem k tomu, že všechny vysvětlující proměnné jsou sociodemografické, tedy mají pro všechny alternativy u určitého jednotlivce konstantní hodnotu, je potřeba je doplnit alternativně specifickými koeficienty, které mohou zachytit rozdíly vlivu těchto atributů na užitek jednotlivých alternativ. Aby model zachycoval pouze rozdíly mezi užitky jednotlivých alternativ, musely být u jedné alternativy alternativně specifické koeficienty a alternativně specifická konstanta stanoveny jako rovny nule. Bylo tak učiněno u alternativy „nevlastní předplatní jízdenku“.

Tabulka 7 Výsledky binárního logitového modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky se všemi dostupnými nezávisle proměnnými

Proměnná	Odhad	Sm. chyba	Sign.
Konstanta	2,430	0,690	***
Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	1,163	0,717	
Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	2,281	0,469	***
Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	0,688	0,902	
Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	1,153	0,677	.
Věk [r/10]	-1,549	0,309	***
Věk - druhá mocnina [r ² /100]	0,176	0,035	***
Muž	-0,255	0,112	*
ln (počet členů domácnosti)	-0,149	0,110	*
Titul VŠ nebo VOŠ	0,479	0,108	***
Disponování osobním automobilem	-1,462	0,128	***
ρ^2 (Rho-square)			0,339
Počet pozorování			2495

Signifikantní na hladině: 0,1% ***; 1% **; 5% *; 10% .

Zdroj: Vlastní zpracování

Výchozí model byl dále upravován tak, že byly postupně odebírány z modelu proměnné, jejichž vliv nebyl statisticky významný. Po každém odebrání proměnné byl model přepočítán. Za výsledný byl považován model, ve kterém již vliv všech proměnných byl statisticky významný alespoň na hladině významnosti 5 %.

Tabulka 8 Výsledky konečného binárního logitového modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky

Proměnná	Odhad	Sm. chyba	Sign.
Konstanta	2,792	0,662	***
Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	1,819	0,253	***
Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	3,028	0,204	***
Věk [r/10]	-1,613	0,306	***
Věk - druhá mocnina [r ² /100]	0,182	0,034	***
Muž	-0,251	0,111	*
Titul VŠ nebo VOŠ	0,472	0,108	***
Disponování osobním automobilem	-1,451	0,127	***
ρ^2 (Rho-square)			0,337
Počet pozorování			2495

Signifikantní na hladině: 0,1% ***; 1% **; 5% *; 10% .

Zdroj: Vlastní zpracování

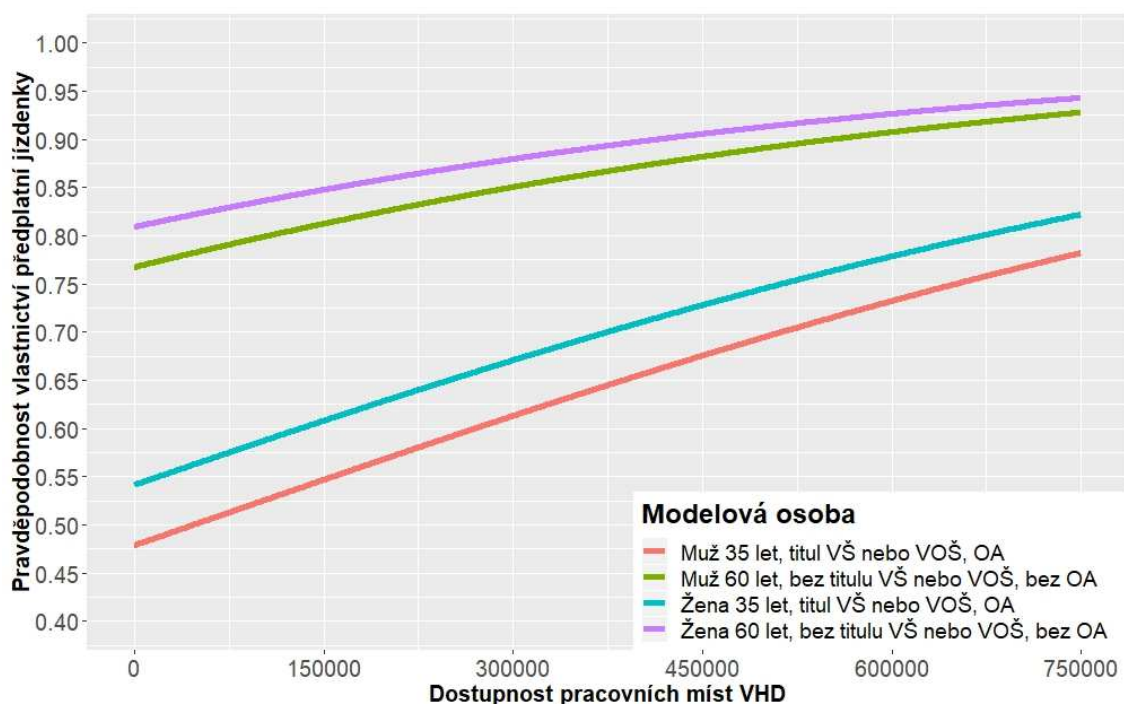
Srovnání hodnot p^2 u obou modelů ukazuje, že model s menším počtem proměnných je z hlediska schopnosti vysvětlení závisle proměnné skoro stejně dobrý jako model se všemi proměnnými.

Obě míry dostupnosti VHD mají pozitivní vliv na vysvětlovanou proměnnou, čímž se potvrzuje platnost příslušné hypotézy z kapitoly 5.1.1. Vzhledem k tomu, že funkce transformující generalizované náklady použitá do výpočtu potenciální dostupnosti byla v obou dvou případech stejná²⁴, je možné tvrdit, že dostupnost pracoviště VHD má větší vliv než dostupnost VHD bydliště.

Pro zobrazení vlivu dostupnosti pracovních míst VHD je možné vytvořit graf zobrazující závislost pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky (predikované na základě vyhodnoceného modelu) na dostupnosti pracovních míst VHD. Tato závislost je ukázána na následujícím obrázku pro čtyři modelové osoby:

- žena 35 let, s titulem VŠ nebo VOŠ, disponující osobním automobilem, její pracoviště má průměrnou dostupnost populace VHD
- žena 60 let, bez titulu VŠ nebo VOŠ, nedisponující osobním automobilem, její pracoviště má průměrnou dostupnost populace VHD
- muž 35 let, s titulem VŠ nebo VOŠ, disponující osobním automobilem, jeho pracoviště má průměrnou dostupnost populace VHD
- muž 60 let, bez titulu VŠ nebo VOŠ, nedisponující osobním automobilem, jeho pracoviště má průměrnou dostupnost populace VHD.

²⁴ Avšak lišil se bod zájmu ve vztahu k přemístění z domova na pracoviště. V prvním případě se jednalo o pohled „ze zdroje“, v druhém o pohled „z cíle“.



Obrázek 20 Závislost pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky na dostupnosti pracovních míst VHD pro čtyři modelové osoby podle výsledků binárního modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky

Zdroj: Vlastní zpracování

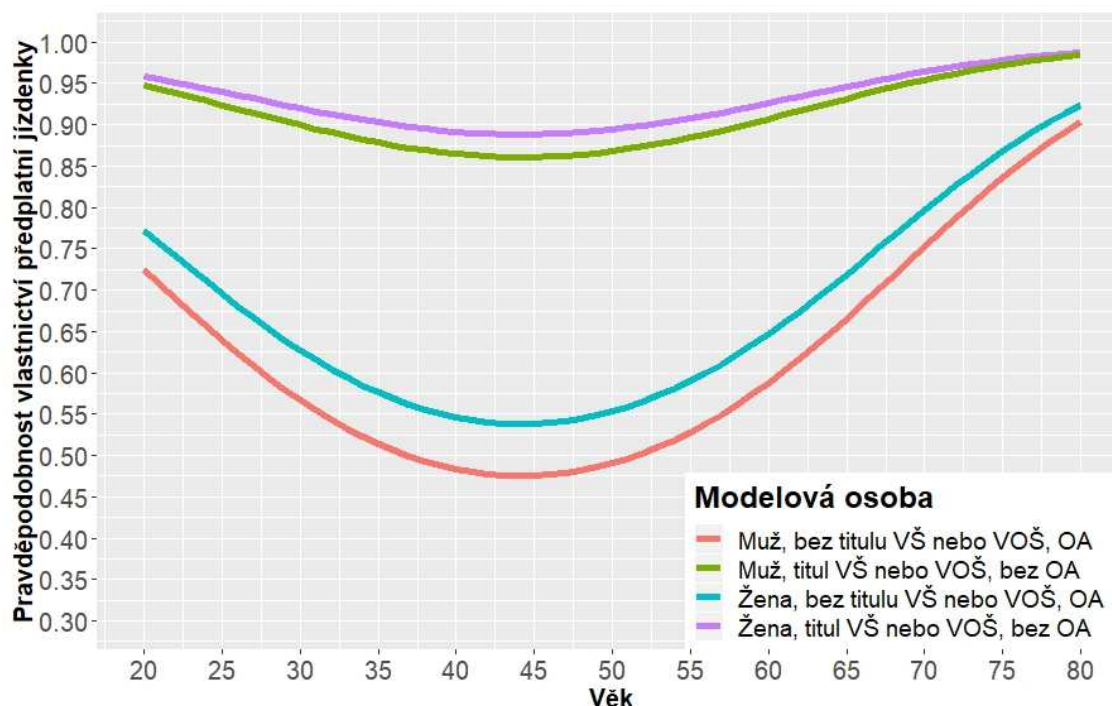
Z grafu je patrné, že u starších osob, které nemají titul VŠ nebo VOŠ a nedisponují osobním automobilem, je při nadprůměrné dostupnosti pracovních míst VHD pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky více než 85 %, zatímco u osob mezi 30 a 40 lety je tato pravděpodobnost v rozmezí přibližně 60 až 80 %. Avšak potvrzuje se pozitivní souvislost pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky a dostupnosti pracovních míst VHD.

Vliv věku se ukázal jako nemonotónní. S rostoucím věkem pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky nejdříve klesá až do 44 let, pak opět roste. Tento průběh potvrzuje hypotézu ohledně věku.

Pro zobrazení vlivu věku je opět možné vytvořit graf zobrazující závislost pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky (predikované na základě vyhodnoceného modelu) na věku jednotlivce. Tato závislosti je ukázána na následujícím obrázku pro čtyři modelové osoby:

- žena, bez titulu VŠ nebo VOŠ, disponující osobním automobilem, její bydliště i pracoviště mají průměrnou dostupnost VHD

- žena, s titulem VŠ nebo VOŠ, nedisponující osobním automobilem, její bydliště i pracoviště mají průměrnou dostupnost VHD
- muž, bez titulu VŠ nebo VOŠ, disponující osobním automobilem, jeho bydliště i pracoviště mají průměrnou dostupnost VHD
- muž, s titulem VŠ nebo VOŠ, nedisponující osobním automobilem, jeho bydliště i pracoviště mají průměrnou dostupnost VHD.



Obrázek 21 Závislost pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky na věku pro čtyři modelové osoby podle výsledků binárního modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky

Zdroj: Vlastní zpracování

Graf ukazuje, že u jednotlivců bez titulu VŠ nebo VOŠ, kteří disponují osobním automobilem, má věk znatelnější vliv než u jednotlivců s titulem VŠ nebo VOŠ, kteří nedisponují osobním automobilem. U všech modelových osob je průběh podobný²⁵, což plyne i z vlastností logitového modelu.

Vliv proměnné popisující pohlaví je záporný, tedy muži spíše nemají předplatní jízdenku v porovnání se ženami. Příslušná hypotéza z bodu 5.1.1 byla potvrzena.

²⁵ S rostoucím věkem dochází nejdříve k poklesu pravděpodobnosti vlastnictví předplatní jízdenky, minimum leží mezi roky 44 a 45 a poté dochází opět k růstu.

Vliv vysokoškolského nebo vyššího odborného vzdělání je pozitivní, tedy jednotlivci s vysokoškolským nebo vyšším odborným vzděláním mají tendenci spíše vlastnit předplatní jízdenku. Opět byla potvrzena příslušná hypotéza. Zde je nutné říci, že se jedná o prokázanou statistickou souvislost, tedy mezi těmito proměnnými nemusí být přímý kauzální vztah, ale vysvětlení může být složitější. Lidé s vysokoškolským nebo vyšším odborným vzděláním mohou častěji práci vykonávat v kanceláři, která může být častěji lépe dopravně dostupná než například pracovní místo ve výrobě.

Disponování osobním automobilem má negativní vliv, což potvrzuje hypotézu o vzájemném působení zkoumaných nástrojů mobility, tedy že se jedná do určité míry o substituty. Alternativně specifická konstanta má kladnou hodnotu, což znamená, že do modelu nezahrnuté faktory zvyšují pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky.

5.1.4.2 Model pro disponování osobním automobilem

U modelu pro disponování osobním automobilem bylo postupováno shodným způsobem jako v modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky. Pro účely zpracování modelu v balíčku Apollo měly reprezentativní složky užítku následující podobu:

$$\begin{aligned}V[['NoCar']] &= asc_NoCar = 0 \\V[['Car']] &= asc_Car + \\&\quad b_home_A_empl_PT_e06 * home_A_empl_PT_e06 + \\&\quad b_work_A_pop_PT_e06 * work_A_pop_PT_e06 + \\&\quad b_home_A_empl_Car_e06 * home_A_empl_Car_e06 + \\&\quad b_work_A_pop_Car_e06 * work_A_pop_Car_e06 + \\&\quad b_age_div10 * age_div10 + \\&\quad b_age_sq_div100 * age_sq_div100 + \\&\quad b_gender * gender + \\&\quad b_household_size_log * household_size_log + \\&\quad b_college * college + \\&\quad b_PT_season * PT_season\end{aligned}$$

Do výchozího modelu byly použity všechny proměnné podle výše uvedeného vztahu, tedy jednalo se o model lineární v parametrech.

Tabulka 9 Výsledky binárního logitového modelu pro disponování osobním automobilem se všemi dostupnými nezávisle proměnnými

Proměnná	Odhad	Sm. chyba	Sign.
Konstanta	-1,502	0,566	**
Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-2,352	0,652	***
Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	-0,880	0,431	*
Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	1,281	0,823	
Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	1,494	0,639	*
Věk [r/10]	0,647	0,237	**
Věk - druhá mocnina [r ² /100]	-0,053	0,026	*
Muž	1,342	0,094	***
ln (počet členů domácnosti)	0,391	0,098	***
Titul VŠ nebo VOŠ	0,209	0,096	*
Vlastnictví předplatní jízdenky	-1,415	0,126	***
ρ^2 (Rho-square)			0,202
Počet pozorování			2495

Signifikantní na hladině: 0,1% ***; 1% **; 5% *; 10% .

Zdroj: Vlastní zpracování

Výchozí model byl dále upravován tak, že byly postupně odebírány z modelu proměnné, jejichž vliv nebyl statisticky významný. Po každém odebrání proměnné byl model přepočítán. Za výsledný byl považován model, ve kterém již vliv všech proměnných byl statisticky významný alespoň na hladině významnosti 5 %.

Tabulka 10 Výsledky konečného binárního logitového modelu pro disponování osobním automobilem

Proměnná	Odhad	Sm. chyba	Sign.
Konstanta	-1,388	0,562	*
Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-1,418	0,254	***
Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	-0,937	0,429	*
Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	1,664	0,631	**
Věk [r/10]	0,638	0,237	**
Věk - druhá mocnina [r ² /100]	-0,052	0,026	*
Muž	1,340	0,094	***
ln (počet členů domácnosti)	0,392	0,098	***
Titul VŠ nebo VOŠ	0,205	0,096	**
Vlastnictví předplatní jízdenky	-1,411	0,126	***
ρ^2 (Rho-square)			0,201
Počet pozorování			2495

Signifikantní na hladině: 0,1% ***; 1% **; 5% *; 10% .

Zdroj: Vlastní zpracování

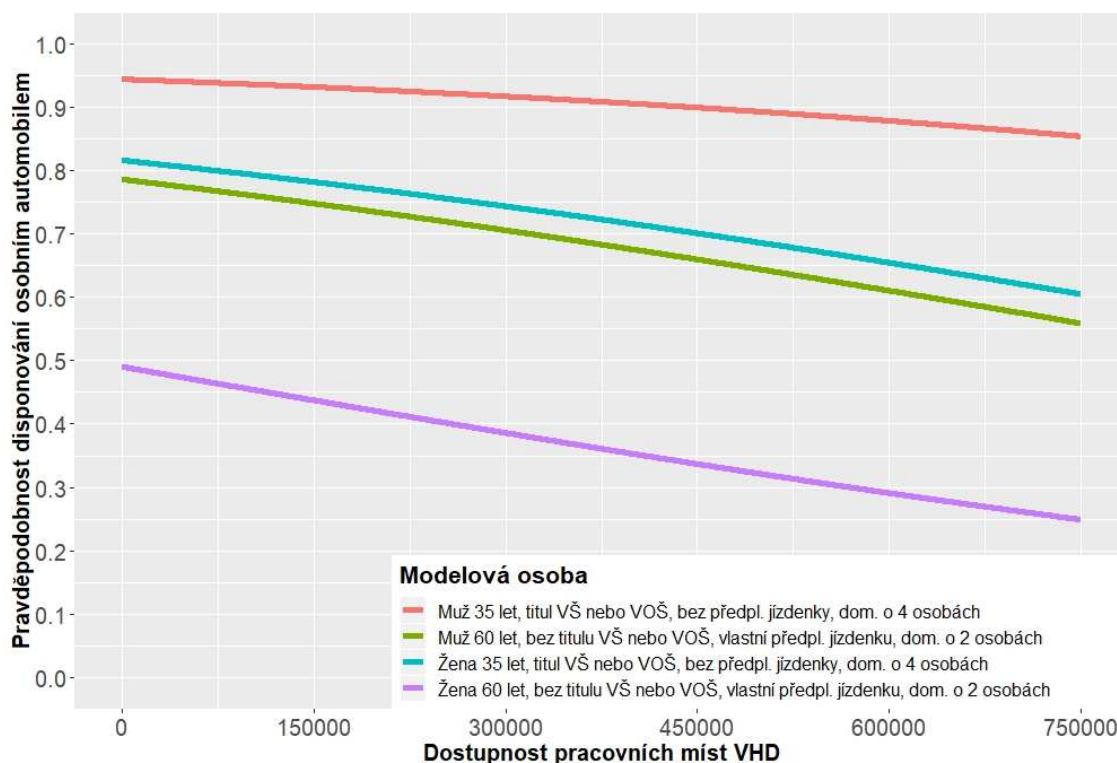
Srovnání hodnot ρ^2 u obou modelů ukazuje, že model s menším počtem proměnných je z hlediska schopnosti vysvětlení závisle proměnné skoro stejně dobrý jako model se všemi proměnnými. Avšak při srovnání modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky ($\rho^2 = 0,337$) a modelu pro disponování osobním automobilem ($\rho^2 = 0,202$) se zdá, že na základě dostupných vysvětlujících proměnných je model pro vlastnictví předplatní jízdenky schopen lépe vysvětlit volbu než model pro disponování osobním automobilem²⁶.

Statisticky významný vliv mají obě míry dostupnosti VHD a taktéž dostupnost populace IAD. Obě míry dostupnosti VHD mají negativní vliv na pravděpodobnost disponování osobním automobilem a dostupnost populace IAD má pozitivní vliv na tuto vysvětlovanou proměnnou, což částečně potvrzuje platnost příslušné hypotézy z kapitoly 5.1.1.

Pro zobrazení vlivu dostupnosti pracovních míst VHD je možné vytvořit graf zobrazující závislost pravděpodobnosti disponování osobním automobilem (predikované na základě vyhodnoceného modelu) na dostupnosti pracovních míst VHD. Tato závislost je ukázána na následujícím obrázku pro čtyři modelové osoby:

- žena 35 let, s titulem VŠ nebo VOŠ, nevlastní předplatní jízdenku, žije v domácnosti o 4 osobách, její pracoviště má průměrnou dostupnost populace IAD a průměrnou dostupnost populace VHD
- žena 60 let, bez titulu VŠ nebo VOŠ, vlastní předplatní jízdenku, žije v domácnosti o 2 osobách, její pracoviště má průměrnou dostupnost populace IAD a průměrnou dostupnost populace VHD
- muž 35 let, s titulem VŠ nebo VOŠ, nevlastní předplatní jízdenku, žije v domácnosti o 4 osobách, jeho pracoviště má průměrnou dostupnost populace IAD a průměrnou dostupnost populace VHD
- muž 60 let, bez titulu VŠ nebo VOŠ, vlastní předplatní jízdenku, žije v domácnosti o 2 osobách, jeho pracoviště má průměrnou dostupnost populace IAD a průměrnou dostupnost populace VHD.

²⁶ Do obou modelů byly na počátku použity stejné proměnné a v obou modelech je stejný počet alternativ.



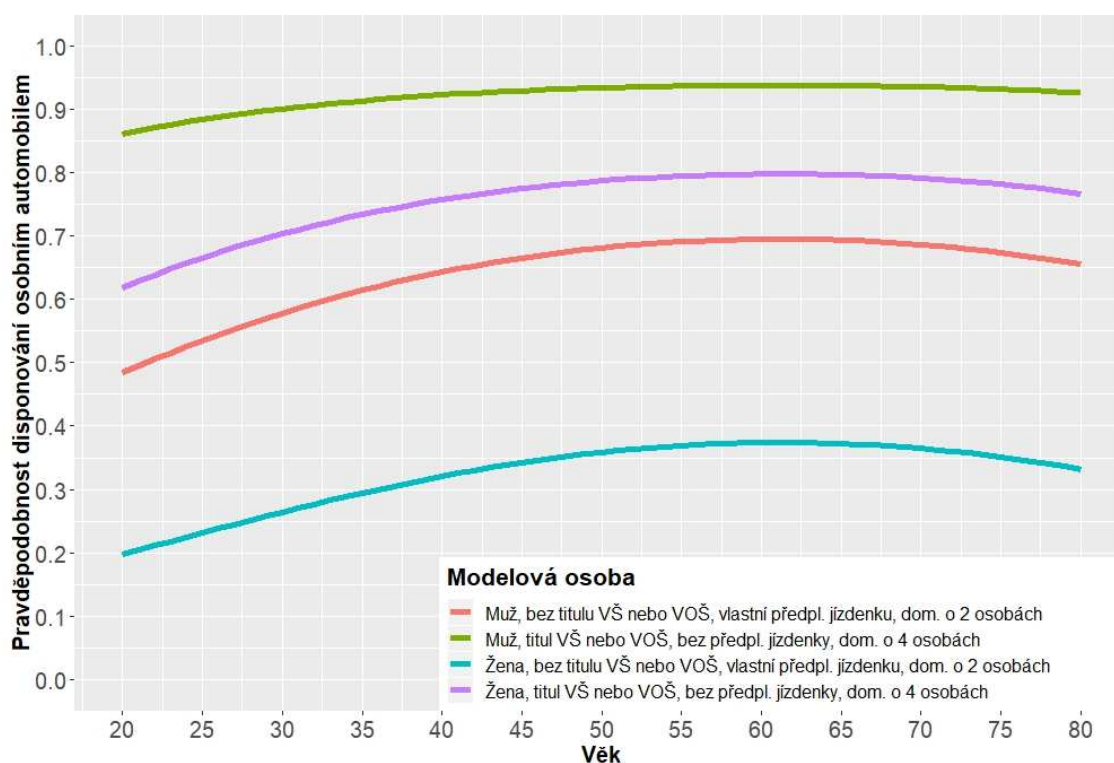
Obrázek 22 Závislost pravděpodobnosti disponování osobním automobilem na dostupnosti pracovních míst VHD pro čtyři modelové osoby podle výsledků binárního modelu pro disponování osobním automobilem

Zdroj: Vlastní zpracování

Při uvažování osob ve věku 60 let, které nemají titul VŠ nebo VOŠ, ale vlastní předplatní jízdenku, klesá u mužů pravděpodobnost disponování osobním automobilem s rostoucí dostupností pracovních míst VHD přibližně z 80 % až na 55 % u mužů. U žen hodnota klesá přibližně z 50 % na 25 %. U mužů ve věku 35 let, kteří mají titul VŠ nebo VOŠ, nemají předplatní jízdenku a žijí v domácnosti o 4 osobách, pravděpodobnost disponování osobním automobilem klesá z hodnoty 95 % při minimální dostupnosti pracovních míst VHD po hodnotu přibližně 85 % při maximální dostupnosti pracovních míst VHD. V případě žen je tento pokles z 80 % na 60 %.

Pro zobrazení vlivu věku je opět možné vytvořit graf zobrazující závislost pravděpodobnosti disponování osobním automobilem (predikované na základě vyhodnoceného modelu) na věku jednotlivce. Tato závislost je ukázána na následujícím obrázku pro čtyři modelové osoby:

- žena, bez titulu VŠ nebo VOŠ, vlastní předplatní jízdenku, žije v domácnosti o 2 osobách, její bydliště i pracoviště mají průměrnou dostupnost VHD, její pracoviště má taktěž průměrnou dostupnost IAD
- žena, s titulem VŠ nebo VOŠ, nevlastní předplatní jízdenku, žije v domácnosti o 4 osobách, její bydliště i pracoviště mají průměrnou dostupnost VHD, její pracoviště má taktěž průměrnou dostupnost IAD
- muž, bez titulu VŠ nebo VOŠ, vlastní předplatní jízdenku, žije v domácnosti o 2 osobách, jeho bydliště i pracoviště mají průměrnou dostupnost VHD, jeho pracoviště má taktěž průměrnou dostupnost IAD
- muž, s titulem VŠ nebo VOŠ, nevlastní předplatní jízdenku, žije v domácnosti o 4 osobách, jeho bydliště i pracoviště mají průměrnou dostupnost VHD, jeho pracoviště má taktěž průměrnou dostupnost IAD.



Obrázek 23 Závislost pravděpodobnosti disponování osobním automobilem na věku pro čtyři modelové osoby podle výsledků binárního modelu pro disponování osobním automobilem

Zdroj: Vlastní zpracování

Vliv věku se ukázal jako nemonotónní. S rostoucím věkem pravděpodobnost disponování osobním automobilem nejdříve roste až do 61 let, pak klesá. Tento průběh potvrzuje hypotézu ohledně věku.

Ze čtyř modelových osob má největší pravděpodobnost disponování osobním automobilem muž, který má vyšší vzdělání, nevlastní předplatní jízdenku a žije v domácnosti o 4 osobách. Naopak nejmenší pravděpodobnost disponování osobním automobilem vykazuje žena, která je bez vyššího vzdělání, vlastní předplatní jízdenku a žije v domácnosti o 2 osobách.

Vliv proměnné popisující pohlaví je kladný, tedy muži spíše disponují osobním automobilem v porovnání se ženami. Příslušná hypotéza z bodu 5.1.1 byla potvrzena. Počet členů v domácnosti (po logaritmické transformaci) má také pozitivní vliv na disponování osobním automobilem.

Vliv vyššího vzdělání je pozitivní, tedy jednotlivci s vysokoškolským nebo vyšším odborným vzděláním mají tendenci spíše disponovat osobním automobilem než jednotlivci bez tohoto typu vzdělání. Směr vlivu je stejný jako v případě vlastnictví předplatní jízdenky.

Opět je nutné uvést, že se jedná o prokázanou statistickou souvislost, tedy nemusí být mezi těmito proměnnými přímý kauzální vztah, ale vysvětlení může být složitější. Lidé s vysokoškolským nebo vyšším odborným vzděláním mohou být bohatší a tím spíše mít tendenci disponovat osobním automobilem. Informace o příjmu respondenta nebyla zjišťována v rámci průzkumu, ze kterého byla data pro model použita (viz kapitola 5.1.3).

Vlastnictví předplatní jízdenky má negativní vliv na disponování osobním automobilem, což potvrzuje hypotézu o vzájemném působení zkoumaných nástrojů mobility, tedy že se jedná do určité míry o substituty. Alternativně specifická konstanta má zápornou hodnotu, což znamená, že do modelu nezahrnuté faktory snižují pravděpodobnost disponování osobním automobilem.

5.1.5 Spojené modely volby nástrojů mobility

Po provedení binárních modelů byly na stejném vzorku vyhodnoceny modely, které popisují zároveň rozhodování pro disponování osobním automobilem i pro vlastnictví předplatní jízdenky. Nejdříve byl aplikován *multinomiální logitový model* (multinomial

logit – MNL). Následně byl pokusně aplikován *model nested logit* (NL). Poslední použitou modelovou strukturou byl *smíšený logitový model* (mixed multinomial logit – MMNL).

5.1.5.1 Multinomiální logitový model

Prvním testovaným statistickým modelem, analyzujícím volby nástrojů mobility současně, byl multinomiální logitový model. Celkově byly definovány čtyři alternativy – pouze disponování osobním automobilem („Car“), pouze vlastnictví předplatní jízdenky („PT“), disponování oběma nástroji mobility zároveň („Both“) a nedisponování žádným nástrojem mobility („None“). Pro zpracování v balíčku Apollo měly reprezentativní složky užítku následující podobu²⁷:

```
V[['None']] = asc_None = 0
V[['Car']] = asc_Car +
    b_home_A_empl_PT_e06_Car * home_A_empl_PT_e06 +
    b_work_A_pop_PT_e06_Car * work_A_pop_PT_e06 +
    b_home_A_empl_Car_e06_Car * home_A_empl_Car_e06 +
    b_work_A_pop_Car_e06_Car * work_A_pop_Car_e06 +
    b_age_div10_Car * age_div10 +
    b_age_sq_div100_Car * age_sq_div100 +
    b_gender_Car * gender +
    b_household_size_log_Car * household_size_log +
    b_college_Car * college
V[['PT']] = asc_PT +
    b_home_A_empl_PT_e06_PT * home_A_empl_PT_e06 +
    b_work_A_pop_PT_e06_PT * work_A_pop_PT_e06 +
    b_home_A_empl_Car_e06_PT * home_A_empl_Car_e06 +
    b_work_A_pop_Car_e06_PT * work_A_pop_Car_e06 +
    b_age_div10_PT * age_div10 +
    b_age_sq_div100_PT * age_sq_div100 +
    b_gender_PT * gender +
    b_household_size_log_PT * household_size_log +
    b_college_PT * college
V[['Both']] = asc_Both +
    b_home_A_empl_PT_e06_Both * home_A_empl_PT_e06 +
    b_work_A_pop_PT_e06_Both * work_A_pop_PT_e06 +
    b_home_A_empl_Car_e06_Both * home_A_empl_Car_e06 +
    b_work_A_pop_Car_e06_Both * work_A_pop_Car_e06 +
    b_age_div10_Both * age_div10 +
    b_age_sq_div100_Both * age_sq_div100 +
    b_gender_Both * gender +
    b_household_size_log_Both * household_size_log +
    b_college_Both * college
```

²⁷ Princip označení koeficientů je podobný přístupu u binárních modelů. Členy začínající „asc_“ označují alternativně specifické konstanty, členy začínající „b_“ označují koeficienty u jednotlivých proměnných. Vzhledem k tomu, že všechny vysvětlující proměnné jsou sociodemografické, tedy mají pro všechny alternativy u určitého jednotlivce konstantní hodnotu, je potřeba je doplnit alternativně specifickými koeficienty, které mohou zachytit rozdíly vlivu těchto atributů na užitek jednotlivých alternativ. Aby model zachycoval pouze rozdíly mezi užítky jednotlivých alternativ, musely být u jedné alternativy alternativně specifické koeficienty a alternativně specifická konstanta stanoveny jako rovny nule. Bylo tak učiněno u alternativy „nedisponuje žádným nástrojem mobility“.

Do výchozího modelu byly použity všechny proměnné podle výše uvedeného vztahu, jednalo se tedy o model lineární v parametrech.

Tabulka 11 Výsledky multinomiálního logitového modelu pro volbu nástrojů mobility se všemi dostupnými nezávisle proměnnými

Nástroje mobility	Proměnná	Odhad	Sm. chyba	Sign.
Pouze disponování osobním automobilem	Konstanta	-0,018	1,356	
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-3,057	1,454	*
	Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	-2,655	0,908	**
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	2,545	1,791	
	Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	3,850	1,912	**
	Věk [r/10]	-0,041	0,610	
	Věk - druhá mocnina [r ² /100]	0,006	0,069	
	Muž	0,986	0,198	***
	ln (počet členů domácnosti)	0,036	0,207	
	Titul VŠ nebo VOŠ	0,500	0,227	*
Pouze vlastnictví předplatní jízdenky	Konstanta	3,403	1,346	*
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	0,438	1,451	
	Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	0,307	0,929	
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	1,918	1,802	
	Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	4,018	1,274	**
	Věk [r/10]	-2,166	0,604	***
	Věk - druhá mocnina [r ² /100]	0,229	0,068	**
	Muž	-0,584	0,202	**
	ln (počet členů domácnosti)	-0,488	0,211	*
	Titul VŠ nebo VOŠ	0,753	0,228	**
Oba dva nástroje zároveň	Konstanta	0,651	1,345	
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-1,589	1,440	
	Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	0,200	0,919	
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	2,714	1,787	
	Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	3,982	1,247	**
	Věk [r/10]	-1,362	0,602	*
	Věk - druhá mocnina [r ² /100]	0,162	0,068	*
	Muž	0,851	0,200	***
	ln (počet členů domácnosti)	-0,013	0,209	
	Titul VŠ nebo VOŠ	0,904	0,226	***
ρ ² (Rho-square)				0,253
Počet pozorování				2495

Signifikantní na hladině: 0,1% ***; 1% **; 5% *; 10% .

Zdroj: Vlastní zpracování

Výchozí model byl opět upravován stejným způsobem jako u binárních modelů. Byly opět postupně odebírány z modelu proměnné, jejichž vliv nebyl statisticky významný. Po každém odebrání proměnné byl model přepočítán. Ve výsledném modelu byly vlivy všech proměnných statisticky významné alespoň na hladině významnosti 5 %.

Tabulka 12 Výsledky konečného multinomiálního logitového modelu pro volbu nástrojů mobility

Nástroje mobility	Proměnná	Odhad	Sm. chyba	Sign.
Pouze disponování osobním automobilem	Konstanta	-0,010	0,266	
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-3,430	0,814	***
	Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	-2,867	0,463	***
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	2,958	1,131	**
	Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	4,095	0,729	***
	Muž	0,981	0,197	***
	Titul VŠ nebo VOŠ	0,505	0,226	*
Pouze vlastnictví předplatní jízdenky	Konstanta	3,274	0,758	***
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	2,413	0,653	***
	Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	4,385	0,540	***
	Věk [r/10]	-2,137	0,332	***
	Věk - druhá mocnina [r ² /100]	0,224	0,037	***
	Muž	-0,587	0,201	**
	ln (počet členů domácnosti)	-0,493	0,100	***
	Titul VŠ nebo VOŠ	0,759	0,226	**
Oba dva nástroje zároveň	Konstanta	0,559	0,742	
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-1,964	0,693	**
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	3,148	1,028	**
	Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	4,205	0,518	***
	Věk [r/10]	-1,342	0,318	***
	Věk - druhá mocnina [r ² /100]	0,159	0,036	***
	Muž	0,849	0,199	***
	Titul VŠ nebo VOŠ	0,908	0,225	***
ρ ² (Rho-square)				0,253
Počet pozorování				2495

Signifikantní na hladině: 0,1% ***; 1% **; 5% *; 10% .

Zdroj: Vlastní zpracování

Srovnání hodnot ρ² u obou modelů ukazuje, že výsledný model je z hlediska schopnosti vysvětlení závisle proměnné prakticky stejně dobrý jako model se všemi proměnnými.

U alternativy obsahující pouze disponování osobním automobilem jsou statisticky významné vlivy všech čtyř indikátorů dostupnosti, pohlaví a vyššího vzdělání. Obě dostupnosti IAD mají pozitivní vliv, přičemž dostupnost populace má větší vliv než dostupnost pracovních míst. Obě dostupnosti VHD mají negativní vliv, přičemž dostupnost pracovních míst má větší vliv než dostupnost populace. Muž ve srovnání se ženou má větší pravděpodobnost disponování osobním automobilem (bez předplatní jízdenky VHD). Tentýž vztah platí pro jednotlivce s titulem VŠ nebo VOŠ oproti jednotlivcům bez vyššího vzdělání. Směr vlivů u všech proměnných je v souladu s předchozími binárními modely a pracovními hypotézami.

Alternativně specifická konstanta je ve srovnání s ostatními koeficienty řádově menší. Je možné říci, že nepozorované atributy nemají na tuto alternativu ani pozitivní ani negativní vliv.

Pro alternativu vlastnictví předplatní jízdenky (bez současného disponování osobním automobilem) jsou statisticky významné vlivy obou indikátorů dostupnosti IAD, obou atributů popisujících věk, pohlaví, velikosti domácnosti a vyššího vzdělání. Vliv obou dostupností IAD je pozitivní. V rozporu s pracovními hypotézami je skutečnost, že nejsou statisticky významné vlivy dostupností VHD.

Vliv věku je nelineární. Pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky v závislosti na věku (za podmínky *ceteris paribus*) zpočátku klesá do 32 let věku a poté opět roste. Žena má ve srovnání s mužem větší pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky. Velikost domácnosti má negativní vliv na výhradní vlastnictví předplatní jízdenky. Jednotlivci s titulem VŠ nebo VOŠ mají vyšší pravděpodobnost vlastnictví předplatní jízdenky oproti jednotlivcům bez vyššího vzdělání. Alternativně specifická konstanta je kladná, nepozorované atributy mají tedy pozitivní vliv na pravděpodobnost volby této alternativy.

U alternativy spočívající v současném disponování osobním automobilem a vlastnictví předplatní jízdenky jsou statisticky významné vlivy obou indikátorů dostupnosti IAD, dostupnosti pracovních míst VHD, obou atributů popisujících věk, pohlaví a vyššího vzdělání. Vliv obou dostupností IAD je pozitivní, avšak vliv dostupnost pracovních míst VHD je negativní.

Vliv věku je nelineární. Podobně jako u výhradního vlastnictví předplatní jízdenky pravděpodobnost výběru této alternativy s věkem klesá, minima však dosahuje přibližně

pro věk 42 let a poté opět roste. Muž má ve srovnání s ženou větší pravděpodobnost disponování oběma nástroji mobility současně. Jednotlivci s titulem VŠ nebo VOŠ mají taktéž vyšší pravděpodobnost disponování oběma nástroji mobility současně oproti jednotlivcům bez vyššího vzdělání. Alternativně specifická konstanta je kladná, nepozorované atributy mají tedy pozitivní vliv na pravděpodobnost volby této alternativy.

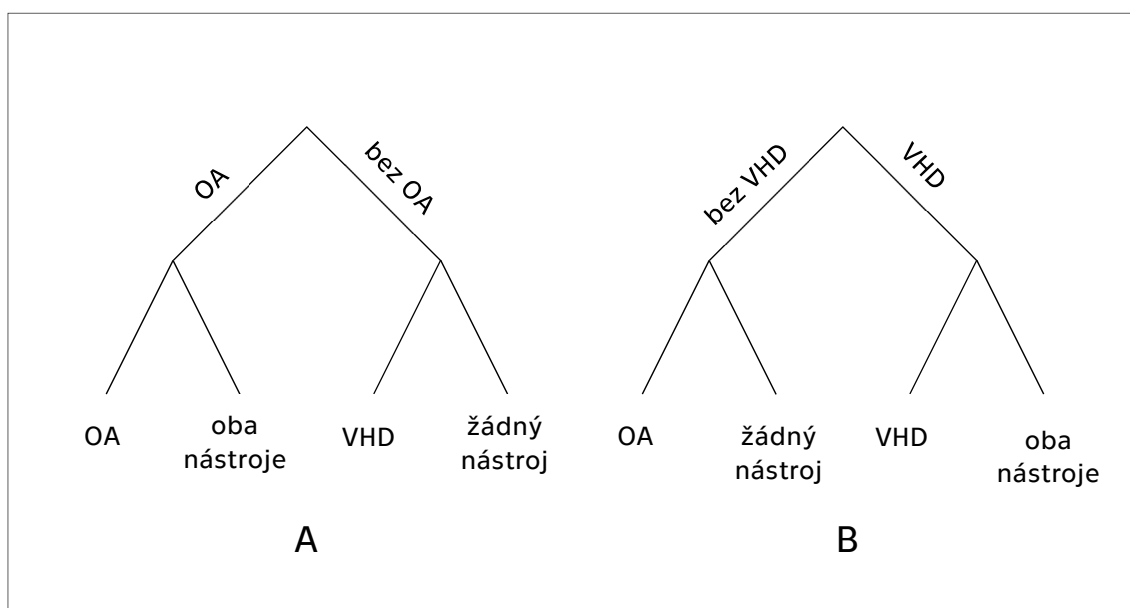
5.1.5.2 Modely nested logit

Z výsledků binárních logitových modelů plyne, že disponování osobním automobilem a vlastnictví předplatní jízdenky se chovají do určité míry jako substituty. Na základě těchto výsledků byla vyvozena hypotéza, že nepozorované části užitků alternativ pouze disponování osobním automobilem („Car“), pouze vlastnictví předplatní jízdenky („PT“), disponování oběma nástroji mobility zároveň („Both“) a nedisponování žádným nástrojem mobility („None“) nemusí být nezávislé, což předpokládá multinomiální logitový model.

Logitovému modelu věcně nejbližší strukturou, která připouští existenci korelovaných nepozorovaných částí užitků alternativ, je model nested logit. Tento model předpokládá existenci K skupin alternativ B_1, B_2, \dots, B_K (tzv. hnízd), přičemž každá alternativa náleží do právě jednoho hnízda a každé hnízdo obsahuje alespoň jednu alternativu. Nepozorované užitky alternativ v rámci jednoho hnízda mohou být korelované, avšak ke korelaci nedochází u alternativ ze dvou různých hnízd. Pravděpodobnost výběru alternativy $i \in B_k$ rozhodovatelem n je pak dána vztahem:

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}/\lambda_k} (\sum_{j \in B_k} e^{V_{nj}/\lambda_k})^{\lambda_k - 1}}{\sum_{l=1}^K (\sum_{j \in B_l} e^{V_{nj}/\lambda_l})^{\lambda_l}} \quad (5.7)$$

Parametry λ příslušejí jednotlivým hnízdům a jsou mírou korelace nepozorovaných užitků alternativ v rámci jednoho hnízda. V rámci aplikace modelu nested logit byly testovány dvě struktury volby. Testované struktury jsou ukázány na následujícím obrázku. Struktura A uvažuje shlukování alternativ podle toho, zda je ve zvolených nástrojích mobility disponování osobním automobilem. Naopak struktura B shlukuje alternativy do hnízd podle toho, zda výběr nástrojů mobility obsahuje vlastnictví předplatní jízdenky.



Obrázek 24 Testované struktury modelu nested logit

Zdroj: Vlastní zpracování

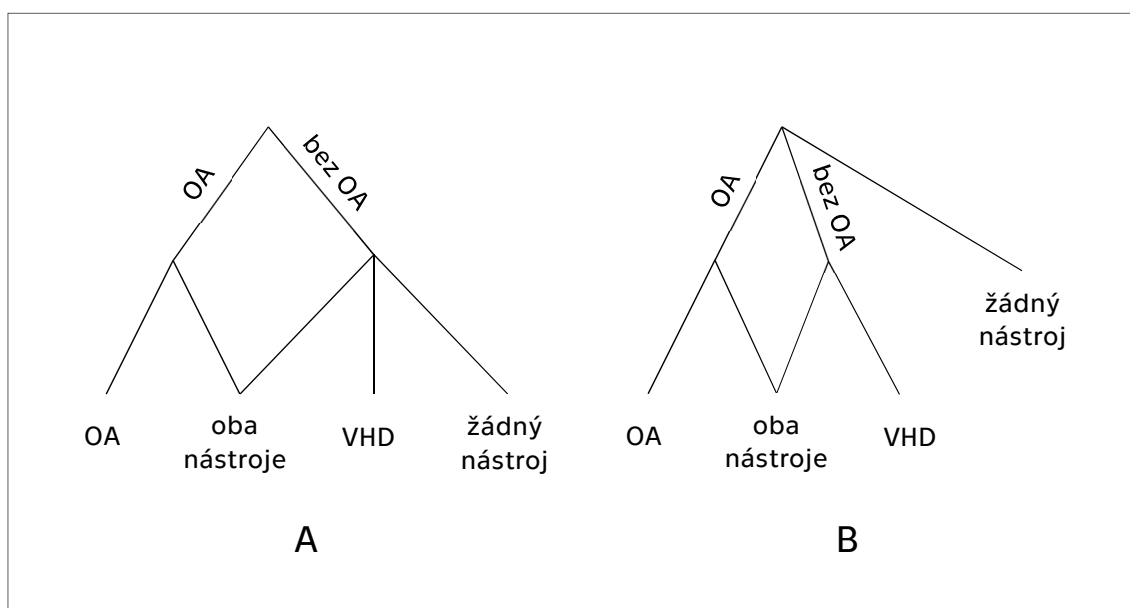
Při výpočtu obou těchto struktur nabývaly výsledné parametry λ buď hodnot záporných, nebo hodnot větších než jedna. To znamená, že model typu nested logit není pro daná vstupní data vhodný. Modely byly též ještě přepočítány pomocí balíčku Mlogit (Croissant, 2019), avšak s podobnými výsledky, které též ukazovaly na nevhodnost modelu nested logit pro daná data.

Dále byla ještě použita obecnější hnízdová struktura, a to *zobecněný model nested logit* (generalized nested logit – GNL), který navrhli Wen a Koppelman (2001). Tento model opět předpokládá existenci K skupin alternativ B_1, B_2, \dots, B_K (tzv. hnízd), přičemž každá alternativa může náležet do více než jednoho hnízda. Toto přidělení je vyjádřeno alokačním parametrem α_{jk} , který udává, do jaké míry alternativa j náleží do hnízda k . Tyto parametry jsou vždy nezáporné a jejich součet pro jednu alternativu je vždy roven jedné. Pravděpodobnost výběru alternativy $i \in B_k$ rozhodovatelem n je pak dána vztahem:

$$P_{ni} = \frac{\sum_k (\alpha_{ik} e^{V_{ni}})^{1/\lambda_k} \left(\sum_{j \in B_k} (\alpha_{jk} e^{V_{nj}})^{1/\lambda_k} \right)^{\lambda_k - 1}}{\sum_{l=1}^K \left(\sum_{j \in B_l} (\alpha_{jl} e^{V_{nj}})^{1/\lambda_l} \right)^{\lambda_l}} \quad (5.8)$$

Parametry λ mají stejnou funkci jako u modelu nested logit. Jsou tedy mírou korelace nepozorovaných užitků alternativ v rámci jednoho hnízda. V rámci aplikace zobecněného modelu nested logit byly testovány dvě struktury volby. Testované struktury jsou ukázány na následujícím obrázku. Struktura A předpokládá stejná hnízda

jako struktura A u modelu nested logit. Je zde však rozdíl, neboť alternativa pro oba nástroje mobility zároveň je příslušná k oběma hnízdům. Struktura B vychází ze struktury A, avšak alternativu pro žádný nástroj mobility vyčleňuje do samostatného hnízda.



Obrázek 25 Testované struktury zobecněného modelu nested logit

Zdroj: Vlastní zpracování

Při výpočtu obou těchto struktur opět nabývaly výsledné parametry λ buď hodnot záporných, nebo hodnot větších než jedna. To znamená, že struktura zobecněného modelu nested logit není pro daná vstupní data vhodná.

5.1.5.3 Smíšený logitový model

Poslední použitou modelovou strukturou byl smíšený logitový model. Smíšený logitový model vychází principiálně z normálního logitového modelu, avšak připouští, že některé parametry modelu mohou být náhodnými veličinami. Pravděpodobnost, že rozhodovatel n si vybere alternativu i , je pak dána vzorcem:

$$P_{ni} = \int \frac{e^{V_{ni}(\beta)}}{\sum_j e^{V_{nj}(\beta)}} f(\beta) d\beta \quad (5.9)$$

Po osobní konzultaci s Felixem Beckerem z ETH Zürich byl model inspirován strukturou dvou binárních logitových modelů, kterou aplikoval ve výzkumném projektu SVI 2015/007 pro Švýcarskou unii dopravních inženýrů a odborníků (Widmer, Axhausen, Schmid, Becker, Stein, 2019).

Model se skládal ze dvou komponent – z binárního modelu pro vlastnictví předplatní jízdenky a z binárního modelu pro disponování osobním automobilem. Model v každé z těchto komponent připouštěl, že alternativně specifická konstanta byla náhodnou veličinou s normálním rozdělením, přičemž byla připuštěna korelace mezi těmito dvěma náhodnými veličinami. Kovarianční matice tohoto dvourozměrného normálního rozdělení byla transformována tzv. Choleského dekompozicí.

Pro zpracování v balíčku Apollo měly reprezentativní složky užítu následující podobu²⁸:

```
V_Car[['NoCar']] = 0

V_Car[['Car']] = asc_Car +
                 b_home_A_emp1_PT_e06_Car * home_A_emp1_PT_e06 +
                 b_work_A_pop_PT_e06_Car * work_A_pop_PT_e06 +
                 b_home_A_emp1_Car_e06_Car * home_A_emp1_Car_e06 +
                 b_work_A_pop_Car_e06_Car * work_A_pop_Car_e06 +
                 b_age_div10_Car * age_div10 +
                 b_age_sq_div100_Car * (age_div10^2) +
                 b_gender_Car * gender +
                 b_household_size_log_Car * household_size_log +
                 b_college_Car * college +
                 S_MT_Car_UT

V_PT[['PT']] = asc_PT +
               b_home_A_emp1_PT_e06_PT * home_A_emp1_PT_e06 +
               b_work_A_pop_PT_e06_PT * work_A_pop_PT_e06 +
               b_home_A_emp1_Car_e06_PT * home_A_emp1_Car_e06 +
               b_work_A_pop_Car_e06_PT * work_A_pop_Car_e06 +
               b_age_div10_PT * age_div10 +
               b_age_sq_div100_PT * (age_div10^2) +
               b_gender_PT * gender +
               b_household_size_log_PT * household_size_log +
               b_college_PT * college +
               S_MT_PT_UT +
               S_MT_PT_Car_UT

V_PT[['NoPT']] = 0
```

Výsledky propočteného modelu jsou uvedeny v následující tabulce.

²⁸ Princip označení koeficientů je podobný přístupu u předchozích modelů. Členy začínající „asc_“ označují alternativně specifické konstanty, členy začínající „b_“ označují koeficienty u jednotlivých proměnných a členy začínající „S_“ označují náhodnou část alternativně specifických konstant, přičemž u systematické složky užítu alternativy vlastnictví předplatní jízdenky jsou následkem Choleského dekompozice náhodné části dvě.

Tabulka 13 Výsledky smíšeného logitového modelu pro volbu nástrojů mobility se všemi dostupnými nezávisle proměnnými

Nástroje mobility	Proměnná	Odhad	Sm. chyba	Sign.
Model disponování osobním automobilem	Konstanta	-3,798	0,904	***
	Parametr rozptylu konstanty (vlastní)	2,029	0,721	**
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-4,260	1,009	***
	Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	-2,188	0,671	**
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	1,922	0,971	*
	Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	1,658	0,975	.
	Věk [r/10]	1,462	0,718	***
	Věk - druhá mocnina [r ² /100]	-0,133	0,044	**
	Muž	2,253	0,493	***
	ln (počet členů domácnosti)	0,667	0,209	**
Titul VŠ nebo VOŠ	0,180	0,154		
Model vlastnictví předplatní jízdenky	Konstanta	2,844	0,902	**
	Parametr rozptylu konstanty (vlastní)	0,014	0,874	
	Parametr rozptylu konstanty (z 2. modelu)	-1,340	0,341	***
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	2,223	0,867	*
	Dostupnost populace VHD [1/10 ⁶]	3,127	0,606	***
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	0,442	0,962	
	Dostupnost populace IAD [1/10 ⁶]	1,192	0,779	
	Věk [r/10]	-2,202	0,434	***
	Věk - druhá mocnina [r ² /100]	0,242	0,048	***
	Muž	-0,817	0,154	***
ln (počet členů domácnosti)	-0,323	0,140	*	
Titul VŠ nebo VOŠ	0,551	0,146	***	
ρ ² (Rho-square)				0,250
Počet pozorování				2495

Signifikantní na hladině: 0,1% ***; 1% **; 5% *; 10% .

Zdroj: Vlastní zpracování

Znaménka u výsledných hodnot odhadů parametrů jsou shodná se znaménky u jednotlivých binárních logitových modelů, tedy model je v principiální shodě s binárními logitovými modely vypočtenými v kapitole 5.1.4. Vzhledem k tomu, že model nebyl dále využit (viz následující kapitola), nebyl aplikován přístup pro určení výsledného modelu, jako tomu bylo u předchozích vypočtených modelů.

5.1.5.4 Výběr modelu

Vzhledem k tomu, že modely typu nested logit se ukázaly jako nevhodné pro vstupní data, bylo třeba vybrat mezi multinomiálním logitovým modelem a smíšeným logitovým modelem. Jednou z možností je srovnání ukazatelů ρ^2 pro jednotlivé modely. Obecně je možné tohoto ukazatele použít, pokud se jedná o modely se stejným počtem alternativ na stejných vstupních datech. Obě podmínky jsou v tomto případě splněny.

V případě multinomiálního logitového modelu má ukazatel ρ^2 hodnotu 0,253 a u smíšeného logitového modelu je hodnota tohoto ukazatele 0,250. Obecně platí, že čím vyšší je hodnota tohoto ukazatele, tím je model lepší. Dalším podpůrným argumentem může být skutečnost, že v případě multinomiálního logitového modelu jsou jeho výpočet a predikce na něm založené méně výpočetně náročné. Proto byl pro predikci v následující kapitole vybrán multinomiální logitový model.

5.2 Agregace modelu chování a prognóza na úrovni zón

V předchozí kapitole byl ukázán vztah mezi atributy jednotlivců a jimi zvolenými nástroji mobility. Bylo také prokázáno, že dopravní dostupnost souvisí se zvolenými nástroji mobility. V této kapitole bude navržen postup, jak výsledky modelu chování jednotlivců přenést do makroskopického dopravního modelu. Navržený princip bude demonstrován na příkladu modelu Pražského metropolitního regionu, který je ve správě TSK Praha. Dále bude postup zobecněn v rámci iterativního výpočtu dopravní poptávky a nabídky.

5.2.1 Agregace volby nástrojů mobility na úroveň dopravních zón

Doposud byly na statistických modelech teorie diskrétní volby ukázány vztahy mezi atributy jednotlivce a jeho výběrem nástrojů mobility. V rámci makroskopických dopravních modelů není však základní jednotkou modelu jednotlivec, nýbrž dopravní zóna se svými atributy. Proto je potřeba pro každou zónu dopravního modelu vypočítat podíly jednotlivců, kteří si vyberou danou kombinaci nástrojů mobility.

Dosavadní statistické modely byly řešeny pro výdělečně činné osoby (jako stěžejní skupinu osob) a 4 kombinace nástrojů mobility: pouze vlastnictví předplatní jízdenky, pouze disponování osobním automobilem, oba nástroje zároveň a žádný z nástrojů.

Ideálním postupem při vyčíslování současných podílů jednotlivých alternativ nebo při jejich predikci je výpočet pravděpodobnosti výběru každé alternativy každým rozhodovatelem dané populace. V případě modelu Pražského metropolitního regionu (PMR) se jedná o přibližně jeden milion výdělečně činných osob, které na tomto území bydlí. Pro tyto osoby by bylo třeba zjistit hodnoty všech atributů, které byly použity ve vybraném modelu z předchozí kapitoly, vypočítat pro ně pravděpodobnosti výběru jednotlivých alternativ a pro každou dopravní zónu spočítat průměrnou pravděpodobnost výběru alternativ za všechny výdělečně činné osoby žijící v této dopravní zóně.

Teoreticky by na základě výsledků Sčítání lidu, domů a bytů mělo být možno získat některé hodnoty atributů pro každého obyvatele PMR, avšak tyto údaje nejsou k dispozici, aby nebylo možné identifikovat konkrétní obyvatele.

Dalším způsobem je výpočet na vzorku, který byl použit pro vyčíslení statistických modelů volby a provedení agregace výsledků průměrováním přes obyvatele jednotlivých dopravních zón modelu. Vzhledem k tomu, že vzorek obsahoval celkem 2495 pozorování a že dopravní model obsahuje 1515 dopravních zón reprezentujících územní celky v modelovaném území, vychází na jednu dopravní zónu přibližně 1,65 osoby, což je pro výpočet průměru nedostatečné.

Na rozdíl od předchozích dvou způsobů je ale možné využít postup segmentace. Z výsledků SLDB 2011 (Český statistický úřad, 2018) bylo možné pro jednotlivé obce a u větších měst pro jednotlivé městské části získat informace o podílech mužů a žen starších 15 let podle dosaženého vzdělání. Tyto údaje byly zjednodušeně považovány za údaje o podílech mužů a žen výdělečně činných rozdělených dále podle dosaženého vzdělání. Dále je možné pro obyvatele každé zóny získat údaj o dostupnosti pracovních míst jak VHD, tak IAD. Proto byl vypočten zjednodušený multinomiální logitový model, do kterého vstupovaly pouze následující vysvětlující proměnné:

- pohlaví
- vzdělání (zda má titul VŠ nebo VOŠ)
- indikátor dostupnosti pracovních míst pro zónu bydliště pomocí VHD
- indikátor dostupnosti pracovních míst pro zónu bydliště pomocí IAD.

Výsledky tohoto modelu jsou ukázány v následující tabulce.

Tabulka 14 Výsledky zjednodušeného multinomiálního logitového modelu pro volbu nástrojů mobility pro účely agregace chování do dopravních zón pomocí segmentace

Nástroje mobility	Proměnná	Odhad	Sm. chyba	Sign.
Pouze disponování osobním automobilem	Konstanta	0,613	0,250	*
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-3,747	1,396	**
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	4,036	1,674	*
	Muž	0,988	0,195	***
	Titul VŠ nebo VOŠ	0,448	0,224	*
Pouze vlastnictví předplatní jízdenky	Konstanta	-0,175	0,261	
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-0,151	1,378	
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	5,341	1,673	**
	Muž	-0,540	0,195	**
	Titul VŠ nebo VOŠ	0,936	0,221	***
Oba dva nástroje zároveň	Konstanta	-0,408	0,259	
	Dostupnost pracovních míst VHD [1/10 ⁶]	-2,445	1,374	.
	Dostupnost pracovních míst IAD [1/10 ⁶]	6,141	1,663	***
	Muž	0,862	0,194	***
	Titul VŠ nebo VOŠ	1,027	0,220	***
ρ ² (Rho-square)				0,203
Počet pozorování				2495

Signifikantní na hladině: 0,1% ***; 1% **; 5% *; 10% .

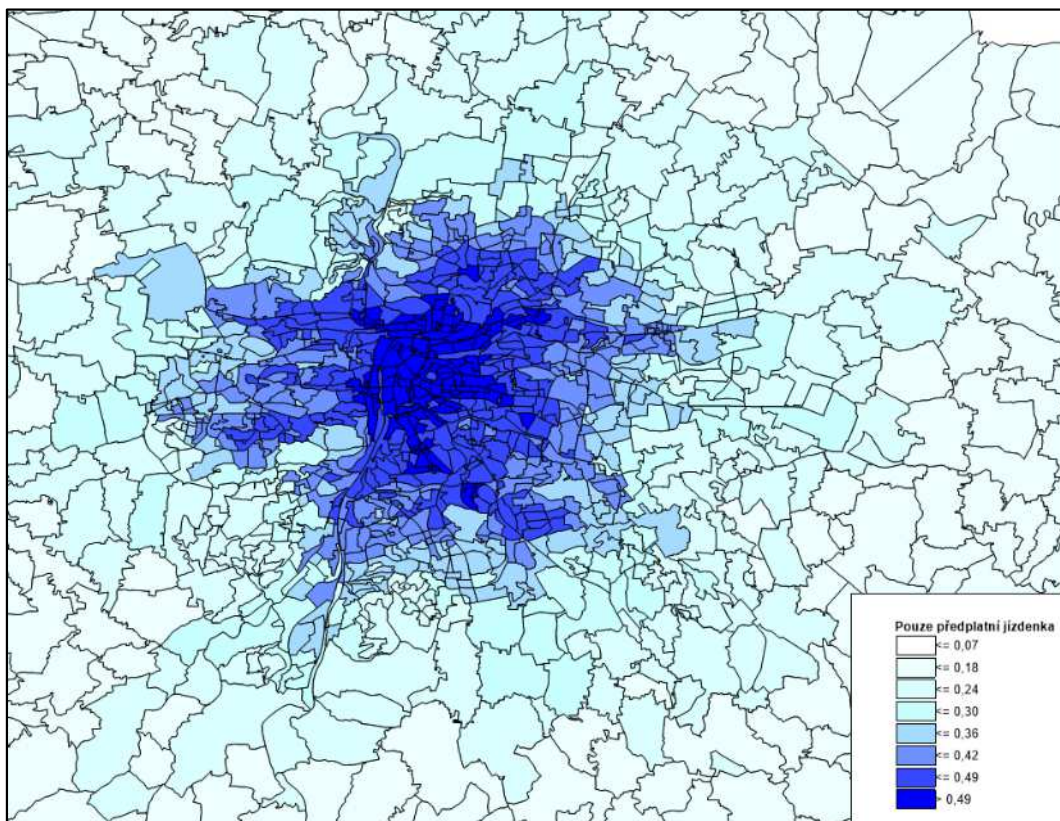
Zdroj: Vlastní zpracování

Model vykazuje díky nižšímu počtu použitých proměnných nutně horší kvalitu než model vybraný v předchozí kapitole, avšak stále vykazuje poměrně dobrou schopnost modelovat volbu nástrojů mobility.

Pro výpočet podílů jednotlivých kombinací nástrojů mobility pro jednotlivé zóny byla tedy použita metoda segmentace, přičemž výdělečně činné osoby bydlící v určité dopravní zóně modelu byly rozděleny na čtyři segmenty:

- muž, který má titul VŠ nebo VOŠ
- muž, který nemá titul VŠ nebo VOŠ
- žena, která má titul VŠ nebo VOŠ
- žena, která nemá titul VŠ nebo VOŠ.

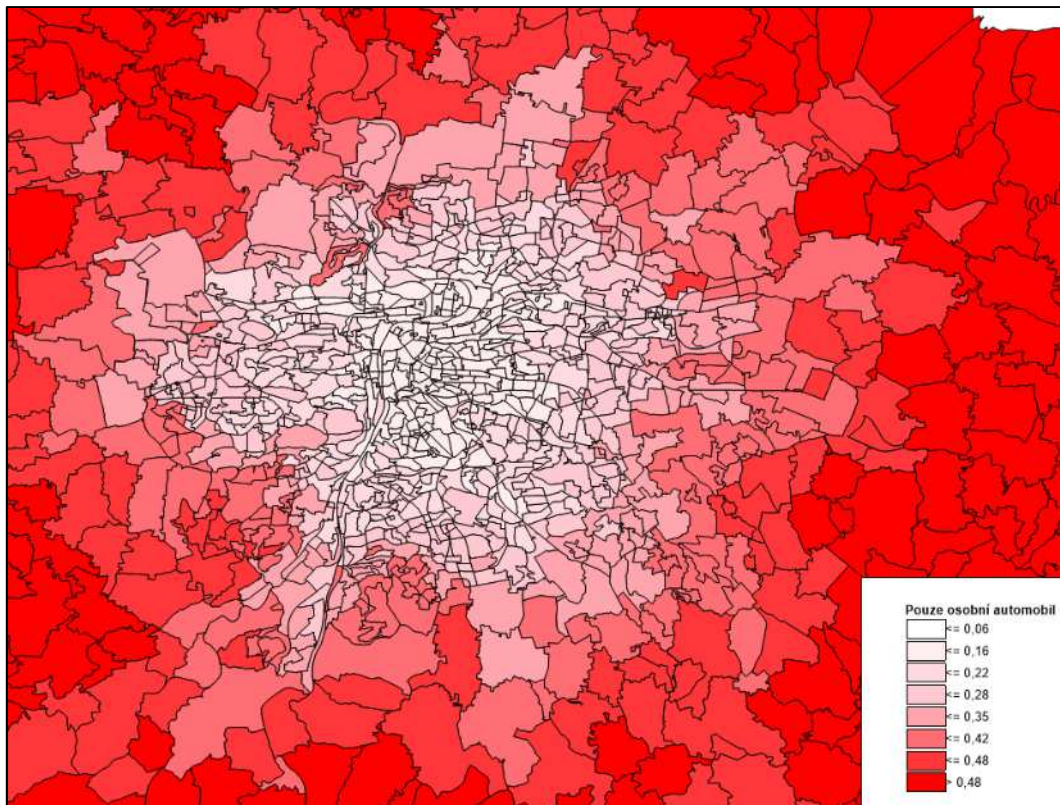
Příslušníci těchto čtyř segmentů v rámci jedné zóny měli stejnou dopravní dostupnost VHD i IAD. V rámci modelu je 1515 dopravních zón, celkově tedy v rámci celého dopravního modelu PMR bylo 6060 segmentů. Pro každý z těchto segmentů byly vypočteny podíly jednotlivých kombinací nástrojů mobility. Následně pomocí váženého průměru přes velikosti jednotlivých segmentů byly spočteny podíly jednotlivých kombinací nástrojů mobility pro jednotlivé dopravní zóny modelu. Na následujících čtyřech obrázcích jsou zobrazeny vypočtené podíly jednotlivců, kteří mají zvolenou danou kombinaci nástrojů mobility.



Obrázek 26 Podíly výdělečně činných osob v jednotlivých dopravních zónách, které mají pouze předplatní jízdenku

Zdroj: Vlastní zpracování

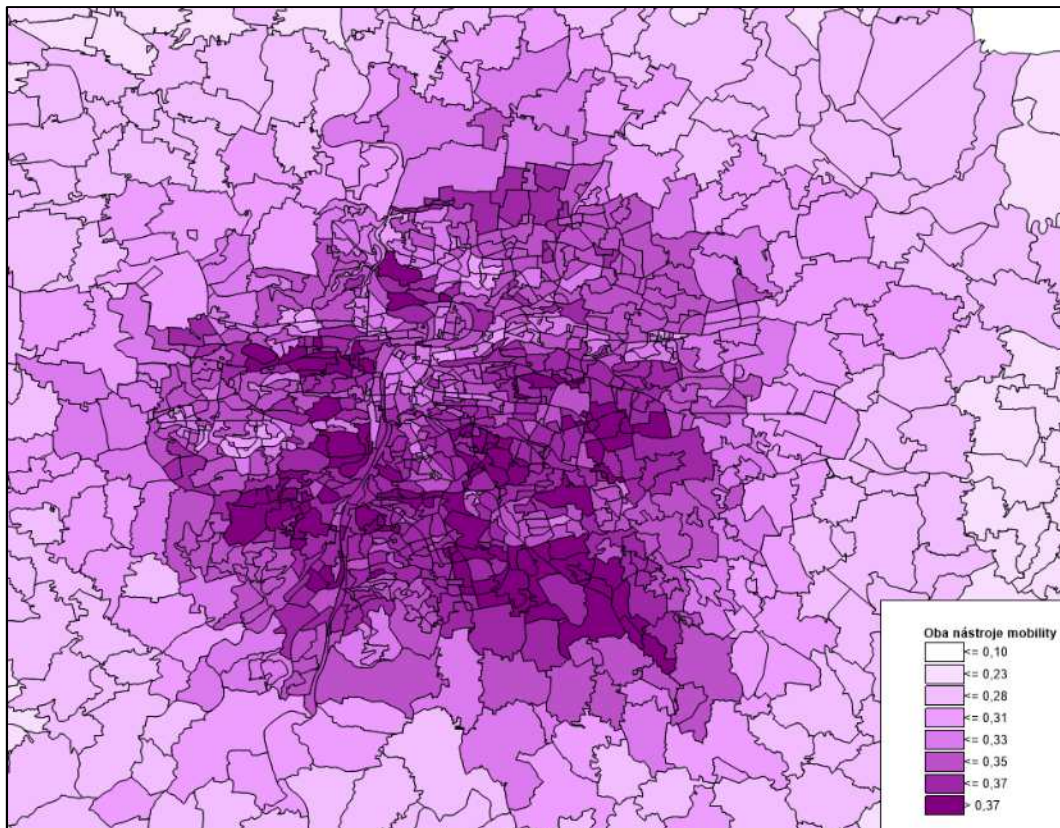
Pro podíly osob vlastnících pouze předplatní jízdenku platí jasná souvislost s dostupností VHD. Ukazuje se, že největší podíly těchto osob jsou v dopravních zónách okolo hlavních tras VHD. Zřejmý je vliv zejména linek metra, méně znatelný je vliv tramvajových tratí. Dále jsou ještě rozpoznatelné hlavní tahy autobusových a železničních linek v regionu.



Obrázek 27 Podíly výdělečně činných osob v jednotlivých dopravních zónách, které disponují pouze osobním automobilem

Zdroj: Vlastní zpracování

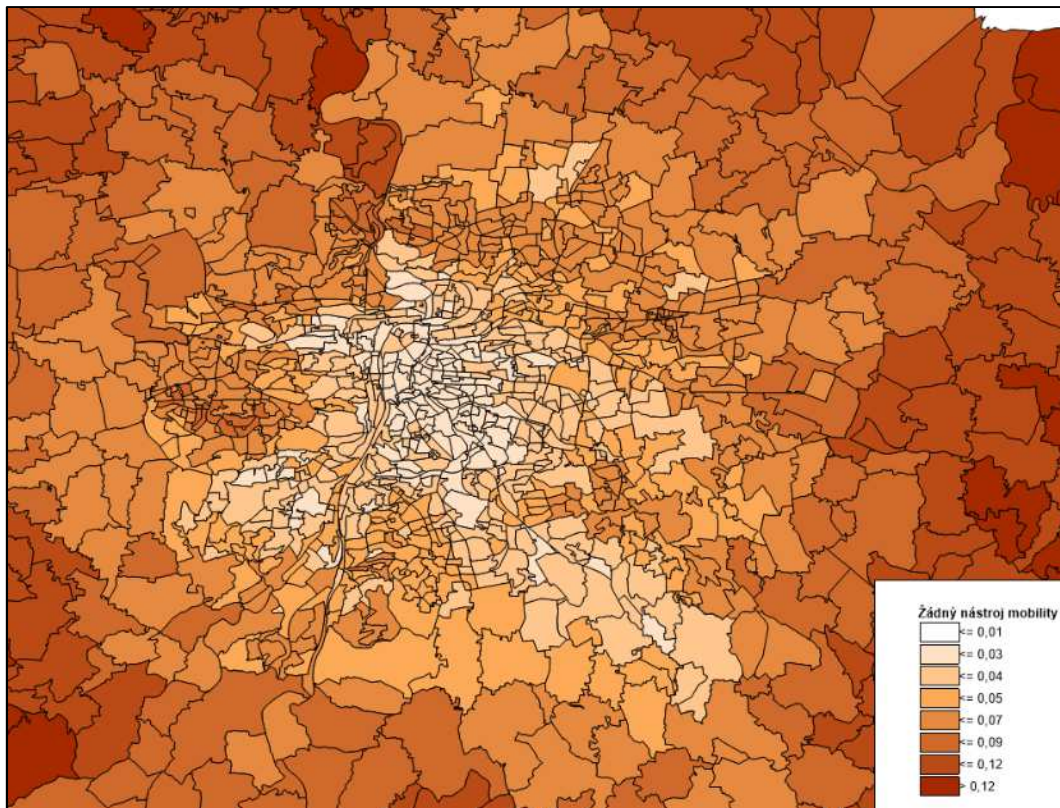
Při srovnání posledních dvou obrázků se jasně ukazuje substituční vztah vlastnictví předplatní jízdenky a disponování osobním automobilem. Na území souvislé zástavby je podíl výdělečně činných osob disponujících pouze osobním automobilem do 15 až 20 %, na okrajích Prahy se zvyšuje a poměrně nedaleko od Prahy dosahuje již hodnot okolo 40 až 50 %, které jsou dále relativně stabilní.



Obrázek 28 Podíly výdělečně činných osob v jednotlivých dopravních zónách, které mají k dispozici oba nástroje mobility

Zdroj: Vlastní zpracování

Využívání obou nástrojů mobility současně je nejvíce zastoupeno v okrajových částech Prahy. Směrem do centra města a k hlavním osám VHD poněkud klesá. Stejně tak klesá podíl této skupiny osob směrem od Prahy do regionu.



Obrázek 29 Podíly výdělečně činných osob v jednotlivých dopravních zónách, které nemají k dispozici žádný nástroj mobility

Zdroj: Vlastní zpracování

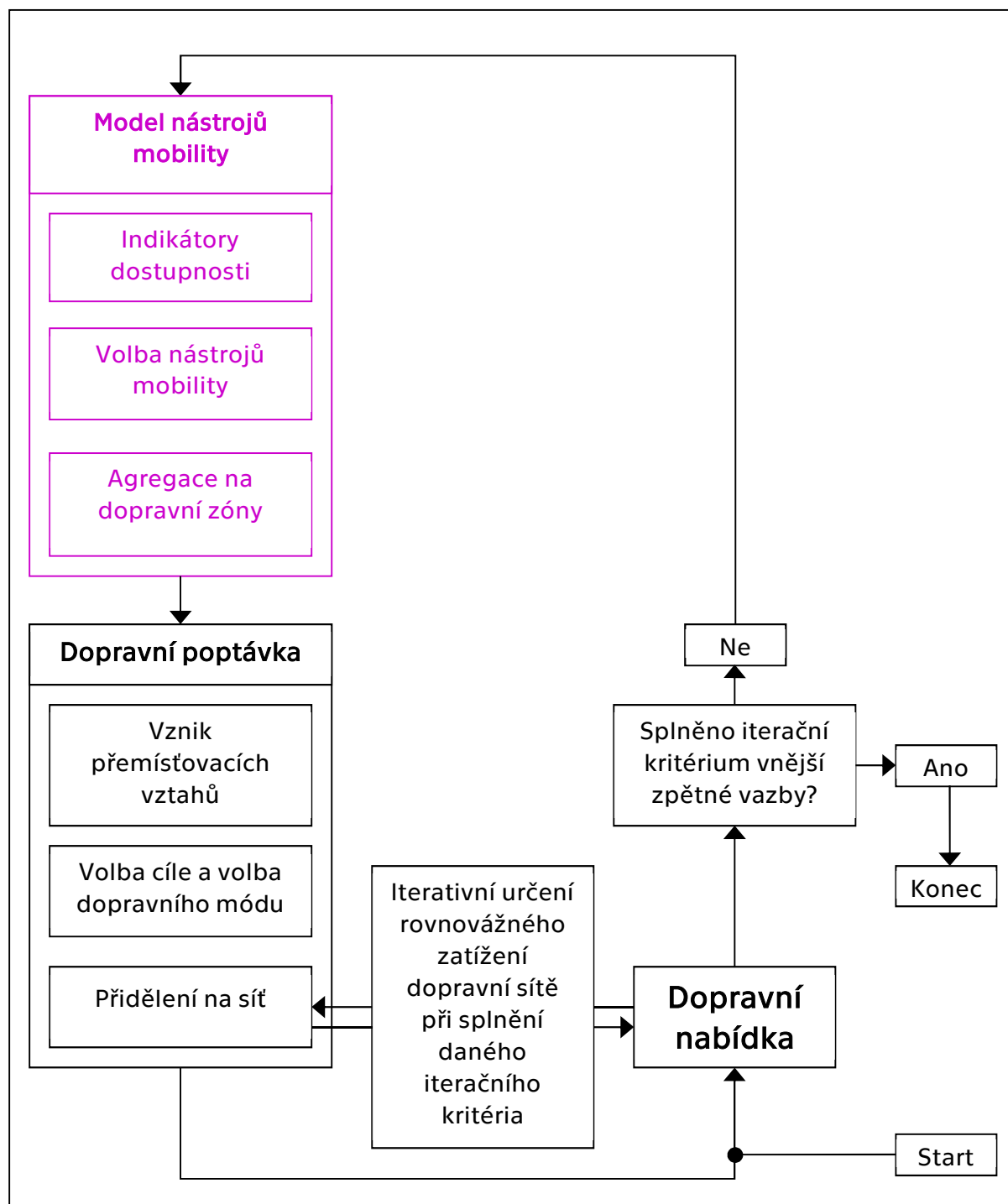
Nedisponování žádným nástrojem mobility je obecně málo zastoupeno mezi výdělečně činnými osobami. Obecně nejméně takových osob žije v centru Prahy, přičemž postupně dále od centra a dále od hlavních os VHD podíl těchto osob roste. Maximální hodnoty jsou však okolo 12 až 13 %.

5.2.2 Integrace do makroskopického dopravního modelu

V předchozích částech kapitoly 5 byl představen nový způsob, jak na základě dat z průzkumu dopravního chování a nákladových veličin získaných z nabídkové části dopravního modelu určit indikátory dostupnosti a poté ze všech těchto dat určit v jednotlivých dopravních zónách podíly kombinací nástrojů mobility mezi jednotlivci, přičemž úloha byla řešena pro výdělečně činné osoby. Takto získané hodnoty podílů je pak možné použít jako vstupy do výpočtu dopravní poptávky.

Při výpočtu dopravního modelu je však nutné zohlednit vzájemné interakce mezi dopravní poptávkou a dopravní nabídkou. Tento jev je zpravidla vyřešen iterativním

výpočtem dopravní nabídky a poptávky, jak bylo popsáno v kapitole 2.2.4. Model pro určení podílů kombinací jednotlivých nástrojů mobility je potřeba zařadit před výpočet dopravní poptávky. Schéma výpočtu je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obrázek 30 Modifikace iterativního výpočtu dopravní nabídky a poptávky v makroskopickém dopravním modelu se zohledněním modelu nástrojů dostupnosti

Zdroj: Vlastní zpracování

V případě, že již byl dopravní model někdy v minulosti vypočten a zkalibrován, je možné model nástrojů mobility propočítat na základě existujících hodnot nákladových veličin, neboť tyto hodnoty byly již vypočteny z rovnovážného zatížení dopravní sítě.

S ohledem na v této práci prokázaný vliv nástrojů mobility na volbu dopravního prostředku je důvodné se domnívat, že navržená modifikace dopravního modelu je velmi účelná pro zpřesnění výpočtu dopravní poptávky a je velmi důležitá v těch případech, kdy zpracováváný model slouží jak vstupní podklad pro plánování veřejné dopravy.

6 Závěr

Stěžejním cílem této disertační práce bylo doplnění standardního postupu výpočtu makroskopického dopravního modelu o submodel, který by pro každou zónu dopravního modelu určoval pro jednotlivé kombinace nástrojů mobility jim příslušné podíly v rámci populace. Tento cíl byl zcela splněn.

Práce prokázala vliv nástrojů mobility na volbu dopravního prostředku a potvrdila vhodnost doplnění tohoto submodelu do vybraných úloh makroskopického dopravního modelování. Platnost výsledků práce byla ověřena multinomiálním logitovým modelem, nested-logit modelem a smíšeným logitovým modelem. I přes testování hypotéz na konkrétních datových sadách TSK Praha mají dosažené metodické výsledky práce obecnou platnost a jsou aplikovatelné ve všech úlohách makroskopického dopravního modelování, ve kterých v principu existuje reálná volba dopravního módu (tj. při dopravně modelovacích úlohách, kdy veřejná doprava může tvořit použitelný substitut dopravě individuální a zároveň, pokud veřejná doprava nabízí možnost předplatných jízdenek, což vždy není samozřejmostí).

Je nutné uznat, že vliv některých faktorů (například příjem jednotlivce nebo občanství ve srovnání s trvalým pobytem), které byly v dostupné literatuře uvedeny jako statisticky významné, nebylo možné na dostupných datech ověřit. Vlivem této skutečnosti nebylo možné úspěšně otestovat další struktury modelů. V případě dostupnosti hodnot těchto faktorů by modely vykazovaly pravděpodobně vyšší kvalitu. Avšak i poznatky v práci získané a ověřené je možné použít i bez zohlednění vlivu dodatečných faktorů pro přípravu dalších průzkumů dopravního chování.

Tato práce dospěla také k zajímavým výsledkům v části věnované modelům volby nástrojů mobility na úrovni jednotlivců. Ukázala, že dopravní dostupnost VHD hraje roli jako faktor při rozhodování o vlastnictví předplatní jízdenky. Je nutné si uvědomit, že určitá úroveň dopravní dostupnosti není dána pouze kvalitou nabídky VHD, ale též rozmístěním zdrojů a cílů v modelované oblasti. Proto například vysoký podíl vlastnictví předplatní jízdenky vykazují kompaktně zastavěné dopravní zóny v sídlištních celcích na okraji Prahy v okolí stanic metra.

Tento fakt je intuitivně vnímán odbornou veřejností v ČR již dnes, avšak zpravidla se omezuje na jednodušší indikátory v podobě vzdálenosti od centra města, hustoty obyvatelstva dané dopravní zóny nebo vzdálenosti k nejbližší stanici metra nebo železnice. Avšak až indikátory dopravní dostupnosti spojující na jedné straně faktory dopravní nabídky a na druhé straně faktory dopravní poptávky umožňují komplexní posouzení výhodnosti polohy dané dopravní zóny nebo místa.

Autor této práce tak pevně věří, že navržený koncept bude v budoucnu implementován do rutinního výpočtu dopravní poptávky a nabídky a zároveň, že toto aplikační prvenství se podaří v rámci dopravního modelu Pražského metropolitního regionu spravovaném na TSK Praha.

7 Použité zdroje

AHRENS, G.-A., F. LIEBKE, R. WITTEWER, S. HUBRICH a S. WITTIG, 2014. *Methodenbericht zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2013“*. Dresden.

AHRENS, G.-A., R. WITTEWER, S. HUBRICH, S. WITTIG a F. LIEBKE, 2015. *Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2013“: SrV-Stadtgruppe: Unter-/Grund-/Kleinzentren/ ländliche Gemeinden, Topografie: flach*. Dresden.

AKBARI, S., M.S. HASNINE, E. PAPAIOANNOU, A. BERNARDINO a K.N. HABIB, 2020. Home relocation and mobility tool ownership: Econometric investigations in the context of rising fuel prices in the Greater Toronto Area [online]. *Travel Behaviour and Society*, **19**, 8-19. Dostupné z: 10.1016/j.tbs.2019.10.005

AXHAUSEN, K.W., H. KÖLL a M. BADER, 1998. *Public Transport Usage Intensity of Season Ticket Holders in the City of Innsbruck*. Report to the Innsbrucker Verkehrsbetriebe GmbH. Innsbruck.

BARTOŠ, L., A. RICHTER, J. MARTOLOS a M. HÁLA, 2012. *Prognóza intenzit automobilové dopravy. TP 225. 2. vyd. Pízeň : EDIP*.

BAUDYŠ, K., V. JANOŠ, O. POLÁK a L. WALLA, 2008. Makroskopické dopravní modely jako podklady užitko-nákladových analýz. *Telematika pro regionální dopravu 2008*.

BECKER, H., A. LODER, B. SCHMID a K.W. AXHAUSEN, 2017. Modeling car-sharing membership as a mobility tool: A multivariate Probit approach with latent variables [online]. *Travel Behaviour and Society*, **8**, 26-36. Dostupné z: 10.1016/j.tbs.2017.04.006

BEIGE, S., 2008. *Long-term and mid-term mobility decisions during the life course*. Disertace (Ph.D.). Zürich.

BEN-AKIVA, M.E. a S.R. LERMAN, 1985. *Discrete choice analysis. Theory and application to travel demand*. Cambridge, Mass. : MIT Press. MIT Press series in transportation studies. 9.

BEN-AKIVA, M.E., 2008. *Transportation Systems Analysis: Demand and Economics*. Lecture notes.

BHAT, C.R. a J.Y. GUO, 2007. A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels [online]. *Transportation Research Part B: Methodological*, **41**(5), 506-526. Dostupné z: 10.1016/j.trb.2005.12.005

BILER, S., P. KOUŘIL, P. RUSÝ, M. STANĚK a P. ŠENK, 2014. *Metodika aktivně-cestovního průzkumu*. Brno : Centrum dopravního výzkumu; Median.

BRAUN KOHLOVÁ, M. a V. MÁČA, 2016. *Faktory ovlivňující volbu dopravního prostředku městského obyvatelstva - přehled stavu poznání*. Praha.

BULÍČEK, J., V. MOJŽIŠ, T. MOLKOVÁ, P. BROŽOVÁ, I. HRUBAN, F. VÍZNER, P. HOFHANZL a P. SÚKENNÍK, 2011. *Modelování technologických procesů v dopravě*. Vyd. 1. Pardubice : Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Monografie.

BUNDESAMT FÜR STATISTIK, 2017. *Verkehrsverhalten der Bevölkerung. Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*. Neuchâtel.

BUNDESAMT FÜR STATISTIK, 2020. *Strassenfahrzeuge – Bestand, Motorisierungsgrad* [online] [cit. 12. února 2020]. Dostupné z: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.html>

CROISSANT, Y., 2019. *Mlogit. multinomial logit model*. R package version 0.4-1.

ČESKÝ ROZHLAS, 2019. *Praha oživuje myšlenku „vodní tramvaje“*. Speciální linky MHD mají vozit lidi k akcím na březích Vltavy [online]. 6. května 2019 [cit. 6. září 2019]. Dostupné z: https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/praha-mhd-lodni-doprava-lodni-linky_1905061415_dbr

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, 2016. *Soustava územních prvků a územně evidenčních jednotek* [online]. 22. listopadu 2016. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/rso/soustava-uzemnich-prvku-a-uzemne-evidencnich-jednotek>

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD, 2018. *Výsledky sčítání lidu, domů a bytů 2011* [online]. 7. února 2018. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/otevrena_data_pro_vysledky_scitani_lidu_domu_a_bytu_2011_slodb_2011

DEMEL, J., 2002. *Grafy a jejich aplikace*. Vyd. 1. Praha : Academia.

ERATH, A. a K.W. AXHAUSEN, 2010. *Long term fuel price elasticity: effects on mobility tool ownership and residential location choice*. Working paper : ETH Zurich.

FLORIAN, M., M. GAUDRY a C. LARDINOIS, 1988. A two-dimensional framework for the understanding of transportation planning models [online]. *Transportation Research Part B: Methodological*, **22**(6), 411-419. Dostupné z: 10.1016/0191-2615(88)90022-7

HÁLA, M., 2009. Predikce stupně automobilizace v České republice. In: Z. KRAMÁŘOVÁ, ed. *Sborník z workshopu Udržitelná výstavba 5 : Ediční středisko ČVUT v Praze*, s. 154-158.

HALÁS, M., P. KLAPKA a P. KLADIVO, 2014. Distance-decay functions for daily travel-to-work flows [online]. *Journal of Transport Geography*, **35**, 107-119 [cit. 1. dubna 2019]. Dostupné z: 10.1016/j.jtrangeo.2014.02.001

HANSEN, W.G., 1959. How Accessibility Shapes Land Use [online]. *Journal of the American Institute of Planners*, **25**(2), 73-76. Dostupné z: 10.1080/01944365908978307

HENSHER, D.A. a K.J. BUTTON, ed., 2008. *Handbook of transport modelling*. Second edition. Bingley : Emerald. Handbooks in transport. Volume 1.

HESS, S. a D. PALMA, 2019. Apollo: A flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application [online]. *Journal of Choice Modelling*, **32**, 100170. Dostupné z: 10.1016/j.jocm.2019.100170

HOLLAREK, T. a J. KUŠNIEROVÁ, 2000. *Metódy modelovania a prognózovania prepravného a dopravného procesu*. Žilina : EDIS.

HRUŠKA, L. a P. ROHÁČ, 2019. *Plán udržiteľné městské mobility měst Mostu a Litvínova. Manažerské shrnutí Most*. Most.

JANOŠ, V. a K. BAUDYŠ, 2013. Transport Planning of Public Services. *Proceedings of the 11th European Transport Congress*.

JANOŠ, V., 2014. Using gravity model in regional rail transport planning. In: J. BALICKI, ed. *Advances in applied and pure mathematics. Proceedings of the 2nd International Conference on Mathematical, Computational and Statistical Sciences (MCSS '14); Proceedings of the 7th International Conference on Finite Differences, Finite Elements, Finite Volumes, Boundary Elements (F-and-B '14) : Gdansk, Poland, May 15-17, 2014*. [Greece] : WSEAS.

JONG, G. de, J. FOX, A. DALY, M. PIETERS a R. SMIT, 2004. Comparison of car ownership models [online]. *Transport Reviews*, **24**(4), 379-408. Dostupné z: 10.1080/0144164032000138733

KAIN, J.F. a M.E. BEESLEY, 1965. Forecasting Car Ownership and Use [online]. *Urban Studies*, **2**(2), 163-185. Dostupné z: 10.1080/00420986520080341

KOČÁRKOVÁ, D., J. KOCOUREK a M. JACURA, 2009. *Základy dopravního inženýrství*. V Praze : České vysoké učení technické.

KOWALD, M., B. KIESER, N. MATHYS a A. JUSTEN, 2017. Determinants of mobility resource ownership in Switzerland: changes between 2000 and 2010 [online]. *Transportation*, **44**(5), 1043-1065. Dostupné z: 10.1007/s11116-016-9693-7

KREML, J., 2014. Model volby dopravního prostředku - zkušenosti a otázky. *Odborný seminář a setkání uživatelů PTV VISION v ČR*. Praha.

KŘÍŽ, M. a V. JANOŠ, 2019. Factors influencing season ticket ownership: An example from the Czech Republic. *Transport Means - Proceedings of the International Conference*. Palanga : Kaunas University of Technology, s. 398-402.

KŘÍŽ, M., 2015. *Návrh postupu tvorby makroskopických dopravních modelů*. Studie k disertační práci. Praha.

KŘÍŽ, M., 2018. Zkušenosti z pravidelné aktualizace dat o dopravním chování v Pražské metropolitní oblasti. *Dopravní chování v datech*. Brno, s. 22-24.

KŘÍŽ, M., J. KREML a A. LANGEROVÁ, 2018. *Přepravní prognóza pro projekt železničního spojení Prahy, Letiště Ruzyně a Kladna - horizont 2030*. Praha.

LILL, E., 1891. *Das Reisegesetz und seine Anwendung auf den Eisenbahnverkehr*. Wien : Spielhagen und Schurich.

- LODER, A. a K.W. AXHAUSEN, 2018. Mobility tools and use: Accessibility's role in Switzerland [online]. *Journal of Transport and Land Use*, 11(1). Dostupné z: 10.5198/jtlu.2018.1054
- LOHSE, D., 2011. *Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2., Verkehrsplanung. 3., vollständig arbeitete Aufl.* Berlin : Beuth.
- MACEJKA, P., 2014. *Vliv struktury osídlení kraje a vybraných socioekonomických ukazatelů na dopravní poptávku*. Disertace (Ph.D.). Ostrava.
- MACEJKA, P., 2019. Plány udržitelné městské mobility - zkušenosti z praxe. XX. *Dopravně - inženýrské dny. Mobilita a logistika ve městech a regionech budoucnosti*. Brno : Pobočka České silniční společnosti, s. 130-138.
- MANHEIM, M.L., 1980. *Fundamentals of transportation systems analysis*. 3. pr. Cambridge, Mass. : MIT Pr. MIT Press series in transportations studies. 4.
- MARADA, M., L. FRÁNĚ, V. JANOŠ, V. JAROŠ, S. KRAFT, M. KŘÍŽ a M. KOWALSKI, 2017. *Rychlá spojení metropolitních oblastí: dopady (nové) dostupnosti na pracovní trh*. Praha.
- MDV SR. *Metodická příručka k zostave dopravných modelov a dopravných prognóz*. Bratislava.
- MEDELSKÁ, V., P. JIRAVA, D. NOP a J. ROJAN, 1991. *Dopravné inžinierstvo*. 1. vyd. Bratislava : Alfa.
- MELZER, Z., T. NĚMEC, P. URBÁNKOVÁ, O. KOKEŠ a J. DYTRYCH. *Dopravní sektorové strategie 2. fáze. Kniha 2 Strategický dopravní model ČR*.
- MOHELSKÝ, L., 2011. Prognóza vývoje počtu osobních automobilů v České republice. *Dopravní inženýrství*, (1), 2-5.
- MONHEIM, R., 1987. Verkehrsmittelwahl und Zeitkartenbesitz im Ausbildungsverkehr: Eine Fallstudie bei Schülern und Studenten in Bayreuth. *Verkehr und Technik*, 40(1), 3-9.
- ORTÚZAR, J.d.D. a L.G. WILLUMSEN, 2011. *Modelling Transport*. Fourth edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom : John Wiley & Sons.
- PÁEZ, A., D.M. SCOTT a C. MORENCY, 2012. Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators [online]. *Journal of Transport Geography*, 25, 141-153. Dostupné z: 10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016
- PASTOR, O. a A. TUZAR, 2007. *Teorie dopravních systémů*. Vyd. 1. Praha : ASPI.
- PFLEGEROVÁ, E., 2001. *Technický slovník naučný*. Praha : Encyklopedický dům.
- PTV, 2019. *PTV VISUM 18. Manual*. Karlsruhe.
- R CORE TEAM, 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Dostupné z: <https://www.R-project.org/>
- RAJMAN, J., T. MATRAS a P. TESAŘ, 2015. *Výběrové šetření charakteristik dopravního chování obyvatel hl. m. Prahy*. Praha.

- RAJMAN, J., T. MATRAS a P. TESAŘ, 2016. *Výběrové šetření charakteristik dopravního chování obyvatel zájmové oblasti hl. m. Prahy*. Praha.
- RODRÍGUEZ, G., 2007. *Lecture Notes on Generalized Linear Models* [online] [cit. 17. dubna 2019]. Dostupné z: <http://data.princeton.edu/wws509/notes/>
- ROHÁČ, P., L. STANĚK a P. ROHÁČ ML., 2018. *Generel dopravy města Poděbrady. Návrhová část*. Ostrava.
- RSTUDIO TEAM, 2016. RStudio: Integrated Development Environment for R. Dostupné z: <http://www.rstudio.com/>
- SARLAS, G. a K.W. AXHAUSEN, 2018. *Commuting distance and individual accessibility*: ETH Zurich.
- SCOTT, D.M. a K.W. AXHAUSEN, 2006. Household Mobility Tool Ownership: Modeling Interactions between Cars and Season Tickets [online]. *Transportation*, **33**(4), 311-328. Dostupné z: 10.1007/s11116-005-0328-7
- SCHILLER, C., 2007. Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung. *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr*, (10).
- SCHILLER, C., 2011. *Theorie der Verkehrsplanung II*. Skript zur Vorlesung.
- SIMMA, A. a K.W. AXHAUSEN, 2001. Structures of commitment in mode use: a comparison of Switzerland, Germany and Great Britain [online]. *Transport Policy*, **8**(4), 279-288. Dostupné z: 10.1016/S0967-070X(01)00023-3
- TAYLOR, P.J., 1971. Distance Transformation and Distance Decay Functions [online]. *Geographical Analysis*, **3**(3), 221-238. Dostupné z: 10.1111/j.1538-4632.1971.tb00364.x
- TOBLER, W.R., 1970. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region [online]. *Economic Geography*, **46**, 234. Dostupné z: 10.2307/143141
- TRAIN, K., 2009. *Discrete choice methods with simulation*. 2nd ed. New York : Cambridge University Press.
- TREIBER, M., 2017. *Verkehrsdynamik und -simulation* [online]. *Skript zur Vorlesung SS 2017*. Dostupné z: http://www.mtreiber.de/Vkmod__Skript/Vkmod__all.pdf
- TSK-ÚDI, 2019. *Ročenka dopravy Praha 2018*. Praha.
- URBAN, J. a M. ŠČASNÝ, 2011. Faktory vysvětlující vlastnictví automobilu v ČR. *Dopravní inženýrství*, (2), 27-28.
- UŠPALYTĚ-VITKŪNIENĚ, R., V. GRIGONIS a G. PALIULIS, 2012. The Extent of Influence of O-D Matrix on the Results of Public Transport Modeling [online]. *TRANSPORT*, **27**(2), 165-170. Dostupné z: 10.3846/16484142.2012.693894
- VALEŠKA, J., 2007. *Mobility management: tvorba plánů mobility pro malé a střední podniky*. Diplomová práce (Ing.). Praha.

VOTRUBA, Z., J. KLEČÁKOVÁ a M. KALIKA, 2004. *Systémová analýza*. Vyd. 1. Praha : Vydavatelství ČVUT.

WALLA, L., 2006. *Modelování přepravních vztahů osobní dopravy v dopravních systémech - aplikace na modelu města Tábor*. Diplomová práce (Ing.). Praha.

WEN, C.-H. a F.S. KOPPELMAN, 2001. The generalized nested logit model [online]. *Transportation Research Part B: Methodological*, **35**(7), 627-641. Dostupné z: 10.1016/S0191-2615(00)00045-X

WHELAN, G., 2007. Modelling car ownership in Great Britain [online]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **41**(3), 205-219. Dostupné z: 10.1016/j.tra.2006.09.013

WIDMER, P., K.W. AXHAUSEN, B. SCHMID, F. BECKER a P. STEIN, 2019. *Einfluss nicht-verkehrlicher Variablen auf die Verkehrsmittelwahl: Entwurf* : ETH Zurich.