

Dopravní plánování v systémech veřejné dopravy



HABILITAČNÍ PRÁCE

Ing. Vít Janoš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto habilitační práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Habilitační práce

Dopravní plánování v systémech veřejné dopravy

Ing. Vít Janoš, Ph.D.

Fakulta dopravní ČVUT

Ústav logistiky a managementu dopravy

janos@fd.cvut.cz

leden 2022

Abstrakt

Předložená práce se zabývá problematikou dopravního plánování v systémech veřejné dopravy, se zaměřením na osobní železniční dopravu. Jsou představeny jednotlivé kroky dopravního plánování, jakož i vybrané postupy a metody, exaktní i heuristické, které jsou v dopravním plánování uplatnitelné. V této práci se autor snaží o propojení otázek dopravního chování, zjišťování přepravních vztahů a metod plánování linek tak, aby bylo možné při aplikaci představených postupů ve výsledném efektu dosáhnout příznivějšího modal split veřejné dopravy.

Klíčová slova: *veřejná doprava, plánování veřejné dopravy, technologie dopravy, železniční doprava, plánování jízdního řádu, ITJŘ*

Abstract

This thesis focuses on the issue of transport planning in public transport systems, with a focus on passenger rail transport. The individual steps of transport planning are presented, as well as selected procedures and methods, both exact and heuristic, which are applicable in transport planning. In this work, the author tries to link issues of transport behaviour, the discovery of transport relations and methods of line planning so that, when the presented procedures are applied, a more favourable modal split of public transport can be achieved in the final effect.

Keywords: *public transport, public transport planning, transport technology, railway transport, timetabling, Integrated Periodic Timetable (IPT)*

ÚVOD	6
1. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	8
1.1. VÝCHOZÍ STAV DOPRAVNÍHO PLÁNOVÁNÍ	8
1.2. PŘÍSTUP K DOPRAVNÍMU PLÁNOVÁNÍ	10
1.3. VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	12
2. ZJIŠŤOVÁNÍ POPTÁVKY PO PŘEPRAVĚ	13
2.1. TEORETICKÉ ZÁKLADY ZJIŠŤOVÁNÍ POPTÁVKY PO PŘEPRAVĚ	13
2.1.1. Vymezení vyšetřovaného území	14
2.1.2. Analýza charakteristik vyšetřovaného území	16
2.1.2.1. Analýza prostorové struktury	17
2.1.2.2. Analýza dopravní sítě	18
2.2. DOPRAVNÍ CHOVÁNÍ	21
2.2.1. Zdroj-cílové skupiny	21
2.2.2. Popis aktivit	22
2.2.3. Vliv rozdílu RP- a SP-dat	24
2.3. MODELOVÁNÍ POPTÁVKY PO PŘEPRAVĚ	26
2.3.1. Modely získávání vstupů o hybnosti	27
2.3.2. Modely získávání údajů o přepravní práci	30
2.4. KLASICKÝ ČTYŘFÁZOVÝ DOPRAVNÍ MODEL	31
2.4.1. Vznik přepravních vztahů	31
2.4.1.1. Růstové koeficienty	32
2.4.1.2. Regresní modely	32
2.4.1.3. Modely založené na charakteristikách dopravního chování	33
2.4.2. Volba cíle přepravního vztahu	34
2.4.2.1. Základní model	37
2.4.2.2. Odvozené modely	38
2.4.2.3. Kalibrace modelů volby cíle	40
2.4.3. Volba dopravního prostředku	40
2.4.3.1. Modely Trip-End	41
2.4.3.2. Modely Trip-Interchange	42
2.4.3. Volba cesty v síti	44
2.4.3.1. Modelování a ohodnocení prvků sítě	44
2.4.3.2. Převodění matice přepravních vztahů na matici napájecích uzlů	45
2.4.3.3. Postupy přidělení zátěže na síť	45
2.5. ELASTICITA POPTÁVKY	47
2.6. MODAL SPLIT	50
2.6.1. Sestava matice přepravních vztahů	53
2.6.2. Významné atributy nabídky ovlivňující modal split ve veřejné dopravě	53
2.6.2.1. Závislost modal split na době přepravy	54
2.6.2.2. Faktor rychlosti přepravy	55
2.6.2.3. Faktor přesnosti dopravy	56
3. PLÁNOVÁNÍ LINEK	58
3.1. ZÁSADY TVORBY PLÁNOVÁNÍ LINEK	59
3.2. OBECNÉ METODY PLÁNOVÁNÍ LINEK	61
<i>Přehled metod pro tvorbu linkové sítě</i>	62
3.3. PŘECHOD LINKOVÉHO VEDENÍ V SEGMENTY DOPRAVNÍ OBSLUŽNOSTI	64
3.4. STRUKTURA A SEGMENTACE TRHU VEŘEJNÉ DOPRAVY	65
3.5. ROZLOŽENÍ PŘEPRAVNÍCH PROUDŮ V SÍTI	71
3.5.1. Všeobecné modelování dopravních proudů	71
3.5.2. Modely pro stanovení systémového optima	73
3.5.3. System – Split	74
3.5.3.1. Nyvigův model	75
3.5.3.2. Modifikované užití Kirchhoffova zákona	75
3.5.3.3. Modelování pomocí sítě událostí	78
3.5.4. Plánování linek při zohlednění segmentů obslužnosti	79
3.5.4.1. Aparát teorie grafů v problematice plánování linek	80
3.5.4.2. Postup při tvorbě nabídky	83

3.5.4.3. <i>Plánování linek za předpokladu neznalosti skutečných přepravních vztahů</i>	86
4. KONCEPCE JÍZDNÍHO ŘÁDU	93
4.1. KOMERČNÍ JÍZDNÍ ŘÁD	98
4.2. INTERVALOVÝ JÍZDNÍ ŘÁD	99
4.3. TAKTOVÝ JÍZDNÍ ŘÁD	100
4.4. INTEGRÁLNÍ TAKTOVÝ JÍZDNÍ ŘÁD.....	103
4.4.1. <i>Ideální integrální taktový jízdní řád</i>	104
4.4.2. <i>Modifikovaný integrální taktový jízdní řád</i>	105
4.5. PLÁNOVÁNÍ STRUKTURY NABÍDKY TAKTOVÉ DOPRAVY	107
4.5.1. <i>Rozlišení taktu z prostorového hlediska</i>	107
4.5.2. <i>Koncepce ITJŘ na liberalizovaných trzích</i>	109
4.6. SHRNUTÍ PROBLEMATIKY KONCEPCE JÍZDNÍHO ŘÁDU.....	111
5. TECHNOLOGICKÉ ZAJIŠTĚNÍ PROVOZNÍ KONCEPCE	113
5.1. PRAVIDLA PRO OBĚHY VOZIDEL A TURNUSY	114
5.1.1. <i>Funkce oběhu</i>	115
5.2. METODY TVORBY OBĚHŮ VOZIDEL A PERSONÁLU.....	117
5.3. INTERAKCE MEZI POPTÁVKOU A PROVOZNÍ KONCEPCÍ.....	120
5.3.1. <i>Vliv variace poptávky na tvorbu provozní koncepce ITJŘ</i>	123
6. NÁVRH POSTUPU PRO TVORBU PROVOZNÍ KONCEPCE	127
6.1. MOŽNOSTI UPLATNĚNÍ	127
6.2. JEDNOTLIVÉ KROKY POSTUPU	129
6.3. OBECNÉ ZÁVĚRY PRO TVORBU PROVOZNÍ KONCEPCE	135
7. POŽADAVKY PROVOZNÍ KONCEPCE NA INFRASTRUKTURU	138
ZÁVĚR	143
SUMMARY	145
<i>Seznam tabulek:</i>	147
<i>Seznam obrázků:</i>	148
<i>Seznam zkratk:</i>	149
<i>Použitá literatura:</i>	150

Úvod

Problematika dopravního plánování je v českém prostředí stále velmi aktuálním tématem. Povinnost tvorby dopravních plánů nařizuje objednatelům dopravy zákon 194/2010 Sb. Zákon o veřejných službách v přepravě cestujících. Dopravní plán má utvářet rámec dopravního, smluvního a finančního řešení dopravní obslužnosti na stanovené období. Jednotlivým prvkem plánů dopravní obslužnosti je absence souměřitelných údajů o mobilitě obyvatel v České republice, které by byly využitelné pro návrh a tvorbu nových provozních koncepcí. Absence těchto údajů vede k tomu, že v mnoha případech nelze použít exaktní metody plánování linek a systémů dopravní obslužnosti. Cílem habilitační práce je představit metody a postupy, které lze při plánování dopravní obslužnosti použít „ihned“ a i s omezenými vstupy dosáhnout zlepšení v oblasti modal split veřejné dopravy.

V habilitační práci jsou představeny jednotlivé kroky dopravního plánování, jakož i vybrané postupy a metody, exaktní i heuristické, které jsou v dopravním plánování uplatnitelné. Autor se snaží o propojení otázek dopravního chování, zjišťování přepravních vztahů a metod plánování linek tak, aby bylo možné uvedenými aplikacemi ve výsledném efektu dosáhnout příznivějšího modal split veřejné dopravy, za předem uvedených podmínek. Záměrem autora je představit celou problematiku tak, aby postupy byly použitelné pro objednatele veřejné dopravy a dopravní technologie v českém prostředí.

V rámci práce byly představeny dnes běžně používané metody v oblasti dopravního chování, atributů nabídky ovlivňujících modal split, vývoje dělby přepravní práce a plánování linek, opírající se o zahraniční metody a přístupy, autorův vlastní výzkum a výstupy řešených projektů.

Dopravní plánování je představeno jako komplexní proces, který je nutné realizovat k vytvoření provozní koncepce / jízdního řádu. Jízdní řád je finálním produktem dopravního plánování ve veřejné dopravě – jeho použitelnost pro jednotlivé skupiny cestujících ovlivňuje, jak bude vypadat dělba přepravní práce v jednotlivých relacích, jaké budou náklady objednatelů na jeho funkčnost, či jaká bude reálná podoba veřejné dopravy v dané oblasti.

Proces dopravního plánování začíná vymezením přepravních potřeb v regionu. V práci jsou představeny metody, jak se lze dobrat potřebných vstupů, ve stavu, kdy nutné datové vstupy existují, jakož i metody, s jakou základnou je nutno pracovat v případě, že skutečná data k dispozici nejsou. Na základě znalosti nebo modelu přepravních vztahů v území jsou formulovány nároky na dopravní obslužnost. Na vymezené přepravní vztahy se následně navrhuje linková síť. Jsou představeny metody na tvorbu linek i metody předpokládající rozložení přepravního proudu mezi jednotlivé obslužné segmenty v rámci jedné přepravní

osy. Následují otázky eventuální segmentace v jednotlivých směrech a modální volby v rámci jednotlivých obslužných segmentů.

Dopravní plánování představuje vícestupňový proces, kdy optimalizace koncepce dopravní obslužnosti vychází z konkrétních předpokladů o hierarchickém uspořádání přepravních vztahů, z nichž jsou následně odvozeny jednotlivé segmenty dopravní obslužnosti. V samotném dopravním plánování nehraje z hlediska samotných postupů zásadní roli modální volba, nicméně velká část metod je automaticky předkládána v podobě, v jaké se uplatňuje na železnici – a to nejen z důvodu, že železniční doprava má s ohledem na vlastní dopravní cestu významný předpoklad pro páteřní funkci dopravního systému, ale i proto, že mnoho postupů naráží na konkrétní omezení dopravní technologií (což je prvek, který se při aplikaci v silniční dopravě výrazně zjednodušuje, anebo odpadá úplně).

Na základě prostorového ukotvení provozní koncepce je řešena časová složka – a to nejprve v koncepční rovině (míra systematizace jízdního řádu, přestupní uzly, v případě taktového či integrálního taktového jízdního řádu taktové uzly, časové ukotvení jednotlivých linek a jednotlivých obslužných segmentů do jednotlivých uzlů, provozní doba), a následně v rovině nabídkového detailu – jízdního řádu. V této oblasti jsou představeny základní přístupy pro poptávkově i nabídkově orientované typy jízdních řádů. Zvláštní pozornost je věnována integrálnímu taktovému jízdnímu řádu a jeho modifikacím.

Představené metody a postupy autor již mnoho let široce uplatňuje jak ve výzkumné a projektové činnosti pro veřejnou správu, objednatele dopravy i dopravce, tak i v rámci svého pedagogického působení na Fakultě dopravní ČVUT v Praze.

V letech 2005-2009 se autor této práce významnou měrou podílel na zavedení taktového jízdního řádu v dálkové železniční dopravě v ČR a dlouhodobě spolupracuje s MD ČR na tvorbě strategických dokumentů i koncepčních dokumentů v oblasti dopravního plánování, ve kterých představené přístupy a metody uplatňuje (např. Plány dopravní obslužnosti území vlaky celostátní dopravy, Objednávka Ministerstva dopravy na zabezpečení dopravních potřeb státu dálkovou drážní dopravou, Koncepce veřejné dopravy apod.).

Celou řadu představených metod a postupů autor vyučuje v rámci předmětů na Fakultě dopravní ČVUT v Praze. V obecné rovině v předmětu Technologie dopravy a logistika, v úrovni celkového uchopení problematiky dopravní obslužnosti a tvorby dopravních koncepcí v předmětu Technologie veřejné dopravy, v úrovni plánování železničního provozu v předmětu Technologie železniční dopravy a v úrovni sestavy grafikonu železniční dopravy a vlakové dynamiky ve volitelném předmětu Síťová tvorba jízdních řádů na železnici.

1. Analýza současného stavu řešené problematiky

1.1. Výchozí stav dopravního plánování

V České republice nebylo ještě v nedávné době dopravní plánování zákonně vůbec zajištěno. Tento stav představoval výrazný handicap při dlouhodobém plánování dopravní obslužnosti území (Econsult, 2006) a potřebnou změnu přineslo až zavedení platnosti zákona 194/2010 Sb. Zákon o veřejných službách v přepravě cestujících.

Dopravní plánování na úrovni objednatelů veřejné dopravy přispívá k vyšší provázanosti objednávků jednotlivých orgánů, které zajišťují veřejné služby v přepravě cestujících (v ČR stát – dálková doprava, kraje – regionální doprava). Při uzavírání dlouhodobých smluv s dopravci je princip dopravního plánování s výhledem na 5-15 let zcela nezbytný.

Pro vymezení hlavních přepravních vztahů v rámci systému osídlení v České republice je nezbytné pracovat s datovými podklady, které zprostředkovávají informace o velikosti a významu jednotlivých obcí či oblastí a základních proudech osob mezi nimi. V zásadě lze datové údaje rozdělit do tří hlavních okruhů:

- velikostně-významové údaje o obcích
- údaje o intenzitě přepravních proudů (zátěže)
- směrová data o pohybu osob (zdroj-cíl).

První skupina informací je získávána především z běžně dostupných databází pořizovaných Českým statistickým úřadem. Využita bývají hlavně data o počtech obyvatel jednotlivých obcí, o počtech studentů vysokých škol apod.

V případě informací o intenzitě a směru přepravního proudu jsou možnosti získání kvalitních a relevantních údajů omezené. Především neexistují přepravní data zdroj-cíl s určením použitého dopravního prostředku, frekvence a účelu cesty v krátké periodě sledování. Přes tyto limity lze řadu informací, byť s omezenou vypovídací schopností, získat z veřejných databází. V případě informací o intenzitě přepravních proudů jsou běžně dostupné údaje o intenzitě silniční dopravy (bez znalosti obsazenosti vozidel), popřípadě dalších údajů zahrnutých v Ročence dopravy České republiky. V rámci datových zdrojů o veřejné dopravě disponuje Ministerstvo dopravy a jednotliví objednatelé veřejné dopravy neveřejnými údaji o úsekové frekvenci cestujících v dálkových a regionálních vlacích.

Volně dostupné směrově orientované informace o přepravních vztazích jsou v podstatě omezeny na údaje o dojížděkových proudech, které jsou sledovány v rámci Sčítání lidu, domů a bytů. Databázi Sčítání lidu, domů a bytů (SLDB) pořizuje Český statistický úřad

s desetiletou frekvencí, přičemž poslední dostupná data pocházejí z roku 2011. Nové údaje z jara 2021 budou dostupné během roku 2022.

Uvedené údaje mají několik nedostatků, jež je nutné zohlednit pro relevantní výstupy. Dojížďková data zahrnují „pouze“ pravidelné pohyby do zaměstnání, včetně použitého dopravního prostředku, a do škol, které sice představují hlavní formy prostorové mobility obyvatelstva, avšak především v rámci regionálních a mikroregionálních vztahů. V rámci nadregionálních a dálkových vztahů tvoří nemalou část také nepravidelné, nahodilé vztahy, které nejsou v dojížděcí sledovány. Jedná se především o cesty za službami (obchod, úřad, lékař apod.), pracovní cesty a cesty spojené s cestovním ruchem, které se vyznačují značnou variací poptávky. Druhým nedostatkem je časové určení, které se objevuje v datových výstupech, kde je podle frekvence rozlišena dojížděčka denní a „celková“ nedenní, tj. cesta několikrát týdně i měsíčně. Dalším, neméně důležitým nedostatkem souvisejícím s využitím dat o dojížďkových proudech z roku 2011 je jejich neaktuálnost. Lze totiž odůvodněně předpokládat, že za posledních deset let došlo vlivem socioekonomických změn obecně k nárůstu mobility obyvatel vlivem vyšší koncentrace pracovních míst do velkých center (generující významné denní přepravní proudy ze zázemí), výstavby dopravní infrastruktury umožňující pravidelné denní dojíždění, dostupnosti veřejné dopravy či automobilu atd. Zároveň zůstává otázkou, jakým způsobem budou relevantní data za SLDB 2021 v případě, že by změny v dopravním chování způsobené omezeními spojenými s onemocněním COVID-19 měly trvalý charakter.

Významný problém dopravního plánování v České republice spočívá v tom, že na jedné straně je k dispozici obecně známý matematický aparát, včetně nejnovějších softwarových nástrojů, na straně druhé je však velmi obtížné tento aparát plně využívat, neboť neexistují souměřitelná data v potřebné kvalitě vztažná k určitému modelovému okamžiku. Vzniká sice celá řada dopravních modelů, které jsou využity pro řešení konkrétního projektu, avšak tyto modely nejsou následně udržovány v aktuálním stavu a proto se ve většině případů začíná s novými dopravními modely opět od začátku (jednou z výjimek je např. průběžně udržovaný model hl. m. Prahy na TSK Praha). V mnoha případech tak dopravní plánovači postupují zcela intuitivně – „zde by si zasloužilo spojení...“, „tétu relaci by slušelo aby...“. Častá je ryze dvoustavová logika „všechno nebo nic“, tj. nejsou-li k dispozici potřebná data, je následnou reakcí absolutní rezignace na jakékoli využití disponibilních dat a následuje pouhá intuice konkrétního člověka – dopravního plánovače (Baudyš a kol., 2006). Z tohoto důvodu jsou v této práci uvedeny i autorem navržené a používané heuristické a empirické postupy, které posouvají dopravní plánování dále, než pouhá intuice.

1.2. Přístup k dopravnímu plánování

Podstata dopravního plánování ve veřejné dopravě spočívá v systematické plánovací činnosti, kdy vstupem jsou veškeré dostupné údaje o mobilitě obyvatel a jejich preferencích při volbě dopravního prostředku, a výstupem plány pro systémy veřejné dopravy v podobě koncepční a strategické obslužnosti území veřejnou dopravou (Baudyš a kol., 2005). Dopravní plánování má především široké uplatnění ve sféře státní správy a samosprávy, neboť naprostá většina služeb veřejné dopravy je financována z veřejných rozpočtů. Dopravní plán tak představuje nejen okamžité řešení pro situaci „co dělat teď“, s dnešním rozpočtem a současnou infrastrukturou“, ale měl by vyústit ve strategickou vizi, která je podkladem pro modernizaci a výstavbu dopravní infrastruktury a pro stabilizaci služeb na dopravním trhu (z úrovně dlouhodobého financování, uzavírání smluv apod.).

Funkční systém veřejné dopravy je dnes pojímán jako součást širší strategie udržitelné mobility, která je charakterizována třemi průřezovými pilíři: ekologickým, ekonomickým a sociálním (Econsult, 2006).

V souladu s touto strategií existuje pět základních důvodů, proč je veřejná doprava významná a je nutno ji podporovat:

- a) prostorová dosažitelnost
- b) regionální rozvoj
- c) sociální rozměr
- d) ekologický rozměr
- e) míra bezpečnosti

Pro systém veřejné dopravy má velký význam dodržování jednotných pravidel dopravního plánování, která tak umožní nejen jeho hierarchické řízení, ale poskytují zároveň jednotnou datovou základnu při optimalizaci systému (Pastor a kol., 2006).

V tomto procesu je nutné dodržení jednotlivých plánovacích etap a kroků, které mají jednoznačnou posloupnost (Pastor a kol., 2006):

- *Formulace přepravních potřeb*
- *Plánování sítě linek*
- *Implementace na síť*
- *Plán grafikonu*
- *Oběhy vozidel*
- *Controlling veřejné dopravy*
- *Plánování dopravní sítě*

V tomto pořadí je i představován teoretický aparát, včetně heuristických přístupů v této práci, a to od fáze formulace přepravních potřeb až po úroveň provozně ekonomických souvislostí jízdního řádu. Tato sekvence kroků je s mírnými odchylkami standardně používána i v zahraničí (Desaulniers, Hickman, 2007) a představuje zažitý a funkční dopravně-plánovací postup.

Stručné shrnutí uvedených kroků představuje postup, kdy jsou v počátku obecně popsány stávající přepravní vztahy v území, napříč všemi druhy dopravy. Existují-li všechny relevantní vstupy v potřebné kvalitě, je vhodné tyto přepravní vztahy znázornit v dopravním modelu, který by měl co nejpřesněji popsat realitu přepravních vztahů. Následně je nutno vytvořit takovou provozní koncepci, která umožní dosáhnout maximální dělby přepravní práce veřejné dopravy na celkových přepravních výkonech. Následně je nutno naplánovat technické a organizační zabezpečení takto vzniklých dopravních výkonů, včetně funkční zpětné vazby do ekonomické roviny (náklady – výnosy – kompenzace z veřejných zdrojů). Finálním výstupem procesu dopravního plánování je sumarizace podkladů pro plánování infrastruktury, které z tohoto pohledu může vést buď k dalšímu zvýšení podílu veřejné dopravy na celkové přepravní práci, anebo ke snížení ekonomické (provozní) náročnosti stávajících výkonů.

Kvalitní dopravní plán musí vzhledem k trvale udržitelné mobilitě obyvatelstva vytvářet vhodnou marketingovou strategii veřejné dopravy, neboť prostřednictvím nabídky přepravních příležitostí motivuje každého účastníka přepravního procesu k racionální volbě dopravního prostředku (Axhausen, 2001).

1.3. Vymezení základních pojmů

Celá oblast dopravního plánování pracuje se skupinou několika základních pojmů, které je třeba hned v úvodu vysvětlit, přestože budou podrobně vymezeny v příslušných kapitolách.

Dopravní model – jedná se o zpravidla matematický (v dnešní době převážně softwarově řešený) model popisující stávající přepravní vztahy v území, a to obvykle napříč všemi druhy dopravy. Smyslem vytvoření dopravního modelu je věrný popis reality, který je po kalibraci, dle stávajících výkonů jednotlivých dopravních druhů v jednotlivých adresných přepravních relacích, využit k prognózování – jak by vypadala reakce na změnu např. nabídky spojení, časové dostupnosti, změně kapacity dopravní cesty apod.

Dopravní chování – představuje souhrn preferencí každého uživatele dopravního systému, které ovlivňují uživatele při volbě dopravního prostředku. Jedná se o soubor objektivních i subjektivních faktorů, kterými je konkrétní druh dopravy uživatelem hodnocen / vnímán při konkrétní cestě.

Modal split – dělba přepravní práce, respektive podíl jednotlivých druhů dopravy na celkové přepravní práci (vztaženo na množinu dopravních výkonů v určitém čase a prostoru, či vztaženo k přepravní relaci).

Grafikon – grafické znázornění jízd vlaků do podoby nákrešného jízdního řádu. V grafickém zobrazení dráha / čas se znázorňují časové polohy spojů na trati. V železniční dopravě tvoří součást grafikonu i technické a technologické podklady a pomůcky ročního jízdního řádu. Jízdní řád pro cestující je zpravidla exportem údajů z grafikonu. Jízdní řád v dopravním plánování představuje produkt veřejné dopravy.

Linka – je tvořena souhrnem spojů, které mají většinu trasy shodnou, přičemž v případě vedení spojů tzv. v taktu mají shodné i minutové polohy na zastávkách.

2. Zjišťování poptávky po přepravě

2.1. Teoretické základy zjišťování poptávky po přepravě

Směrodatnými ukazateli ovlivňujícími intenzitu přepravního proudu jsou především socioekonomické faktory vztahené k počtu obyvatel konkrétních míst, zrovna tak jako vzájemný „vztah“ míst, pro které přepravní proud zjišťujeme (Axhausen, 2001) .

Dopravní modely zabývající se intenzitou přepravního proudu mezi dvěma místy lze základním způsobem rozdělit na modely zabývající se prostorovou strukturou území z hlediska zdrojů a cílů cest obyvatel a modely vztahující se k popsání osobních mezilidských vztahů. V obou případech má však velký význam dopravní chování obyvatelstva, které starší modely více či méně zanedbávají a v rámci novějších modelů se je pokoušíme zjistit, popsat a algoritmizovat (Vrtic, Axhausen, 2002).

Řešený prostor či území je třeba rozdělit do jednotlivých oblastí poptávky po přepravě, které jsou nějakou svou vlastností specifické (Schnabel, Lohse, 1997). Následně lze zjištěné, případně vypočtené hodnoty intenzity přepravního proudu přiřadit jednotlivým cílům. Jako podklady pro modelování poptávky a kalibraci dopravního modelu jsou nutná popisná data k jednotlivým vstupům:

prostorová data:

- 1) vlastnosti bodů/oblastí generujících přepravu (atraktivita / emitivita sídel)
- 2) cílové skupiny cestujících
- 3) přepravní potenciál plynoucí ze struktury prostorového uspořádání v území

data o dopravním chování:

- 1) četnost cest v území, specifická hybnost
- 2) informace o existujícím modal split
- 3) vlastnictví osobních vozidel ve vztahu k počtu obyvatel

stávající omezující podmínky:

- 1) přepravní časy jednotlivých druhů dopravy, časová dostupnost zdrojů / cílů cest
- 2) počet přestupů v rámci realizovaných cest
- 3) četnost spojů u jednotlivých druhů dopravy

Na základě výše uvedených vstupů je třeba kalibrovat jednotlivé parametry vybraného dopravního modelu tak, aby co nejvěrněji popisoval realitu v řešeném prostoru. Následně lze pomocí změny jednotlivých vstupů predikovat vývoj poptávky.

2.1.1. Vymezení vyšetřovaného území

Všechny dopravní a přepravní procesy, na které se vztahuje zjišťování poptávky po přepravě, je nutno v prostoru vymežit – samotným střediskem, případně územím / vyšetřovanou zónou, okolím.

Dopravní význam střediska (jeho velikost) a struktura (typ) zajištění jeho dopravní obslužnosti je dán jednak populační velikostí střediska, jednak jeho dopravní polohou, tzn. především polohou v silniční a železniční síti. Na poptávku po osobní dopravě samozřejmě mají vliv i další faktory, jako jsou cena dopravy, její rychlost, dostupnost zastávek, pohodlí, a mnoho dalších faktorů subjektivní povahy. Základní je zde však makropoloha a odpovídající formování sítí podle hierarchicky vyšších úrovní střediskových soustav. Proto je potřeba zdůraznit primárně vliv sídelní hierarchie na utváření dopravně-geografických vazeb a hierarchie dopravních sítí (Marada, 2003). Každé sídlo (dopravní uzel) lze charakterizovat v území z hlediska jeho mezopolohy (vnitrostátní), makropolohy (v nadnárodním systému), a je třeba také zohlednit určitá lokální specifika vyplývající z mikroregionálních vztahů. Každá z uvedených úrovní geografické polohy se odráží v dopravní funkci střediska a jeho obslužnosti: makropolohový význam ovlivňuje počet mezinárodních spojů, mezopoloha ovlivňuje organizaci vnitrostátní dálkové dopravy a mikroregionální význam střediska pak organizaci místní dopravní obslužnosti. Existující dopravní obslužnost střediska je tedy výsledkem jak jeho regionálního významu, tak exponovanosti jeho polohy (Baudyš a kol., 2008).

S ohledem na členění jednotlivých dopravních zón je nutno zabývat se i vzájemnými vazbami jednotlivých řešených dopravních zón ve sledovaném území. Nejprve je nutné si uvědomit, že sledované území je zahrnuto v nějakém větším územním celku, tedy má nějaké okolí. Dochází tak k interakcím, které se projevují přepravními vztahy přes hranice

sledovaného území. Přitom zpravidla platí: čím bližší okolí, tím je interakce silnější. Proto je nutno zahrnout část okolí (tuto část nazveme okolí, zbytek okolního prostředí nazveme rozšířené okolí) do dopravního modelu a vytvořit tak vyšetřované území.

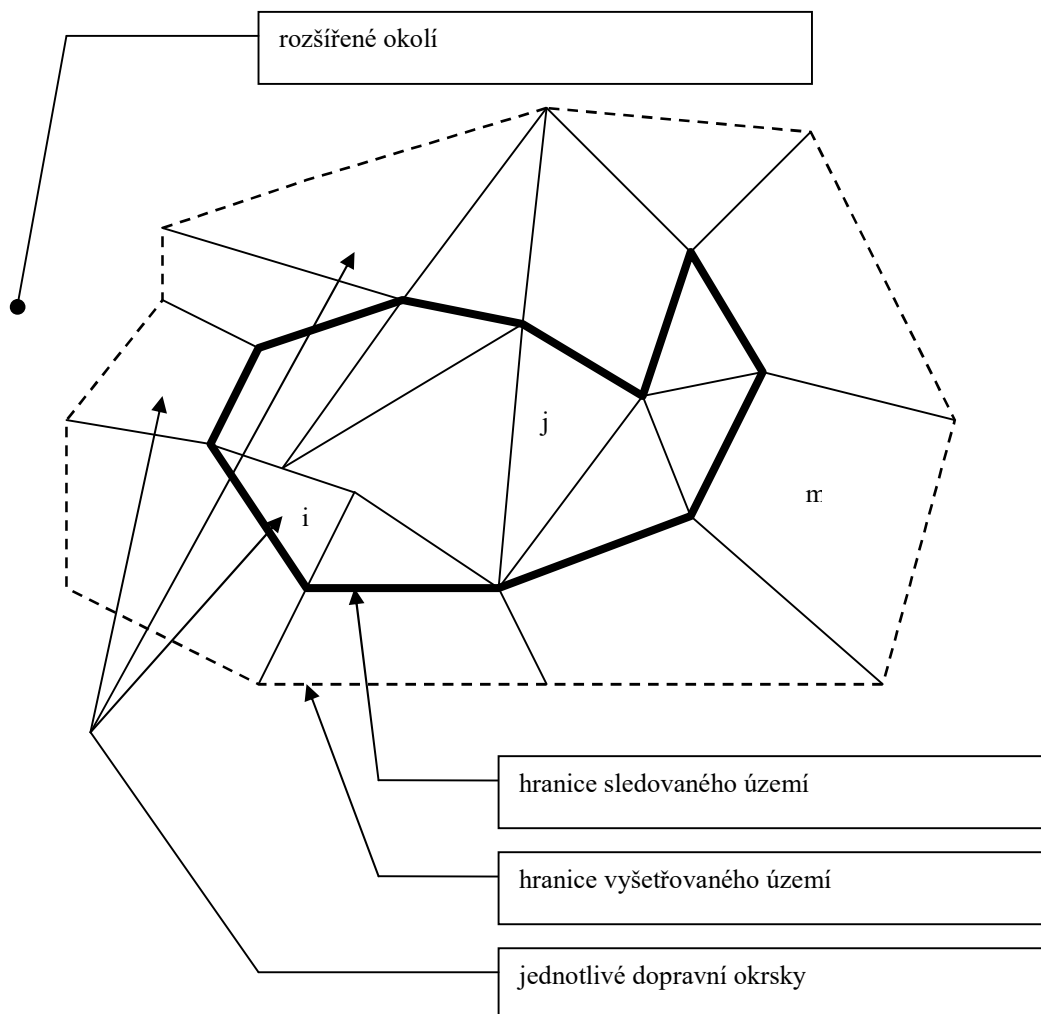
Okolí lze zahrnout třemi způsoby (Schnabel, Lohse, 1997):

- velice široké okolí (tzv. globální expanze okolí) - (skoro) bez existence interakcí mezi sledovaným územím a rozšířeným okolím
- úzké okolí (tzv. lokální expanze okolí) - s existencí malé interakce mezi sledovaným územím a rozšířeným okolím
- bez okolí (rozšířené okolí přímo sousedí se sledovaným územím, na hranici existují tranzitní body, které slouží jako fiktivní zdroje a cíle cest do okolí)

Samo vyšetřované území se pak rozdělí na tzv. dopravní okrsky (viz Obr. 2.1.), což jsou územní jednotky, které jsou zdroji, resp. cíli přemístění. Každý dopravní okrsek je pak napojen jedním nebo více tzv. napájecími uzly na dopravní síť území. Nejjednodušší variantou je uzel jeden, který je umístěn v geometrickém těžišti okrsku.

Při vytváření okrsků platí:

- Sledované území a okolí se každé dělí zvlášť.
- Přírodní překážky (vodní toky, hřebeny, neprostupná území) by měly tvořit hranice okrsků. Stejně pravidlo platí pro hlavní pozemní komunikace a linky veřejné dopravy.
- Velikost okrsků závisí na účelu dopravního modelu a velikosti vyšetřovaného území.
- S rostoucí vzdáleností od centra území se zpravidla okrsky zvětšují (obzvláště na vnějším kraji okolí).
- Okrsky by také měly dodržovat strukturu území z jiných pohledů (územní plánování, ...).
- Je vhodnější modelově vytvořit nejdříve větší množství menších okrsků, které pak lze spojit. Opačný postup je mnohem náročnější, mnohdy nemožný.



Obr. 2.1: Rozdělení vyšetřovaného území na dopravní okrsky (zdroj: Baudyš a kol., 2008)

2.1.2. Analýza charakteristik vyšetřovaného území

Abychom mohli kvalitně modelovat dopravní systém na určitém území, je nutné získat co nejvíce informací o všech jeho relevantních atributech. Tyto atributy se dají rozdělit do tří skupin:

- prostorová struktura
- dopravní síť
- dopravní chování obyvatelstva

2.1.2.1. Analýza prostorové struktury

Prostorová struktura popisuje vlastnosti jednotlivých dopravních okrsků (popř. z nich složených větších celků), popř. jejich obyvatel (návštěvníků) z nedopravních hledisek (demografického, sociálního, geografického, ...), které však dopravu ovlivňují. Z těchto vlastností se pak odvozují strukturální veličiny používané k modelování. Lze je shrnout do následující tabulky:

Tab. 2.1. Charakteristiky území relevantní pro dopravní modelování (zdroj: FD ČVUT, Telematix, 2010)

Geografické charakteristiky
<ul style="list-style-type: none">• reliéf• podnebí a počasí• využití ploch<ul style="list-style-type: none">- zastavěná území (obytná, průmyslová, ...)- nezastavěná území (lesy, orná půda, vodní plochy)• ochranná pásma různých druhů
Charakteristiky obytných území
<ul style="list-style-type: none">• počty bytů dle jejich druhů• počty obyvatel dle:<ul style="list-style-type: none">- stáří- vzdělání- příjmu- typů domácností- dostupnosti osobního automobilu• počty zaměstnaných dle oborů hospodářství a profesních skupin

Hospodářské charakteristiky

- počty pracovních míst dle oborů hospodářství a dle podniků
- objemy produkce dle:
 - hodnoty v peněžních jednotkách
 - fyzických jednotek (hmotnost, objem)
- pracovní režimy (začátek a konec pracovní doby, směnnost)

Charakteristiky společenské vybavenosti, obchodu a služeb

- počty pracovních míst v příslušných zařízeních
- prodejní plochy
- kapacity kulturních zařízení
- kapacity zařízení sloužících dopravě (nádraží, ...)
- kapacity rekreačních zařízení

2.1.2.2. Analýza dopravní sítě

Pojem dopravní síť zahrnuje všechna pevná i pohyblivá zařízení, která umožňují pohyb dopravních prostředků v prostoru, popřípadě jejich odstavení a také způsob organizace dopravy na těchto sítích. U dopravního modelování za ně považujeme ještě všechny další elementy, které vytvářejí dopravní nabídku (zejména linky veřejné dopravy). Pro modelování osobní dopravy nás zajímají sítě těchto oborů dopravy: pěší, cyklistická, veřejná, silniční. Z těchto druhů se dají jejich rozdělením, popř. kombinací vytvořit různé mody dopravy (např.: P+R = VD + IAD), u kterých pak vytváříme nabídkové submodely.

Pro dopravní modelování je potřeba tyto sítě ohodnotit (Axhausen a kol., 2004), abychom pak mohli posuzovat jednotlivé varianty při rozhodování jedinců před započítáním přemístění (např. volba cesty v síti nebo volba dopravního prostředku). K ohodnocování používáme následující tři druhy veličin:

- izochrony, izochory
- nákladové veličiny
- kritéria polohy

Izochrony, izochory

Jedná se o čáry spojující místa se stejnou časovou dostupností z určitého předem zvoleného bodu (např. zastávky autobusu). Zpravidla se tvoří soustava izochron s konstantními časovými rozestupy (5 min), avšak záleží na konkrétní situaci. Účelem stanovení izochron při dopravním plánování je zejména určit čas potřebný k dosažení důležitých bodů pěší dopravou (zastávky veřejné dopravy, parkoviště, ...).

Zpravidla se konstruuje kružnicové izochrony se středem v určitém bodě se vzájemnými rozestupy dle následujícího vzorce:

$$\Delta r = \frac{V \cdot \Delta T}{LF} \quad (2.1.)$$

Δr - vzájemný rozestup izochron [m]

V - střední rychlost přemístění [$m \cdot s^{-1}$]

ΔT - časový rozestup [s]

LF - faktor prodloužení [1], zohledňující omezenou prostupnost území (budovy, ...)

V případě, kdy se nepracuje se vzdáleností časovou, ale geografickou, pak je vhodným vyjádřením izochora. Izochora je linie, spojující místa stejně vzdálená od nejbližší dopravní cesty nebo stanice. Obvykle se konstruuje pro jednotlivé druhy dopravních cest nebo stanic, a to v určitých intervalech vzdálenosti.

Nákladové veličiny

Pro modelování přepravní poptávky a nabídky je nutné vytvořit funkce, které budou charakteristiky jednotlivých (skupin) možností přemístění převádět na společnou veličinu – náklady („přepravní odpor“ k cestě provedené tímto způsobem), které pak umožní hledat nejvýhodnější variantu provedení přemístění (Axhausen, 2001).

Hlavní charakteristiky jsou:

- vzdušná vzdálenost v [m]
- skutečná vzdálenost v [m]
- skutečná časová vzdálenost [s , min]
- náklady na přemístění v peněžních jednotkách

Tyto náklady je pak nutné ohodnotit pomocí různých funkcí, které budou uvedeny dále.

Nejdůležitější charakteristikou přemístění je doba přepravy „od domu k domu“, tedy celková cestovní doba:

$$T = \sum TF + TP + TC + \sum TPRC + TH + TO \quad (2.2.)$$

T - celková cestovní doba

$\sum TF$ - součet všech cestovních dob v jednotlivých dopravních prostředcích

TP - doba docházky k zastávce

TC - doba čekání na příjezd spoje

$\sum TPRC$ - součet všech přestupních a čekacích dob na následující spoje

TH - doba hledání místa k zaparkování

TO - doba dosažení cíle z poslední zastávky

Kritéria polohy

Těmito veličinami se ohodnocují celé okrsky nebo celé vyšetřované území pomocí ohodnocujících funkcí. Tedy v zásadě říkají, jak moc „daleko nebo blízko“ je určitý okrsek „v průměru“ vzdálený od ostatních.

Jako příklad je uvedena výhodnost polohy okrsku i jako zdrojového:

$$VPZ_i = \sum_{j=1}^n \frac{SC_j}{SCS} \cdot F(W_{ij}); SCS = \sum_{j=1}^n SC_j \quad (2.3.)$$

VPZ_i - výhodnost polohy okrsku i jako zdrojového

SC_j - rozhodující strukturální veličina v okrsku j jako cílovém

n - počet okrsků v území

$F(W_{ij})$ - hodnotící funkce ohodnocující náklady na přemístění na relaci $i - j$

2.2. Dopravní chování

Dopravní chování představuje souhrn preferencí každého jednotlivce v oblasti rozhodování o volbě dopravního prostředku. Znalost těchto faktorů je důležitá pro pochopení neobjektivních faktorů, které budou odraženy v dopravním modelu. Základním projevem dopravního chování jednotlivce je přemístění se v čase a prostoru (Ben-Akiva, Lerman, 1985).

2.2.1. Zdroj-cílové skupiny

Abychom mohli modelovat dopravní chování, potřebujeme znát tři základní charakteristiky přemístění, tedy odpovědi na otázky: „Kdy, odkud a kam, (proč)?“ Na otázku „kdy“ nám pomáhají odpovědět denní průběhy dopravy v dané oblasti. Na otázky „odkud“ a „kam“ mají za úkol odpovídat tzv. zdroj-cílové skupiny (dále jen ZCS). ZCS je jakákoli množina přemístění, v níž mají společný charakter zdroje a cíle cest (bydlení, škola, zaměstnání, ...), které mají přidělenou nějakou strukturální veličinu (vztažnou skupinu obyvatel daného zdrojového / cílového okrsku, kapacitu příslušných zařízení,...), pomocí které jsou pak odhadovány zdrojové a cílové přepravní vztahy. V současné době se nejčastěji používají rozdělení do 5, 13, resp. 17 ZCS (Schnabel, Lohse, 1997).

Tab. 2.2: Rozdělení do 13 ZCS (zdroj: FD ČVUT, Telematix, 2010)

do z	B	Z	P	V	N	O
Bydlení (vlastní)	-	BZ	BP	BV	BN	BO
Zaměstnání (vlastní)	ZB	-	ZO			
Předškolní zařízení	PB	OZ	OO			
Vzdělávací zařízení	VB					
Nákupní zařízení	NB					
Ostatní	OV					

K modelu ZCS se váží ještě dva pojmy – specifická hybnost SH (vztažné skupiny obyvatel) a koeficient vzniku KV (ostatní – „nelidské“ – strukturální veličiny).

$$SH = \frac{PP}{PO \cdot \check{C}J} \quad (2.4.)$$

$$KV = \frac{PS}{SZ \cdot \check{C}J} \quad (2.5.)$$

PP - počet přemístění vzniklých (skončených) v daném okrsku, který vykonala daná vztažná skupina obyvatel za určitou uzavřenou časovou jednotku; hodnota může být dále omezena například na určitou ZCS

PO - počet příslušníků dané vztažné skupiny obyvatel

PS - počet přemístění vzniklých (skončených) v daném okrsku, který se vztahuje k určité strukturální veličině a byl vykonán za určitou uzavřenou časovou jednotku

SZ - hodnota dané strukturální veličiny

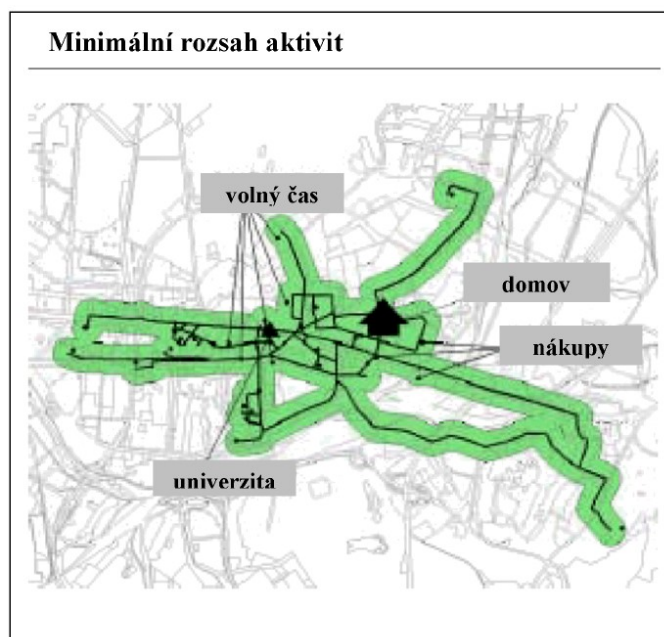
$\check{C}J$ - uzavřená časová jednotka (den, týden, ...)

2.2.2. Popis aktivit

Základním výchozím krokem při sestavení modelu dopravního chování a následného rozdělení do skupin s homogenním chováním je tzv. popis aktivit (Axhausen, 2001). Popis aktivit je výsledkem adresného průzkumu v určitém regionu a představuje zaznamenání všech činností konkrétní osoby s následkem přemístění. Prostor aktivit je vymezen místy a kontakty, které daná osoba zná ze svého užívání.

Vliv na tyto aktivity a jejich rozsah mají například sociální kontakty, prostorové uspořádání zkoumaného území apod. Každé zkoumané území představuje oblast, která je dále rozdělena na jednotlivé zóny. Z popisu aktivit vyplývají navštívená místa – tj. taková, kde se během zkoumání konkrétní osoba vyskytla, nebo se tam pravidelně vyskytuje. Z navštívených míst lze určit minimální rozsah aktivity, tj. délky všech nejkratších cest mezi všemi navštívenými cíli.

Minimální rozsah aktivit lze (na příkladě studenta) znázornit následujícím obrázkem.

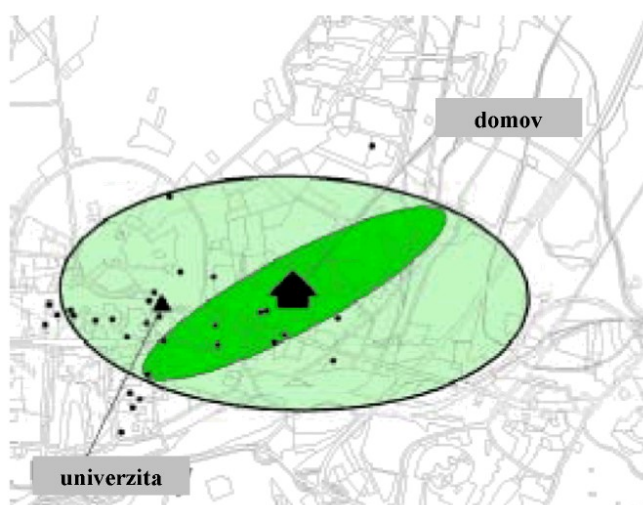


Obr. 2.2. Minimální rozsah aktivit (zdroj: Axhausen, 2001, úprava: autor)

Je zřejmé, že je třeba získat ve zkoumaném území co největší počet popisů aktivit, aby bylo možné identifikovat skupiny s „podobným“ rozsahem aktivit a následně zkoumat jejich chování.

Z navštívených míst je následně možné určit prostor aktivit, který lze pojmout jako část území, kde je realizováno 95% všech cest. Tento prostor lze vymezen např. statistickým nástrojem, tzv. *konfidenční elipsou*.

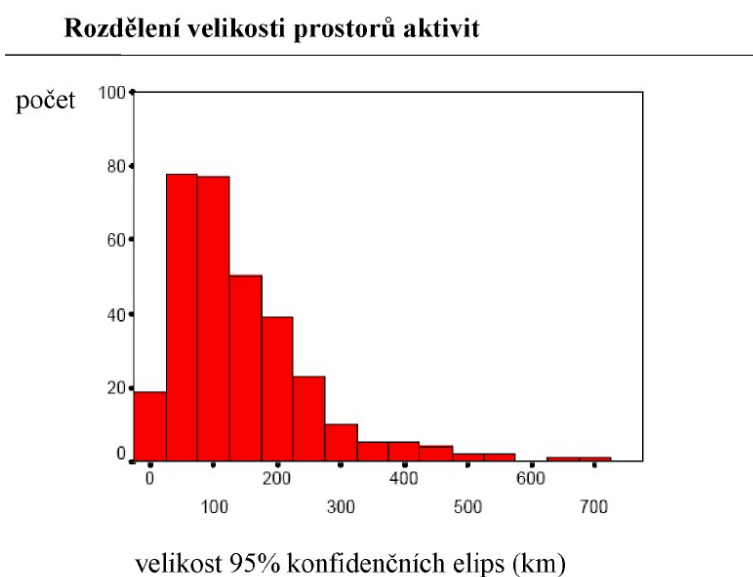
Konfidenční elipsa



Obr. 2.3. Konfidenční elipsa (zdroj: Axhausen, 2001, úprava: autor)

Na základě popisů aktivit a jejich podobnosti a velikosti konfidenčních elips lze rozpoznat identifikovatelné skupiny obyvatel jako skupiny s homogenním chováním (Axhausen, 2001) – a to nejen v „klasickém“ pojetí zaměstnaní, studenti, důchodci..., ale lze vytvářet i další skupiny podle nejrůznějších klasifikačních kritérií, kde hrají roli např. závazky (rodina, práce, volnočasové aktivity) nebo struktura cílů v území a způsob jejich dosahování. Jednotlivé skupiny tak můžeme precizovat např. i podle konkrétního cíle (zdroje) cesty, dne, nebo četnosti cest.

Vzhledem k částečnému překrývání sociálních kontaktů se přirozeně stává, že konkrétní osoba může být vnímána jako příslušná k více homogenním skupinám.



Obr. 2.4. Rozdělení velikosti konfidenčních elips (zdroj: Axhausen, 2001, úprava: autor)

Bylo prokázáno, že pro vytvoření popisu aktivit a vytvoření konfidenčních elips postačují cílené průzkumy dopravního chování trvající 6-12 týdnů (Axhausen, Vrtic, 2002), neboť u 95% procesů přemístění hraje významnou roli vazba na určitou kombinaci času a místa a „náhodné“ cesty lze tak při vymezení konfidenční elipsy zpravidla zanedbat.

2.2.3. Vliv rozdílu RP- a SP-dat

Popis aktivit je získáván na určitém vzorku populace ve zkoumaném území a to formou adresného průzkumu, v jehož rámci vybraní respondenti zaznamenávají sami všechny své cesty (zdroj, cíl, účel, způsob dopravy). Součástí tohoto průzkumu je i zkoumání modelových rozhodovacích situací (Axhausen, 1999). Pro věrný popis a následné modelování dopravního chování je důležitá charakteristika prostoru a podmínek, v nichž

probíhá rozhodovací proces o volbě dopravního prostředku. Údaje poskytované samotnými respondenty označujeme jako *Stated-Preferences* (SP-data). Jelikož SP-data jsou zpravidla zatížena vysokou mírou subjektivity a navíc mají respondenti často sklon tvrdit něco jiného než následně činí (zejména v otázkách preferencí a atributů nabídky veřejné dopravy), je nutné SP-data porovnávat i s výsledky průzkumů pořádaných nezávisle na SP-datech (Ben-Akiva, Morikawa, 1990). Mezi takovéto průzkumy lze zařadit například průběžné sčítání cestujících ve veřejné dopravě, údaje o prodaných jízdních dokladech apod. Tyto průzkumy konané bez přímého vlivu účastníků přepravního procesu označujeme jako *Revealed-Preferences* (RP-data).

RP-data se tak zakládají na prokazatelně realizovaných cestách, zatímco SP data jsou založena na vyjádření respondentů o volbě dopravního prostředku, a to buď pravděpodobně realizovaných nebo teoretických, za systematicky měněných hypotéz.

Rozsáhlé zkušenosti s porovnáním SP- a RP-dat má Švýcarsko, kde probíhají v pravidelných intervalech průzkumy dopravního chování (souhrnně nazývány jako projekt *Mikrozensus*), kdy datovou základnu SP-dat tvoří výsledek dotazování na cca 10 000 respondentech. Dotazníky jsou koncipovány na bázi 10 vzájemně se ovlivňujících faktorů se 3-4 váhami (např. cestovní doba, cena, počet přestupů, interval, spolehlivost, dostupnost, komfort – pro IAD cestovní doba, cena, spolehlivost) a obsahují až 64 rozhodovacích situací (Axhausen a kol., 2004). Datovou základnu RP-dat tvoří výsledky z průběžného sčítání cestujících a informace o cca 40 000 cestách realizovaných souhrnně všemi dopravními prostředky po dobu jednoho týdne (a to buď na vzdálenost delší než 3 km nebo jako cesty za hranice obce).

Výhodou pro shromažďování údajů o všech přepravních aktivitách na bázi SP-dat a RP-dat je skutečnost, že pro věrný popis reality nelze vycházet nikdy pouze z jednoho typu dat, resp. lze následně modelově porovnávat výsledky vývoje dopravního chování v čase z výstupů modelů kalibrovaných zvláště na RP- a zvláště na SP-data. V případě nejednoznačných výsledků lze i cíleným dotazováním (na bázi SP-dat) korigovat nedostatky RP-dat.

2.3. Modelování poptávky po přepravě

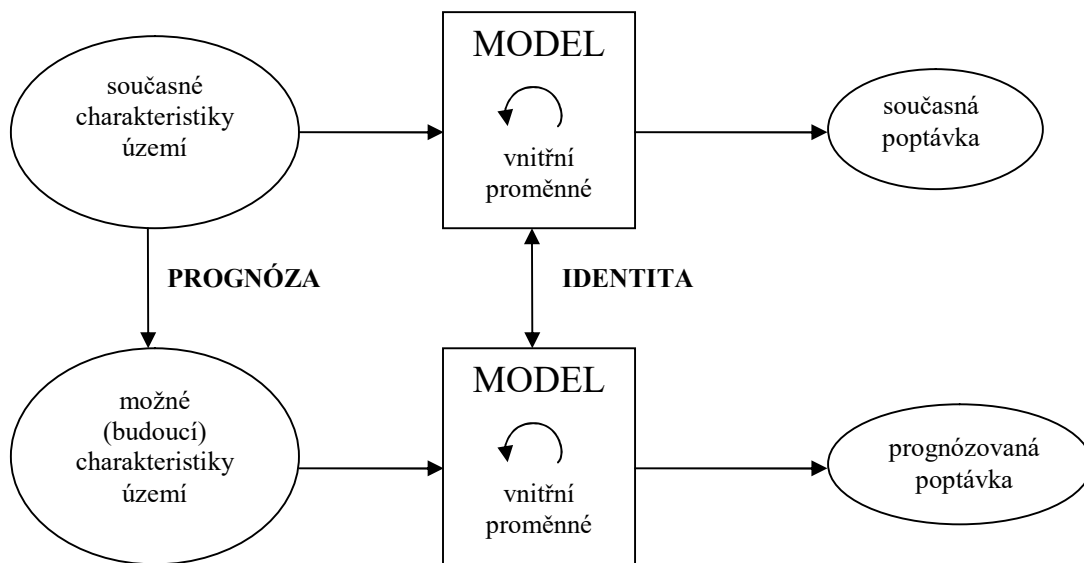
Jako na jakémkoli jiném trhu, tak i na dopravním trhu se střetávají nabídka a poptávka. Pokud se vzájemně střetnou, dojde k realizaci přepravního procesu.

Poptávku po přepravě můžeme charakterizovat jako soubor všech přemístění, která jsou obyvatelé ochotni v daném území vykonat. Tato přemístění lze charakterizovat dle následujících hledisek:

- zdroj a cíl přemístění
- účel přemístění
- nutnost provedení přemístění
- čas opuštění zdroje
- čas dosažení cíle
- druh dopravního prostředku
- použitá dopravní cesta

Poptávka po přepravě vzniká v reakci na tři výše uvedené analyzované skupiny charakteristik území: prostorovou strukturu, dopravní síť a dopravní chování obyvatelstva. Model přepravní poptávky můžeme popsat jako soubor vnitřních proměnných, které převádějí vnější proměnné (charakteristiky) na výslednou přepravní poptávku. Smyslem modelování je tedy nejdříve při známých vnějších (vstupních) proměnných a výsledné poptávce, kterou zjistíme z různých průzkumů, určit vnitřní proměnné modelu, a ten poté aplikovat na změněné vstupy (nové obchodní centrum, nová komunikace, ...) při prognóze poptávky.

Situaci objasňuje následující obrázek:



Obr. 2.5: Prognóza poptávky po přepravě pomocí dopravního modelování (FD ČVUT, Telematix, 2010)

2.3.1. Modely získávání vstupů o hybnosti

Základní data pro celkovou prognózu poptávky jsou získávána v rámci zjišťování celkových údajů o přepravních výkonech. Zkoumaný prostor je třeba rozdělit do jednotlivých dopravních oblastí, pro které následně zjišťujeme důležité údaje o struktuře:

- rozložení zdrojů a cílů v prostoru
- sociodemografické ukazatele
- dopravně sociologické ukazatele
- geografické atributy

V řešeném prostoru je třeba oddělit dopravu vznikající, zanikající, tranzitní a vnitřní. Z jednotlivých strukturálních ukazatelů jednotlivých dopravních oblastí i, j, e , kdy:

$$i \in M_1, j \in M_2, e \in M_3$$

je tak následně vypočten přibližný potenciál dopravní oblasti, který představuje počet cest za časovou jednotku:

Q_i – zdrojový potenciál dopravní oblasti i

Z_j – cílový potenciál dopravní oblasti j

H_e – dopravní potenciál domovské oblasti e

Skupinové modely

Tyto modely seskupují osoby do homogenních skupin a popisují chování těchto skupin množinou charakteristických veličin. Nejčastěji používané modely vychází z předpokladu, že většina cest realizovaných v osobní dopravě začíná a končí v místě bydliště, a to podle nejčastějších denních průběhů:

bydliště → pracoviště → volnočasové aktivity → bydliště

nebo

bydliště → pracoviště → bydliště → volnočasové aktivity → bydliště

Skupinou osob z pohledu zdroj-cíl se rozumí klasifikace cest skupiny/osoby podle konkrétních požadavků na základě existujících potřeb.

Hlavní myšlenkou tohoto modelu je smysluplné rozdělení jednotlivých skupin zdroj-cíl do homogenních celků a definovat tak jejich „dopravní chování“. Z toho vyplývá, že v rámci každé skupiny existuje nějaká specifická přepravní potřeba, či nějaký zájem a při samotném rozdělení je tak třeba primárně brát zřetel na:

- zájmovou skupinu (zaměstnaní, studenti, důchodci..)
- směrodatné strukturální údaje pro každý zdrojový obvod i (případně cílový obvod j)

Každé zájmové skupině osob zdroj-cíl g se přiřazuje směrodatná zdrojová strukturální veličina $SQ_{i,g}$ (příp. směrodatná cílová strukturální veličina $SZ_{j,g}$) vyjadřující počet potenciálních osob ze zájmové skupiny g se zdrojem i (případně cílem j). Tento způsob klasifikace nám zaručí relativně jednotné dopravní chování v rámci každé skupiny zdroj-cíl.

Přepravní potenciál každé skupiny zdroj-cíl je zjišťován po částech (Axhausen, 2001), neboť v rámci každé skupiny g lze definovat více domovských dopravních oblastí $H_{e,g}$. Jako specifický přepravní potenciál osoby/skupiny osob SV označujeme průměrný počet cest osoby (resp. všech osob v rámci jedné skupiny osob) za den. Specifický přepravní potenciál osob ve skupině zdroj-cíl g je tedy definován jako:

$SV_{i,g} = (\text{počet všech cest způsobený všemi osobami skupiny } g \text{ v oblasti } i) / (BP_{i,g} = \text{počet osob patřících do skupiny } g \text{ v oblasti } i)$

Specifický přepravní potenciál je následně odpovídajícím způsobem přiřazen jednotlivým zájmovým skupinám. Specifický přepravní potenciál jednotlivých zájmových skupin není zpravidla v jednotlivých relacích pro oba směry symetrický, což vyplývá z faktických odlišností konkrétně realizovaných cest. Pro domácí přepravní potenciál tak tedy následně platí:

$$H_{e,g} = SV_{e,g}BP_{e,g} \quad (2.6.)$$

a celkový přepravní potenciál skupiny g je tedy roven:

$$V_g = \sum_e H_{e,g} \quad (2.7.)$$

Míra hybnosti (Axhausen, 2001) v dopravní oblasti je definována jako průměrný počet zjištěných cest připadajících na jednu strukturální veličinu. Celková míra hybnosti pro každou skupinu zdroj-cíl g je tak rovněž zjišťována po částech:

$ER_{i,g}$ = (počet všech změn místa v rámci skupiny g v oblasti i) / ($SZ_{i,g}$ = hodnota směrodatné strukturální veličiny skupiny náležící ke skupině g v oblasti i)

Výpočet zdrojového a cílového přepravního potenciálu $Q_{i,g}$, $Z_{j,g}$ skupiny zdroj-cíl g v oblasti i tak následně vychází z následujících modelových předpokladů:

- (1) je-li bydlíště zároveň zdrojem cesty, pak platí $H_{e,g} = Q_{i=e,g}$
- (2) je-li bydlíště zároveň cílem cesty, pak platí $H_{e,g} = Z_{j=e,g}$
- (3) pokud $i, j \neq e$, pak se potenciál rozdělí proporcionálně k míře hybnosti, tj.

$$\tilde{Q}_{i,g} = ER_{i,g}SQ_{i,g} \quad (2.8.)$$

$$\tilde{Z}_{j,g} = ER_{j,g}SZ_{j,g} \quad (2.9.)$$

V případě prostorově i časově ohraničených a uzavřených systémů (tj neexistuje žádná externí zdrojová ani cílová přeprava) se pro celkový přepravní potenciál V_g stanoví:

$$Q_{i,g} = \frac{\sum_i Q_{i,g}}{V_g} \tilde{Q}_{i,g} \quad (2.10.)$$

$$Z_{j,g} = \frac{\sum_j Z_{j,g}}{V_g} \tilde{Z}_{j,g} \quad (2.11.)$$

Je třeba zohlednit, že všechny vstupní hodnoty mají náhodný průběh a jedná se tak pouze o očekávané hodnoty.

2.3.2. Modely získávání údajů o přepravní práci

Základní data pro zjištění a prognózu údajů o přepravní práci získáváme na základě podkladů o hybnosti a zdrojích a cílech cest. Pro všechny relace zdroj-cíl v řešené oblasti lze tak určit sílu přepravního proudu (v_{ij}). Pro jednotlivé přepravní proudy dále platí, že jejich součástí nejsou přepravy, jejichž zdroj nebo cíl leží mimo řešenou oblast a při zohlednění těchto externích přepravních vztahů (včetně tranzitujících) budou jednotlivé přepravní proudy silnější.

Při zjišťování údajů o přepravní práci je také nutné brát v úvahu omezující prvky (w_{ij}), které jsou u jednotlivých přepravních vztahů různé (lze je považovat za „přepravní odpor“ příslušného přepravního vztahu). Těmito prvky ohodnocujeme realizaci přepravního procesu v závislosti na jeho náročnosti (délka přepravní doby, četnost spojů, počet přestupů nebo riziko kongescí aj.).

2.4. Klasický čtyřfázový dopravní model

Tento model vzniká čtyřmi postupnými kroky:

- vznik přepravních vztahů
- volba cíle přepravního vztahu
- volba dopravního prostředku (modu)
- volba cesty v síti

Tyto kroky se provádějí sekvenčně ve dvou variantách. První jsou modely Trip-Interchange, kde kroky za sebou následují tak, jak bylo uvedeno v seznamu (vznik přepravních vztahů → volba cíle → volba dopravního prostředku → přidělení na dopravní síť). Druhou jsou modely Trip-End, kde si pořadí vzájemně prohazují fáze volba cíle a volba dopravního prostředku, tj. vznik přepravních vztahů → volba dopravního prostředku → volba cíle → přidělení na dopravní síť. Dále budou představeny jednotlivé fáze tohoto modelu a další modely, které jsou modifikací tohoto klasického modelu.

2.4.1. Vznik přepravních vztahů

Cílem tohoto kroku je určení zdrojových, resp. cílových přepravních vztahů Z_i , C_j (tedy množství přemístění, která vzniknou, resp. končí v daném okrsku za danou uzavřenou časovou jednotku) a celkového přepravního vztahu V (tedy množství přemístění, která se uskuteční ve vyšetřovaném území za danou uzavřenou časovou jednotku). Je nutné zjistit údaje o podmínkách hybnosti – získání dat o sídelní a prostorové struktuře, informace o potenciálních zdrojích a cílech cest.

Obecně platí, že každá z těchto veličin je závislá na příslušných strukturálních veličinách a kritériích polohy.

Hodnoty těchto veličin je možné zjišťovat třemi způsoby (Schnabel, Lohse, 1997):

- růstovými koeficienty
- regresními modely
- modely založenými na charakteristikách dopravního chování

2.4.1.1. Růstové koeficienty

Tento postup stojí na zprostředkování prognózovaných hodnot hledaných veličin pomocí jejich analyzovaných hodnot a růstových koeficientů. Základní tvar modelu růstových koeficientů zní:

$$V(P) = f \cdot V(A) \quad (2.12.)$$

$$Z_i(P) = z_i \cdot Z_i(A) \quad (2.13.)$$

$$C_j(P) = c_j \cdot C_j(A), \quad (2.14.)$$

kde (P) , resp. (A) znamenají prognózované, resp. analyzované veličiny a f , z_i a c_j jsou příslušné růstové koeficienty. Ty zpravidla odvozujeme z analyzovaných a prognózovaných hodnot strukturálních veličin.

Výhodou tohoto postupu je velice rychlé určení prognózovaných veličin. Avšak problémem je určení použitých růstových koeficientů. Prvním úskalím je určení metody jejich výpočtu, druhým jsou jednak přesné analyzované veličiny, jednak zjištění hodnot strukturálních veličin, ze kterých koeficienty odvozujeme.

2.4.1.2. Regresní modely

Regresní modely se používají především ke zjišťování hodnot zdrojových a cílových přepravních vztahů (ne pro celkový přepravní vztah). Předpokládá se, že hledaný přepravní vztah (závisle proměnná) je lineárně závislý na nějaké skupině strukturálních veličin (nezávisle proměnné).

Jako příklad je uvedena možnost zápisu regrese pro zdrojový přepravní vztah závislý na třech strukturálních veličinách:

$$ZT_i = a_0 + a_1 \cdot SZ_{1i} + a_2 \cdot SZ_{2i} + a_3 \cdot SZ_{3i} \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=1}^n (ZE_i - ZT_i)^2 \rightarrow MIN \quad (2.16)$$

ZT_i - hodnoty zjištěné regresí

ZE_i - hodnoty zjištěné průzkumem

a_0, \dots, a_3 - regresní koeficienty

SZ_{1i}, \dots, SZ_{3i} - strukturální veličiny zdrojového okrsku i

Regresní modely je možné používat jen u situací, kdy nedochází ve vyšetřovaném území k příliš značným změnám, které mohou například měnit význam jednotlivých strukturálních veličin ve vztahu k na nich závislému přepravnímu vztahu.

2.4.1.3. Modely založené na charakteristikách dopravního chování

Tyto modely jsou založeny na strukturovaném zkoumání vzniku požadavku na přemístění (Ortúzar, Willumsen, 2011). Používají výše uvedené ZCS a jejich vazby na vztažné skupiny obyvatel nebo jiné vztažné strukturální veličiny. Dále je tento model založen na principu uzavřenosti časového úseku, pro který modelujeme – nejčastěji den. Uzavřenost časové jednotky se projevuje předpokladem vykonávání uzavřených řetězců přemístění (skoro) každým jedincem účastnícím se dopravy v daném území (např. bydlení → práce → nákupní zařízení → bydlení). Tedy pak pro všechny dopravní okrsky platí, že počet všech vzniklých přemístění v daném okrsku je roven počtu všech ukončených přemístění v tomto okrsku (za danou uzavřenou časovou jednotku). Samozřejmě je pak možné zpětně určit dopravní poptávku pro jiné časové úseky (např. ranní špičku), ale k výpočtu je nejdříve nutné počítat s celou uzavřenou časovou jednotkou.

Postup začíná rozdělením všech přemístění dle zvoleného modelu (např. 13 ZCS). Tyto skupiny lze rozdělit do tří typů:

1. Začátek přemístění leží v domácím stanovišti (BX, ZO).
2. Konec přemístění leží v domácím stanovišti (XB, OZ).
3. Začátek a konec přemístění neleží v domácím stanovišti (OO).

Domácím stanovištěm může být buď vlastní bydlení (1. priorita), nebo vlastní zaměstnání (2. priorita). Tyto dva druhy stanovišť mají v denním životě většiny obyvatel zásadní roli a v kratším časovém horizontu zůstávají neměnné. Ostatní aktivity pak může jedinec vykonávat na různých místech (nejsme nuceni např. nakupovat ve stále stejném obchodě).

K těmto ZCS pak pomocí různých průzkumů zjistíme příslušné hodnoty SH a KV (buď stejné hodnoty pro celé vyšetřované území, nebo pro každý okrsek jeho vlastní hodnoty – záleží na kvalitě průzkumu) a hodnoty příslušných strukturálních veličin pro jednotlivé okrsky. Pro každou ZCS tedy počítáme hodnoty Z_i , resp. C_j a V .

Nejdříve se počítají ZCS 1. typu, pak ZCS 2. typu a nakonec ZCS 3. typu. U ZCS všech typů se přemísťovací vztahy v nedomovských stanovištích mohou počítat dvěma způsoby:

- nezáleží na výhodnosti polohy okrsků → hodnoty přepravních vztahů jsou závislé jen na hodnotách strukturálních veličin – tzv. neelastické okrajové

součtové podmínky. Za těchto podmínek se vypočítají výsledné hodnoty veličin Z_i , resp. C_j . Jako příklad lze uvést ZCS BZ.

- záleží na výhodnosti polohy okrsků → hodnoty přepravních vztahů jsou závislé na hodnotách strukturálních veličin a na koeficientech zohledňujících výhodnost polohy okrsků – tzv. elastické okrajové součtové podmínky. Za těchto podmínek se vypočítají jen horní meze $Z_{max,i}$, resp. $C_{max,j}$. Výsledné hodnoty se určují až v dalších fázích (hlavně ve volbě cíle). Jako příklad lze uvést ZCS BN.

Důvodem pro používání takového pořadí výpočtu u ZCS jsou delší řetězce přemístění, které obyvatelé přes den vykonávají. Z tohoto důvodu vzniká nesymetrie v hodnotách SH u protikladných ZCS. Například je zjištěno, že obvykle platí vztah $SH(BZ) > SH(ZB)$, neboť lidé ráno cestují přímo do zaměstnání, ale odpoledne necestují přímo domů, ale nakupují nebo cestují za volnočasovými aktivitami. Tyto nerovnoměrnosti se pak vyrovnávají u ZCS OO.

2.4.2. Volba cíle přepravního vztahu

Cílem tohoto kroku je rozdělení a přidělení zdrojových, resp. cílových přepravních vztahů k jejich cílovým, resp. zdrojovým okrskům. Cílem je vytvoření množiny tzv. přepravních vztahů v_{ij} , které vyjadřují počet přemístění vzniklých v okrsku i a ukončených v okrsku j . Tyto vztahy je vhodné vyjádřit ve formě matice (viz Tab. 2.3.). Je nutné si uvědomit, že obě přidělování jsou na sobě vzájemně závislá, a tedy nejlepší je provádět je zároveň v jednom kroku.

Všechny modely této fáze dopravního modelování se dají rozdělit do dvou druhů:

- makroskopické, kde se určují přepravní vztahy na základě charakteristik obyvatelstva a ohodnocení sítě pomocí matematických modelů – těmto se budeme věnovat dále.
- mikroskopické, kde dochází k simulaci rozhodování jednotlivých (statistických) jedinců - až stovky tisíc přemístění, která jsou pak statisticky vyhodnocována.

Pro vykonání této fáze modelu jsou potřeba tři druhy vstupů:

- model pro volbu cíle
- hodnoty veličin Z_i , C_j a V
- informace o nabídkové části modelu a její ohodnocení rozhodujícími se jedinci

Tab. 2.3: Matice přepravních vztahů (FD ČVUT, Telematix, 2010)

	1	...	j	...	n	Σ
1			v_{1j}			Z_1
.						
.						
.						
i	v_{i1}		v_{ij}	v_{in}		Z_i
.						
.						
.						
n			v_{nj}			Z_n
Σ	C_1		C_j	C_n		V

Při zohlednění rozdělení na elastické a neelastické okrajové součtové podmínky jsou možné druhy postupu dle následující tabulky.

Tab. 2.4: Druhy modelů volby cíle dle elasticity okrajových podmínek (FD ČVUT, Telematix, 2010)

Okrajové součtové podmínky	neelastické	elastické		
	všechny ZCS	ZCS 1. typu	ZCS 2. typu	ZCS 3. typu
zdroj	$Z_i = \sum_j v_{ij}$	$Z_i = \sum_j v_{ij}$	$Z \max_i \geq \sum_j v_{ij}$	$Z \max_i \geq \sum_j v_{ij}$
cíl	$C_j = \sum_i v_{ij}$	$C \max_j \geq \sum_i v_{ij}$	$C_j = \sum_i v_{ij}$	$C \max_j \geq \sum_i v_{ij}$
celé území	$V = \sum_i Z_i = \sum_j C_j$	$V = \sum_i Z_i$	$V = \sum_j C_j$	$V = \sum_i \sum_j v_{ij}$

Dále je uveden jen neelastický případ. V jeho obecném případě máme n^2 neznámých přepravních vztahů, ale jen $2n$ rovnic z okrajových součtových podmínek. Proto je třeba získat další podmínky, abychom došli k určité soustavě rovnic s právě jedním řešením. Těmito podmínkami jsou ohodnocení BW_{ij} jednotlivých relací. Určit však toto ohodnocení není jednoduchá záležitost, neboť se do něho může promítnout mnoho faktorů (cestovní doba, obliba určitého dopravního prostředku, zatížení dopravní sítě, peněžní náklady na přemístění, ...).

Dalším aspektem matice přepravních vztahů je její informační entropie (Axhausen, 2001). Na poměr hodnot daného přepravního vztahu v_{ij} a celkového množství přepravních vztahů V můžeme pohlížet jako na pravděpodobnost, že rozhodující se jedinec se přemístí z okrsku i do okrsku j . Informační entropii matice přepravních vztahů pak definujeme:

$$H(v) = -\sum_i \sum_j p_{ij} \cdot \log_2(p_{ij}), \text{ kde } p_{ij} = \frac{v_{ij}}{V} \quad (2.17)$$

Vzhledem k tomu, že dopravní model je stochastickým systémem, platí u něj pravidlo maximalizace entropie. To znamená, že při daných podmínkách, které systém určují (snižují tím tedy jeho neurčitost - entropii) se systém snaží maximalizovat svoji entropii, tedy k volbě cílů dochází co možná náhodně.

2.4.2.1. Základní model

Ohodnocení BP_{ij} lze uvažovat jako pravděpodobnost, se kterou se jedinec rozhoduje pro provedení přemístění za podmínky, že začíná v okrsku i a končí v okrsku j . Tedy:

$$BP_{ij} = P(W | (A_i \wedge B_j)) \quad (2.18)$$

W - realizace přemístění

A_i - zvolení okrsku i za zdroj přemístění

B_j - zvolení okrsku j za cíl přemístění

Naproti tomu podíl daného přepravního vztahu vůči celkovému množství přemístění lze chápat jako pravděpodobnost rozhodnutí jedince pro okrsek i jako zdroj a okrsek j jako cíl, když víme, že došlo k realizaci. Tedy:

$$\frac{v_{ij}}{V} = P((A_i \wedge B_j) | W) \quad (2.19)$$

Za použití Bayesova vztahu, okrajových součtových podmínek a za předpokladu nezávislosti výběru zdroje a cíle dospějeme k formálnímu tvaru základního modelu volby cíle přepravního vztahu:

$$v_{ij} = P(W | (A_i \wedge E_j)) \cdot fz_i \cdot fc_j \quad (2.20)$$

$$Z_i = \sum_j v_{ij} \quad (2.21)$$

$$C_j = \sum_i v_{ij} \quad (2.22)$$

Koeficienty fz_i a fc_j slouží k zajištění dodržení okrajových součtových podmínek v dané soustavě rovnic. Vzhledem k tomu, že se jedná o bilineární soustavu rovnic, je nutné ji řešit iterativními algoritmy.

2.4.2.2. Odvozené modely

Náhodný model

U náhodného modelu platí, že všechny relace $i - j$ mají stejnou velikost hodnotící pravděpodobnosti (hodnotící funkce). Problém se tím velice zjednoduší, neboť platí:

$$v_{ij} = \frac{Z_i \cdot C_j}{V} \quad (2.23)$$

Tento model lze s úspěchem použít pro menší a střední města do průměru přibližně 6 km pro modelování silniční a veřejné dopravy (Schnabel, Lohse, 1997).

Gravitační model

Tento model používá analogie s Newtonovým gravitačním zákonem. Jeho zápis zní:

$$v_{ij} = F(N_{ij}) \cdot fz_i \cdot fc_j \quad (2.24)$$

$$Z_i = \sum_j v_{ij} \quad (2.25)$$

$$C_j = \sum_i v_{ij} \quad (2.26)$$

Veličina $F(N_{ij})$, která je na pozici hodnotící pravděpodobnosti a vyjadřuje již zmíněný „přepavní odpor“, se u tohoto modelu nazývá *odporová funkce*. Jejím účelem je převést hodnotu nákladů N_{ij} do formy zpracovatelné základním modelem. Axhausen (1999) uvádí tři nejdůležitější odporové funkce dle [1]:

$$\text{klasická funkce: } F(N_{ij}) = \frac{1}{N_{ij}^\alpha} \quad (2.27.)$$

Jedná se o nejstarší formu, která co nejlépe odpovídá původnímu Newtonovu zákonu, kde se ve jmenovateli nachází druhá mocnina vzdálenosti těles, mezi kterými dochází ke vzniku gravitační síly.

Gravitační modely tak obvykle pracují s počtem obyvatel jednotlivých míst a jejich vzdáleností. Vzdálenost může být formulována buď jako prostorový (l_{ij}) nebo časový (t_{ij}) parametr (König, 2002). N_{ij} tak může mít podle volby parametru tvar (l_{ij}^2) nebo (t_{ij}^2).

Funkce obsažené v gravitačním modelu bývají obvykle doplněny o konstantu k , která je určovaná expertním odhadem.

Běžně užívaná podoba gravitačního modelu vycházející z tzv. Lillova cestovního zákona

$$(Lill, 1891): \quad v_{ij} = k \cdot \frac{Z_i \cdot C_j}{N_{ij}^\alpha} \quad (2.28)$$

Význam konstanty k spočívá v možnosti úpravy hodnot v případě řešení intramodálních úloh, možnému zohlednění poptávkových variací apod. Při zanedbání gravitační konstanty je výstupem proporční srovnání významnosti jednotlivých přepravních vztahů (Janoš, Kříž, 2018c).

První nevýhodou této funkce jsou její nízké hodnoty při malých nákladech, čímž dochází k nadhodnocení relací s malými náklady. Další nevýhoda se objevuje při poměrování dvou různých nákladů (Axhausen, 1999). Pro konstantní poměr nákladů je výsledkem konstantní poměr odporových funkcí. Příklad u cestovních dob: poměr 5 min vůči 10 min má stejnou hodnotu jako poměr 1 hod vůči 2 hod.

$$\text{Logit-funkce: } F(N_{ij}) = e^{(-\beta \cdot N_{ij})} = \exp(-\beta \cdot N_{ij}) \quad (2.29)$$

Problémem této funkce při poměrování nákladů je, že pro konstantní rozdíl nákladů je výsledkem konstantní poměr odporových funkcí. Opět příklad: rozdíl 10 min - 5 min je hodnocen stejně jako rozdíl 60 min - 55 min.

$$\text{EVA-funkce: } F(N_{ij}) = \frac{1}{(1 + N_{ij})^{\varphi(N_{ij})}}; \varphi(N_{ij}) = \frac{E}{1 + \exp(F - G \cdot N_{ij})} \quad (2.30)$$

Tato funkce se snaží o co nejdůvěhodnější popis reakce rozhodujícího se jedince na velikost nákladů. Uvažuje se bezprostředně jako podmíněná pravděpodobnost $P(W | (A_i \wedge B_j))$, jež byla použita při odvození základního modelu. Problémem je existence tří koeficientů E , F a G , které se mohou různě určovat podle druhu dopravního prostředku, charakteristik obyvatelstva nebo jiných faktorů. Výhodou křivky je její tvar, který začíná pro nulovou hodnotu nákladů v hodnotě 1. Zpočátku funkce klesá jen mírně, pak v určitém intervalu klesá prudce, až dále se pro hodnoty nákladů rostoucí nade všechny meze asymptoticky blíží nule. Tento průběh výborně odpovídá vnímání nákladů rozhodujícími se lidmi (Janoš, Kříž, 2018b). Příklad pro celkovou cestovní dobu při dopravě do zaměstnání: Při malých hodnotách, např. 5 nebo 10 minut, vůbec člověk nebere čas v úvahu, avšak při určité době - interval 30 až 60 minut, už začíná uvažovat, zda vůbec chce takovou dobu denní dojížděky podstupovat. Až u hodnot nad 90 minut dochází k realizaci této dopravy jen výjimečně (Axhausen a kol., 2004).

Model růstových koeficientů

Model opět vychází ze základního modelu, avšak v tomto případě jsou jako hodnotící funkce použity analyzované přepravní vztahy. Formální zápis:

$$v_{ij} = v_{ij}(A) \cdot fz_i \cdot fc_j \quad (2.31)$$

$$Z_i = \sum_j v_{ij} \quad (2.32)$$

$$C_j = \sum_i v_{ij} \quad (2.33)$$

Tento model lze použít, jen pokud v časovém úseku mezi analýzou a prognózou nedojde k významným změnám v prostorové struktuře nebo dopravní síti území.

2.4.2.3 Kalibrace modelů volby cíle

Kalibrací modelu se rozumí úprava jeho parametrů do takové podoby, aby propočtené přepravní vztahy v_{ij} odpovídaly co nejvíce přepravním vztahům ve_{ij} zjištěným ve skutečném území. Nutnou podmínkou úspěšné kalibrace jsou reprezentativní průzkumy ve vyšetřovaném území. Pro kvantifikování rozdílnosti propočtené a zjištěné matice přepravních vztahů je možné používat různá měřítka (Axhausen, 1999):

$$D = \sum_i \sum_j \frac{(ve_{ij} - v_{ij})^2}{v_{ij}} \rightarrow MIN \quad (2.34)$$

2.4.3. Volba dopravního prostředku

V rámci tohoto kroku dojde ke stanovení dělby přepravní práce (modal split), rozložení všech cest mezi jednotlivé druhy dopravy.

Modal split vyjadřuje relativní podíl přepravní práce jednotlivých druhů dopravy na přepravním trhu a odráží tak kvalitativní úroveň dopravních plánů. Volba dopravního prostředku se uskutečňuje na základě individuálního rozhodnutí jednotlivce jako výsledek celé řady zohledněných faktorů (Baudyš a kol., 2008), které se týkají:

1) vlastností druhu dopravy

„Vlastnostmi“ rozumíme časovou a prostorovou dostupnost, která je ovlivněna např. docházkovou vzdáleností, kongescemi, či rozsahem nabídky veřejné dopravy a jejími kvalitativními atributy.

2) samotného účastníka přepravního procesu

Každého účastníka přepravního procesu charakterizujeme nejen podle příslušnosti k určité homogenní skupině, ale i na základě sociální a ekonomické situace. Významnou roli hrají i subjektivní preference jednotlivých druhů dopravy.

3) samotného procesu přemístění

V případě samotného přemístění je nejdůležitějším faktorem volby dopravního prostředku účel cesty. V úvahu je tak třeba brát polohu zdroje a cíle cesty, jakož i její časovou náročnost.

Z výše uvedených charakteristik vyplývá, že fáze volba cíle přemístění a fáze volba dopravního prostředku spolu úzce souvisejí. V průběhu času byly vytvořeny dva druhy sekvenčních modelů: modely Trip-End a modely Trip-Interchange.

Všechny modely lze opět rozdělit na makroskopické (modelování na základě charakteristik celých skupin obyvatelstva) a mikroskopické (simulování rozhodování velkého množství jednotlivců).

2.4.3.1. Modely Trip-End

U modelů Trip-End následuje po fázi vzniku přepravního vztahu hned fáze volby dopravního prostředku. V rámci tohoto modelu se mění klasické pořadí jednotlivých kroků pro výpočet, neboť nejdříve získáváme profilové zatížení sítě a následně vypočítáme modal split:

rozdělení → zatížení → rozložení

Zatížení sítě je výsledkem analýzy cílového a zdrojového potenciálu jednotlivých dopravních oblastí a následným přiřazením přepravních výkonů jednotlivým druhům dopravy určíme dělbu přepravní práce. V mnoha případech je účelné určení profilového zatížení jednotlivých dopravních módů zvlášť pro jednotlivé zájmové skupiny (Axhausen, 1999). Zjišťování profilového zatížení sítě jednotlivých dopravních módů je založeno na empirickém zkoumání dopravního chování jednotlivých zájmových skupin.

U těchto modelů je nutné při průzkumech k získání hodnot SH zjišťovat i údaje o dělbě přepravní práce pro jednotlivé ZCS a skupiny obyvatel. Výsledkem jsou zdrojové a cílové přepravní vztahy a celkový přepravní vztah v území pro jednotlivé dopravní módy a ZCS, u kterých se pak provádí fáze volby cíle.

2.4.3.2. Modely Trip-Interchange

U těchto modelů se nejdříve určí matice přepravních vztahů pro jednotlivé ZCS (s určitou zjednodušenou všezahrnující hodnotící funkcí), a pak je u jednotlivých proudů prováděna dělba přepravní práce podle určitých kritérií (Axhausen, 1999).

V rámci tohoto modelu následuje po procesu rozdělení standardní rozložení celkového přepravního toku na jednotlivé relace zdroj-cíl.

rozdělení → rozložení → zatížení

Následně se pro každou relaci zdroj-cíl $i \rightarrow j$ rozdělí přepravní potenciál v_{ij} do jednotlivých druhů dopravy k :

$$v_{ij} = \sum_k v_{ijk} \quad (2.35)$$

Ohodnocení libovolné relace zdroj-cíl $i \rightarrow j$ použitým dopravním prostředkem (eventuelně druhem dopravy) k se pokládá za náhodnou veličinu

$$X_{ijk} = f(w_{ijk}) \quad (2.36)$$

Tato náhodná veličina, kvantifikace užítku, se skládá ze složky deterministické d_{ijk} reprezentující např. vzdálenost, a složky stochastické S_{ijk} reprezentující např. subjektivní vnímání nabídky určitého druhu dopravy (možno chápat i intramodálně) v dané relaci, tj. platí

$$X_{ijk} = d_{ijk} + S_{ijk} \quad (2.37)$$

Při zohlednění možnosti použití dvou různých dopravních prostředků $k = 1, 2$ upřednostníme dopravní prostředek 2, pokud platí $X_{ij1} \leq X_{ij2}$ (alternativa použití dopravního prostředku 2 přináší uživateli vyšší míru užítku). Následně získáme pravděpodobnost volby jednotlivých dopravních prostředků v relaci zdroj-cíl $i \rightarrow j$

$$p_{ij2} = P(X_{ij1} \leq X_{ij2}) \quad (2.38)$$

v případě upřednostnění dopravního prostředku 2 a

$$p_{ij1} = P(X_{ij2} \leq X_{ij1}) = 1 - p_{ij2} \quad (2.39)$$

v případě upřednostnění dopravního prostředku 1.

Očekávaná intenzita přepravního proudu realizovaná konkrétním dopravním prostředkem se následně určí jako

$$V_{ijk} = p_{ijk}V_{ij} \quad (2.40)$$

přičemž platí, že

$$\sum_k V_{ijk} = V_{ij} \sum_k p_{ijk} \quad (2.41)$$

Náhodná veličina

$$\Delta S_{ij} = S_{ij1} - S_{ij2} \quad (2.42)$$

se nazývá *agregovaná rušivá složka*. Jednotlivé modely popisující zatížení sítě se liší pouze použitím jiného modelového rozdělení pro agregovanou rušivou složku. Distribuční funkci G rozdělení agregované rušivé složky popisujeme jako

$$P(\Delta S_{ij} \leq s) = G(s) = \int_{-\infty}^s g(x)dx \quad (2.43)$$

kde g vyjadřuje hustotu rozdělení.

Deterministická část užitku bývá většinou popisována lineárními funkcemi různých nákladových položek (cestovní doba, poplatky, jízdné).

V rámci použití popisovaného Trip-Interchange modelu jsou tak tři základní modelové možnosti pro použití různé hustoty rozdělení pro g (modely lineární, Probit, Logit).

Lineární modely

Všechny tyto modely slouží k odhadu modal split podle zohlednění různých parametrů. U lineárních modelů se uvažuje rovnoměrné rozdělení užitkových veličin (uživatel určuje hodnotu užitku dané alternativy náhodně mezi horní a dolní mezí, které jsou známy).

model lineární pravděpodobnosti: g vyjadřuje hustotu rovnoměrného rozdělení

Modely Probit

Zde se předpokládá normální rozdělení ohodnocení alternativ uživatelem.

Probit model: g vyjadřuje hustotu normálního rozdělení

Modely Logit

Zde se předpokládá logistické rozdělení ohodnocení alternativ uživatelem:

$$g(x) = \frac{\beta e^{\beta x}}{(1 + \beta e^{-\beta x})^2} \quad (2.44)$$

$$G(s) = \frac{1}{(1 + \beta e^{\beta x})} \quad (2.45)$$

2.4.3. Volba cesty v síti

Cílem této fáze je určení dopravní poptávky v každém relevantním bodě (linii) sítě. Do této matice vstupují přepravní vztahy v_{ijk} (z okrsku i do okrsku j dopravním prostředkem k), které jsou součtem přes všechny ZCS a výstupem jsou zatížení jednotlivých prvků dopravní sítě jednotlivými druhy dopravy, popř. tras veřejné dopravy. Dále uvedené modely se využívají především pro zatížení sítě individuální dopravou, což je pro veřejnou dopravu významné s ohledem na propustnost jednotlivých úseků silnic / tras (Cats, Hartl, 2016).

2.4.3.1. Modelování a ohodnocení prvků sítě

Celá modelovaná síť se skládá z tras a uzlů.

Trasy:

- volné trasy - zobrazují volné úseky silnic
- uzlové trasy - zobrazují vztahy v křižovatkách (přirážky na odbočení, ...)
- napájecí trasy - spojují napájecí uzly s dopravní sítí

Uzly:

- síťové uzly - všechny uzly, ve kterých se potkávají trasy
- napájecí uzly - slouží jako „fyzické“ zdroje a cíle přemístění u jednotlivých dopravních okrsků

Pro ohodnocení sítě jsou nejdůležitější časové náklady na průjezd určitou trasou. Ty mohou být buď pevně dopředu zvolené (kvalifikovaný odhad, nebo výpočet dle volné rychlosti a délky trasy), nebo mohou záviset také na jejím aktuálním zatížení. Pro tento

lepší model se používají tzv. CR-funkce („Capacity-Restraint“), které zobrazují závislost doby průjezdu trasou na stupni nasycení její propustnosti. Platí:

$$TM = T0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{M}{C} \right)^b \right) \quad (2.50)$$

- TM - aktuální doba průjezdu trasou
 $T0$ - doba průjezdu trasou při nulové intenzitě provozu
 M - aktuální intenzita provozu
 C - propustnost trasy
 a, b - zvolené parametry

2.4.3.2. Převedení matice přepravních vztahů na matici napájecích uzlů

Aby bylo možné modelovat zatížení sítě, tak je nutno ještě převést matici přepravních vztahů na matici napájecích uzlů, skrze něž je okrsek napojen na dopravní síť. Místo jednoho prvku - přepravního vztahu v_{ijk} bude vytvořena submatice, kde řádkové součty budou tvořit zdrojové přepravní vztahy jednotlivých napájecích uzlů okrsku i pro přemístění do uzlu j a sloupcové součty budou tvořit cílové přepravní vztahy jednotlivých napájecích uzlů okrsku j pro cestu z uzlu i a zároveň jednotlivé přepravní vztahy budou propočteny na základě náhodného modelu volby cíle (Axhausen, 2001).

2.4.3.3. Postupy přidělení zátěže na síť

Existují dva základní druhy postupů - s přihlédnutím a bez přihlédnutí k omezeným propustnostem tras.

Postupy bez přihlédnutí k propustnostem tras

U těchto postupů se nejdříve určí pevně hodnota přepravních odporů jednotlivých tras a uzlů. Pak se naleznou pro určitou relaci buď nejkratší cesta, a na tu se přidělí celý přepravní vztah, nebo množina nejkratších tras (např. se vyberou všechny cesty s celkovou hodnotou odporu do určitého násobku celkového odporu nejkratší cesty). Na tyto cesty se pak podle určitého kritéria rozdělí příslušný přepravní vztah.

Postupy s přihlédnutím k propustnostem tras

Tyto postupy opět využívají metodu nejkratší cesty, resp. množiny nejkratších cest, ale nemají pevně dané přepravní odpory jednotlivých tras. Jedná se o iterativní algoritmy, které v každém kroku vždy přidělí určitou část celkového přepravního vztahu v každé relaci na síť, a pak znovu ohodnotí všechny trasy a určí nejkratší cestu, resp. množinu nejkratších cest. Tento krok se opakuje až do chvíle, kdy jsou přiděleny na síť celé přepravní vztahy (Gentile, Nökel, 2016).

2.5. Elasticita poptávky

Pro tvorbu nabídky je z pohledu vlastností druhu dopravy ve výsledku významná elasticita poptávky po nabízených službách v závislosti na jejích parametrech. Důležitý je prvotní výběr významných faktorů a následně zjištění jejich vlivu (Vrtic, 2004).

Na základě výsledků RP- a SP-dat se provádí finanční ohodnocení jednotlivých atributů nabídky veřejné dopravy, přičemž opět lze využít cíleného SP dotazování, kdy respondenti vyjadřují svou ochotu využít veřejné dopravy, když bude mít její nabídka určité vlastnosti (Hackney, Axhausen, 2004).

Pokud se podaří na základě cíleného SP a RP dotazování věrně popsat rozhodovací realitu, pak lze v daném prostoru za daných podmínek zkoumat elasticitu poptávky po přepravě – respektive lze sledovat procentuální změny v poptávce po veřejné dopravě při změnách jejích atributů o 1 % - např. prodloužení / zkrácení přepravních časů, změna ceny apod.

Lze zmínit výsledky ze švýcarských průzkumů (Axhausen a kol., 2004), kdy zásadním výsledkem RP-dat bylo zjištění silné pozitivní korelace mezi časem a cenou, přičemž jako nejvýznamnější komponenty přepravního procesu byly zjištěny cestovní doba a dostupnost. Tyto výsledky potvrzují i nejnovější průzkumy v českém prostředí (Fitzová a kol., 2021).

Zásadním výsledkem SP-dat bylo uvedení cestovní doby a dostupnosti jako nejvýznamnějších komponent přepravního procesu. Při volbě dopravního prostředku bylo při rozhodování směrodatné vlastnictví osobního automobilu a předplatního jízdního dokladu na veřejnou dopravu. Jako zcela specifická homogenní skupina se ukázali lidé dojíždějící za prací, protože oproti ostatním skupinám měla tato skupina extrémně vysokou citlivost na interval (ve veřejné dopravě), cenu a přesnost. V případě používání veřejné dopravy bylo při rozhodování směrodatné vlastnictví předplatní jízdenky. Toto potvrdil i výzkum v pražské aglomeraci, byť zjištěná závislost nebyla tak silná, jako ve švýcarských průzkumech (Kříž, Janoš, 2019).

Jako významné faktory nabídky ovlivňující poptávku po přepravě a volbu dopravního prostředku, jejichž elasticita byla zkoumána, byly určeny v případě individuální automobilové dopravy:

- přepravní čas
- cena přepravy
- spolehlivost (ve smyslu přesnosti)

a v případě veřejné dopravy:

- přepravní čas
- cena za přepravu
- počet přestupů
- interval mezi spoji
- spolehlivost
- dostupnost, docházková vzdálenost
- komfort

Obecně lepších výsledků pro zkoumání elasticity poptávky bylo dosaženo pomocí SP-dat, neboť RP-data byla zatížena značnou nepřesností.

Pro dosažení srovnatelné vypovídací hodnoty jednotlivých faktorů, které mají zásadní vliv při zjišťování dopravního chování, bylo pomocí cíleného SP-dotazování zjišťováno vnímání „peněžní hodnoty“ jednotlivých atributů nabídky (Vrtic, Axhausen, 2002). Relativní ohodnocení těchto faktorů (uvedeny relativní hodnoty ve švýcarských francích – ChF) :

<i>cena času v individuální dopravě (ChF/h)</i>	27,7
<i>cena času jízdy ve veřejné dopravě (ChF/h)</i>	18,5
<i>cenový přepočít na nabízený interval ve veřejné dopravě (ChF/h)</i>	8,3
<i>časová hodnota dostupnosti k veřejné dopravě (ChF/h)</i>	50,0
<i>spolehlivost (cena / % pravděpodobnost)</i>	0,1
<i>komfort (např. odpovídající EC vlaku) (ChF)</i>	4,9

Toto SP-dotazování a následný převod do finanční roviny opět potvrdilo čas strávený v dopravním prostředku za nejvýznamnější modelovou proměnnou. Na základě takto ohodnocených dat a znalosti podstaty rozdílu mezi RP- a SP-daty lze verifikovat modely na volbu dopravního prostředku.

Z těchto a dalších zjištěných hodnot elasticity poptávky v závislosti na dalších významných faktorech se jeví jako zásadní udržet vhodný poměr ceny za realizaci přepravy prostřednictvím individuální dopravy a veřejné dopravy. Vyšší elasticita poptávky ve veřejné dopravě svědčí o skutečnosti, že individuální doprava je vůči veřejné dopravě vnímána jako substitut, nicméně v opačném případě toto vnímání substituce tak silné není. Je také patrné, že se zvyšováním ceny za realizaci přepravy poroste poptávková elasticita

a bude se tak zvyšovat pravděpodobnost substituce. Jelikož v případě přepravních časů je elasticita poptávky obecně vyšší než v případě ceny, je zřejmé, že pro potřeby ovlivnění modal split je důležité zkracování přepravních dob ve veřejné dopravě, neboť ta se tak může následně snáze stávat substitutem vůči dopravě individuální. Jak již bylo uvedeno výše, zvláštní skupinou s vyšší mírou poptávkové elasticity a tudíž i vyšší citlivostí na změnu, jsou lidé dojíždějící za prací, což je vysvětlitelné skutečností, že tato skupina ve srovnání s ostatními skupinami tráví více času v dopravních prostředcích a zrovna tak za realizaci přepravního procesu obecně vynakládá relativně více finančních prostředků.

Nejnovější zkoumání elasticity poptávky v českém prostředí vzniká v rámci projektu „Nová mobilita“ (Tomeš a kol., 2021) řešenému s ohledem na predikci poptávky po přepravě na budoucích vysokorychlostních tratích v ČR. Již nyní však tento projekt poskytuje zajímavé dílčí výstupy, široce použitelné i pro ostatní dopravně-plánovací úlohy.

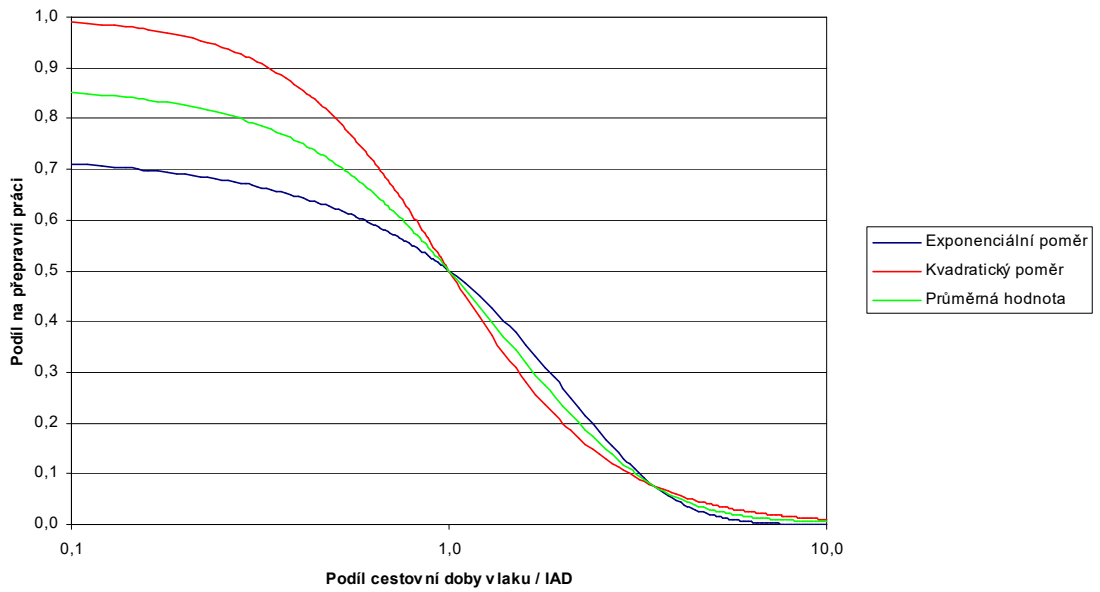
2.6. Modal split

Základní rozložení známých přepravních proudů mezi jednotlivé druhy dopravy není při známých poptávkových závislostech složitým úkonem. Po potvrzení tvaru odporové funkce se pro všechny kombinace zdrojů a cílů cest vytvoří matice hodnot cestovních dob, vypočtou odporové funkce a přepravní proudy rozdělí mezi druhy dopravy v jejich vzájemném poměru. Případně je možné využít možnosti sestavení kombinované odporové funkce, obsahující kromě cestovní doby i jiné veličiny, například modální odporovou veličinu (konstantní pro každý druh dopravy), počty přestupů nebo průměrný čas čekání na spoj ve veřejné dopravě, nejnižší, převažující a nejvyšší typ silničních komunikací nebo pravděpodobnost tvorby dopravních kongescí v případě automobilové dopravy, cena za přepravu apod. V případě velmi podrobných modelů hrají roli také sociodemografické parametry, jejichž vzájemná závažnost je kalibrována na základě specializovaných marketingových průzkumů nebo pozorování skutečného chování obyvatel. Stejně tak je možné provést hrubou segmentaci poptávkových skupin například podle věku (segmentace podle účelu cest je možná jen ve velmi omezené míře, neboť lze těžko nalézt kontrolní data například pro segment cest rekreačních; na druhou stranu lze odhadnout, že záměna celkového počtu cest a dojížděky za práci a vzděláním znamená jen malou chybu, resp. je možné použít případnou jednoduchou plošnou korekci, zejména s ohledem na rozlišovací úroveň srovnávacího modelu).

Pro odhad podílu jednotlivých druhů dopravy na přepravní práci se potom použije prostý nebo exponenciální poměr těchto odporových funkcí. V případě převzetí tvaru odporové funkce z distribučního modelu je potom významný jejich poměr, tj. obvykle poměr druhých mocnin cestovních dob.

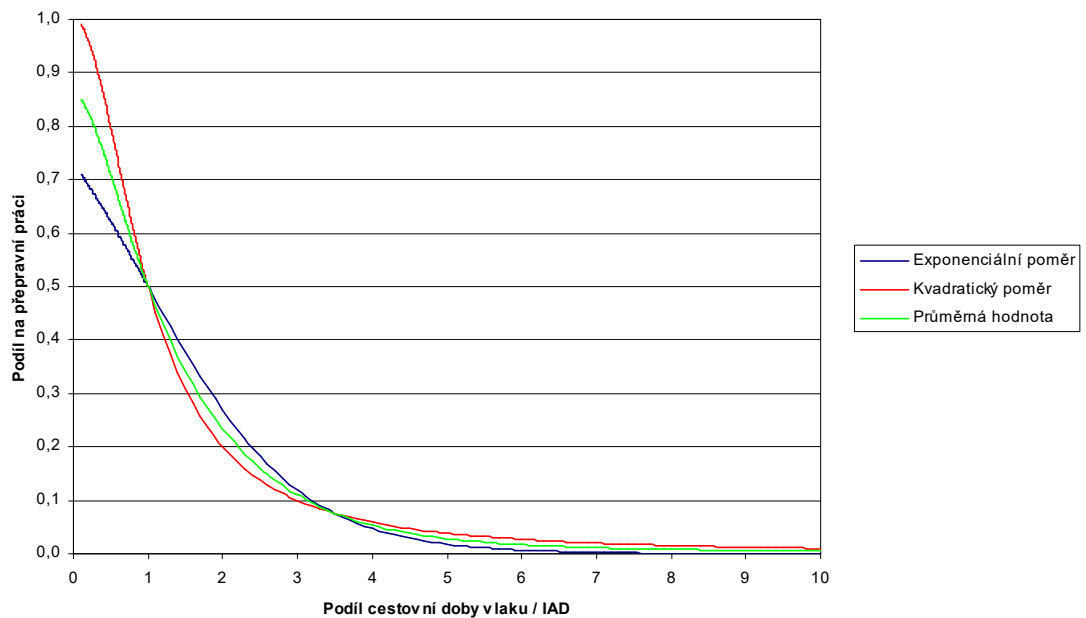
Níže je graficky zobrazen očekávaný modal split v závislosti na poměru cestovních dob v poměru kvadratickém a exponenciálním (FD ČVUT, Telematix, 2010). Pro přibližnou představu je zvolena jejich průměrná hodnota a obě mezní křivky potom lze chápat jako obvyklé rozpětí v závislosti na individuální časové citlivosti.

modal split železnice (logaritmické vyjádření)



Obr. 2.6. modal split železnice – logaritmické vyjádření (FD ČVUT, Telematix, 2010)

modal split železnice



Obr. 2.7. modal split železnice (FD ČVUT, Telematix, 2010)

Za zdůraznění stojí přesná definice pojmu cestovní doby jakožto časového úseku, složeného z dílčích podstatných dob trvání jednotlivých součástí procesu přemístění. Kromě samotné jízdní doby je nutno navíc zohlednit dobu na dosažení výchozího terminálu veřejné dopravy a cílového místa („první a poslední míle“), sumu přestupních dob a čas čekání na spoj, reprezentovaný pro časovou náhodnost vzniku přepravní potřeby polovinou intervalu. V případě cest v typickém segmentu, daným modelem prioritně řešeným, (mezi centry velkých měst, kde lze důvodně očekávat nejvýše hodinový interval, popř. z předměstí výchozího místa do centra města cílového či naopak), lze tyto časové přírážky úhrnně odhadnout jako jednu hodinu. Naopak v případě cest osobním automobilem lze obvykle časové přírážky zanedbat, snad s výjimkou časových ztrát způsobených obtížnou situací z hlediska parkování ve velkých městech. V případě obvyklých cest s dobou jízdy osobním automobilem asi 1-3 hodiny se tedy dá učinit zobecňující poznámka, že pro vyrovnané cestovní doby je nutné dosáhnout jízdní doby veřejné dopravy asi poloviční, tj. rychlosti asi dvojnásobné. Podrobné stanovení časových závislostí a ztrát vždy však záleží na konkrétním řešeném případě a lze ho i příslušným způsobem monetizovat (Hartl, 2020).

Následujícím krokem by mělo být vytvoření tabulek cestovních dob, modal split (v obecném smyslu veřejné dopravy coby „dopravního módu“) jednotlivých relací a získání absolutních hodnot velikostí přepravních proudů, které je možné očekávat ve veřejné dopravě. S ohledem na výsledky časové dostupnosti proběhne modální volba a po přidělení na dopravní síť a sumaci pro jednotlivé přepravy lze provést dle významnosti rozdělení na páteřní a obslužné směry. Takové řešení je pak v závislosti na skutečném výsledku návrhu konstrukce linkového vedení a časových poloh, určujících v jednotlivých směrech pro dané přepravní proudy, nutné zopakovat na základě skutečně dosažených cestovních dob, a pokud nedojde v některé relaci k podstatné změně modal split, pak považovat takové řešení za vyhovující. Postup má tedy iterativní charakter. Na tomto místě je také třeba učinit poznámku, že v případě návrhu na zásadní zkrácení dosud nejkratší cestovní doby přes všechny dopravní módy v některé relaci lze očekávat zpětnou vazbu až do fáze generativního modelu, tj. potřeba nalézt opět celkový počet cest a jejich rozdělení (Brugger a kol., 2012). Takový proces má však, zejména v případě delších vzdáleností, dlouhodobý charakter a pro účely sestavy srovnávacího modelu jako vodítka pro kalibraci výsledného modelu pro aktuální časový horizont jej lze zanedbat.

2.6.1. Sestava matice přepravních vztahů

Při tvorbě dopravního modelu je dalším krokem sestava matice přepravních vztahů. Postupně je zobrazena matice vzdáleností (vypočtená na základě získaných údajů o zeměpisných souřadnicích jádrových měst), matice gravitací (tedy podílu velikosti cílového místa a odporové funkce, závislé v tomto modelu na jejich zeměpisné vzdálenosti), a konečně výsledná matice přepravních vztahů.

Tato výsledná matice, obsahující také příslušné lineární kombinace poměrů vyjížďky, rozděluje celkovou vyjížďku z výchozího místa mezi jednotlivé cíle v poměru jejich gravitací vůči zdrojové oblasti. Uvedené hodnoty jsou tedy odhady počtu cestujících v uvedené relaci z-do (a zpět) v denním průměru, za již uvedených předpokladů a zjednodušení.

Intramodální matici přepravních vztahů lze sestavit i výhradně na základě gravitačního modelu, při zohlednění atraktivity a dostupnosti (Gašparík a kol., 2020).

2.6.2. Významné atributy nabídky ovlivňující modal split ve veřejné dopravě

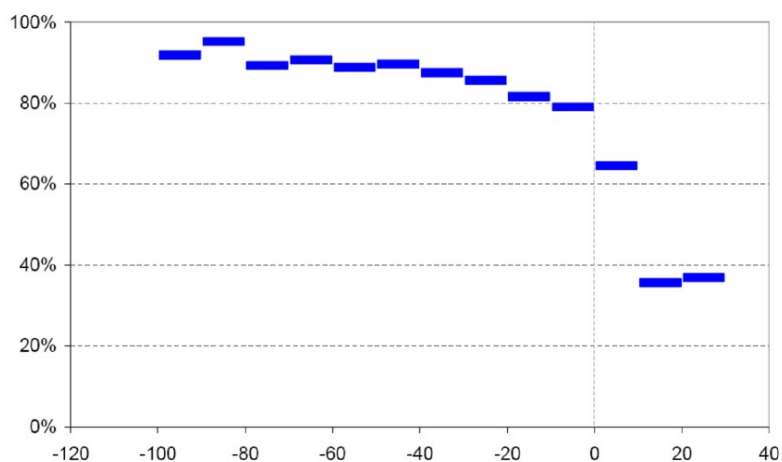
Metody a výstupy předchozí kapitoly jsou pro potřeby této práce naprosto stěžejní, neboť poskytují potřebnou výchozí úroveň pro plánování nabídky ve veřejné dopravě.

Jak bylo uvedeno v části o elasticitě poptávky, je nutné se dále při plánování nabídky zaměřit především na rozsah nabídky spojení (počet, interval) a rychlost. Tyto faktory budou rozebrány podrobněji v následujících podkapitolách.

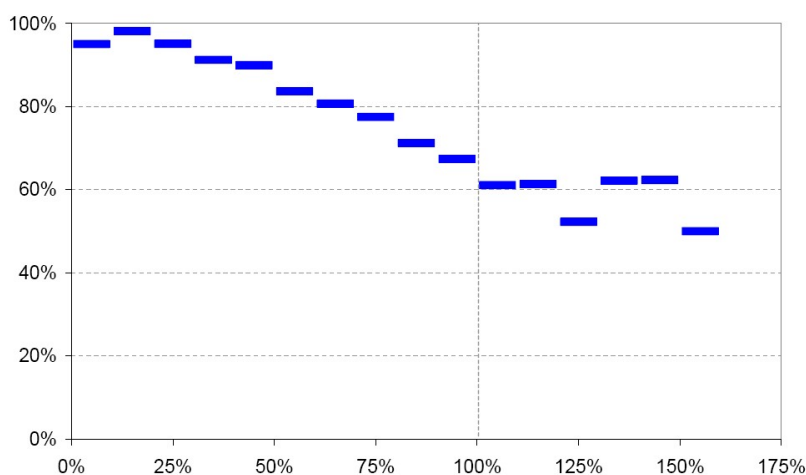
V neposlední řadě je nutné zabývat se seriózně otázkou, kolik času jsou lidé schopni trávit v dopravních prostředcích k dosažení svých cílů, zejména v oblasti pravidelné denní dojížďky. Dojde-li k překonání „jisté“ časové hranice doby přepravy mezi dvěma místy, vzroste radikálním způsobem počet cestujících mezi oběma místy, neboť se vzájemně „zpřístupní“ pracovní trhy těchto míst. V dané relaci se tak vytvoří nová homogenní skupina cestujících. Tato časová hranice se pohybuje v oblasti hodnot blízkých zdrojům / cílům cest v rámci 60 minutové izochrony časové dostupnosti (Halás a kol. 2014) a často bývá označována jako „antropologická konstanta“ v dopravě. Zároveň bylo zjištěno, že (v závislosti na velikosti sídel) pravidelná dojížďka razantně klesá se vzdáleností a u středně velkých sídel odpovídá průměrné přepravní vzdálenosti mezi zdroji a cíli cest 17 km (Halás a kol. 2014).

2.6.2.1. Závislost modal split na době přepravy

Existují četná měření, která prokázala jednoznačnou závislost podílu železniční dopravy v závislosti na době přepravy (Vrtic a kol., 2003). Podle výše podílu doby přepravy osobním automobilem a doby přepravy vlakem vzniká rozsah modal split pro železniční dopravu v rozmezí 5 – 80% (Behrens, Pels, 2012). Pro výpočet požadovaného podílu je nutné zahrnout všechny potřebné časy pro použití osobního automobilu a všechny potřebné časy pro použití železniční dopravy včetně zahrnutí střední doby čekání na spoj, aby bylo dosaženo teoretické doby přepravy „od domu k domu.“



Obr. 2.8. Modal split IAD ve vazbě na absolutní rozdíl cestovní doby IAD / VD, absolutní časové difference (10 min) při cestách nad 10 km (zdroj: Axhausen, 2001)



Obr. 2.9. Modal split IAD ve vazbě na relativní rozdíl cestovní doby IAD / VD, relativní časové difference (10% cestovní doby) při cestách nad 10 km (zdroj: Axhausen, 2001)

Výše uvedené závislosti jsou zobecněné a v jednotlivých konkrétních případech se mohou přirozeně lišit v souvislosti s vývojem socioekonomických faktorů v regionu a stavem infrastruktury jednotlivých druhů dopravy.

Přestože se jedná o výsledky již starších průzkumů, je patrné, že plně korespondují i s novějšími výzkumy v oblasti poptávkové elasticity vztažené k době přepravy.

2.6.2.2. Faktor rychlosti přepravy

Ve smyslu potřeb této práce je rychlostí míněna rychlost cestovní. Cestovní rychlost je ovlivněna docházkovou vzdáleností k zastávce prostředku veřejné dopravy, střední dobou čekání na spoj, samotnou technickou rychlostí dopravních prostředků, v uzlových stanicích čekání na přípoj a samozřejmě i pobyty spojů v nácestných stanicích (Weidmann, 2008). Souhrnnou dobu čekání cestujících v síti t_c lze vyjádřit jako:

$$\sum t_c = \sum_{p=1}^n (t_p - t_{pmin}) \cdot Q_p \quad (2.58)$$

kde:

ppřestupní vazba v síti $p \in (1, \dots, n)$

t_p přestupní doba vztažená k p -té přestupní vazbě, $t_p = (t_{odj} - t_{prij})$

t_{pmin}minimální přestupní doba realizovatelná v případě p -té přestupní vazby

Q_ppřepravní proud cestujících připadající na p -tou přestupní vazbu

Je patrné, že souhrnnou čekací dobu cestujících v síti lze použít jako jedno z kritérií pro měření kvality nabídky jízdního řádu.

Střední doba čekání na spoj se odvíjí od počtu spojů za den a jejich intervalu. Jako vhodný příklad týkající se volby délky intervalu lze uvést, že podle měření SBB (Weidmann, 2001) bylo dosaženo největšího nárůstu cestujících (68%) se zavedením 30 minutového intervalu na většině tratí – tento interval je zákazníky subjektivně vnímán tak, že vlak, podobně jako osobní automobil, jede „kdykoli“ je zapotřebí (Vrtic a kol., 2003).

2.6.2.3. Faktor přesnosti dopravy

Přesnost dopravy tvoří při návrhu provozní koncepce a následně provozu systémů veřejné dopravy zcela klíčový ukazatel. Zejména v oblastech pravidelné denní dojížděky, kde se jedná o opakované a pravidelné přepravy na relativně krátké vzdálenosti, znamená případné, byť i malé zpoždění, relativně významné prodloužení cestovní doby.

Za účelem vyjádření spolehlivosti železniční dopravy je např. v Rakousku a Švýcarsku sledována časová odchylka oproti jízdnímu řádu na příjezdu vlaku (Smoliner a kol., 2018a), přičemž ve Švýcarsku je navíc zaveden pojem „zákaznická přesnost“, která vyjadřuje zpoždění vážené počtem cestujících. Za vlak jedoucí včas se považuje v Rakousku vlak zpožděný do 5 min 29 s, ve Švýcarsku vlak zpožděný do 2 min 59 s, v českém prostředí na síti Správy železnic vlak zpožděný do 5 min 59 s.

V případě stanovení vhodné délky jízdních dob pro stabilní jízdní řád je nutné pracovat i s přírážkami, které zvyšují stabilitu dopravního systému.

„Teoretická jízdní doba“ představuje nejkratší technicky dosažitelnou jízdní dobu, odpovídající příslušnému vozidlu a úseku. Teoretická jízdní doba navýšená o přírážku pak představuje „pravidelnou jízdní dobu“, se kterou se pracuje při tvorbě jízdního řádu.

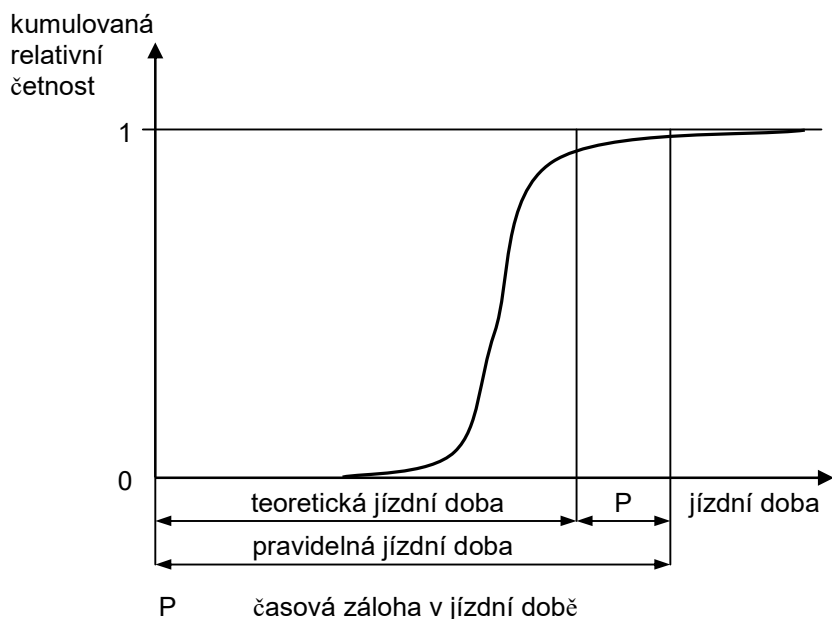
Přirážky k jízdním dobám by měly umožnit vyrovnání běžných a provozně vzniklých nepravidelností. Na železnici se jedná například o špatné rozhledové poměry, sníženou mez adheze, nástup velké skupiny cestujících, pochybení provozního personálu apod. Výše přírážek bývá u vlaků osobní dopravy stanovována obvykle v rozmezí 3-12% a podrobně je stanovena směrnici UIC 451-1, kdy se zohledňuje maximální rychlost a hmotnost vlaku, přičemž část hodnoty přírážky je lineární a část paušální / bodová. Obecně se pro běžný bezvýlukový provoz uplatňují lineární přírážky, přičemž čím vyšší je rychlost a hmotnost vlaku, tím větší by měla být hodnota lineární přírážky.

Plánovanou délku jízdní doby T_j v mezistaničním úseku lze tak vyjádřit:

$$T_j = T_{jmin} (1 + T_{př} / 100) \quad (2.59)$$

kde T_{jmin} představuje minimální (teoretickou) dosažitelnou jízdní dobu v daném úseku pro danou řadu hnacího vozidla a parametry soupravy a $T_{př}$ dobu přírážky.

Přidáním přírážky k minimální jízdní době však stále nelze zaručit jízdu dopravního prostředku včas. Jevy vznikající náhodně nelze nijak zahrnout do délky jízdních dob. Ačkoli je známa statistická četnost výskytu těchto jevů, nelze následky jejich vzniku omezit ani odstranit rozdělením časových ztrát do jízdních dob jednotlivých spojů.



Obr. 2.10. Délka jízdní doby T_j dosahovaná v jednom mezistaničním úseku

(zdroj: Baudyš, Janoš, 2007b)

Z obrázku je patrné, že zaručení 100% přesnosti by vyžadovalo stanovení takových délek jízdních dob, které by již byly pro zákazníky zcela neakceptovatelné.

Zajištění stability jízdního řádu je velkým dopravně-plánovacím tématem a je předmětem i částých úloh matematické optimalizace, které se liší tím, zda se jedná o síť s vysokou mírou systematizace provozu (Sparing, Goverde, 2017), anebo o síť s nízkou mírou systematizace (Wong a kol., 2008).

Umísťování přírážek do jízdní doby je rozdílné v železniční a silniční dopravě. Zatímco na železnici se přírážka rozprostírá obvykle lineárně (se zaokrouhlením ke konci úseku), v silniční (autobusové dopravě) se přírážka v celé své výši umísťuje obvykle na konec trasy (nebo před významný přepravní anebo přestupní bod).

3. Plánování linek

Plán linek by měl co možná nejvíce vycházet z popsaných a definovaných přepravních vztahů. Přepravní vztahy určují směrové linkové vedení a zároveň tvoří podklad pro popis potřebných přepravních kapacit.

Matice přepravních vztahů udává přepravní proudy za časovou jednotku (= 1h, 2h, atd.). V rámci sítě se tak vzájemně překrývá více plánů linkového vedení, a proto je smysluplné linkové vedení optimalizovat. Každý cestující požaduje zpravidla rychlou přepravu mezi vybranými místy a to nejlépe bez přestupů. Při plánování linek je tedy nutno vycházet z nejsilnějších přepravních proudů cestujících (Schöbel, 2012).

Pro plánování linek existují v principu metody:

Intuitivní metody

vedou iterativně ke změnám existujících sítí linek – hledání nejkratších cest, průměrná cestovní doba v síti linek, náklady na vlakový či vozový kilometr, zatížení linek, zatížení dopravní sítě apod.

Numerické metody

vedou k vytvoření teoretických modelů s cílovou funkcí:

- Maximalizace počtu přímo jedoucích cestujících
- Minimalizace počtu přestupních procesů
- Minimalizace celkové cestovní doby
- Minimalizace celkové délky linek
- Minimalizace provozních nákladů
- Maximalizace využití kapacity vozidla

3.1. Zásady tvorby plánování linek

Při tvorbě linkového plánu je nutno kombinovat aspekty sledované cestujícími a technologické a provozní aspekty, jejichž kombinací je nutno dosáhnout takového návrhu, který na jedné straně pozitivně ovlivní modal split ve prospěch veřejné dopravy a na straně druhé bude takový návrh „provozně únosný“ (Sonntag, 1977).

Do této kombinace patří zohlednění nejdůležitějších faktorů sledovaných cestujícími:

- Možnost využít mezi všemi místy „časově nejkratší“ cesty
- Minimální počet přestupů

a nejvýznamnějších faktorů provozních:

- Podobná potřeba kapacity souprav / náležitostí po celé délce linky
- Minimální počet vozidel na lince zajišťující požadovaný rozsah výkonů

Mezi faktory, které mohou ovlivnit výslednou síť linek, patří zejména:

- Volba dopravního prostředku (modální volba)
- Volba typu vozidla (kapacita, variabilita)
- Nastavení intervalu
- Využití stanic („na znamení“, průjezd)
- Souběžné vedení linek (posilové, proložené)

Rozdělení linek podle vedení:

- Radiální
- Diametrální
- Tangenciální
- Napájecí
- Okružní
- Posilové

Rozdělení linek podle provozu:

- Základní
- Denní
- Noční
- Doplnkové
- Posilové

Typy linkových sítí:

Osová síť – každá hrana v síti je zpravidla obsluhována pouze jednou linkou

Rozvětvená síť – každá hrana je obsluhována více linkami v prokladu

Pokud je úloha o linkovém vedení zadána tak, že je k dispozici údaj o přepravním proudu a zároveň je k dispozici přepravní kapacita vozidel, pak lze vypočítat ideální interval (Nachtigall, 1998):

Frekvence obslužnosti:
$$f = \frac{Q}{\gamma \cdot K} \quad (3.1)$$

Ideální interval:
$$T_i = \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

Q - intenzita přepravního proudu (osob / časovou jednotku)

γ - součinitel využití přepravní kapacity vozidla

K - kapacita vozidla

Pro získání relevantních výstupů z uvedeného vztahu je účelné definovat tři okrajové podmínky:

- 1) přípustnost přepravy stojících cestujících (což ovlivní součinitel γ)
- 2) přípustné intervaly obslužnosti (minimální a maximální hodnoty)
- 3) minimální velikost vozidla

3.2. Obecné metody plánování linek

Postupy plánování linek uvedené v této části se omezují na předpoklad taktového nebo integrálního taktového jízdního řádu (ITJŘ). Představené metody vycházející z předpokladu systematizace nabídky a periodicity provozu poskytují základ pro optimalizaci taktové sítě. V ITJŘ jsou vlaky provozovány na principu vzájemně provázaných linek, čímž se vytváří taktově linková síť (Wegel, 1974). Vysoká kvalita taktového jízdního řádu předpokládá vysokou kvalitu taktově linkové sítě. Přestože popis taktového jízdního řádu je uveden až v části odpovídající jízdním řádům, metodicky se plánování linek provádí před tvorbou jízdního řádu, po vymezení přepravních vztahů v území – proto bylo zvoleno toto pořadí.

Pro plánování linek se používají čtyři základní metody (Baudyš, Janoš, 2001a):

- I. metoda uspořádání koncových uzlů
- II. metoda základních (bazických) linek
- III. metoda koster
- IV. metoda sítí

Metoda	Princip	Zjednodušení
metoda uspořádání koncových uzlů	předběžný výběr omezené množiny potenciálních koncových uzlů a linek mezi těmito uzly, optimalizace je potom obecně možná pomocí úplného vyčíslení	předběžný výběr koncových uzlů a linek
metoda základních (bazických) linek	konstrukce sítě linek spojením (někdy i rozdělením) základních linek	částečně heuristické metody pro spojení základních linek
metoda koster	konstrukce sítě linek postupným zvětšováním množiny základních linek (které jsou označeny jako kostra)	částečně heuristické metody k doplnění částečných linek
metoda sítí	výchozím bodem jsou úplné linky: vyčíslení všech prakticky přípustných linek a jejich kombinací, obecně je možné pouze neúplné vyčíslení	obecně heuristické metody, omezení množiny řešení, vyčíslení

Přehled metod pro tvorbu linkové sítě

Wegel (1974) vytvořil síťově orientovanou metodu optimalizace průběhu linek pro taktový kolejový systém. Vícestupňovým přístupem jsou nejkratšími cestami minimalizovány přestupní procesy s ohledem na potřebný počet linek na hraně. Pro stanovení potřebného počtu linek na hraně byl zaveden pojem kapacita linky, který udává střední počet cestujících jedné linky vztažený k časové jednotce.

Dienst (1978) vytvořil metodu tvorby sítě linek pro dálkovou železniční dopravu. Plán sítě linek vychází z hypotézy vedení linek přes nejkratší cesty a počtu linek na hraně vycházející z kapacity linky. Optimalizace sítě linek probíhá na základě úplného vyčíslení, přičemž cílovým kritériem je maximalizace přímo jedoucích cestujících. Kvůli značně dlouhé době výpočtu v případě rozsáhlých sítí je metoda ukončena po předem určeném počtu rozhodnutí, dříve než je prokazatelně dosaženo optimálního řešení.

Sonntag (1979) vychází z vícestupňového iterativního přístupu. Cílem je minimalizace středního časového zatížení každého cestujícího v síti. Výchozím řešením je ideální plán sítě linek, který umožňuje každému cestujícímu spojení bez přestupu přes nejkratší cesty. Ve fázi zpracování se hledají alternativní cesty na současném plánu linek, na které se rozvrhne objem přepravy. V navazující 4-stupňové spojovací fázi je vytvořen přípustný plán sítě linek. V hodnotící etapě je určena kvalita řešení vypočteného plánu sítě linek, v případě dosažení zlepšujícího řešení pokračuje fází zpracování, jinak je postup ukončen.

Mott (1987) zavádí pojem interaktivní sítě, kdy strukturu sítě a průběh linek mění podle definované poptávky tak, aby ve výsledku tvořila co nejlepší prostorovou nabídku. Jedná se o iterativní postup.

Výše uvedené metody zpravidla předpokládají využití jednoho segmentu veřejné dopravy v homogenní síti. V mnoha případech není s ohledem na komplexitu sítě, anebo širší řešeného problému, takovýto aparát postačující. Z tohoto důvodu se utvářely vícestupňové modely plánování linek veřejné dopravy, které zohledňují využívání a provázání většího počtu segmentů veřejné dopravy v reálné praxi.

Nároky na tyto vícestupňové modely byly formulovány následovně (Krista, 1996):

- zohlednění různých druhů veřejných dopravních prostředků
- stanovení plánu linek na základě zadaných cílových kritérií za účelem získání počátečního řešení
- zahrnutí interaktivní komponenty
- zahrnutí dopravního chování cestujících pro ohodnocení plánu linek

- možnost jednoznačného porovnání více různých plánů linek

Bylo tak navrženo mnoho metod a aplikací uplatňujících principy operačního výzkumu, kdy se tak například zohledňovaly odlišné frekvence spojů na jednotlivých hranách a iterativními kroky se upravovalo linkové vedení (Nachtigall, 1996), anebo se zohledňovaly různé obslužné segmenty (Bussieck a kol., 1997).

3.3. Přechod linkového vedení v segmenty dopravní obslužnosti

Na základě vytvořené linkové sítě systému prostředků veřejné dopravy je nutné přistoupit k vymezení jednotlivých segmentů dopravní obslužnosti. V tomto kroku se v plánu linek upřesní zastavovací strategie jednotlivých linek v síti a vymezí funkce jednotlivých linek v úsecích sítě, kde je navrženo více linek souběžně. Následně je nutné zjistit rozdělení cestujících mezi jednotlivé segmenty obslužnosti. Při plánování linek se pro každý typ produktu vytváří v souladu s principy segmentace plán linkového vedení na základě jeho matice přepravních vztahů $V^X = (v_{qz}^X)$ a specifických vlastností infrastruktury. Při určování poloh vlaků je provedeno stanovení předpokladu dosažení určitých uzlů v síti (Oltrogge, 1994).

Návrh vedení linky musí zohledňovat potřeby homogenní skupiny cestujících, pro kterou je linka ve smyslu segmentace určena. Jako velmi nevhodná se jeví tvorba linek, které z principu směšují místní a dálkovou frekvenci cestujících, neboť z hlediska dopravce se obtížně hledá systém stanovení zastavování v jednotlivých stanicích, může docházet k přeplňování soupravy v některých úsecích anebo naopak k jízdě s předdimenzovanou soupravou. Z hlediska cestujícího může docházet k nepříjemnému efektu zpomalování hlavního přepravního proudu kvůli místní frekvenci.

Hlavním ovlivnitelným kritériem je cestovní doba, která vychází zejména ze sítově podmíněných čekacích dob (Nachtigall, Voget, 1997). Provozními možnostmi a přepravními požadavky (především přípoje pro přestupující cestující) vznikají grafikonově technické vazby, tj. na železnici časová závislost mezi dvěma vlaky.

Plán linek naprosto stěžejním způsobem ovlivňuje modal split a je tak třeba věnovat jeho přípravě příslušnou pozornost. Účelem metod plánování linek samozřejmě není vytvořit co největší portfolio bezpřestupových cest za každou cenu. Přestupy jsou negativem veřejné dopravy, kterému je třeba přiřadit příslušnou váhu. Prvotní prioritou plánování veřejné dopravy je co nejširší nabídka veřejné dopravy v rámci optimalizovaných a doplňujících se sítí plánů linek jednotlivých segmentů, resp. produktů.

3.4. Struktura a segmentace trhu veřejné dopravy

Při tvorbě struktury a hierarchie nabídky používáme celou řadu pojmů, které jsou v měkkém systému snadno charakterizovatelné (například „rychlá regionální doprava“), ale pokud bychom tyto pojmy chtěli projektovat do tvrdého systému, setkáváme se s určitými problémy, neboť v plně deterministickém systému není možné používat intuitivní definice, které pracují s většinovým výkladem.

V rámci budování struktury systému veřejné dopravy je nutné postupovat hierarchicky směrem dolů, tj. od budování funkčních páteřních systémů. V tomto uvažování je velmi perspektivní model vrstev (segmentů) veřejné dopravy, které dohromady tvoří ucelenou stavbu. Metoda *segmentace* zpřehledňuje strukturu veřejné dopravy (Huisman, 2005).

Správné pojetí segmentace trhu je výchozí pro následnou tvorbu linek. Segmentace trhu veřejné hromadné dopravy je navržena ve čtyřech úrovních, z nichž každá může podporovat specifické rozhodovací hledisko. Trh veřejné dopravy lze tak segmentovat podle několika principů:

Prostorová segmentace

Segmentace trhu veřejné hromadné dopravy dle velikosti aglomerací nebo institucionálně dle krajů je základním rozčleněním trhu veřejné hromadné dopravy, neboť respektuje rozčlenění území dle příslušných objednatelů.

Segmentace dle dopravních vztahů

Takto pojatou segmentaci lze rozčlenit na:

- dopravu mezi aglomeracemi (A)
- rychlou dopravní obslužnost mezi regiony i uvnitř regionů (B)
- páteřní regionální dopravu (C)
- obslužnou regionální dopravu (D)
- dodatečně lze uvažovat alternativní segment (E) doplňkových dopravních systémů

Segmentace dle druhu dopravy

Segmentace veřejné hromadné dopravy dle použitého druhu dopravy je nutná z důvodů technických, provozních, ekologických či finančních. Z hlediska struktury přepravních vztahů se jedná i o posouzení vhodnosti realizace konkrétních přepravních vazeb určitým druhem dopravy (např. z pohledu nutné přepravní kapacity).

Dále je představeno obecně uplatňované rozvrstvení veřejné dopravy (FD ČVUT, KPM Consult, 2007) čili systému veřejné dopravy segmentovaného dle dopravních vztahů.

Tab. 3.1. Jednotlivé segmenty veřejné dopravy (zdroj: FD ČVUT, KPM Consult, 2009)

Úroveň obsluhy, funkce		Oblast [km]	Orientace na přepravní potenciál	Dopravní prostředek	Příklad produktu nabídky	
A	Tranzitní	A1	> 600	Vzájemné spojení kontinentálních metropolí, mezikontinentální relace	Letadlo (VR železnice)	Mezikontinentální lety, lety v rámci Evropy
		A2	130 – 600	Vzájemné spojení aglomerací v rámci státu, sousední zahraniční velká centra	(Letadlo) Vlák	Vysokorychlostní železnice (ICE, TGV, THALYS), konvenční rychlá železnice (EuroCity, InterCity)
B	Spojovací	B1	30 – 130	Spojení dvou aglomerací a mezilehlých regionálních center, spojení řetězce regionálních center	Vlák	Expres, Rychlík (IR-InterRegio)
		B2	20 – 100	Spojení dvou aglomerací a mezilehlých regionálních center, spojení řetězce regionálních center	Autobus	Dálkový autobus Rychlík, spěšný vlák (RE-Regionální expres)
C	Sběrná	C1	10 – 50	Spojení vnějšího aglomeračního pásma s centrem (zrychlení/průjezd zastávek ve vnitřním pásmu aglomerace)	Vlák	Rychlá příměstská železnice Spěšný vlák (resp. spěšný vlák v pásmovém JŘ) (RE-Regionální expres)

		C2	< 30	Spojení vnitřních pásem aglomerací s centrem, aglomerací středních a velkých měst s centrem	Vlak	Příměstská železnice (ESKO, S-Bahn)
		C3	< 30	Spojení sídel mimo aglomerace s nejbližším významným uzlem	Vlak	Páteří regionální osobní vlak
		C4	< 20	Spojení sídel mimo aglomerace s nejbližším významným uzlem	Autobus	Linkový autobus
D	Obslužná	D1	< 15	Spojení městských částí metropole navzájem a jejich spojení s centrem metropole	Metro	Metro městská rychlodráha
		D2	< 10	Spojení městských částí velkých měst navzájem a jejich spojení s centrem města	Tramvaj Autobus	Tramvaj městský autobus
		D3	< 5	Vnitřní obsluha městských částí, obsluha malých měst	Autobus	Městský autobus Místní autobus
		D4	< 10	Obsluha turistických oblastí	Ozubnice, lanová dráha	

Segment A: Tranzitní vrstva

V pozemní dopravě tvoří páteří prvek dopravního systému zpravidla segment A2. Jedná se o spojení velkých aglomerací mezinárodního významu (např. Praha, Brno, Ostrava) vlaky EC, IC apod., včetně odpovídajícího spojení do zahraničních center, v případě autobusové dopravy zejména radiální spojení k aglomeracím národního i regionálního významu.

Segment B: Spojovací vrstva

Úkolem segmentu B je navázat na segment A a vzájemně propojovat důležitá regionální střediska mezi sebou. V podmínkách drážní dopravy se jedná o vlaky Ex, R, Sp, doplňkově rovněž o dálkové autobusy.

Segment C: Sběrná vrstva

Systém C tvoří páteř regionálních nebo městských systémů veřejné dopravy; jako na hlavní osu jsou na tyto linky navázány spoje segmentu D a další návazná doprava (např. P&R). Typickým příkladem je pražské metro, nebo linky příměstské dopravy, nejen u velkých měst.

Segment D: Obslužná vrstva

Jde o plošnou rozvozovou dopravu od segmentů A, B a C. Cílem je obsloužit co největší území a v případě řídkého osídlení umožnit okružní jízdu pokud možno co největší vytížení spoje při odjezdu ze střediska a tím umožnit případnou intervalovou dopravu i na těchto jinak málo vytížených spojích. Kolejová doprava v tomto segmentu by měla být postupně zcela vyloučena, protože vázání vozidel na kolejovou infrastrukturu neumožňuje plošnou obslužnost co největšího území.

Segment E: Alternativní formy veřejné dopravy

Zpravidla tvoří alternativu k segmentu D, popřípadě C: pěší doprava, cyklistická doprava, systémy „Bike and Ride“; „Park and Ride“, taxislužba, služby mikromobility na „poslední míli“, sdílená mobilita. Plošný význam těchto forem je ovšem značný, nejen s ohledem na velkou roztržitost přepravních vztahů na mikroregionální úrovni (Kraft, Marada, 2017), ale i s ohledem na zapojení cyklistické a pěší dopravy do systémů veřejné dopravy, neboť toto funkční propojení tvoří základ strategie udržitelné mobility.

Jednotlivé obslužné segmenty mají s ohledem na časovou konkurenceschopnost vůči individuální dopravě doporučené obecné délky intervalů, vycházející z obecných předpokladů, že střední doba čekání na spoj by neměla být delší, než samotná cestovní doba.

Tato doporučení vycházejí z empirických zkušeností organizace veřejné dopravy např. ve Švýcarsku či Německu (Weidmann, 2008).

Tab. 3.2. Doporučené délky intervalů pro jednotlivé segmenty dopravní obslužnosti (zdroj: Weidmann, 2008; úprava: FD ČVUT, KPM Consult, 2009)

Vrstva obslužnosti	charakteristika	Maximální interval
A, B	Dálková doprava	60 min
C1, C2	Příměstská doprava	30 min
C3	Regionální dráha	60 min
C4	Obslužný autobus	60 min
D1, D2	Metro, tramvaj	10 min
D3	Městský autobus	15 min
D4	Turistické nabídky	variabilní

Zároveň mají jednotlivé obslužné segmenty z téhož důvodu doporučenou cestovní rychlost a tomu odpovídá i obvyklá mezizastávková vzdálenost.

Tab. 3.3. Doporučená cestovní rychlost a mezizastávková vzdálenost pro jednotlivé segmenty dopravní obslužnosti (zdroj: Weidmann, 2008; úprava: FD ČVUT, KPM Consult, 2009)

Vrstva obslužnosti	charakteristika	Cílová přepravní rychlost	Mezizastávková vzdálenost
A	Tranzitní dálková	120 km/h	80 – 100 km
B	Dálková - spojení	85 km/h	30 – 50 km
C1	Příměstská vnější	60 km/h	5 – 10 km
C2	Příměstská vnitřní	50 km/h	2 – 3 km
C3	Regionální dráha	50 km/h	2 – 3 km
C4	Obslužný autobus	35 km/h	1 – 2 km
D1	Metro	35 km/h	0,5 – 1 km
D2	Tramvaj	20 km/h	0,4 – 0,6 km
D3	Místní obslužnost	15 km/h	0,2 – 0,3 km

Teoretická problematika vymezení jednotlivých obslužných segmentů je významná z toho důvodu, aby bylo možno linkové vedení a návrh provozní koncepce koncipovat tak, aby jednotlivé skupiny přepravních vztahů byly co nejefektivněji pokryty příslušnou nabídkou.

Každá linka v každé přepravní vrstvě, tj. v každém obslužném segmentu musí mít svůj jasný účel. Zejména u vícestupňové dopravní obslužnosti, kdy je paralelně nabízeno více segmentů v jednom směru, bývá ze strany cestujících obvykle patrný tlak na dodatečná zastavení spojů vyšších obslužných segmentů. Směšováním přepravních funkcí dochází pouze k neúčelnému „přebírání“ cestujících mezi jednotlivými obslužnými segmenty, neúčelnému nakládání s disponibilní přepravní kapacitou, nižší segmenty jsou funkčně oslabovány vyššími segmenty a vyšší obslužné segmenty zároveň ztrácí svou atraktivitu a konkurenceschopnost na vzdálenější relace.

Výjimku tvoří „jednosegmentová“ obslužnost, kdy v méně zatížených, anebo koncových úsecích sítě může být přepravně, provozně a ekonomicky účelné, zredukovat počet obslužných segmentů a zavést pouze jeden přepravní segment (obvykle na pomezí B / C), který následně nabízí větší četnost spojení, avšak pro redukováný počet obsluhovaných míst (Baudyš, Janoš, 2007a).

Specifickým případem je v obslužném segmentu C1 případ pásmového jízdního řádu, kde se v každém úseku linky zastavovací koncepce úmyslně liší a záleží tak na vhodném výběru pásmovací stanice, která oddělí vnitřní a vnější aglomerační pásmo a stane se tak hranicí obslužných segmentů (Vávra, Janoš, 2019).

3.5. Rozložení přepravních proudů v síti

Rozvržení přepravních proudů zvláště pro každý druh dopravy vychází ze zjištěného modal split. Podle struktury a typu přepravních vztahů lze tak při určitém modal split očekávat určité profilové zatížení dopravní sítě jednotlivých druhů dopravy v jejích konkrétních úsecích (Borndörfer a kol., 2016).

Model rozvržení přepravních proudů počítá nezávisle pro každý druh dopravy rozdělení dopravní zátěže nebo přepravních proudů v rámci dopravní sítě. Model předpokládá, že účastníci provozu se při volbě trasy snaží minimalizovat odpor přepravního procesu, který může být vyjádřen různými modelovými parametry, například jízdni dobou, peněžními náklady, nebo kvalitativními aspekty (Axhausen, 1999). Takzvaně rovnovážné modely zohledňují skutečnost, že rychlost - a tedy i jízdni doba - na dopravní cestě závisí na jejím zatížení.

3.5.1. Všeobecné modelování dopravních proudů

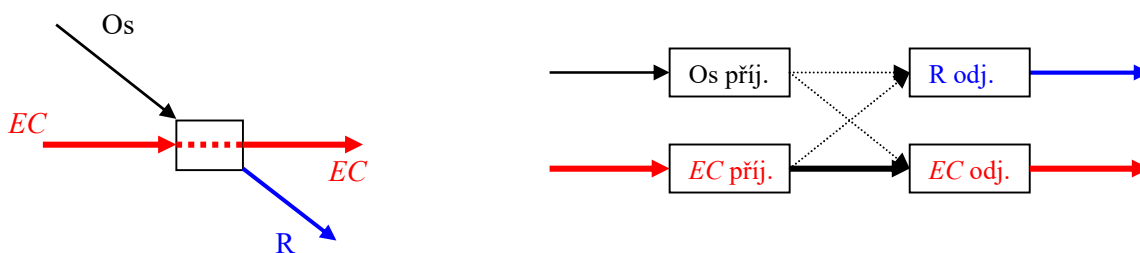
Základem všech postupů je síťový graf, jehož hrany a představují buď:

- traťové úseky sloužící k překonávání vzdáleností, nebo
- procesy, které spotřebovávají čas bez překonávání vzdáleností (např. čekání na spoj), nebo
- pomocné hrany

Tyto hrany $a: i \rightarrow j$ jsou potom ohodnoceny hodnotami odporu $\alpha(a)$. Algoritmy výpočtu rozvržení vypočítají (se zohledněním hodnot odporu) nejkratší cestu mezi jednotlivými uzly relace zdroj (q) – cíl (z). Těmto trasám jsou pak dopravní proudy získané při rozdělení zátěže přiřazeny (Nachtigall, 1998).

Modelování síťového grafu

Síťový graf často obsahuje pomocné uzly a pomocné hrany, které jsou nutné například k popisu zakázaných vazeb (např. v silniční dopravě zákaz odbočení vlevo). Základní síťové grafy potřebné pro rozvržení je třeba pro různé druhy dopravy definovat odlišným způsobem. Následující obrázek ukazuje modelování přestupních vazeb na příkladu železniční dopravy:



Obr. 3.1. Vzor síťového grafu pro železniční uzel (Nachtigall, 1998; úprava autor)

Vymezení smysluplné trasy

Součet hodnot odporu trasy \vec{p} je dále označován jako délka trasy a značen $\alpha \vec{p}$.

Trasu \vec{p} ze zdroje i do cíle j můžeme považovat za smysluplnou zpravidla jen tehdy, když podíl mezi délkou této cesty $\alpha(\vec{p})$ a nejkratší trasou $\alpha(\vec{p}_{opt})$ nepřesáhne určitou hodnotu ρ :

$$\rho: \frac{\alpha(\vec{p})}{\alpha(\vec{p}_{opt})} \leq \rho \quad (3.5.)$$

Pro silniční dopravu (Schnabel, Lohse, 1997) jsou dosahovány následující hodnoty pro ρ :

- městské komunikace: $\rho = 1,4$
- meziměstské komunikace: $\rho = 1,25$

V drážní dopravě mohou dosahovat hodnoty ρ zcela odlišných hodnot, neboť díky odlišným parametrům jednotlivých tratí v rámci drážní infrastruktury jako celku, různým tarifním opatřením dopravců apod. je dopravní proud z ryze geografického hlediska rozprostírán uměle (může tak existovat i $\rho = 3$).

Výpočet všech smysluplných cest s faktorem $\rho > 1$ může vést u rozsáhlých sítí k přechodu na np-úplné úlohy, protože množství těchto cest roste exponenciálně s rostoucí hodnotou ρ . Množinu smysluplných cest z určitého výchozího uzlu ρ můžeme znázornit formou stromu.

Metody více tras

Při metodách více tras se pro každou relaci $i \rightarrow j$ zdroj – cíl vychází z více alternativních tras $\vec{p}^{qz,1}, \dots, \vec{p}^{qz,k}$ mezi q a z . Každé takové trase je přidělena pravděpodobnost jejího použití $\gamma_1, \dots, \gamma_k$ pro kterou platí $\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_k = 1$. Trasa $\vec{p}^{qz,u}$ je binární vektor, pro který platí

$$p_a^{qz,u} = \begin{cases} 1, & \text{pokud je hrana } a \text{ součástí trasy} \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$$

Očekávané nebo střední dopravní zatížení hrany a v síti se potom vypočítá jako

$$\varphi_a = \sum_{qz} \sum_{u=1} v_{qz} p_a^{qz,u} \gamma_u \quad (3.6.)$$

kde v_{qz} představuje celkový přepravní proud mezi q a z .

3.5.2. Modely pro stanovení systémového optima

Stanovení systémového optima může být popsáno následujícím modelem (Nachtigall, 1998).

Použijeme následující proměnné:

- φ_a^{qz} = zatížení hrany $a: i \rightarrow j$ dopravním proudem relace zdroj – cíl (q, z). Rozměr je např. [osoby / čas], [vozidla / čas], atd.

- $\varphi_a = \sum_{(q,z)} \varphi_a^{qz} =$ celkové zatížení hrany $a: i \rightarrow j$.

- $\alpha(\varphi_a)$ = ohodnocení odporu hrany $a: i \rightarrow j$ (přibližně pomocí jízdní doby).

Optimalizační úloha potom zní:

$$\sum_a \varphi_a \alpha(\varphi_a) \rightarrow \min \quad (3.8)$$

$$\varphi_a = \sum_{(q,z)} \varphi_a^{qz} \quad (3.9)$$

$$\sum_j \varphi_a^{qz} = u_{qz} \quad (3.10)$$

$$\sum_i \varphi_a^{qz} = v_{qz} \quad (3.11)$$

$$\forall j \neq q, z : \sum_i \varphi_a^{qz} = \sum_k \varphi_a^{j \rightarrow k} \quad (3.12)$$

Metody s vnitřním učením

Metody s vnitřním učením jsou iterativní metody, při kterých je při každém iteračním kroku n provedeno rozvržení podle metody více tras. Jako vstupní hodnoty pro hodnoty odporu jsou použity odhadované hodnoty $\bar{\varphi}^{odh.}(n)$. Ze skutečných zatížení $\bar{\varphi}^{skut.}(n)$ jsou prováděny nové odhady hodnot odporu pro další iterační krok $n+1$.

$$\bar{\varphi}^{odh.}(n+1) = \bar{\varphi}^{odh.}(n) + \delta (\bar{\varphi}^{skut.}(n) - \bar{\varphi}^{odh.}(n)) \quad (3.13)$$

kde parametr δ představuje korekci modelu.

3.5.3. System – Split

Ve veřejné dopravě souvisí rozložení přepravního proudu v síti především struktura nabídky, která je směrodatná pro hodnoty odporu v síti (Bussieck a kol., 1996). Nabídka je strukturována do linek a spojů, přičemž v rámci taktové dopravy jsou vytvářeny vzájemně propojené systémy linek. Dopravní síť se tak dělí na různé „typy produktů“ nebo „systémy nabídky“. Například na české železnici najdeme rozdělení na síť linek SC, EC/IC, Ex/R, Sp a Os. V principu se pro každý obslužný segment, reprezentovaný určitým produktem, plánuje linkové vedení zvlášť, byť jak již bylo uvedeno v části o segmentaci, dochází často i k vzájemným překryvům, eventuelně jednovrstvé obslužnosti.

Jako system split se označuje rozdělení dopravních proudů mezi jednotlivé systémy nabídky. Existuje několik způsobů a modelů, které uvažují rozprostření mezi různě nabízené systémy v síti, přičemž vždy je jako hlavní parametr pro rozprostření uvažována jízdní doba (Krista, 1996).

3.5.3.1. Nyvigův model

Tento model slouží v obecné rovině pro odhad modal split jednotlivých dopravních oborů na trhu, nicméně ho lze díky jeho principu uplatnit i při odhadu System-Split.

$$w_i = \frac{1}{C_i} \cdot \frac{1}{D_i} \cdot S_i \cdot K \quad (3.14.)$$

kde pro každý i -tý systém platí:

w_i podíl příslušného systému na dělbě přepravní práce

C_i cena za přepravu ve zkoumané relaci

D_i časová náročnost přepravy ve zkoumané relaci

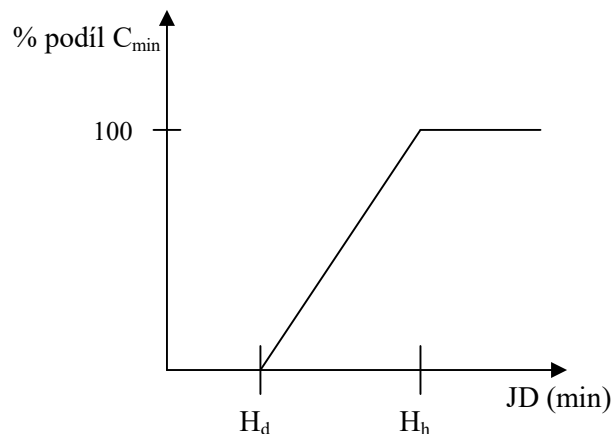
S_i počet spojů daného systému (lze modifikovat i na dobu taktu)

K koeficient, konstantní vždy pro všechny systémy v dané relaci,

přičemž platí, že $\sum_i w_i = 100\%$

3.5.3.2. Modifikované užití Kirchhoffova zákona

Tato metoda rozložení vychází z předpokladu, že jako odpor figuruje nejen cestovní doba, ale i doba taktu a počet přestupů. Základním předpokladem vycházejícím z reality je, že počtem přestupů v síti v rámci realizace určité cesty lze mnohdy zkrátit přepravní čas. Poprvé Fengler formuloval rozdělení popisující závislost časového zisku na cestě s nejkratším přepravním časem, podle které se přepravní proud rozděluje lineárně mezi dvěma hraničními hodnotami v závislosti na časové úspoře (Fengler, 1988).



Obr. 3.2. Rozdělení přepravního proudu podle časové úspory (zdroj: Fengler, 1988)

kde:

C_{\min}	podíl cestujících s minimální cestovní dobou
H_d	dolní hranice pro cestující s minimální cestovní dobou
H_h	horní hranice pro cestující s minimálním počtem přestupů
JD	jízdní doba

Uvedená závislost vychází z předpokladu, že každý cestující bere v úvahu možnost přestupu (H_d) teprve tehdy, pokud tímto získá určitou absolutní časovou úsporu (nezávisle na celkové délce cestovní doby) a zároveň teprve od určitého absolutního prodloužení cestovní doby při použití spojení s minimálním počtem přestupů (H_h) upřednostňuje vždy spojení s přestupem. V oblasti mezi těmito dvěma hranicemi je rozdělení difference cestovních dob mezi oběma volbami lineární.

Jelikož počet spojení mezi zdroji a cíli cest není vázán vždy na konkrétní spoje jedné linky, ale zpravidla lze využívat i kombinací a alternativ, bylo navrženo rozdělení přepravního proudu cestujících mezi jednotlivé možnosti analogicky podle Kirchhoffova zákona známého z elektrotechniky (Fengler, 1988).

Podle této úvahy se rozděluje přepravní proud cestujících tak, že sleduje možnosti nejkratších spojení v síti (podle principů odporů v síti).

U „napětí“, v našem případě osobominuty v síti

I „proud“, přepravní proud cestujících

R_i „odpor“, cestovní doba na i -tém úseku

hodnoty za zkoumanou celkovou síť se tak zjišťují následovně:

$$U_{\text{celk}} = R_{\text{celk}} \cdot I_{\text{celk}} \quad (3.15)$$

přičemž platí že:

$$\frac{1}{R_{\text{celk}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (3.16)$$

V případě přímých spojení se převrácená hodnota odporu vypočítá ze sumy převrácených hodnot všech přípustných přímých spojení.

V případě taktové dopravy rozumíme „takterem“ počet rovnoměrně rozložených spojení za danou časovou jednotku. Pro dosažení hledaného výsledku je tak třeba příslušný odpor R_i dělit takterem. Je-li takt odlišný od 1, pak si lze úsek s kratší dobou taktu představit jako paralelně řazené odpory.

V případě spojení s přestupem je nutné uvažovat s celkovým odporem tohoto spojení ve smyslu sériově řazených odporů. Samotný přestup je vyjádřen samostatnou hodnotou odporu odpovídající časové ztrátě spojené s přestupem.

Pro větší upřesnění lze hodnoty odporu přestupů vypustit a nahradit je zohledněním taktu linek vedoucích do přestupních bodů a z přestupních bodů vycházejících; při rozdílnosti těchto taktů vlastně vzniká několik různých přestupních časů. V mnoha postupech používajících tuto metodu se však uvažuje s úplným vypuštěním odporů přestupů, neboť jejich relativní podíl na cestovní době se považuje v zásadě za zanedbatelný (Lindner, 2000).

Praktickým výsledkem užití tohoto modelu je, zjednodušeně řečeno, že přepravní proud cestujících se v síti rozprostírá poměrem inverzním k poměru přepravních časů.

Všechny uvedené předpoklady, se kterými tato metoda pracuje, však počítají s celou řadou zjednodušení a mnoho vlivů zanedbávají. Tato metoda představuje typický příklad pokusu o deterministický popis rozložení přepravních proudů, kdy celou řadu vstupů zatížených pravděpodobností „násilně“ determinuje do exaktní roviny. Samotné zanedbání vlivu přestupu lze považovat za velmi zjednodušující, neboť jak bylo uvedeno v kapitole o dopravním plánování, citlivost jednotlivých homogenních skupin cestujících na jízdní dobu i přestupy je velmi různá. Zrovna tak nelze v plné míře souhlasit s výchozím předpokladem o dělení přepravního proudu v závislosti na hraničních hodnotách – absolutní prodloužení jízdní doby / absolutní časová úspora. Z mnoha pozdějších projektů a měření vyplývá, že nelze paušálně považovat časovou náročnost přestupu za konkrétní ekvivalent jízdní doby (Weidmann, 2001). Ani nelze přesně říci, že přestup odpovídá srovnatelné penalizaci, jako prodloužení jízdní doby o určitý počet minut. Uvedené absolutní hodnoty jsou sice teoreticky platné, nicméně je k nim třeba přidávat i relativní podíl z celkového přepravního času. V obecné rovině nelze uvést skutečnou výši absolutních hodnot, ani výši relativního podílu, neboť jak bylo zmíněno, tyto hodnoty se liší v závislosti na citlivosti jednotlivých homogenních skupin na jednotlivé atributy nabídky (König, 2002).

3.5.3.3. Modelování pomocí sítě událostí

Rozklad přepravních proudů v síti lze provést i pomocí „sítě událostí“ (Nachtigall, 1998). Pro každý odjezd, resp. příjezd produktu typu X v uzlu i je definován okamžik příjezdu, resp. odjezdu $(i, X, příj.)$, resp. $(i, X, odj.)$. Procesy jízdy $(i, X, odj.) \rightarrow (j, X, příj.)$ jsou ohodnoceny cestovními dobami, procesy přestupů $(i, X, příj.) \rightarrow (j, X, odj.)$ jsou ohodnoceny dobou čekání a procesy stání v zastávkách $(i, X, příj.) \rightarrow (i, X, odj.)$ jsou ohodnoceny minimálními pobyty. Navíc se pro každý uzel definuje vstupní a výstupní bod $(i, vstup)$ a $(i, výstup)$. Nyní jsou přepravní proudy v_{qz} relace $q \rightarrow z$ přiděleny nejkratší trase (nebo více smysluplným trasám) z $(q, výstup)$ do $(z, vstup)$. Přitom je z celkové matice dopravních vztahů $V = (v_{qz})$ vytvořena pro každý produkt X matice $V^X = (v_{qz}^X)$. Z toho tedy platí

$$v_{qz} \leq \sum_X v_{qz}^X \quad (3.17)$$

3.5.4. Plánování linek při zohlednění segmentů obslužnosti

Plánování linek jako struktury nabídky při zohlednění resp. návrhu obslužných segmentů představuje autorova vlastní metoda, publikovaná v rámci disertační práce v roce 2006 (Janoš, 2006). Tato metoda je obecně uplatnitelná v systémech taktového jízdního řádu.

Plánování linek v rámci taktového jízdního řádu se odvíjí od plánování spojů vyšších segmentů a pokračuje sestupně na další segmenty obslužnosti. Je tedy nutné zabývat se sledem obslužnosti jednotlivých zastávek mezi jednotlivými linkami mezi dvěma (resp. více) uzlovými stanicemi železniční sítě a to i různou volbou systémů obslužnosti (ve smyslu segmentace).

Jako cílová kritéria byla zvolena minimalizace přepravních časů v síti a nutná obslužnost každé zastávky na každé hraně v síti aspoň jednou linkou v síti. Ohodnocení alternativních cest v síti zohledňuje kapacitní problémy v síti. Jedná se o problém stanovení lokálních komponent jednotlivých linek.

Stanovení lokálních komponent plánovaných linek v sobě slučuje následující problémy:

- stanovení maximálního dosažitelného počtu cestujících v jednotlivých relacích (za předpokladu cesty bez přestupu a nejkratší dosažitelné jízdní doby)

$$\sum_{i=1}^n Q_{ij} \rightarrow \text{Max}, \quad (3.18)$$

přičemž $i \neq j$

kde n je počet uzlů a Q_{ij} počet cestujících mezi i -tým a j -tým uzlem

- stanovení frekvence obslužnosti jednotlivých zastávek
- stanovení linek s nejkratší souhrnnou délkou

$$\sum_{m=1}^L l_{mc} \rightarrow \text{Min}, \quad (3.19)$$

přičemž $m \neq c$

kde L je počet všech linek v síti a l_{mc} délka linky mezi m -tým a c -tým uzlem

- minimalizace trakční práce na jednotlivých linkách

$$\sum e_k x_k \rightarrow \text{Min} \quad (3.20)$$

kde e_k je množství trakční práce vykonané na k -té hraně, $k \in (1, \dots, K)$, $x_k = 1$ pokud je k součástí systému linek L , $x_k = 0$, pokud k -tá hrana součástí systému linek L není

- dosažení maximálního počtu cestujících v systému

K dosažení optima u těchto zcela protichůdných požadavků je zapotřebí použít kombinaci dopravních modelů stanovujících intenzitu přepravního proudu v jednotlivých relacích a teorii grafů.

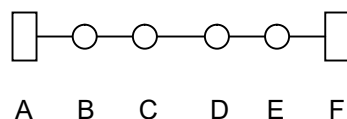
Postup zohledňuje dva aspekty, které jsou v dnešních metodách plánování linek více či méně opomíjeny.

Prvním je vliv plánu linek na modal split z hlediska zacílení jednotlivých produktů na jednotlivé homogenní skupiny cestujících. V praxi se dnes při plánování postupuje obvykle naprosto intuitivně v oblasti stanovení prostorových komponent linek (dodatečná místa zastavení nebo naopak jejich rušení) i v oblasti rozšiřování linkového vedení, např. rozklad jedné linky na dvě různé se souhrnnou vyšší frekvencí obslužnosti, ale odlišnými místy zastavení.

Druhým aspektem je, samotné optimalizační kritérium z pohledu počtu cestujících v síti. Zatímco ve veřejné dopravě, která je systémově řízena a její jednotlivé segmenty mají své objednatele, je jednoznačně maximalizace počtu cestujících v síti na jednotku výkonu, tak v těch segmentech, které fungují bez garance veřejného sektoru je prioritou jednoznačně maximalizace tržeb, bez ohledu na počet cestujících. Tato dvě různá kritéria se promítají do zcela odlišného pohledu na časovou a prostorovou strukturu plánu linek v síti.

3.5.4.1. Aparát teorie grafů v problematice plánování linek

Před vlastním plánováním linek je třeba provést plánování struktury sítě. Je nutno stanovit síť tratí, na kterých budou provozovány různé kategorie vlaků v rámci dálkové i regionální dopravy. Po provedení plánu struktury sítě lze přejít k plánování linek. Železniční síť lze dekomponovat na jednotlivé tratě a mezistaniční úseky. Předmětem zkoumání této práce bude jednoduchá železniční trať s mezilehlými zastávkami (B, C, D, E) mezi dvěma uzlovými stanicemi (A, F).



Všechna realizovatelná spojení na této trati lze znázornit úplným neorientovaným grafem.

Graf je z hlediska teorie grafů matematická struktura sloužící především k vyjádření určitých vazeb mezi prvky z množin V a H . Prvky v množině V nazýváme uzly a vazby mezi těmito uzly (prvky $h(u,v)$ z množiny H) nazýváme hrany.

Graf lze tedy definovat jako $G = (V,H)$, kde

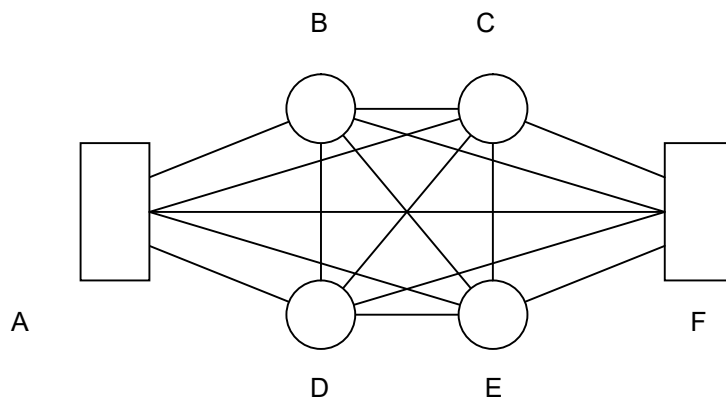
$$V = \{v_i\}, i = 1, \dots, n$$

$$H = \{h_j\}, j = 1, \dots, m$$

V případě neorientovaného grafu hovoříme o vrcholech u a v jako o krajních vrcholech hrany $h(u,v)$, kde není jednoznačně určeno, který z uzlů (u,v) je uzel počáteční a který uzel koncový.

Úplný graf je graf, jehož množina hran H obsahuje všechny dvojice vrcholů, takže každé dva vrcholy jsou spojeny hranou. Jelikož úplný graf je možné v rovině znázornit maximálně pro $n \leq 4$, což v tomto případě nelze dodržet, je třeba zdůraznit, že ke křížení jednotlivých hran grafu nemusí docházet vždy pouze v uzlech.

V případě výše uvedené železniční tratě představují uzly stanice a zastávky na trati a hrany jednotlivá spojení a to tak, že libovolné spojení v síti je možné.



Pro počet spojení (hran) mezi jednotlivými stanicemi / zastávkami (uzly) v rámci celé sítě platí:

$$n_H = k \cdot (k-1) \tag{3.21}$$

kde n_H je počet hran a k počet uzlů

Úkolem je najít takové cesty v grafech, které vyhoví kritériu maximálního počtu cestujících v síti. Aby byly nabídkou dopravních spojení obslouženy všechny zastávky a stanice, je třeba, aby byl v rámci výsledné linkové sítě obsloužen každý uzel grafu alespoň jednou linkou.

spoj – dopravní spojení, které se pravidelně opakuje v určitém čase

linka – množina spojů po dané trase

Vlastnosti linky uvažované v rámci zmíněného grafu:

- jedná se o tah i dráhu, tudíž každou hranu a každý uzel v grafu lze v rámci jedné linky projít nejvýše jednou
- pro jednoduchost uvažujme (na základě reálného železničního provozu), že ke každé lince orientované z k -tého do j -tého uzlu existuje linka přesně opačně orientovaná, linková síť v grafu je tedy symetrická
- každá linka v grafu je tedy orientovaným sledem a každému takovému sledu odpovídá sled opačně orientovaný

sled – střídavá posloupnost bezprostředně po sobě následujících vrcholů a hran, která začíná a končí ve vrcholu

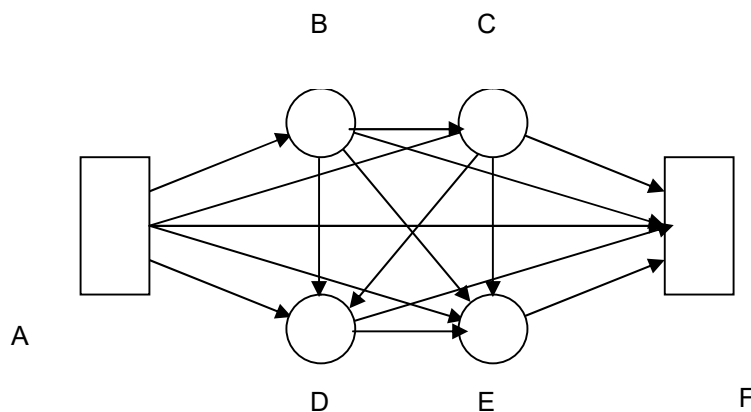
orientovaný sled – pro každé dvě po sobě následující hrany sledu $[u, v], [x, y]$ platí $v = x$

tah – takový sled, ve kterém se neopakuje žádná hrana

cesta – takový sled, ve kterém se neopakuje žádný vrchol

dráha – takový orientovaný sled, ve kterém se neopakuje žádný vrchol

Díky výše uvedeným vlastnostem uvažovaných linek lze tedy v grafu hledat orientovanou síť linek. Pro práci snazší práci s grafem budou jednotlivé železniční stanice a zastávky označeny od začátku do konce trati postupně podle písmen abecedy. Od neorientovaného grafu dochází tak k posunu ke grafu orientovanému a acyklickému (graf, ve kterém nelze umožnit takový tah, který ve smyslu značení grafu postupuje od značení vyššího k nižšímu).



Počet spojení v síti tak nabývá hodnoty:

$$n_H = [k \cdot (k-1)] / 2 \quad (3.22)$$

K získání plánu linek je nutné ve výše zobrazeném orientovaném acyklickém grafu najít takové podgrafy (linky), které zajistí obslužnost každého uzlu grafu alespoň jednou, přičemž není nutnou podmínkou k existenci linky, aby procházela celým grafem od počátečního po koncový uzel.

3.5.4.2. Postup při tvorbě nabídky

Návrh postupu je zaměřen na vytvoření linkového vedení v osobní železniční dopravě, při respektování určité úrovně vstupů. Je sledováno vytvoření nabídky v úrovni trati a to za předpokladu existence alespoň dvouvrstvého modelu dopravy na trati (hierarchicky dle jednotlivých segmentů). Způsob řešení principiálně umožňuje přechod z úrovně trati do úrovně sítě. Vícevrstvý model obslužnosti v rámci trati totiž vykazuje shodné prvky řešení, jako model řešený v rámci sítě (různé segmenty obsluhují různé body, dochází k částečným souběhům v části sítě, jednotlivé body mohou být obslouženy více linkami apod.).

Uvedený postup řešení vychází z potřeby formalizovaného postupu při řešení praktických úloh, kdy nejsou známy všechny vstupy, které jsou pro existující modely plánování linek, nebo plánování nabídky nutné.

Metoda představuje takový postup, který získaný modal split poměřuje ve vztahu k vynaloženým nákladům. Pokus o sestavení takového modelu však narazil na tentýž problém, se kterým se potýkají i ostatní existující modely plánování nabídky, a sice na nedostatek podkladů týkajících se vlastní dělby přepravní práce a nedostatečný popis dopravního chování uživatele nabízených přepravních služeb. Současný přístup v plánování linkové struktury vychází z toho, že je-li už k dispozici struktura popisu dopravního chování, používá se zpravidla ke zpětnému ohodnocení optimalizovaného plánu linek.

Byl tak navržen heuristický postup vycházející ze skutečných podmínek, ve kterém jsou dnes úlohy dopravního plánování řešeny a to tak, aby byl v našich podmínkách obecně uplatnitelný. Těžiště postupu tak spočívá v hierarchickém uspořádání obslužnosti sítě (v počátečním řešení v úrovni trati).

Jednotlivé plánovací úrovně i vykazují odlišný prostor pro zlepšení:

- strategická úroveň – těžiště zlepšení spočívá v infrastrukturních opatřeních
- koncepční úroveň – prostor pro zlepšení vymezen nabídkovými (časová a prostorová struktura linek) a provozními parametry (např. nasazení jiných typů vozidel)
- operativní úroveň – prostor pro zlepšení vymezen technologickým zpracováním (volbou vlakových cest, sledem křižování, obsazením hran, způsobem provázení jednotlivých vlakových systémů omezujícím úsekem apod.).

Postup vychází z předpokladu taktového systému dopravy. V případě, že taktová doprava v řešeném úseku dosud zavedena není, přejímají se do nově vytvořeného systému zpravidla většinové strukturální prvky existujících spojů. V první fázi řešení je zanedbána kapacita dopravní cesty.

Prostorem pro znázornění řešení úlohy je graf, tak jak je charakterizován v kapitole 3.5.4.1. Jelikož se nejedná o klasickou úlohu na grafech a graf tak slouží pouze jako prostředek znázornění, nemá ohodnocení jednotlivých hran h_j matematický význam, ale představuje nosič nejdůležitějších informací potřebných pro řešení.

Množina potřebných informací pro každou hranu představuje údaje o:

- jízdní době
- přepravním proudem
- nákladech

V počátku řešení je nutné definovat hraniční intenzitu přepravního proudu postačující pro vedení samostatné linky ve stanoveném taktu – označeno jako C - *kapacita linky*. C tak představuje minimální kapacitu nutnou pro existenci samostatné linky, přičemž tato kapacita může být v síti přirozeně podle reálných podmínek proměnlivá. Horní omezení pro kapacitu linky apriori nezavádíme, byť může podle reálných omezení existovat. Případné nepřekročení horní meze je ošetřeno dotazem v algoritmu, zda lze kapacitu linky zvýšit. C lze vnímat odlišně nejen ze síťového hlediska, ale i z traťového hlediska (např. jednotlivé linky v rámci téže tratě mohou mít odlišné C – např. z vozebních důvodů). V rámci případného rozkladu linky na více linek je vždy hraniční kapacita nových linek posuzována podle sledované C , která tak reprezentuje i výši nákladů, kterou jsme ochotni vynaložit na uspokojení přepravní potřeby určitého počtu cestujících.

Dále je zavedena iterativní komponenta (*KZ* - koeficient zlepšení), která sledovaným kritériím přiřazuje relativní váhu a vymezuje tak „prostor pro zlepšení“ celé nabídky.

Řešení celé úlohy restrukturalizace nabídky vychází z vymezení všech přímých a nejrychlejších spojení v řešeném prostoru. Využití tohoto přístupu je však dále odlišné v tom, že v rámci prezentovaných postupů je toto vymezení učiněno pro poměření relativního získání dalších přeprav (potenciální změny modal split a to i při akceptování stavu, že úplnou dělbu přepravní práce známe pouze částečně, nebo dokonce vůbec).

Redukcí hran v grafu se tak snižuje počet přímých a zároveň nejrychlejších spojení, klesá tak podíl přepravní práce - zároveň však s vynaloženými náklady, a snižuje se i prostor zlepšení (roste *KZ*). Výsledkem by měl být maximální počet cestujících v síti, za sledované úrovně nákladů (vyjádřených i pomocí *C*) a předpokladů disponibilní kapacity dopravní cesty.

Při návrhu byly zohledněny i oba formulované Wardropovy principy (= účastník přepravního procesu volí vždy nejkratší cestu, v případě alternativních tras je doba cesty shodná, ve všech ostatních případech je delší → minimalizuje se cestovní doba na všech hranách v síti).

V rámci znázornění bodů na trati formou grafu dále předpokládáme, že:

- zatížení hrany je součtem zatížení všech cest vedoucích přes tuto hranu
- zdroj (začátek relace) obsahuje i všechny vstupující (tranzitující) cestující a cíl (konec relace) i všechny vystupující (tranzitující) cestující

V rámci postupu oddělujeme problém zlepšování struktury nabídky a problém vytváření struktury nabídky. Postup začíná vymezením struktury nabídky a končí před samotnou tvorbou grafikonu, respektive konstrukcí jízdního řádu. Proces aplikace linek na síť formou uspořádání uzlů již řešen není a s vytvořenou linkovou strukturou lze následně použít jakoukoli dostupnou metodu (Friedrich a kol., 2017).

Vyhodnocení plánu linek může proběhnout následně standardním způsobem, a to sice z přepravního hlediska poměřením kvalitativních parametrů. Zohledněna je tak cestovní doba vážená přes přepravní vztahy v síti („osobominuty“ v síti) nebo počet přestupů vážený všemi cestami v síti („osobopřestupy“ v síti).

3.5.4.3. Plánování linek za předpokladu neznalosti skutečných přepravních vztahů

Reálná úloha v podmínkách ČR je, bohužel, omezena téměř vždy tím, že nejsou známa ani data o dopravním chování, ani skutečné přepravní vztahy v území v intermodálním měřítku a přirozeně tedy ani modal split. Na druhou stranu jsou téměř vždy známy údaje ze sčítání cestujících ve veřejné dopravě (bez určení zdrojů a cílů, tudíž prostá kvantifikace ve vybraném úseku sítě) a v některých případech lze dokonce získat i údaje o prodaných jízdních dokladech.

Při praktické aplikaci postupu uvedeného v předchozí kapitole byly zohledněny „průměrné“ nebo, lépe řečeno, „typické“ charakteristiky přepravního procesu z hlediska uživatelů, kdy jsou při postupu vytváření nabídky prostě přejímány závěry zahraničních průzkumů (např. König, 2002).

Homogenní skupiny cestujících jsou buď identifikovány na základě prodeje jízdních dokladů (v porovnání s teoretickým modal split při aplikaci gravitačního modelu), nebo se apriori předpokládá, že převládající skupinou jsou lidé dojíždějící za prací (Marada, 2003).

Zacílení na „průměrné“ charakteristiky přepravního procesu vyplývá i z principiálního zaměření uvedeného postupu na upřednostnění přepravních potřeb majoritní homogenní skupiny, která ve zkoumaném prostoru aktuálně převládá. Předpokládá se tak u všech homogenních skupin rovnoměrně nevyčerpaný přepravní potenciál.

Výsledek metody je sice zatížen velkou nepřesností, ale výhodou je, že od začátku o této nepřesnosti víme a v případě náhlého získání doplňujících údajů je možné tuto nepřesnost částečně, teoreticky i úplně, odstranit. Cílem uvedené metody je formalizovat heuristický postup, který autor během své výzkumné činnosti opakovaně použil s výsledkem nárůstu cestujících v relacích s restrukturalizovanou nabídkou (např. iRFP Praha, 2005; Ústecký kraj, 2011).

Postup vychází ze skutečnosti, že neznáme přepravní proudy a koeficient zlepšení KZ tak nevztáhneme přímo na modal split, ale na jízdní dobu (KZ_{JD}), protože to je nejvýznamnější atribut nabídky (Vrtic, Axhausen, 2002).

$$KZ_{JD} = \frac{JD_s}{JD_d} \quad (3.23)$$

kde JD_d představuje nejkratší dosažitelnou jízdní dobu a JD_s aktuálně dosahovanou jízdní dobu v dané relaci.

Pokud je k dispozici struktura prodaných jízdních dokladů, lze existující intramodální přepravní vztah vynásobit KZ_{JD} a získat tak vážený potenciál existujícího prostoru pro zlepšení. Výhodou vážení přes KZ_{JD} je právě relativní (a nikoli absolutní hodnota), neboť

podle existujících výzkumů má přepravní čas, jehož nejvýznamnější složkou je jízdní doba, v každém druhu dopravy jinou váhu (Hackney, Axhausen, 2004), a to i vůči celkové době přepravy. V případě absence struktury jízdních dokladů lze pro získání poměrného prostoru zlepšení vynásobit KZ_{JD} přepravním proudem získaným z gravitačního modelu, kde konstantou může být libovolné celé číslo. Prostor zlepšení lze i pomocným způsobem identifikovat zpětným dopočítáním konstanty v gravitačním modelu a zjišťovat, jaký je rozdíl ve výši konstanty pro jednotlivé relace a analyzovat příčiny.

Heuristický přístup vyžaduje i zavedení „báze znalostí“, kde se soustřeďují informace o restrukturalizovaných linkách a výsledcích této restrukturalizace, přičemž za absence dat lze využít „podobnosti“ aktuálně řešených a již dříve vyřešených relací a formovat strukturální prvky nové nabídky obdobným způsobem jako v případě úspěšných restrukturalizací.

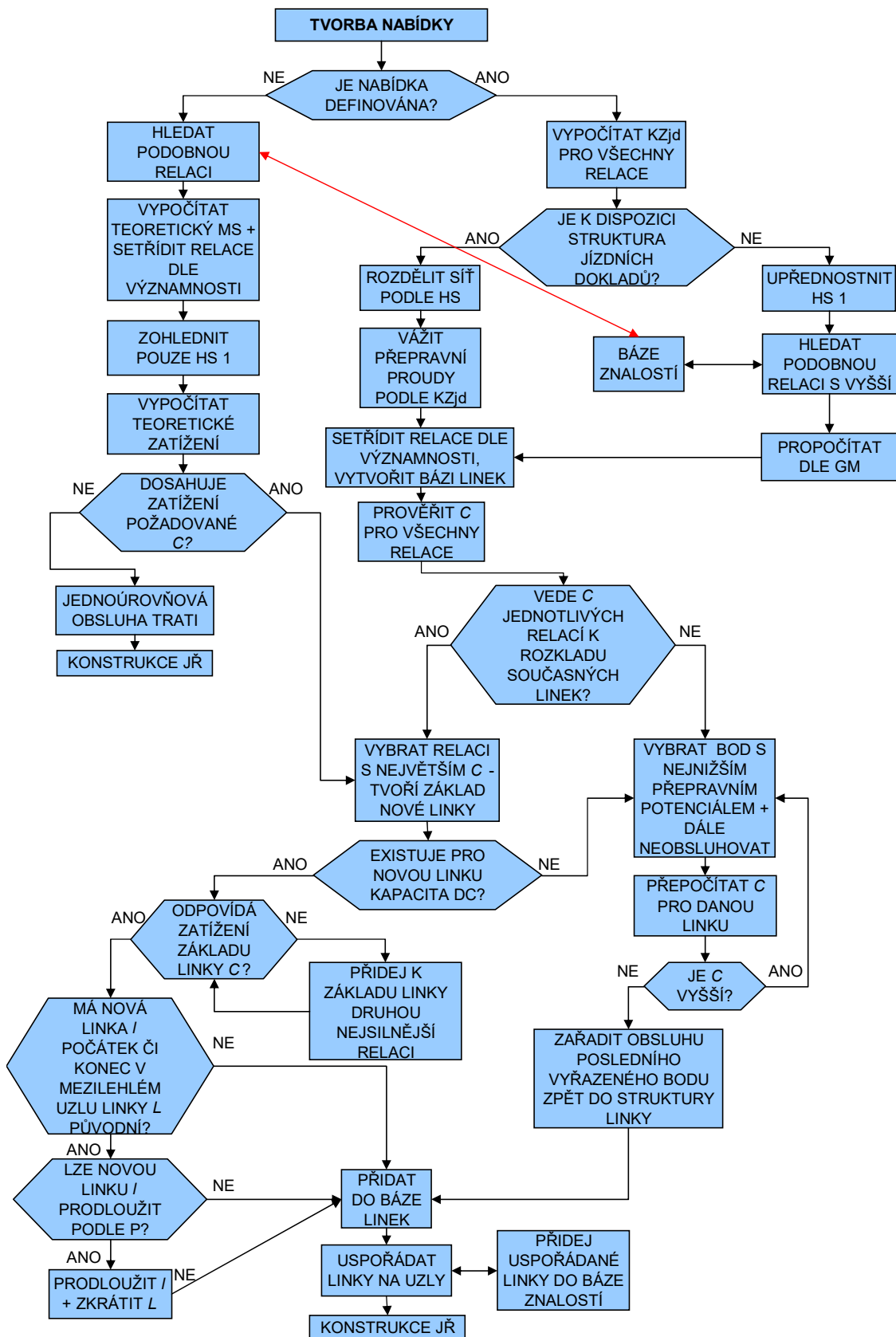
Disponibilní sčítání cestujících lze zpravidla použít pro rozklad kapacity linky C.

použité zkratky:

PP	přepravní proud
DC	dopravní cesta
MS	modal split
JŘ	jízdní řád
HS	homogenní skupina (HS 1 – HS 3)
GM	gravitační model
P	odkaz na vysvětlení kroku v sumarizovaném postupu

(odlišnou barvou jsou pro přehlednost znázorněny kroky, které v rozhodovacím stromu kříží kroky jiné)

Schematické uvedení postupu tvorby nabídky:



Obr. 3.3. Schematický postup tvorby nabídky (autor)

Sumarizovaný postup:

- vypočítat KZ_{JD} na všech relacích (v případě změny existující nabídky postup od největšího prostoru pro zlepšení), v případě dosud neexistující nabídky zjištění JD_{min} a prohledání báze znalostí
- seřadit relace dle významnosti – za znalosti struktury jízdních dokladů lze realizovat vážením přepravních proudů dle KZ_{JD} , v ostatních případech se teoreticky vypočítá zatížení sítě gravitačním modelem
- struktura nabídky se koncipuje na převládající homogenní skupinu cestujících – v případě znalosti jízdních dokladů lze homogenní skupiny identifikovat rozkladem všech cest, v případě neznalosti struktury se nabídka koncipuje apriori na denně dojíždějící, tzn. upřednostněny jsou relace s $JD_{min} \leq 60$ min a to podle KZ_{JD}
- strukturálně se rozliší tři základní homogenní skupiny cestujících (*HS*)

HS 1 denně dojíždějící

HS 2 cestující dálkové dopravy

HS 3 turistické přepravy a volnočasové aktivity (struktura přepravních cílů a intenzita přepravních proudů se zpravidla vymyká popisu možnému pomocí gravitačního modelu)

- všechny vážené přepravní vztahy vážené podle KZ_{JD} položíme jako základ pro linky v síti / na trati; za předpokladu restrukturalizace existující nabídky lze vážené přepravní vztahy teoreticky porovnat s dosahovaným C u existujících linek (podle údajů ze sčítání)
- prověřit C pro všechny relace – relace s nejvyšším C vytváří základ pro nové linky; z existujících linek L_i se tak vlastně vyčlení nejsilnější relace, která tvoří základ nových linek I_i
- pokud teoretické zatížení odpovídá C dosahovanému na dnešní linkové struktuře, dojde pouze k případné změně struktury linek (dojde ke změně v rámci stávajících orientovaných sledů), např.

dnešní:

segment B: $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow F$

segment D: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$

po změně struktury:

segment A: $A \rightarrow F$

segment D: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$

pokud je C vyšší než na současné linkové struktuře, k relaci nejsilnější se postupně přidávají další relace dle významnosti tak dlouho, dokud nová linka nedosáhne požadovaného C

např.

nejsilnější relace, C však nepostačuje na samostatnou linku:

$B \rightarrow E$

lze přidat druhou nejsilnější relaci, např. $A \rightarrow E$, součet zatížení $B \rightarrow E + A \rightarrow E$ již dosáhne C, vznikne nová linka

$A \rightarrow B \rightarrow E$, tj. po změně struktury

segment B: $A \rightarrow B \rightarrow E$

segment D: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$

pokud při nově koncipované nabídce nedosahuje teoreticky zjištěné C požadované hodnoty, ponechá se na síti / trati jednoúrovňová obslužnost (segment D) a úloha se dále neřeší

segment D: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$

- v tomto případě nemůže od začátku strukturalizace nabídky dojít k souběhu (s výjimkou teoreticky nejvyššího a nejnižšího obslužného segmentu), neboť proces spojování relací do linky probíhá podle zatížení, nicméně je zohledněna možnost prodloužení nové linky tak, aby nedošlo k penalizaci nejsilnějších přepravních proudů; jedná se o případ, kdy nižší segment přesahuje počátek či konec linky segmentu vyššího, např.

segment B: $A \rightarrow B \rightarrow E$

segment D: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$

což po prodloužení linky vyššího segmentu vede na

segment B: $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow F$

segment D: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$

tento krok je ve schématu označen jako P – krok realizujeme za předpokladu, že – na uvedeném příkladě – přepravní potenciál $A \rightarrow F + B \rightarrow F$ je vyšší než $C \rightarrow F + D \rightarrow F$, z původní linky L_i se tak vyčleňuje další relace do l_i

- strukturalizované linky tvoří bázi linek, pro kterou se hledá kapacita dopravní cesty
- v případě, že báze cílových linek obsahuje více linek, než pro kolik existuje kapacita dopravní cesty, je třeba počet linek redukovat, a to formou změny struktury linek (dojde ke změně v rámci stávajících orientovaných sledů)
- v případě nedostatečné kapacity dopravní cesty pouze v části sítě je teoreticky možné, že bude dodatečně vyvolána potřeba přestupu, nebo provozního rozdělení linky, neboť její zachování by vedlo k výraznému prodloužení jízdních dob z technologických důvodů, např. omezená kapacita dopravní cesty v úseku B – E může z původního uspořádání:

segment B: $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow F$

segment D: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$

vést na změnu:

segment B: $A \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow F$

segment D 1: $A \rightarrow B \rightarrow C$

segment D 2: $C \rightarrow D \rightarrow E$

tj. k technologickému rozdělení linky obsluhující segment D.

V případě rozhodování o rozdělení segmentu D na D1 a D2 je třeba zohlednit vliv přestupu vzniklého v uzlu C.

Při rozdělení přeprav na homogenní skupiny a upřednostnění majoritní skupiny, upřednostňujeme na základě existujících poznatků (König, 2002) v případě H 1 přestup, je-li časová úspora pro přestupující cestující alespoň 5 min, nebo 10% celkového přepravního času. V případě H 2 a H 3 upřednostňujeme vedení linky bez přestupu, i za cenu prodloužení cestovní doby.

- před samotnou konstrukcí grafikonu jsou údaje o strukturalizované síti linek zaznamenány do báze znalostí

Patrnou nevýhodou tohoto postupu je silné zaměření na zkušenost, podobnost a na průměrné charakteristiky přepravních procesů. V případě atypických přepravních vztahů tak může dojít k naprosto fatálnímu zhoršení nabídky, neboť nedostatečná úroveň znalostí přepravních vztahů neumožní na tyto atypické faktory jakkoli reagovat. Na druhou stranu je nutné podotknout, že díky obecně nízkému modal split veřejné dopravy v ČR aplikací tohoto postupu dosud k paušálnímu zhoršení nabídky nikde nedošlo, což ale neznamená, že přepravní potenciál jednotlivých homogenních skupin nemůže být čerpán v odlišné míře. Je zřejmé, že čím více by byla poptávka po veřejné dopravě nově strukturalizovanou nabídkou saturována, tím horší výsledky by tento postup přinášel.

4. Koncepce jízdního řádu

Grafikon vlakové dopravy je základním nástrojem organizace vlakové dopravy a jedním z jeho nejvýznamnějších výstupů je nákrešný jízdní řád, který v grafickém zobrazení dráha / čas znázorňuje časové polohy spojů na trati. Jízdní řád pro cestující je zpravidla exportem údajů z grafikonu. Jízdní řád v dopravním plánování představuje produkt veřejné dopravy, neboť určuje výslednou podobu nabídky spojení.

Na sestavu grafikonu lze pohlížet ve třech rovinách (Lichtenegger, 1990):

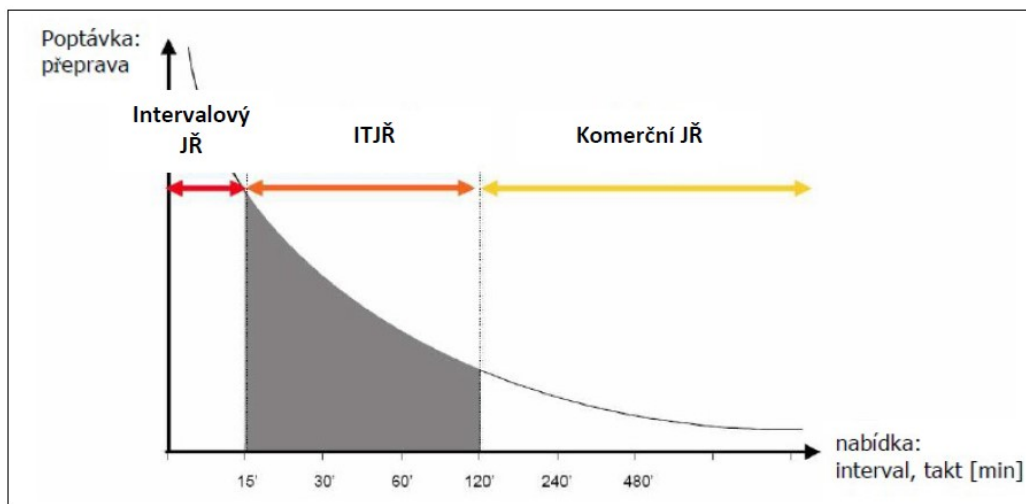
1. Strategická rovina – zkoumání přepravních proudů v síti, zjišťování počtu přestupujících cestujících v jednotlivých relacích, systematické plánování nabídky stanovením jejích základních komponent
2. Taktická rovina – samotná konstrukce jízdního řádu na jednotlivých tratích, výpočet jízdních dob v závislosti na parametrech jednotlivých vlaků, provozní intervaly, stanovení délky pobytů v jednotlivých stanicích, výpočet čekacích a synchronizačních časů v síti
3. Operativní rovina – krátkodobé plány řešící náhlé provozní nepravidelnosti a mimořádnosti vzniklé při řízení provozu

Tato práce se z pohledu návrhu provozní koncepce a koncepce jízdního řádu při řešení dalších otázek a postupů soustředí výhradně na strategickou plánovací úroveň.

Jízdní řád spojů veřejné dopravy představuje přímý výsledek aplikací dopravního plánování v území a předurčuje strukturu a formu nabídky. Existuje několik základních přístupů ke tvorbě jízdního řádu a každým přístupem lze jinak ovlivnit dělbu přepravní práce mezi jednotlivé dopravní módy (Guihare, Hao, 2008).

Při rozhodování o vhodném typu jízdního řádu na příslušné lince, resp. linkové síti je nezbytná znalost údajů o přepravní poptávce, anebo alespoň prognóza přepravní poptávky. Významný je i charakter dominujících přepravních proudů. Nevhodný výběr typu jízdního řádu pro příslušnou provozní koncepci zásadním způsobem ovlivní výsledný přepravní efekt.

U jednotlivých typů jízdních řádů je tak významným parametrem úroveň systematizace nabídky a vzájemná vazba mezi spoji a linkou (Lichtenegger, 1990). Rozlišujeme tak jízdní řád bez pevné vazby (např. komerční JŘ) a jízdní řády s pevnou vazbou (intervalový JŘ, ITJŘ).



Obr. 4.1. Vhodnost typu JŘ v závislosti na poptávce (zdroj: Rey, 2007)

Klasická podoba jízdního řádu vychází z předpokladu, že lze během dne najít taková období silné poptávky po přepravě v určité relaci, že je možné určit „jediné správné“ časové okamžiky, ve kterých budou vedeny spoje veřejné dopravy. Tento přístup k tvorbě jízdního řádu tak rozprostírá spoje během dne v období předpokládané poptávky po přepravě, proto se takový jízdní řád nazývá „komerční jízdní řád“. Silnou stránkou komerčního jízdního řádu je rozsáhlá nabídka spojení v době přepravních špiček a pokrytí celé řady relací přímými spoji. Mezi nejvýraznější nedostatky komerčního jízdního řádu z pohledu cestujícího patří především omezený počet spojů v každé relaci a neucelenost rozsahu spojů z hlediska síťového charakteru nabídky – přestupní vazby jsou v mnoha případech dílem náhody, nikoli primárním cílem. Tyto vlastnosti značně omezují použitelnost nabídky pro cestování v jiných relacích, než takových, které jsou obslouženy přímým spojem. Komerční jízdní řád nemá obvykle v síti žádné pevné vazby, postup při jeho tvorbě cílí primárně na optimalizaci jízdy jednotlivých spojů. Typickým zástupcem komerčního jízdního řádu je většina dálkových autobusových linek.

Pokud není poptávka po přepravě kumulována do přesných časových okamžiků (začátky / konce směn u velkých zaměstnavatelů, začátky / konce školního vyučování apod.), je ideální časová poloha spoje pro komerční jízdní řád prakticky nenalezitelná, přičemž v oblasti rozsáhlejších sídelních celků a aglomerací s diverzifikovanými zdroji a cíli cest lze s jistotou tvrdit, že taková optimální časová poloha ani neexistuje. Z tohoto důvodu se uplatňuje další typ jízdního řádu, který na obtížně uchopitelnou poptávku ze strany cestujících reaguje rozprostřením spojů v pravidelném intervalu / taktu. Tento typ jízdního řádu se nazývá „intervalový jízdní řád“. Intervalový jízdní řád již pracuje se systémem pevných linek. Linka je souborem jednotlivých spojů, jezdících v téže trase v pravidelných

časových rozestupech po dobu celého občanského dne, anebo jeho části, přičemž minutové polohy všech spojů jsou v jednotlivých nácestných zastávkách na lince shodné. Cílem intervalového jízdního řádu je pokrytí přepravních požadavků cestujících kontinuální nabídkou spojení. Intervalový jízdní řád nabízí zpravidla odlišné intervaly jednotlivých linek v období přepravního sedla a jiné v období přepravní špičky. Díky odlišným intervalům jednotlivých linek a různému časovému uspořádání spojů jednotlivých linek může docházet k omezené provázanosti takto provozovaných linek a to například pouze po část dne nebo pouze v jednom směru. Pokud jsou intervaly všech linek v síti dostatečně krátké, nepředstavuje tento fakt žádný větší problém. Postup při tvorbě intervalového jízdního řádu cílí primárně na optimalizaci jízdy samostatných linek. Typickým představitelem intervalového jízdního řádu jsou linky MHD ve větších městech (Janoš, Kříž, 2018a).

Vlastností intervalového jízdního řádu jsou opakující se identické procesy na lince pro každou délku intervalu (přechody vozidel, obratové časy, místa potkávání spojů). Vlastností intervalového jízdního řádu je tak i „symetrie“. Symetrie vyjadřuje „zrcadlovou stejnost“ procesů na lince – to co platí pro spoj linky jedoucí jedním směrem platí i pro spoj téže linky v opačném směru. Pravidelné časové okamžiky potkávání spojů téže linky se nazývají „symetrické časy“. Z podstaty věci se symetrické časy opakují vždy po uplynutí poloviny doby intervalu / taktu. Přestože vlastnost symetrie vyplývá z pravidelného a opakujícího se intervalu na lince, intervalový jízdní řád tuto vlastnost nijak nevyužívá.

Jízdní řád, který je založen na stejných a opakujících se procesech na lince a plně využívá vlastnost symetrie se nazývá „taktový jízdní řád“. Cílem taktového jízdního řádu je dosažení síťového optima (Bär, 1999). Jednotlivé linky na síti se skládají a navazují na sebe takovým způsobem, aby byly optimalizovány jako jeden ucelený a provázaný systém. Je tak zřejmé, že na rozdíl od intervalového jízdního řádu, zde musí platit ta samá pravidla pro všechny linky provozované v téže síti. Nutným pravidlem je, že všechny linky v síti musí mít stejnou dobu taktu, anebo alespoň stejný taktový základ. V jedné síti je nepřijatelná kombinace linek s různým taktovým základem – došlo by tak k posunu symetrických časů a tím pádem k časové nepropojitelnosti takových linek v jedné síti. Vlastnost symetrie se uplatňuje tak, že všechny linky provozované v jedné síti musí mít stejnou symetrii. Následkem sjednocení symetrie dochází ke sladění všech stejných procesů na všech linkách v síti. Jakmile je toho dosaženo, zbývá již jen časový posun linek (resp. jejich spojů) tak, aby byly symetrické časy dosahovány ve vhodných uzlech, kde dojde k pravidelnému časovému a prostorovému provázání jednotlivých linek. Takovéto uzly, kde dochází k systematickému propojení a pravidelnému potkávání různých linek se nazývají „taktové uzly“. Jednotná symetrie v síti není nahodilá, ale v západo- a středoevropském prostoru vychází historicky z taktového systému SBB (Švýcarské

spolkové dráhy), kde byla v roce 1982 stanovena na minutu 00 (Stohler, 1994). S ohledem na zřejmou nepropojitelnost sítí s odlišnými symetriemi a požadavkem na mezinárodní dálkovou dopravu provozovanou v taktu, představuje tato symetrie v minutě 00 na evropských železnicích respektovaný úzus. Dochází-li v síti provozované v taktu se shodnou symetrií k tomu, že jednotlivé linky mají různou dobu taktu (na stejném základě), pak je zřejmé že ne každý taktový uzel je z hlediska provázanosti (dosažení všech přípoju a možných přestupů) úplný. Limitní je pak v systému linka s nejdelším taktem. Je zřejmé, že platí-li v síti jednotná osa symetrie a zároveň mají všechny linky taktový základ, pak má časová vzdálenost jednotlivých uzlů přímou souvislost s dobou taktu v síti, resp. na každé hraně v síti. Platí tzv. *hranová rovnice*, která určuje, že časová délka každé hrany mezi taktovými uzly v síti musí být rovna polovině celočíselného násobku doby taktu. Zároveň platí tzv. *obvodová rovnice*, která určuje, že libovolná časová kružnice (součet časových délek hran) v síti musí být celočíselným násobkem doby taktu. Dodržení těchto podmínek zaručuje, že v každém taktovém uzlu budou dosaženy všechny možné přípoje – a to ne pouze jednou, anebo nahodile, ale vždy po uplynutí doby taktu. Taktový jízdní řád tak představuje periodický proces; je-li jednou optimalizován systém taktových linek na periodu taktu, pak spolehlivě funguje zcela identicky po celou dobu občanského dne. Časová vzdálenost taktových uzlů odpovídajících celočíselnému násobku doby taktu se nazývá *systémová jízdní doba*. Systémová jízdní doba představuje součet technicky dosažitelné jízdní doby na hraně včetně potřebných přírážek, doby pobytů v nácestných stanicích a zastávkách, a ideálně poloviny přestupní doby v počátečním a koncovém taktovém uzlu.

Taktový jízdní řád bývá mnohdy upraven podle „místních potřeb“ (časové odchylky spoju od jednotného času za účelem dosažení místního časového požadavku, prodloužení doby taktu v sedlových časech či okrajových částech dne, nestejnost doby taktu na všech linkách v síti apod.). Navíc na stávající dopravní infrastruktuře nelze striktně dodržet podmínku pro délku jízdních dob mezi všemi uzly a čas symetrie bývá mnohdy dosahován mimo uzly. Následkem těchto úprav jsou narušeny mnohé přepravní řetězce a celá řada taktových uzlů je po část dne neúplných (neobsahuje všechny přípoje). Jízdní řád, který tyto odchylky neobsahuje a důsledně dodržuje všechna pravidla pro dodržení identických procesů na všech linkách v síti se nazývá „integrální taktový jízdní řád“. Tento jízdní řád je realizován intermodálně, tj. propojuje všechny druhy dopravy, a to přirozeně bez ohledu na provozovatele. Podstatou integrálního taktového jízdního řádu je systematická koordinace jízdních řádů jednotlivých linek, kdy se využívá vzájemného propojení ve zvolených taktových uzlech k dosažení maxima optimálních přípoju, s cílem vytvořit celkově provázaný celosíťový taktový jízdní řád. Jednotná doba taktu na všech linkách je

dodržena po celou dobu občanského dne. Místní požadavky jsou řešeny nad rámec taktového systému dodatečnými účelovými spoji.

Hlavním benefitem integrálního taktového jízdního řádu je ucelenost nabídky veřejné dopravy pro cestující. Jednoduchost, snadná zapamatovatelnost, přestupy bez zbytečného čekání a především územní a síťová dostupnost. Koncepce taktového a integrálního taktového jízdního řádu je zejména vhodná tam, kde existují velké přepravní proudy cestujících bez zjevně uchopitelných časových požadavků, jako je tomu v komerčním jízdním řádu, a zároveň četnost obslužnosti nemůže být tak vysoká, aby bylo možno rezignovat na přestupní vazby, jako je tomu v intervalovém jízdním řádu. Koncepce integrálního jízdního řádu v současné době představuje nejvyšší možnou úroveň nabídky ve veřejných službách.

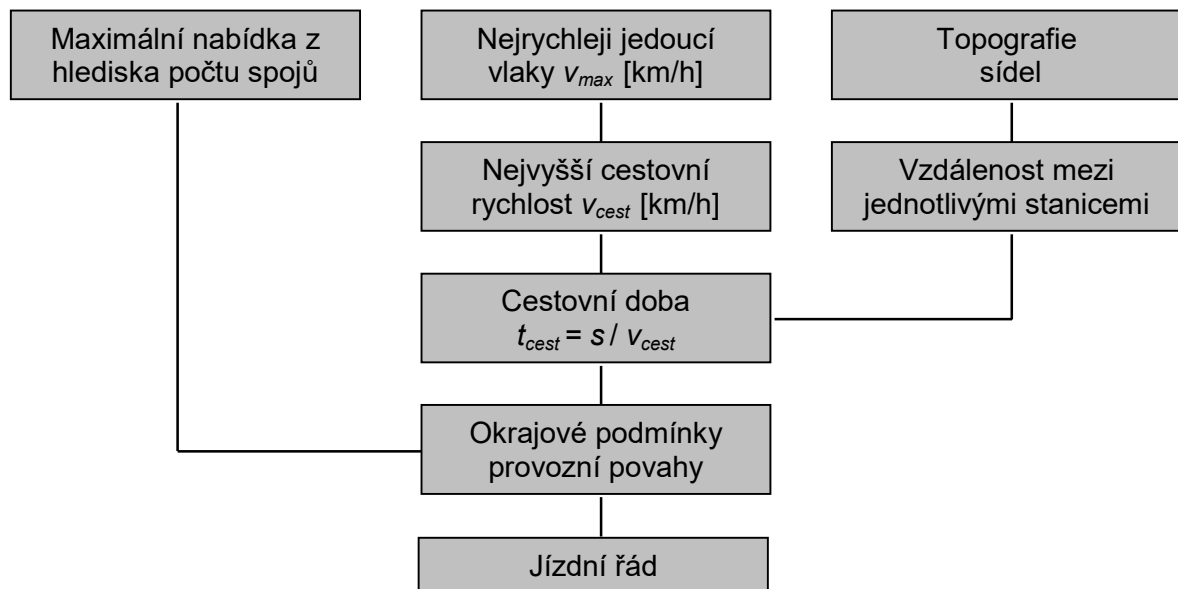
Uvedené typy jízdních řádů budou podrobně představeny v následujících kapitolách.

4.1. Komerční jízdní řád

Cílem komerčního jízdního řádu je v maximální míře pokrýt časově a prostorově uchopitelné přepravní požadavky cestujících, zejména v době přepravních špiček a pružně reagovat na takové přepravní proudy cestujících, které se vyskytují pouze v určitém časovém období.

Silnou stránkou komerčního jízdního řádu je rozsáhlá nabídka spojení v době přepravních špiček, přičemž mezi nejvýraznější nedostatky komerčního jízdního řádu z pohledu cestujícího patří především neucelenost rozsahu spojů z hlediska síťového charakteru nabídky.

Postup při tvorbě jízdního řádu s volnou vazbou



Obr. 4.2. Postup při tvorbě jízdního řádu s volnou vazbou (zdroj: Lichtenegger, 1990)

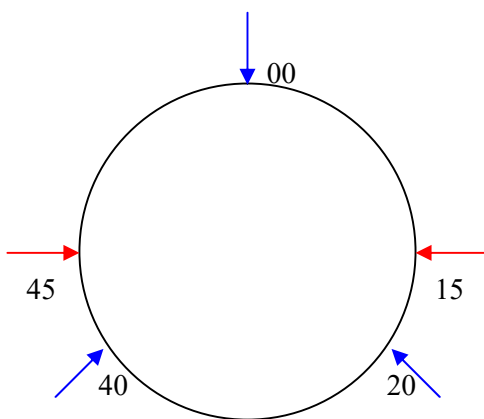
4.2. Intervalový jízdní řád

Intervalový jízdní řád lze definovat tak, že všechny jízdy v rámci libovolné linky nebo jinak sestavené skupiny vlaků se shodnou jízdní dobou se uskutečňují v daném prostoru v časových intervalech, které jsou vždy po část provozní doby pevné (např. přepravní špička / přepravní sedlo).

Cílem intervalového jízdního řádu je pokrytí přepravních požadavků cestujících kontinuální nabídkou spojení, která však poměrně pružně reaguje na proměnlivou poptávku po přepravě. Krátké intervaly mezi spoji zajišťují vysokou úroveň nabídky a přechod k vytváření systematických vzájemných přestupních vazeb mezi spoji jednotlivých linek by vedl k neefektivním prodloužením cestovních dob.

Vlivem odlišných intervalů jednotlivých linek a různého časového uspořádání spojů jednotlivých linek může docházet k omezené provázanosti takto provozovaných linek – a to například pouze po část dne nebo pouze v jednom směru. Tento jev je označován jako

Noniusefekt (Newell, Potts, 1964). To si lze představit jako situaci, kdy dva dopravní prostředky různých linek s odlišným intervalem (viz znázornění: kombinace 20-ti a 30-ti minutového intervalu) přijíždí do přestupní stanice. Přestupní doba mezi těmito dvěma spoji se pak vlivem rozdílnosti intervalů jednotlivých linek zvětšuje. Vhodná návaznost mezi těmito linkami se opakuje vždy až po uplynutí nejmenšího společného násobku intervalu obou linek.



Přestože míra systematizace v intervalovém jízdním řádu již vykazuje vlastnost symetrie, intervalový jízdní řád s touto vlastností nijak dále nepracuje. Odlišné délky intervalů na jednotlivých linkách, ani odlišné délky intervalů v jednotlivých částech dne využití vlastnosti symetrie reálně neumožňují (Baudyš, Janoš, 2001b).

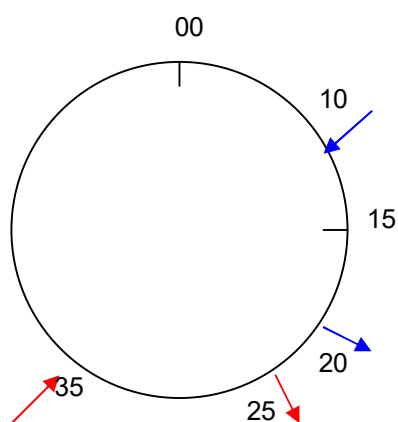
4.3. Taktový jízdní řád

Taktový jízdní řád lze definovat tak, že časové polohy všech spojů v rámci libovolné linky nebo jinak sestavené skupiny vlaků se shodnou jízdní dobou se uskutečňují v daném prostoru v konstantních časových intervalech, tzv. *době taktu* t_T a ve shodných minutových polohách v rámci doby taktu.

Taktový jízdní řád lze definovat jako takový jízdní řád, v jehož rámci se v daném prostoru zpravidla překrývá více grafikonů jednotlivých linek s pevnou vazbou (Lichtenegger, 1990), přičemž platí, že sled jednotlivých skupin vlaků a délka intervalu následné jízdy se pravidelně opakuje. Taktový jízdní řád nabízí zpravidla konstantní intervaly jednotlivých linek v období přepravní špičky i přepravního sedla. V celé síti se všechny procesy opakují ve stanoveném taktu.

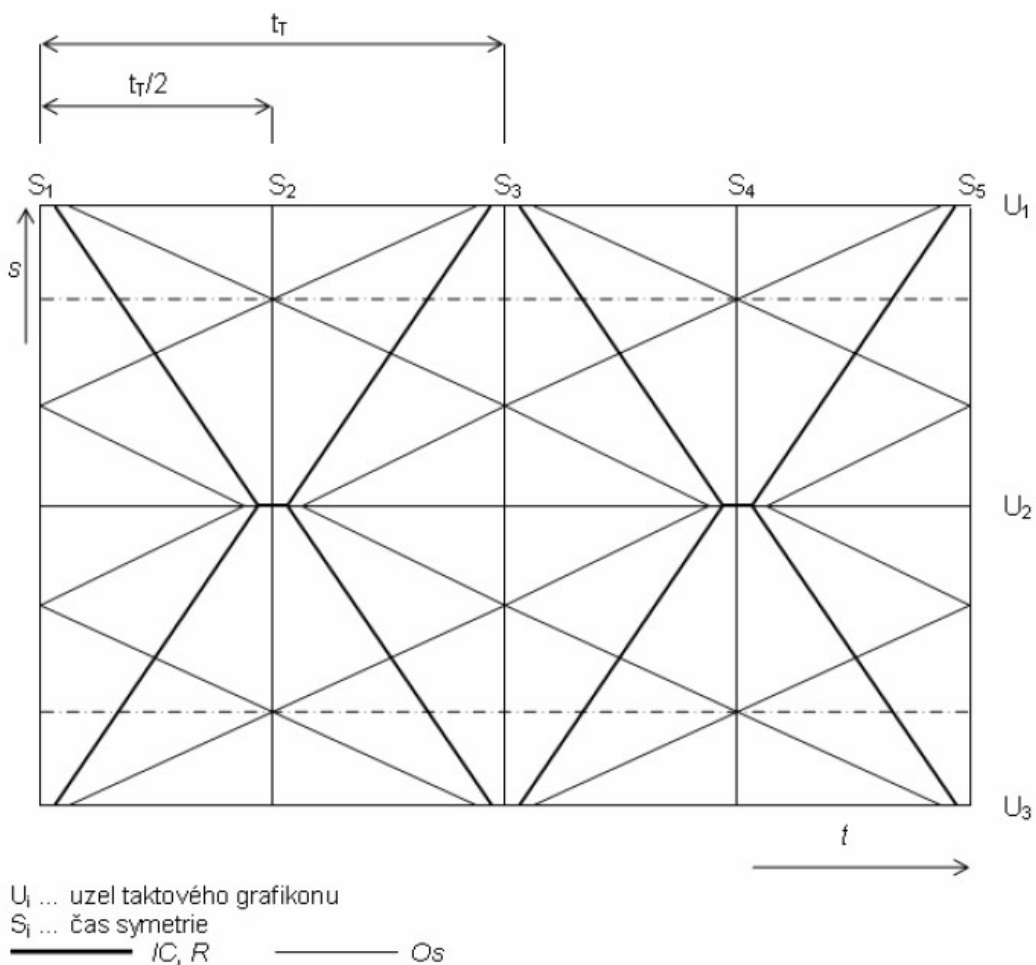
Taktový jízdní řád se vyznačuje následujícími znaky:

- vlaky stejné kategorie následují za sebou v pevném pravidelném časovém intervalu
- pro vlaky jedoucí jedním i druhým směrem platí stejná pravidla
- všechny spoje všech linek dodržují jednotnou osu symetrie (v *taktu* $t_T/2$)



Nedodržení jednotné osy symetrie napříč všemi provozovanými linkami v rámci téže sítě by z důvodu nepropojitelnosti sítí se shodnou dobou taktu, avšak odlišnou osou symetrie (viz znázornění), vedlo k nemožnosti tvorby systematicky provázané provozní koncepce (Bär, 1999).

Taktový jízdní řád přináší zjednodušení procesu tvorby jízdního řádu, neboť zkracuje délku dopravního cyklu z 24 hodin na dobu taktu.



Obr. 4.3. Diagram dráha – čas znázorňující taktový jízdní řád tratě mezi uzly $U_1 - U_3$
(zdroj: Stohler, 1994)

Z diagramu dráha – čas vyplývá typický sled linek vlaků

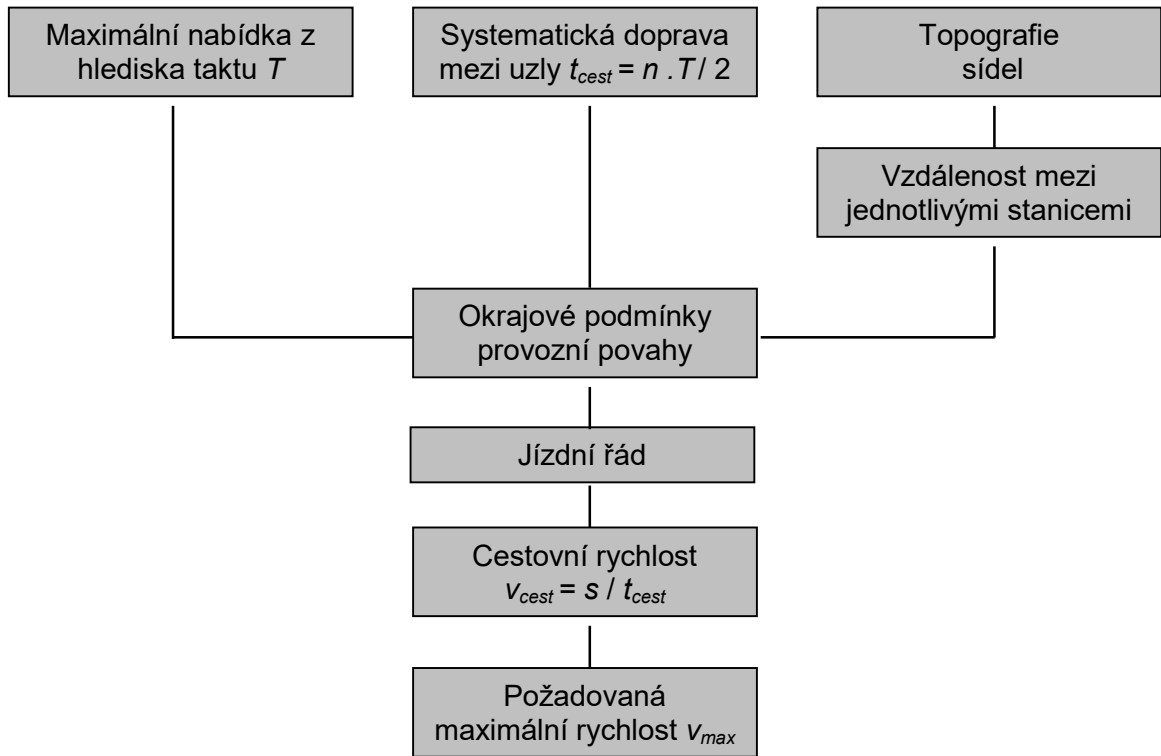
- paralelní linky s identickými vzdálenostmi pro každou linku
- stejné stanice pro křižování, předjíždění a přípojové stanice

Za předpokladu shodnosti délky jízdních dob v obou směrech lze dokázat (na základě shodnosti trojúhelníků v diagramu dráha – čas), že platí následující vztah:

$$S_{j+1} - S_j = \frac{t}{2} \quad (4.1)$$

Z diagramu dráha – čas vyplývá, že vlaky stejné kategorie se křižují v čase symetrie.

Postup při tvorbě taktového jízdního řádu



Obr. 4.4. Postup při tvorbě taktového jízdního řádu (zdroj: Lichtenegger, 1990)

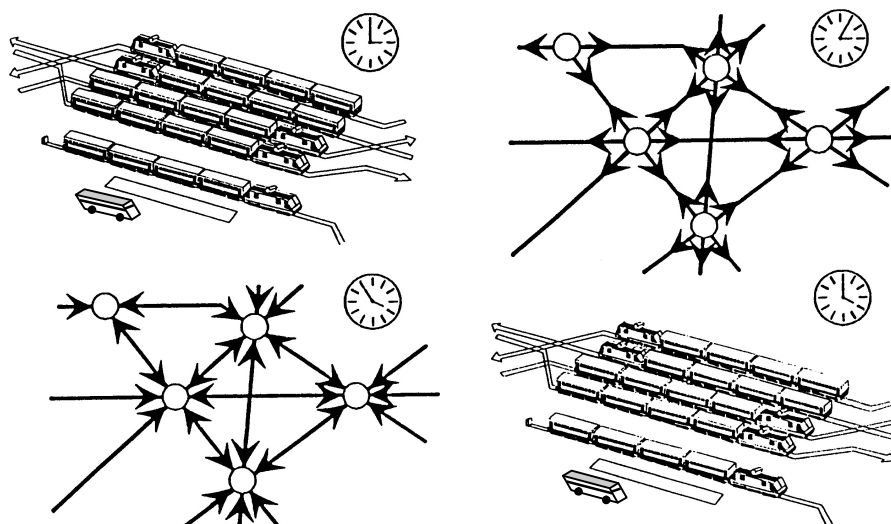
4.4. Integrální taktový jízdní řád

Integrální taktový jízdní řád systematicky propojuje linky provozované v taktu tak, že vznikají optimální přípojné vazby pro přímé přepravní proudy cestujících (Stohler, 1994). Tento princip je realizován intramodálně (přípojné vazby mezi dopravními prostředky určitého druhu dopravy) a intermodálně (přípojné vazby mezi dopravními prostředky různých subsystémů veřejné dopravy).

Pro fungování integrálního taktového jízdního řádu je třeba splnit definované okrajové podmínky v oblasti jízdních dob, dosažení tzv. systémové jízdní doby (SJD), jejíž hodnota dosahuje:

$$Jd_{sys} = n \cdot t_T / 2 \quad (4.2)$$

a to včetně pobytů v uzlech (resp. poměrné části přestupních dob), pobytů v mezilehlých stanicích a zastávkách podle navrhovaného taktu, neboť pouze tak lze vytvořit ideální podmínky pro modelování přípojových vazeb.



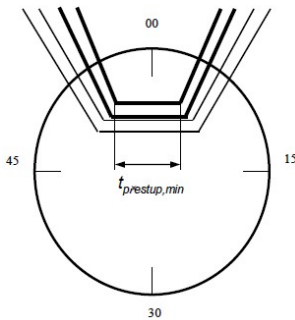
Obr. 4.5. Znázornění principu integrálního taktového jízdního řádu (zdroj: Stohler, 1994)

4.4.1. Ideální integrální taktový jízdni řád

Podstatou ideálního ITJŘ je systematická koordinace grafikonů jednotlivých linek s cílem vytvořit celkově provázaný celosíťový taktový jízdni řád. Koncepce ideálního ITJŘ využívá vzájemného propojení linek ve zvolených *uzlech ITJŘ* (Lichtenegger, 1990) k dosažení maxima optimálních přípojů.

Ideální ITJŘ musí proto splňovat následující okrajové podmínky:

- síťové spojení všech linek (intra- a intermodálně) nezávisle na provozovateli
- zajištění *jednotného taktu*
- stanovení jednotného systémově orientovaného *času symetrie*
- zachování nabídky po dobu celé provozní periody

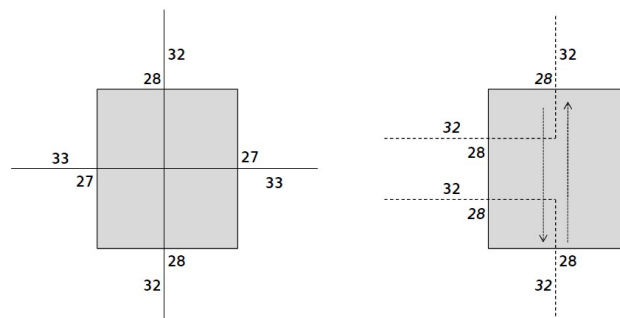


Koncepce ITJŘ je založena na taktových uzlech, které fungují jako „sjízdné body“ pro všechny linky zapojené do uzlu ITJŘ v *čase symetrie* (viz znázornění). Přestupní procesy v uzlech mezi jednotlivými linkami jsou realizovány formou přestupů bez výrazných časových ztrát. Tento princip je vhodné realizovat zejména v uzlech, kde lze zaznamenat rovnoměrně rozvržené přestupní proudy cestujících mezi všemi linkami. Slabou stránkou

systému sjízdňných bodů jsou negativní dopady na nepřestupující cestující, kteří jsou zatíženi prodlouženou dobou pobytu v uzlech ITJŘ.

Přestupní vazby se v ideálním ITJŘ odehrávají vždy buď v úplných, anebo vedlejších taktových uzlech.

Vzdálenost mezi úplnými taktovými uzly činí $\frac{1}{2}$ doby taktu. Vedlejší taktové uzly se nalézají $\frac{1}{4}$ doby taktu od úplného taktového uzlu, anebo v místě ukončení souběhu vzájemně proložených linek, které vytváří v daném uzlu směrové vazby (Bär, 1999).



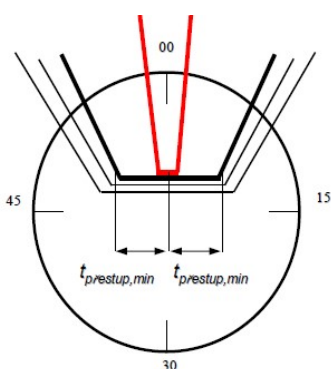
Obr. 4.6. Úplný taktový uzel, vedlejší taktový uzel (zdroj: FD ČVUT, KPM Consult, 2009)

4.4.2. Modifikovaný integrální taktový jízdní řád

V mnoha případech je plánována cílová provozní koncepce na principu ideálního ITJŘ, avšak cílového stavu není z nejrůznějších důvodů (infrastrukturních, provozních, ekonomických apod.) možné dosáhnout ihned. V takových situacích je nutné přistoupit k určitým modifikacím ITJŘ (Bär, 1999).

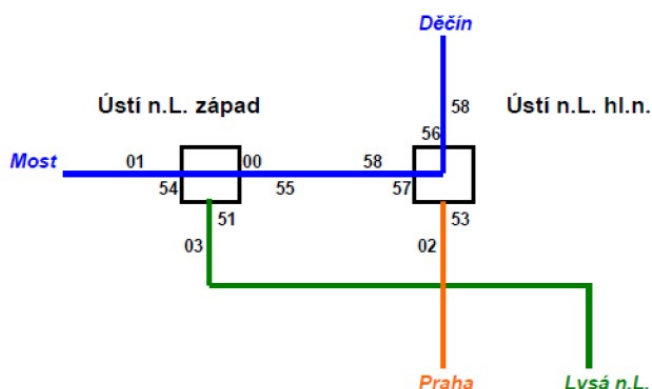
První fáze zavádění integrálního taktového jízdního řádu zahrnuje zpravidla pouze zanedbatelný nárůst počtu vlakových spojů a soustředí se na maximální dosažitelnou úroveň systematizace. Tento postup byl zvolen i v ČR při zavádění ITJŘ v dálkové dopravě (Janoš, Baudyš, 2012).

Výsledkem této první fáze zavedení taktového jízdního řádu je tzv. *modifikovaný integrální taktový jízdní řád* (Bär, 1999). Modifikovaný ITJŘ se tak vyznačuje některými odlišnými znaky od ideálního ITJŘ. Nepostrádá sice potřebnou míru systematizace ani prostorovou komplexitu, provázanost v taktových uzlech se však odvíjí od linky / linek s nejdelší dobou



taktu a zároveň je celé řešení ITJŘ omezeno možnostmi infrastruktury (možnosti dosažení SJD, technologické možnosti v uzlech). Slabinou modifikovaného ITJŘ je tak často nízká cestovní rychlost, neboť celá koncepce zaměřená na systematizaci je primárně podřízena aktuálním možnostem infrastruktury. Častou modifikací představuje přestupní doba v taktových uzlech, neboť ne všechny hrany splňují přesně potřebné podmínky dosažení SJD.

Další modifikací může představovat rozložení přestupních vazeb do více stanic v rámci jednoho uzlu, tj. jedná se o případ decentralizovaného taktového uzlu (Bär, 1999).



Obr. 4.7. Decentralizovaný taktový uzel Ústí n.L., JŘ 2015/16 (zdroj: autor)

Modifikace ITJŘ zaváděného na stávající dopravní infrastrukturu musí často pracovat se stavem, kdy nelze striktně dodržet podmínku pro délku SJD mezi všemi uzly, tj. čas symetrie bývá mnohdy dosahován mimo uzly, tj. některé přestupní vazby dosahovány nejsou vůbec a některé mají pouze směrový charakter.

Další užívané modifikace ITJŘ se týkají především užitných nabídkových vlastností systému a reálně vždy znamenají zhoršení síťových vlastností systému (Janoš a kol., 2009). Jedná se zejména o modifikace:

- nabídka odlišného taktu pro některé linky
- zeslabení nebo zesílení nabídky linek vzhledem k určité provozní době
- vytvoření jednostranných přestupních vazeb (směrové přípoje)
- vynechání spojení některých přestupních směrů ve zvolených uzlech
- zavedení dodatečných linek (spojů) mimo základní takt

Odstraňování modifikací a postupné dosahování ideálního ITJŘ je možné pouze kombinací opatření na straně infrastruktury, provozu, vozidel a nabídky (Bär, 1999), tj. ve většině případů se jedná o potřebu dodatečných investic do vozidel a infrastruktury.

Cílem dosahování SJD je však zkracování, anebo alespoň udržení cestovních dob. Prodloužení stávajících jízdních dob na jednotlivých hranách v síti za účelem dosažení SJD není účelné, neboť nevede ke skutečnému zkrácení cestovní doby u přestupující frekvence, ale prodlužuje cestovní doby u zdroj-cílových frekvencí cestujících jedoucích přímo. Zejména při přípravě a vyhodnocování takovýchto kroků je nezbytné podrobně zkoumat poptávkové dopady vyvolané změnou provozní koncepce a přechodem z úrovně strategické koncepce k provozně-technologickému detailu (Friedrich, Nökel, 2003).

Přechod od modifikovaného ITJŘ k ideálnímu ITJŘ tak vyžaduje sumarizovaný plán jednotlivých kroků, spojených s postupným „přepínáním“ časových poloh taktových uzlů, resp. částí sítě do cílové podoby (Hesse a kol., 2010). Průvodním jevem tohoto „přepínání“ taktových uzlů samozřejmě může být dočasné rozvázání přestupních vazeb, anebo dokonce i opuštění některých taktových uzlů vybranými linkami.

4.5. Plánování struktury nabídky taktové dopravy

Strukturální uspořádání nabídky vyžaduje dvoufázový postup:

1. Plánování linek = stanovení *lokálních komponent* taktové dopravy
2. Plánování grafikonu = stanovení *časových komponent* taktové dopravy

Obě tyto komponenty představují základ cíleného plánování taktové dopravy. Před určením těchto komponent je třeba stanovit plánování struktury sítě. To zahrnuje především stanovení sítě tratí s různými systémy vlaků obsluhujících tuto síť, stanovení systémových zastávek a periody taktu (Lichtenegger, 1990). Očekávaný objem přepravy v jednotlivých relacích bude nutno řešit rozdělením různých systémů vlaků na částečné dráhy. Z toho plyne zatížení prvků sítě systémy vlaků.

4.5.1. Rozlišení taktu z prostorového hlediska

Takt linky:

jízdy všech spojů jedné linky jsou provozovány v taktu (obecně v obou směrech a po celé trase jízdy)

Takt tratě:

na společném úseku tratě jsou jízdy všech spojů všech linek s identickou periodou taktu resp. se společným násobkem této periody provozovány s takovým vzájemným časovým posunem, že společným provážením jednotlivých linek nastává nová společná (kratší) perioda taktu v daném úseku

Takt sítě:

v síti resp. podsíti jsou provozovány vzájemně (v taktových uzlech) časově provázané linky s identickým linkovým taktem nebo taktem tratě, resp. jejich násobky nebo děliteli. Při jednotném taktu sítě se dosahuje nejvyšší míry systematizace.

Hodnocení nabídky dopravy z hlediska zákazníků se v systematicky a periodicky uspořádaných taktových sítích odráží do sledovaných kritérií (Brugger a kol., 2012), např.

- počet přímo jedoucích cestujících
- počet přestupujících cestujících
- délky linek v síti
- počet linek na hraně resp. v síti

Výše uvedená kritéria bývají častým předmětem optimalizačních úloh na taktově provozovaných sítích. Na základě jmenovaných problémů nelze očekávat optimální řešení plánování linek pouze formou vícenásobné optimalizace (Nachtigall, Voget, 1997). Hledá se proto příznivé řešení, které splní zvolené cílové kritérium, za současného dodržení předem stanovených mezí některých zbývajících kritérií.

Rozhodujícím výsledkem účinným z hlediska zákazníka je při plánování vzájemně provázaných linek v rozvětvené síti počet nutných přestupů vztažených na jednu cestu. Proto jsou středem zájmu metod plánování linek cílová kritéria, která jsou odvozena z následujících veličin:

- maximalizace počtu nepřestupujících cestujících v síti
- minimalizace počtu přestupních procesů v síti

Ačkoli jsou obě kritéria orientována k těmto cílům, není při jejich aplikaci dosaženo stejných výsledků. Metoda maximalizace přímých spojení upřednostňuje dlouhé linky přes nejkratší cesty bez ohledu na počet přestupů cestujících, kteří nemohou použít tuto linku pro přímou cestu. Metoda minimalizace přestupních procesů preferuje uzlově orientovaná příznivá spojení částí linek, takže mohou vzniknout linky vedoucí oklikou pro potenciál přímo jedoucích cestujících. Oproti výše uvedené metodě se tímto redukuje podíl vícekrát přestupujících cestujících.

Hlavním ovlivnitelným kritériem je *cestovní doba*, která vychází zejména ze síťově podmíněných čekacích dob. Jedná se o „ztrátové“ doby nad rámec minimálních přestupních dob, které jsou způsobeny vzájemnou časovou koordinací spojů a které je zapotřebí vzájemnými posuny příjezdů a odjezdů spojů jednotlivých linek minimalizovat (Nachtigall, Voget, 1997).

Výše síťově podmíněných čekacích dob je však ovlivněna provozními možnostmi tj. na železnici časovou závislostí mezi dvěma a více vlaky, kterou je možno popsat tzv. grafikonově-technickými vazbami. V praxi obsahují grafikonové sítě z důvodu velké

provázanosti v železniční síti většinou více vazeb než stupňů volnosti (Nachtigall, 1998). Jako důsledek této provázanosti vzniká (z grafikonově-technického hlediska) přeúčtená síť. Grafikon je pak realizovatelný tehdy, pokud:

- některé časy v grafikonu jsou pokryty přes své minimální časy dodatečnými síťově podmíněnými čekacími dobami (např. prodloužené pobyty projíždějících linek, prodloužené přestupní doby) nebo
- lze navázat na grafikonové vazby taková omezení, že tento přeúčtený systém lze realizovat po úpravě jízdních dob mezi uzly (na hodnoty odpovídající potřebným SJD)

Optimalizaci síťově podmíněných čekacích dob na přeúčtených sítích se podrobně věnoval Nachtigall (1998). Obdobně bylo sledováno např. i kritérium celkových časových ztrát cestujících na periodicky provozované síti izraelských železnic (Kaspi, Raviv, 2013). V případě, že se při procesu verifikace linkové sítě v ITJŘ zasáhne do samotné struktury linkového vedení a vznikají provozně a nabídkově srovnatelné varianty, lze dále postupovat vyčíslením poptávky pro jednotlivé varianty uspořádání taktové sítě (Amstutz, 2020). V případě, že provozovaná síť má významná omezení (např. jednokolejnost, omezený počet křižovacích stanic), může být předmětem optimalizace i samotná časová koordinace spojů periodicky provozovaných linek v přestupních uzlech (Lorenz a kol., 2021).

Další optimalizační úlohy na periodicky provozovaných sítích ITJŘ se zaměřují na úpravy linkového vedení (typicky protrasy linek skrz taktové uzly) za účelem optimalizace oběhů vozidel, přičemž zároveň je sledováno nabídkové kritérium přímo jedoucích cestujících (Liebchen, 2006).

4.5.2. Koncepce ITJŘ na liberalizovaných trzích

Dosud představené metody a postupy zaměřené na plánování linek tvorbu jízdního řádu se vždy zaměřovaly na samotnou podstatu věci – tj. na základě vstupů o přepravních proudech vytvořit na základě definovaných okrajových podmínek a sledovaných kritérií linkové vedení, resp. rozložení taktových uzlů ITJŘ.

V dobách unitárních železnic bylo procesně snazší zavést novou provozní koncepci, anebo upravit stávající. V současné době, kdy je železniční sektor rozdělen rozhraními dopravce / manažer infrastruktury, dopravce / objednatel a přístup k dopravní cestě je plně liberalizovaný, je velmi nesnadné zavádět systémově „čistá“ provozní řešení.

Provozní koncepce ITJŘ založená na vícestupňové / vícesegmentové obsluze vychází z předpokladu, že všechny segmenty jsou nějakým způsobem řízeny a koordinovány, tj. že sledováno je systémové optimum z hlediska sítě a nikoli lokální optimum z hlediska linky, anebo jednoho segmentu (Janoš a kol., 2006). Je tak zapotřebí řešit otázku open-access služeb za předpokladu, že mají být systémově integrovány. Problém je o to významnější, pokud v open-access režimu funguje obecně nejvyšší obslužný segment (typicky volná konkurence v relaci Praha – Ostrava), se kterým mají být nižší obslužné segmenty systémově propojeny (Janoš, Baudyš, 2014).

První způsob koordinace spočívá v regulaci tras a přidělu kapacity takovým způsobem, aby pro open-access byly vyhrazeny pouze trasy, které lze systémově integrovat (Pachl, 2006). Tento způsob je možno provádět, pokud však žádosti o kapacitu nejsou vzájemně kolizní. V případě více dopravců v open-access režimu se vzájemně kolizními požadavky je s ohledem na funkčnost ITJŘ nutné přistoupit ke koordinaci přidělu systémových tras, přičemž v úvahu připadají různá optimalizační kritéria týkající se technických a přepravních parametrů spojů jednotlivých linek (Klabes, 2010).

Druhý způsob koordinace spočívá v zahrnutí maximálního rozsahu dopravních služeb do režimu veřejných služeb formou objednávky veřejných služeb (PSO), přičemž open-access služby tvoří nadstavbu systému a nemusí být nezbytně systémově koordinovány (Alexandersson a kol., 2018). Přestože se jedná o poměrně pragmatický přístup, následným problémem zůstává nejen přiděl kapacity a koordinace přidělu tras, ale především dimenzování výhledového rozsahu infrastruktury, kdy část dopravních služeb – navíc v nejvyšším obslužném segmentu – nelze úspěšně predikovat (Smoliner a kol., 2018). Zajímavý přístup k problému tvoří dílčí optimalizace jednotlivých sítí rychlých vlaků (bez ohledu na PSO) a následná časová koordinace těchto sítí (Canca a kol., 2019). Možnosti koordinace se odvíjí i od velikosti provozních souborů v rámci jednotlivých smluv PSO. Smoliner (2021) navrhl postup, ve kterém utváří vzájemně časově koordinované subsystémy ITJŘ, kdy každý z nich následně představuje samostatný provozní soubor. Až do doby případných strukturálních změn pak není další časová koordinace potřebná.

Třetí způsob koordinace spočívá v zahrnutí všech dopravních služeb do režimu veřejných služeb na koncesním principu. Provoz dálkových vlaků v koncesním režimu automaticky neznamená nutnost vzniku úhrad z veřejných rozpočtů, dokonce je možné jít i cestou „negativní kompenzace“ (Temple, 2015). Možností je i udělování geograficky rozsáhlých provozních souborů do malého množství koncesí, což je případ dálkové dopravy ve Švýcarsku, kde jsou předmětem jedné koncese všechny vlaky dálkové dopravy na celé síti, které lze následně vzájemně koordinovat (Arx a kol., 2018).

4.6. Shrnutí problematiky koncepce jízdního řádu

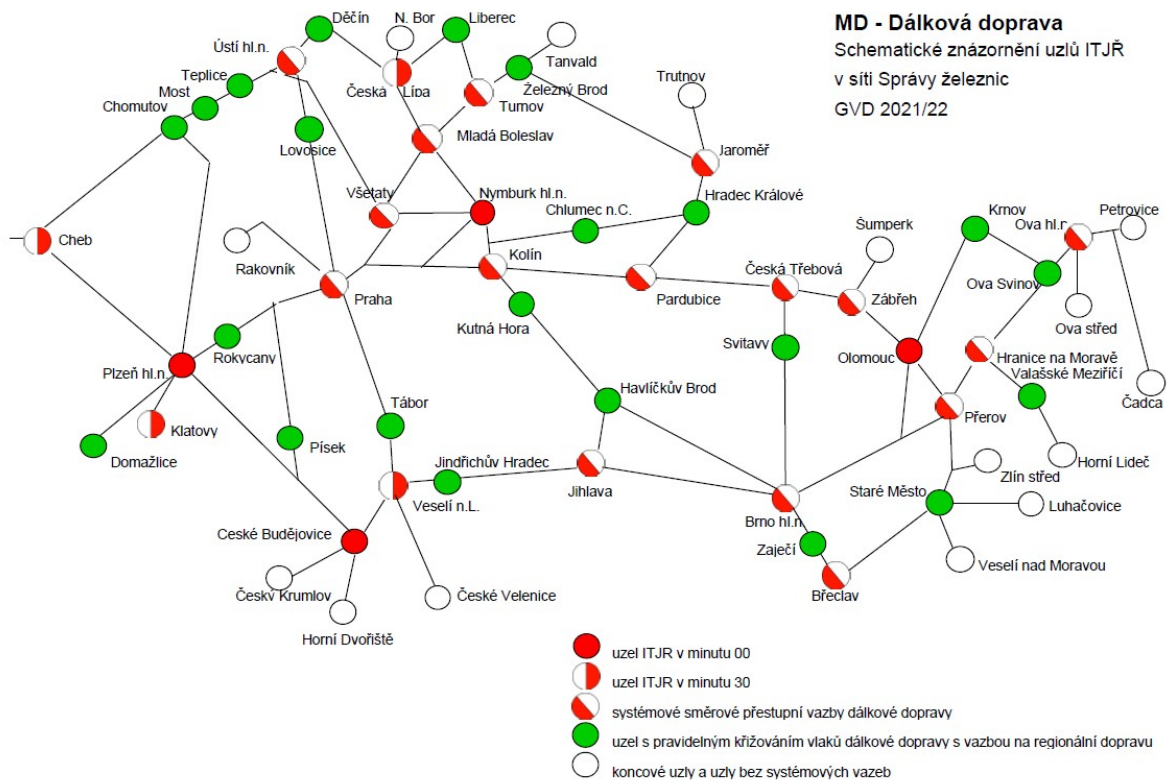
V oblasti tvorby jízdního řádu panuje značný rozdíl mezi jednotlivými evropskými zeměmi. Obecně platí, že v zemích s polycentrickou strukturou směřuje organizace provozní koncepce k ITJŘ. Například ve Švýcarsku je provozován téměř ideální ITJŘ, v Německu či Rakousku modifikovaný ITJŘ, přičemž je realizována celá řada investic do dopravní infrastruktury, které umožňují vylepšovat provozní koncepci ve směru ideálního ITJŘ (ostatně i dlouholetá dominantní aplikace ITJŘ v německy hovořících zemích vysvětluje, proč většina kvalitní odborné literatury pochází právě od autorů z těchto zemí).

V zemích s monocentrickým osídlením, např. ve Francii či Španělsku je naopak provozován převážně typický komerční jízdní řád na většině sítě a větší míra systematizace je patrná pouze lokálně, anebo v určitých obslužných segmentech.

Ve středoevropských zemích bývalého východního bloku se mimo České republiky uplatňuje ve větším měřítku taktový jízdní řád v Maďarsku a na Slovensku (Borza a kol., 2013). V ostatních zemích je opět majoritně uplatňován komerční jízdní řád a případná míra systematizace nevykazuje prvky odpovídající principům ITJŘ.

Počátky intervalové dopravy v osobní železniční dopravě na území ČR spadají do JŘ 1983/1984, kdy tehdejší ČSD zavedly intervalovou dopravu osobních vlaků mezi Prahou a Kolínem (hodinový interval s účelově vloženými spoji). Od JŘ 1993/1994 byly na české železnici v taktových polohách (výsledný 2-hodinový takt) vedeny dálkové vlaky v ose *EuroTaktu* Berlín – Praha – Wien. Přestože se následně i odjezdy vlaků vnitrostátní dálkové dopravy začaly na jednotlivých tratích sjednocovat, zdaleka se z pohledu míry systematizace nejednalo ani o náznaky taktové dopravy. Systematický přechod k taktové dopravě (koncepte modifikovaného ITJŘ) započal v dálkové osobní dopravě s jízdním řádem 2004/05. Na zavedení této provozní koncepce se autor této práce významnou měrou podílel (Janoš, Baudyš, 2012).

Velkým rizikem pro systém ITJŘ v ČR je skutečnost, že objednatelé veřejné dopravy se zatím plně neztotožnili se skutečností, že ve veřejné dopravě, ať železniční nebo autobusové, nelze v prostředí intermodální konkurence dosáhnout vyvážené nabídky odpovídající poptávce (Weidmann, 2001). Vždy je nutný určitý převis nabídky nad poptávkou – v případě nevyhovující časové polohy části přepravního požadavku je realizován celý přepravní požadavek jinou formou, většinou prostřednictvím individuální automobilové dopravy. Hybnost obyvatelstva v ČR a obecně nepříliš dlouhé vzdálenosti v zázemí dojížděkových regionů (Halás a kol., 2014) jasně vedou k potřebě vysoké četnosti spojů veřejné dopravy. Systematizovaný ITJŘ v nejsilnějších přepravních osách s taktem sítě 60 min je přesto stále mnohdy považován za druh „nadměrného luxusu“.



Obr. 4.8. Síť dálkové dopavy a uzly ITJŘ v ČR, JŘ 2021/22 (zdroj: autor)

5. Technologické zajištění provozní koncepce

Po finalizaci nabídkové části provozní koncepce, tj. finalizaci podoby jízdního řádu, je dalším krokem technické a technologické zajištění samotného provozu. Zatímco pro cestující je významná přesnost a spolehlivost jízdního řádu, pro dopravce a objednatele veřejných služeb jsou významné náklady provozní koncepce. Mimo nákladů na samotnou realizaci dopravního výkonu jsou nejvýznamnější položkou náklady spojené s pořízením a provozem vozidel a mzdy personálu. Vysoká produktivita vozidel a personálu skýtá velký operativní prostor pro provozní efektivitu (Baudyš, Janoš, 2013).

Každý jízdní řád a konkrétní provozní koncepce na sebe váže konkrétní počet vozidel s určitým turnusovým proběhem. Oběhy vozidel, resp. jejich počet, resp. jejich vhodné obraty je tak nutno sledovat již v koncepční úrovni přípravy jízdního řádu.

Existují i optimalizační metody počtu vozidel, které minimalizaci počtu vozidel nadřazují nad optimalizaci časových ztrát cestujících v periodicky provozované síti a proto do tvorby provozní koncepce zařazují „zpětnou smyčku“, která v případě nedostatečně produktivního nasazení vozidel vrátí plánovací proces zpět k linkovému vedení (Michaelis, Schöbel, 2009). Popsány jsou i řešení, kdy jsou zohledněny všechny náklady provozní koncepce (s dominantním vlivem počtu vozidel), kdy je předmětem iterací nejen linkové vedení, ale i jízdní řád. S ohledem na množství proměnných je však takový postup použitelný jen pro malé sítě (Pätzold a kol., 2018).

Pro hnací vozidla je nutné vytvoření technického zázemí pro nezbytnou údržbu a rozsah těchto zařízení úzce souvisí s počtem vozidel, kterými dopravce disponuje. Celkový počet vozidel nasazených na dopravcem pojižděné síti je také přímo úměrný počtu potřebného personálu pro zajištění provozu. Efektivní nasazení vozidel a jejich nejnížší možný počet nutný pro spolehlivý provoz tudíž příznivě neovlivňuje pouze náklady pořizovací, nýbrž i náklady spjaté s realizací provozu samotného.

5.1. Pravidla pro oběhy vozidel a turnusy

Efektivní nasazení vozidla je dáno jeho oběhem. Oběhy vozidel určují pořadí, v jakém jsou na sekvenci spojů nasazována určitá vozidla. Efektivní oběhy hnacích a přípojných vozidel na železnici nejsou nepostradatelné pouze pro hospodárny provoz, ale i pro strategické plánování investic a nabídky. Za efektivní je považován obvykle takový proběh, kdy je vozidlo po dobu občanského dne využito po 85% času (Baudyš, Janoš, 2013). Za velmi efektivní jsou zároveň v konvenčním provozu v osobní dopravě považovány takové oběhy, kdy denní běh vozidla přesahuje 800 km. V silniční dopravě jsou např. v regionální dopravě za efektivní nasazení považovány i vozidla s denním proběhem nad 200 km – tento rozdíl je dán nejen rozdílnou pořizovací cenou drážních a silničních vozidel, ale i průměrnou rychlostí vozidla v rámci jeho oběhu. Pokud dopravce zajišťuje dopravu na jedné trati nebo nepříliš rozsáhlé síti trati, zpravidla nepotřebuje žádné nástroje pro optimalizaci, neboť počet vozidel i vlaků je značně omezený a výčet možných kombinací oběhu velmi stručný. U velkých dopravců a rozsáhlejších provozovaných sítí je celý problém podstatně složitější.

Oběh vozidla je ovlivněn mnoha limitujícími faktory, jako např. maximálním přípustným kilometrickým proběhem mezi provozními ošetřeními, počtem a umístěním technických základen, kde lze provozní ošetření pro dané vozidlo provádět, nepravidelnosti v období jízdy vlaku (pracovní dny, víkendy, sezónní vlaky), nebo i nepárovosti vlaků a z toho plynoucího určitého rozsahu prázdných jízd.

Složitost hospodárných a technicky optimálních oběhů hnacích vozidel spočívá v téměř nekonečném množství kombinací sledu vlaku a navíc v množství cílových kritérií, které je třeba zohlednit, ale pokaždé mohou mít různou váhu. Bez softwarových podpůrných prostředků je téměř nemožné dobrat se smysluplné a podle váhy cílových kritérií optimální varianty. Množství přípustných kombinací přechodů vozidel totiž obvykle vede na *NP-úplnou* úlohu. Ze zkušenosti vyplývá, že na hranici možností „ručního“ zpracování a nalezení suboptimální varianty (kontrola optimality je neproveditelná) je oběh do 30 vozidel (Janoš, Kříž, 2016).

Efektivní oběhy hnacích vozidel však nemusí automaticky znamenat efektivní nasazení personálu a naopak, neboť ve většině případů dnes již není personál pevně svázán s vozidlem. Vlivem vysokých kilometrických proběhů vozidla v rámci oběhu by například strojvedoucímu v zákonem stanoveném čase nemusel vzniknout nárok na povinnou pracovní přestávku.

Adekvátně s efektivními obraty vozidel, kde mimo času vyhrazených na provozní ošetření nedochází zpravidla ke zbytečným prostojům, mělo by se tak dít i v případě směn

vlakového personálu – mimo nutných pracovních přestávek by měla být pracovní doba personálu maximálně využita bez dalších přerušení směny.

Optimální tvorba plánu směn pro zaměstnance (turnusu) je analogická s plánováním oběhu vozidel. Nejvýznamnějšími limitujícími faktory v tomto případě jsou: identické místo počátku a konce směny, dodržování zákoníku práce (stanovené pracovní přestávky, délka směny apod.) a omezený počet vlakového personálu v každé provozní jednotce. Záměrně není uvedena znalost jednotlivých řad hnacích vozidel a traťových poměrů, neboť tyto faktory jsou snadno odstranitelné.

5.1.1. Funkce oběhu

Oběhy vozidel, jakož i personální turnusy, musí zohledňovat skutečné potřeby dopravce při obsazování a zajišťování dopravních výkonů. Zde jsou shrnuta nejdůležitější pravidla, která je vhodné obecně respektovat (Baudyš a kol., 2001).

V případě oběhů vozidel:

1. Jsou tvořeny pouze uzavřené oběhy (tj. poslední den končí tam, kde první začíná), tak aby došlo k celkovému pokrytí všech vybraných vlaků. Pro jednotlivé dny mohou vznikat varianty, tak aby došlo k obsazení spojů s omezením jízdy v některých dnech (např. víkendové vlaky).
2. Pro zadanou lokomotivní řadu musí být zohledněn proběh mezi provozními ošetřeními a místo, kde je možné ho provést; každé se musí dle oběhu dostat včas do místa realizace provozního ošetření.
3. S ohledem na průběžně vykonávané provozní ošetření a periodicitu oprav je vhodné, zajišťovat rovnoměrný proběh vozidel stejné řady.
4. Lokomotivní / prázdné jízdy jsou maximálně eliminovány (např. při nepárovostech vlaků), s výjimkou případů, kdy lokomotivní / soupravový přejezd mezi dvěma místy sníží celkovou potřebu lokomotiv.
5. Maximální využití vozidla činí 85% z celkové provozní doby v časovém období – vyšší míra využití snižuje stabilitu jízdního řádu (riziko přenosu nepravidelností při obratech).

V případě personálních turnusů:

1. Z hlediska procesu optimalizace nastává ideální stav tehdy, když je personálně turnus pevně svázán s oběhem vozidla, neboť optimalizace probíhá pouze jednou (praxe stále ještě běžná v autobusové dopravě). Vazba personálu na vozidlo však může vést k nižšímu využití vozidla (z důvodu zákonných přestávek na jídlo a oddech).
2. Není-li sledována pevná vazba personál / vozidlo, pak je nutné maximální využití disponibilní pracovní doby personálu (eliminace neproduktivních časů, režijních jízd apod.).
3. Obecně platí, že personál končí v jednom dni v témže místě, kde začal (výjimku tvoří směny přerušené, anebo směny s noclehem – tyto případy však obvykle snižují produktivitu nasazení personálu a vyvolávají dodatečné náklady dopravce; směny s přerušením nebo s noclehem lze mnohdy eliminovat protisměrnou režijní jízdou personálu, která může celkové náklady dopravce snížit).
4. S ohledem na přirozený biorytmus je vhodné, doplnit optimalizační kritérium, které eliminuje začátky směn personálu před 6:00 a konce směn po 22:00; v případě směn nočních je žádoucí, aby směny nekončily později než v 8:00. Obecně je vhodné eliminovat začátky směn v období 23:00-2:00.
5. V disponibilní pracovní době (po odečtení zákonných přestávek na odpočinek) je vhodné maximální využití personálu, které se zpravidla dosahuje tím, že v těchto disponibilních časech je personál svázán s vozidlem, které má v té době maximální využití. Obecně platí, že v rámci celé směny (bez zohlednění pracovních přestávek) se optimální využití personálu pohybuje na 85% využití, přičemž prostoje / přestávky je vhodné ideálně umísťovat přibližně do poloviny délky směny, anebo alespoň eliminovat výrazně nesouměřitelné využití v rámci jedné směny.

5.2. Metody tvorby oběhů vozidel a personálu

Existuje celá řada metod tvorby oběhů vozidel a personálu. V metodách operačního výzkumu se jedná o tzv. „přiřazovací problém“, který se řeší např. „maďarskou metodou“, která je obecně známa a proto nebude dále podrobně uváděna.

Při stanovení turnusového počtu vozidel je nutno zvlášť počítat s provozní zálohou, která pokrývá neplánované výpadky vozidel (poruchy, garanční opravy, nehody, vandalismus většího rozsahu apod.). Tato záloha se v českém prostředí obvykle pohybuje v rozmezí 10-20% z turnusového počtu vozidel. V případě provozního personálu se záloha na dovolené, nemoci apod. pohybuje zpravidla v rozmezí 12-18% z turnusového počtu personálu (Baudyš, Janoš, 2013).

Existuje obecná doba jednoho oběhu

$$t_{obehu} = 2 \cdot t_{jizdy} + t_{obratu,A} + t_{obratu,B} \quad (5.1.)$$

z čehož vyplývá minimální doba oběhu vozidla

$$t_{obehu,min} = 2 \cdot (t_{jizdy,min} + t_{obratu,min}) \quad (5.2.)$$

V úlohách taktového jízdního řádu je na každé lince velmi jednoduše stanovitelný počet vozidel

$$n_{vozidel} = (2 \cdot t_{jizdy} + t_{obratu,A} + t_{obratu,B}) / t_T \quad (5.3.)$$

neboť všechny procesy se periodicky opakují.

Počet vozidel na lince nemá sám o sobě žádnou vypovídací schopnost o jejich oběhu. Při jakémkoli softwarovém řešení přiřazovacího problému je proběhlá optimalizace konfrontována s potřebou provozního ošetření. Softwary existující v současné době dosud neumí plnohodnotně zohlednit provozní ošetření v konkrétním místě v síti po najetí kilometru nutných pro provozní ošetření na potřebnou dobu. Počet přípustných kombinací totiž vede na *NP-úplnou* úlohu. Většina softwarů umožňuje manuální zadání přechodu vozidla (spoj / spoj) – pokud tak existuje oběh, ve kterém je v místě obvyklého provozního ošetření patrná možnost časového prostoje vozidla za účelem tohoto ošetření, pak se manuálně stanoví přechod a optimalizace počtu vozidel proběhne znovu s touto omezující

podmínkou (Janoš a kol., 2003). Jedná se však o ruční zásah, který musí vždy provést sám uživatel. V extrémním případě může tento zásah vést i ke zvýšení počtu vozidel. Možnosti provozního ošetření a s tím spojené (ne)nárůsty turnusového počtu vozidel, jakož i rozsah prázdných jízd, jsou přímo spojeny s umístěním dep / vozoven / středisek obslužnosti. Výběr vhodného střediska pro obsluhu linky je spojen s jízdním řádem – jeho podobou, pravidelnými prostoji spojů atd.

Autor formuloval heuristický postup (Janoš, Baudyš, 2013), kterým lze dosáhnout takové řešení, které zohlední specifika provozního ošetření (anebo např. tankování, či střídání personálu v konkrétním místě apod.). Tento postup má 6 základních kroků:

- 1) pro každé místo v síti, kde začínají či končí spoje se vytvoří tabulka příjezdů / odjezdů (ukázka tabulky)

z	vlak/část vlak	příj.	<->	odj.	vlak/část vlak	do
LIBO	Os 6120	po 5.23,9	--->	po 5.35	Os 6123	LOVO
LOVO	Os 6122	po 6.18,6	--->	po 6.44	Os 6101	LOVO
LOVO	Os 6124	po 7.28,7	--->	po 8.57	Os 6103	LOVO
LOVO	Os 6102	po 8.55,3	--->	po 10.57	Os 6105	LOVO
LOVO	Os 6104	po 10.55,3	--->	po 12.57	Os 6107	LOVO
LOVO	Os 6106	po 12.55,3	--->	po 13.33	Os 6127	LOVO
LOVO	Os 6126	po 14.19,6	--->	po 14.57	Os 6109	LOVO
LOVO	Os 6108	po 14.55,3	--->	po 15.33	Os 6129	LOVO
LOVO	Os 6128	po 16.19,6	--->	po 16.57	Os 6111	LOVO
LOVO	Os 6110	po 16.55,3	--->	po 17.33	Os 6131	LOVO
LOVO	Os 6130	po 18.19,6	--->	po 18.57	Os 6113	LOVO
LOVO	Os 6112	po 18.55,3	--->	po 20.28	Os 6115	LOVO
LOVO	Os 6114	po 21.10,8	--->	út 4.12	Os 6121	LOVO
LIBO	Os 6120	út 5.23,9	--->	út 5.35	Os 6123	LOVO
LOVO	Os 6122	út 6.18,6	--->	út 6.44	Os 6101	LOVO
LOVO	Os 6124	út 7.28,7	--->	út 8.57	Os 6103	LOVO
LOVO	Os 6102	út 8.55,3	--->	út 10.57	Os 6105	LOVO
LOVO	Os 6104	út 10.55,3	--->	út 12.57	Os 6107	LOVO
LOVO	Os 6106	út 12.55,3	--->	út 13.33	Os 6127	LOVO
LOVO	Os 6126	út 14.19,6	--->	út 14.57	Os 6109	LOVO
LOVO	Os 6108	út 14.55,3	--->	út 15.33	Os 6129	LOVO

- 2) vytvoří se množiny síťově podmíněných přechodů (přechody vozidel ze spoje na spoj, jejichž nedodržením je nutno obsadit výchozí spoj dodatečným vozidlem)

- 3) množiny síťově podmíněných přechodů vytvoří sledem spojů ucelené řetězce (řetězec je ukončen až v místě a čase, kdy je z hlediska přechodu vozidla v uzlu možná rovnocenná kombinace – tj. nevzniká síťově podmíněný přechod)
- 4) jednotlivé řetězce se ohodnotí svou kilometrickou (pro případy provozního ošetření, či tankování), anebo časovou (pro případy personálního nasazení a dodržení přestávek) délkou
- 5) následuje spojování řetězců do ucelených oběhů (v případě vozidel), anebo turnusů (v případě personálu)
- 6) pokud dojde k tomu, že nějaký řetězec přesahuje na počátku stanovenou mez (v proběhu či časové délce), pak je zřejmé, že je nezbytné nasazení dalšího vozidla / personálu, čímž se opět rozšíří kombinační možnosti

Tento postup je shodně využitelný pro tvorbu oběhů vozidel na silnici i železnici, jakož i pro tvorbu personálních turnusů. Postup sám o sobě nezaručuje vytvoření optimálního návrhu (z hlediska rovnoměrného běhu vozidel, či optimálního využití personálu), zaručuje však, že bude nasazen pouze minimální počet vozidel (resp. personálu) při dodržení okrajových podmínek. Hranice počtu vozidel při aplikaci tohoto postupu leží při ručním zpracování na hodnotě přibližně 30 vozidel, což ze zkušenosti vede obvykle k nutnosti kombinace cca 60-150 řetězců.

Výše uvedená metoda, zrovna tak jako i ostatní optimalizační metody na tvorbu oběhů vozidel považují jízdní řád za pevně daný, resp. stabilní v tom smyslu, že naplánované přechody vozidel a personálu budou spolehlivě fungovat. Zejména v případě intenzivního a vysoce produktivního využívání vozidel nemusí být tento předpoklad samozřejmý.

Vznikl tak optimalizační postup, který vyhledává takové přechody vozidel a personálu, aby byla provozní koncepce při případných vnějších rušeních a provozních nepravidlostech co nejspolehlivější (Liebchen, 2008). Následně byla popsána i metoda, která hledá na pevně daných taktových uzlech maximální robustnost jízdního řádu tak, aby využití vozidel v provozní koncepci mohlo být co nejvyšší a zároveň spolehlivé (Caimi a kol., 2017).

5.3. Interakce mezi poptávkou a provozní koncepcí

Všechny dosud uvedené kapitoly se týkaly v zásadě nabídkové stránky provozních koncepcí – jak zjistit poptávku po přepravě, jak na danou strukturu poptávky utvořit co nejvhodnější provozní koncepci, jak tuto koncepci vozebně a personálně zajistit, a tvoří tak nezbytné výchozí teoretické penzum informací. Vyjasnění přístupu k provozně-ekonomickým otázkám je klíčové pro ozřejmění vlastního postupu při hledání řešení, zejména v oblasti rozvržení linek v síti a pojetí jejich struktury.

Náklady spojené s vozidly (odpisy, údržba), personální náklady (mzdy, odvody) a náklady na trakci (pohonné hmoty, energie) tvoří v českém prostředí celkově obvykle více než dvě třetiny celkových nákladů spojených s dopravním výkonem (Baudyš, Janoš, 2013). Při návrhu většiny reálných provozních koncepcí se tak již od počátku uplatňuje snaha o maximální provozní efektivitu. Při návrhu linkové sítě se tak již v počátečních kombinacích spojují úseky obsluhované sítě do linek tak, aby jednotlivé linky byly provozně vyvážené s ohledem na potřebnou kapacitu vozidla, a spojují se vozební ramena tak, aby délka obsluhovaných hran předurčovala takovou dobu oběhu vozidla, která se maximálně bude blížit celonásobné délce intervalu obslužnosti na lince (Janoš, Kříž, 2018a).

Tyto neformální postupy zpravidla vedou bez dalších optimalizačních kroků k vysokému vytížení vozidel i personálu.

Jakmile je dopravní plán zaveden do provozu, je třeba jej pravidelně vyhodnocovat, a to zejména z pohledu:

- vývoje počtu cestujících a jejich spokojenosti
- obsazenosti vozidel
- ekonomického dopadu
- výsledného dopadu na modal split

Kromě ekonomických analýz je vhodné využít přepravních průzkumů, dotazníků spokojenosti cestujících apod.

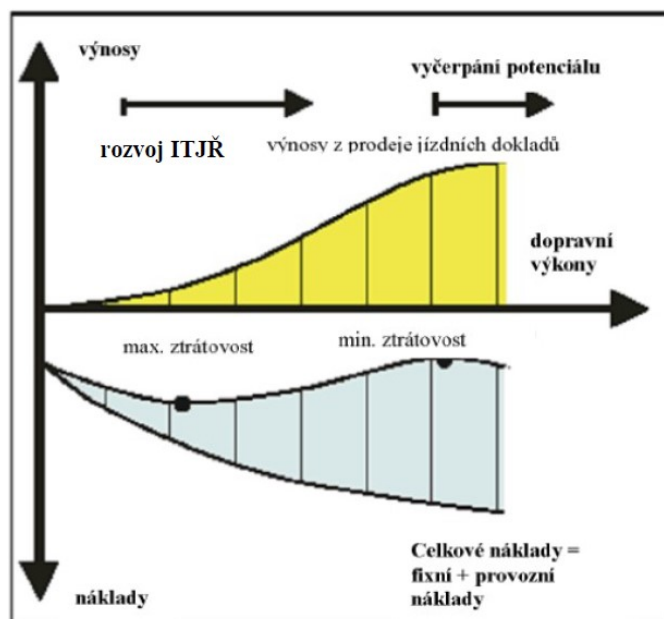
Sledovaná kritéria se obvykle liší podle toho, zda se jedná o dopravní službu, která je realizována v rámci veřejného zájmu, anebo ryze komerčně v open-access režimu.

Existuje totiž přirozený střet mezi komerčním zájmem dopravce (optimalizovat load factor a tržby svých produktů) a veřejným zájmem objednatele dopravy (nalézt systémové optimum na řešené síti a zvyšování modal split veřejné dopravy). Veřejný zájem tak následně vyústí ve smlouvu o veřejné službě.

V případě veřejné dopravy v rámci PSO je samotný efekt veřejné dopravy vždy přímo srovnáván s provozní ztrátou, resp. nároky dopravců na výši kompenzací. Pro objednatele dopravy je tak vždy zajímavým ukazatelem rentabilita systému (Schiewe, 2018). V praxi se velmi často stává, že i přes hojné využívání nabízeného systému cestujícími, vzniká tlak na optimalizaci systému, čímž se obvykle zcela mylně rozumí snížení kompenzačních plateb a následné omezování spojů. Těmito opatřeními vzrůstá podíl fixních nákladů systému a výsledkem takové optimalizace je následně snížení rentability systému jako celku.

V případě aplikace komerčního jízdního řádu jsou zpravidla pokryty především přepravní špičky, což jasně determinuje počet nutných náležitostí, které jsou následně během dne nerovnoměrně využity. Komerční jízdní řád znamená v našich podmínkách téměř vždy menší rozsah výkonů než taktový jízdní řád a jeho zajištění je tak spjato s relativně vysokým podílem fixních nákladů. Jednotka dopravního výkonu (na železnici *v/km*) je tak následně vzhledem k rentabilitě systému obvykle velmi drahá.

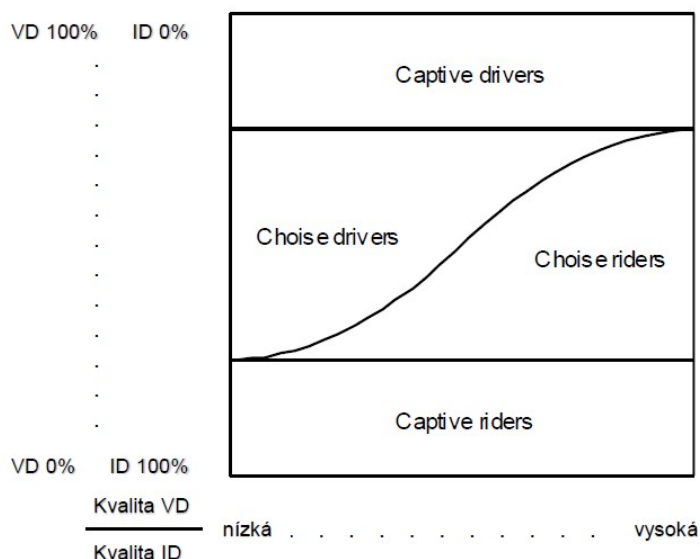
Při přechodu z komerčního jízdního řádu na taktový se v počáteční fázi náležitosti potřebné pro zajištění přepravní špičky v jednotném intervalu nasadí po celou dobu provozní periody. Klesá tak relativní ztráta na jednotku výkonu, a to i přesto, že variabilní náklady rostou (Bär, 1999). Zvyšující se nabídka vede k progresivnímu nárůstu počtu přepravených cestujících a tím i k příznivějšímu vývoji tržeb.



Obr. 5.1.: Kompenzace v závislosti na rozvoji taktového jízdního řádu (zdroj: Stohler, 1994)

Tento vývoj v provozních koncepcích s vysokou mírou systematizace není překvapivý. S ohledem na poměrně nízký modal split veřejné dopravy je velká část cest realizována jinými způsoby a existuje tak velký potenciál převodu cest do veřejné dopravy.

Čím atraktivnější je nabídka spojení veřejnou dopravou, tím spíše ji využijí i ti cestující, kteří jsou svobodní ve své volbě dopravního prostředku (držitelé řidičského průkazu a vlastníci osobního automobilu – označování jako *captive drivers* a *choice drivers*) a nikoli pouze ti, kteří nemají jinou možnost (např. školní mládež – *captive riders*). Skupina *choice drivers* představuje takovou skupinu uživatelů dopravního systému, která se rozhoduje téměř výhradně racionálně při volbě dopravního prostředku – právě v této skupině leží potenciál pro navýšení dělby přepravní práce – z *choice drivers* (řidičů z vlastní vůle) lze systémem kvalitní veřejné dopravy udělat *choice riders* - dobrovolné cestující / uživatele veřejné dopravy (Weidmann, 2008).



Obr. 5.2. Atraktivita veřejné dopravy pro choice riders (zdroj: Weidmann, 2008)

Nárůst cestujících byl po zvýšení systematizace nabídky a zavedení ITJŘ zaznamenán nejen ve Švýcarsku, Rakousku a Německu, ale i v ČR (Janoš a kol., 2009) a Velké Británii (Wardman a kol., 2004). Pokud se nově systematizovaná nabídka zavede zároveň na nové, časově konkurenceschopné infrastrukturu, jsou pak nárůsty cestujících velmi vysoké, a to např. i v Itálii, kde systematizovaná nabídka v podobě ITJŘ rozhodně nemá dlouhou tradici (Bacares a kol., 2019).

5.3.1. Vliv variace poptávky na tvorbu provozní koncepce ITJŘ

V předchozích kapitolách bylo uvedeno, že modal split je ovlivňován i mnoha atributy nabídky, jako např. četností spojů. Při plánování provozních koncepcí veřejné dopravy je nutno vyřešit problém variace poptávky (denní, týdenní, roční).

Na straně jedné vyvstává otázka, jak v přepravních špičkách nepřicházet o cestující sníženou kvalitou přepravního komfortu, neboť veřejná doprava v rámci PSO je postavena na neodmítnutí cestujících, na straně druhé je zde otázka dimenzování přepravních kapacit, přípustnosti přepravy stojících cestujících a zároveň nákladů na řešení přepravních špiček. Tento problém odpadá v případě komerčních služeb, které variace zpravidla neřeší, a nabídku (kapacitu spojů, velikost vozidel) dimenzují na sedlovou (anebo lehce zvýšenou) poptávku, přičemž oblasti špiček řeší zpravidla místenkováním, případně vyšší cenou za přepravu.

Z rozložení zdrojů a cílů cest v každé oblasti vyplývají určité hlavní přepravní směry a vymezují se tak i spádové oblasti. Je zřejmé, že na okrajích spádových oblastí dochází k časovému posunutí přepravní špičky nebo aspoň jejímu rozložení.

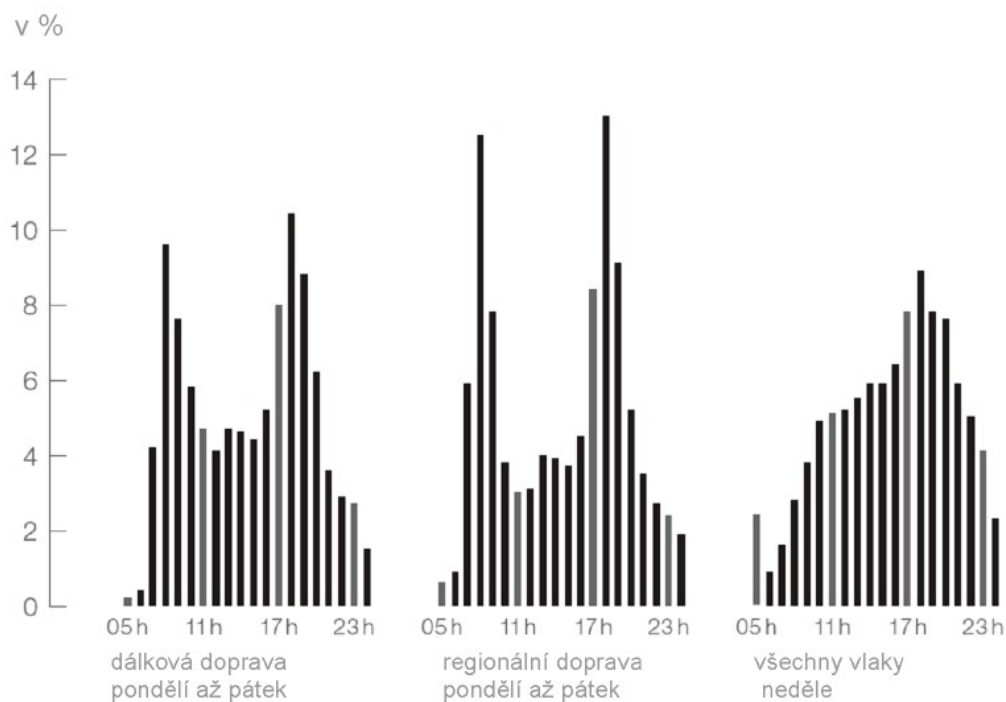
Na otázky variace poptávky přirozeně reaguje odlišnou strukturou nabídky komerční jízdní řád a odlišnou strukturou jízdního řádu taktového.

V rámci komerčního jízdního řádu jsou zpravidla období špiček pokryta samostatnými spoji, které jsou vedeny přesně v časově ohraničeném prostoru větší poptávky – například spoje vedené pouze v pracovní dny, dny školního vyučování, pouze v pátek či neděli, pouze v letní či zimní sezóně apod.

V taktovém jízdním řádu je přístup k přepravním špičkám odlišný. Samotné zavedení taktového jízdního řádu prokazatelně přispívá ke „zjemnění“ přepravních špiček, což znamená, že kumulované přepravní požadavky se částečně v čase rozprostřou (resp. období špiček se prodlouží a odpadnou extrémní hodnoty), avšak nikdy nedojde k takovému rozprostření poptávky, aby bylo možné vlivy poptávkových variací zanedbat.

V níže uvedených třech grafech jsou znázorněny denní variace v regionální a dálkové dopravě tak, jak byly zjištěny při sčítání cestujících u SBB a představují procentní podíly cestujících za hodinu, zjištěné ve stanici Zürich HB jako průměrné hodnoty za rok 2005 (SBB, 2005).

Počet cestujících v průběhu dne



Obr. 5.3. Denní variace ve stanici Zürich HBf v roce 2005 (zdroj: SBB, 2005)

Způsoby řešení variace poptávky se liší v dálkové a regionální dopravě. I v případech, kdy dálková doprava mimo cest náhodných a nepravidelných pokrývá relace s pravidelnou denní a týdenní dojížděkou, pak rozdíl mezi poptávkou v přepravním sedle a v přepravní špičce nedosahuje tak velkých rozdílů, jako je tomu v regionální dopravě. V dálkové dopravě je běžné, že přepravní poptávka ve špičce dosahuje dvojnásobku či maximálně trojnásobku sedlové poptávky. Je to způsobeno právě kombinací různých typů realizovaných cest a jejich podílem na příslušné lince v příslušné relaci (Janoš, Baudyš, 2014). I v případě, kdy je dálková doprava předmětem PSO a minimální přepravní kvalitativní standardy určuje objednatel, zabývá se řízením přepravní kapacity dopravce. Například „kritérium komfortu“ u SBB stanoví, že pro všechny spoje dálkové dopravy na síti by mělo platit, že nabízená přepravní kapacita míst k sezení, určená podle sčítání za jednotlivé dny v týdnu, by měla být využita z 80% ve 2. vozové třídě a z 50% v 1. vozové třídě (Weidmann, 2001). Tím je zajištěn dostatečný přepravní komfort i v případech náhlých poptávkových výkyvů, nehlášených přeprav skupin cestujících apod.

V regionální dopravě je rozdíl mezi přepravním sedlem a přepravní špičkou podstatně větší a není problém objevit i pětinasobné rozdíly. Cílově zaměřený průzkum v regionální dopravě v ČR ukázal i směrové rozložení v přepravním sedle a špičce, kdy ve směru „do

centra“ bylo realizováno v ostré ranní špičce 67% ze všech celodenních cest v daném směru (Metelka, Janoš, 2021). V regionální dopravě se tak v rámci stanovení kvalitativních kritérií běžně určuje, po jakou dobu smí být využita místa k stání a v jakém počtu či podílu, kdy rozhodovacím kritériem je cestovní doba i délka linky. Je zřejmé, že tento přístup znamená snížení přepravního komfortu a vede k paradoxu, že zatímco průměrná obsazenost spojů regionální dopravy se pohybuje mezi 20-40%, tak naprostá většina cestujících cestuje plnými až přeplněnými spoji (Weidmann, 2008).

Existují tři základní způsoby, jak lze v systematizovaném ITJŘ reagovat na pravidelné variace poptávky.

- 1) Proměnlivost nabízené přepravní kapacity. Nejčastěji používaným způsobem je posilování standardně řazených souprav v období přepravních špiček. Nevýhodou tohoto řešení je skutečnost, že výpočet jízdní doby pro základní taktovou trasu musí následně zohledňovat tato krátkodobá posílení a vliv poptávkových variací se tak promítá do všech spojů jedné linky a tedy do cestovních dob všech cestujících. Posilování kapacit má své meze. Jednu mez tvoří již zmíněná dynamika jízdy, kdy např. u SBB je obvyklé, že spoje vedené klasickými soupravami se v případě posílených kapacit vedou elektrickými lokomotivami ve dvojité trakci, čímž se uvedený problém částečně eliminuje, avšak např. v české praxi tento přístup obvyklý není. Druhou mez představuje délka nástupišť. Například v pražské příměstské dopravě je s ohledem na délku nástupišť možné jednotky 471 nejvýše zdvojit.
- 2) Zavádění vložených účelových spojů nad rámec základní taktové struktury. Tyto spoje mohou mít podobu účelové trasy „na míru“, která může nabídnout např. přímé spojení v relaci, kde pravidelně v rámci linkového vedení v ITJŘ zajištěno není, nebo využívají volnou trasu jiné linky, která v daném období nejede (typicky brzká ranní přepravní špička, kdy ještě nedojíždí všechny linky dálkové dopravy, eventuelně periodická trasa nákladní dopravy) anebo se jedná o trasu která půlí základní takt příslušné linky. Podvariantou zavádění účelových tras je situace v pásmovém jízdním řádu, kdy lze buď v přepravní špičce pásmovou stanicí posunout, anebo pásmový jízdní řád aplikovat pouze v přepravních špičkách. Částečně se tak využívá tras existujících, přičemž i vložené trasy vykazují systematizaci. V případě dodatečných tras v přepravních špičkách je velmi důležité věnovat zvýšenou pozornost stabilní konstrukci jednotlivých tras, aby nedošlo k řetězovému šíření zpoždění (Caimi, 2009). V případě využívání periodických tras alokovaných pro nákladní dopravu vzniká riziko, že tyto trasy nakonec nebudou k dispozici po větší část dne a je pak následně nezbytné provést novou kapacitní

analýzu a nový přiděl tras (Drábek, Janoš, 2021). Všechny popsané možnosti ve srovnání s prvním přístupem sice umožňují konstrukci základních taktových tras na standardně řazené soupravy (bez špičkového posílení), nicméně generují vyšší provozní náklady (dodatečné náležitosti, personální náklady aj.).

- 3) Využití obratových časů náležitostí. Provozně elegantním řešením, jak posílit období přepravní špičky bez nárůstu náležitostí, je vzájemné využití obratových časů náležitostí ve vratných stanicích jednotlivých linek. Např. 30-minutový obratový čas lze využít krátkým výjezdem náležitosti do frekvenčně nejzatíženějšího úseku, posílit takto základní taktový systém jiné linky v části její trasy a opět náležitost vrátit buď do původního obratu, nebo ji vzájemnou kombinací použít na přechod do jiné linky. Zrovna tak je možné vloženým spojem „prohodit“ náležitosti mezi linkami, využívat odlišné zastavovací koncepce v jednotlivých směrech, případně využívat jednosměrných prázdných přejezdů vozidel po nejkratších trasách (Janoš, Kříž, 2018a). Toto řešení má sice jednoznačně nejnižší náklady v oblasti náležitostí, nicméně oproti předchozím řešením rostou některé provozní náklady (variabilní náklady spojené s rozsahem dopravního výkonu). Toto kombinační řešení lze navíc použít jen tehdy, když v oblasti s vyšší poptávkovou variací existuje nějaká linka, jejíž náležitosti mají základní obratový čas natolik dlouhý, aby toto řešení bylo vůbec technologicky možné. Slabou stránkou tohoto řešení je snižování stability oběhů náležitostí v přepravních špičkách, kdy malé časové rezervy v přechodech náležitostí mohou způsobit nestabilitu celé sítě (Huisman a kol., 2005).

Nutnost reakce ITJŘ na variace poptávky nikterak nesnižuje vhodnost provozní koncepce založené na ITJŘ na sítích obsluhujících polycentrické osídlení. Jedná se o dílčí problém, který je různou měrou společný všem typům jízdního řádu.

6. Návrh postupu pro tvorbu provozní koncepce

6.1. Možnosti uplatnění

V této části bude představen autorův sumarizovaný empirický postup, který využívá znalosti, metody, postupy a dopravně-plánovací principy uvedené v předchozích kapitolách a zároveň navazuje na autorovu metodu uvedenou v kapitole 3.5.4, přičemž tímto postupem lze řešit i problematiku návrhu vícesegmentové obslužnosti malých sítí. Nejedná se o optimalizační metodu, neboť celá řada vstupů se v průběhu řešení proměňuje anebo jsou pohyblivé. Při návrhu a tvorbě provozních koncepcí jsou vstupy vzájemně provázány a vzájemně se v průběhu řešení ovlivňují – to je i důvodem, proč celá řada dopravních plánovačů řeší úlohy tohoto typu převážně intuitivně a nevyužívá matematický aparát optimalizačních úloh, kterým lze dílčí úlohy řešit.

Postup slouží k upřesnění koncepčního plánu v krátkodobém plánovacím výhledu (tj. v horizontu do 5 let) jako podklad určující podobu nabídky dopravní obslužnosti pro technologickou sestavu provozní koncepce. Předpokladem je, že rychlostní parametry infrastruktury jsou dány zrovna tak jako parametry vozidel (výkon, maximální rychlost) a nelze je v průběhu řešení měnit, tj. postup řeší tvorbu nabídky s danými podmínkami.

Postup je založen na upřednostnění růstu modal split, avšak nikoli bezvýhradně, neboť rozsah dopravního výkonu je druhotný parametr, který je na poptávkově stanovených segmentech v postupu sledován. Postup tvorby provozní koncepce je založen na principu preference přímých relací a samostatných linek, přičemž následně se linkový koncept skládá do síťově provázané podoby ITJŘ.

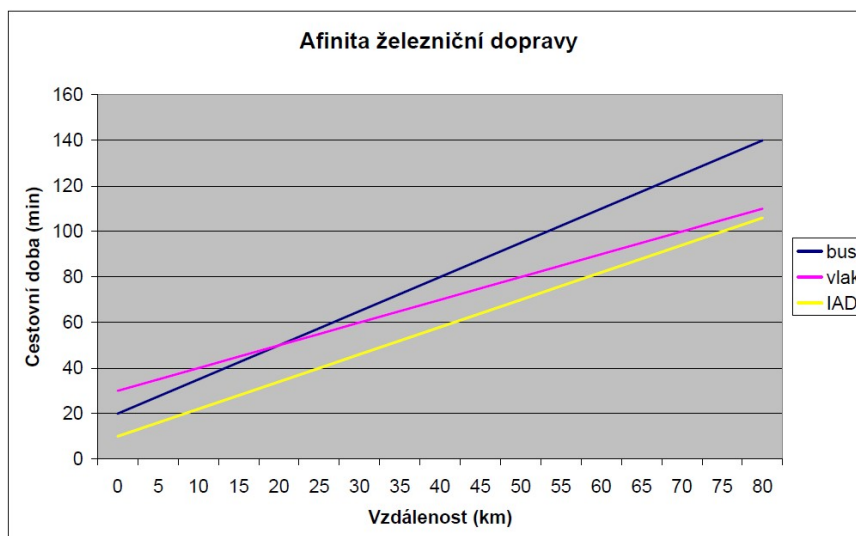
Jelikož se jedná o „ruční“ postup bez softwarové algoritmizace, je nezbytné síť ohraničit tak, aby se počet zdrojů / cílů cest pohyboval řádově v nižších desítkách, tj. např. krajská města a ostatní dojížděkové regiony v případě řešení dálkové dopravy, nebo např. ORP v rámci kraje při řešení páteřní krajské sítě veřejné dopravy, anebo např. sídla s určitým počtem obyvatel při řešení regionální dopravní obslužnosti v rámci okresu, anebo zastávky s určitým přepravním potenciálem, anebo obratem cestujících při řešení sítě MHD.

Postup se zaměřuje na uspořádání provozní koncepce v těch oblastech, kde je z pohledu volby typu jízdního řádu pro zajištění dopravní obslužnosti vhodný model ITJŘ (Rey, 2007).

V rámci postupu se zavádí pojem „indikativní přepravní výkon sítě“ (IPVS), který je vyjádřen jako podíl mezi teoretickými přepravními proudy a navrženým dopravním výkonem jednotlivých linek v jedné periodě taktu sítě a představuje tak základní ohodnocení sítě linek. Hodnocení přepravního výkonu sítě je založeno na skutečnosti, že

předmětem představeného postupu není dobrat se finální podoby jízdního řádu v rámci celého občanského dne, ale vytvořit základ provozní koncepce, tj. koncepční základ pro řešení návrhu jízdního řádu v jedné taktové periodě. Tak jak je IPVS formulován, je v této plánovací úrovni zcela lhostejné, zda se ukazatel vztahuje na taktovou periodu anebo na občanský den, protože na řešení samotné to nemá žádný vliv. Teoretické přepravní proudy na lince jsou však v průběhu řešení proměnlivé podle toho, jaké všechny body linka obsluhuje a jak se tedy v jednotlivých relacích prodlužuje či zkracuje cestovní doba. Za účelem vyjádření vazby cestovní doby a modal split je využita metodika ČVUT vytvořená v rámci projektu vědy a výzkumu (FD ČVUT, Telematix, 2010).

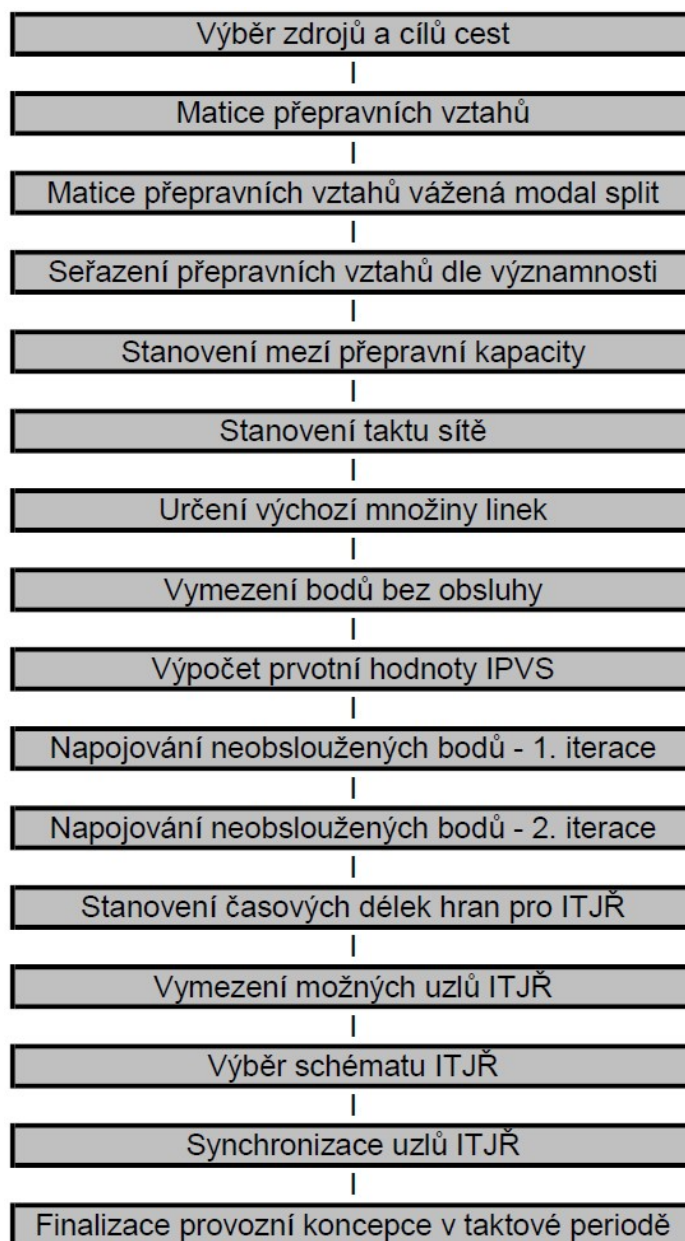
V rámci modální volby postup nijak neřeší systémovou relevanci (Wardman, 2004), tj. vhodnost daného dopravního módu z hlediska přepravní výkonnosti daného dopravního módu pro danou linku, avšak tím, že je jako hlavní parametr sledován dosahovaný modal split, má zásadní vliv cestovní doba, u které se vždy hledá nejkratší dosažitelná hodnota. Pro jednotlivé relace se tak zohledňuje tzv. afinita veřejné dopravy (Prinz a kol., 2011), což je systémová vlastnost vyjadřující vhodnost použití jednotlivých druhů dopravy v závislosti na cestovní rychlosti, přičemž hodnoty průměrných cestovních rychlostí jednotlivých druhů dopravy a hodnoty dostupnosti zastávky si stanoví řešitel sám podle reálné situace.



Obr. 6.1. Afinita železniční dopravy v regionální dopravě – příklad (zdroj: autor)

Postup pracuje s předpokladem, že všechny určené zdroje / cíle cest je zapotřebí obsloužit – tento předpoklad vychází z české praxe, kdy autorovi není znám žádný případ, že by se objednatel dopravy rozhodl neobsluhovat nějaký relevantní zájmový dopravní bod s odůvodněním, že zajištění jeho dopravní obslužnosti je „příliš drahé“. Tímto nejsou míněny případy, kdy jsou některá sídla ponechána bez dopravní obslužnosti na základě standardů dopravy např. podle počtu obyvatel nebo frekvence cestujících.

6.2. Jednotlivé kroky postupu



Obr. 6.2. Schematické znázornění posloupnosti jednotlivých kroků (zdroj: autor)

Níže jsou představeny jednotlivé kroky autorova iterativního postupu:

(Nejedná se o úlohu řešenou aparátem teorie grafů, tj. nejsou určena žádná pravidla pro počty a vlastnosti hran a uzlů. Obvyklým podkladem je mapový podklad s topologií dopravní sítě, na které je úloha řešena).

1) Definování řešené sítě, výběr zdrojů a cílů cest

Jelikož se jedná o „ruční“ postup bez softwarové algoritmizace, je nezbytné síť ohraničit tak, aby se počet zdrojů / cílů cest pohyboval řádově v nižších desítkách. Pro každý zdroj / cíl je definován přepravní potenciál.

2) Sestava matice přepravních vztahů v řešené síti

Pokud neexistuje kalibrovaný dopravní model, na jehož základě by bylo možné matici přepravních vztahů napříč všemi druhy dopravy vytvořit, jedná se o „expertní kompilaci“ disponibilních údajů ze SDLB, údajů o hybnosti obyvatelstva a gravitačního modelu. V současné době se jedná o obvyklý přístup k řešení dopravně-plánovacích úloh v ČR, neboť absence kvalitních dopravních modelů jiný přístup ani neumožňuje.

3) Zohlednění řešených dopravních módů, přepočet maximálních dosažitelných hodnot přepravních proudů v matici podle teoreticky nejkratších cestovních dob

Jedná se fakticky o vážení hodnot v matici přepravních vztahů přes ideálně dosažitelný modal split. Stanoví se tak horní hranice dosažitelné přepravní poptávky.

4) Seřazení přepravních vztahů dle významnosti

Přepravní vztahy vážené přes ideálně dosažitelný modal split tvoří pořadí priorit, podle kterých se následně v koncepčním návrhu sestupně postupuje.

5) Stanovení dolní a horní meze přepravní kapacity

Pro každou řešenou úlohu je stanovení mezí velmi významným krokem, protože se tímto v kombinaci s taktem sítě předurčuje podoba obslužných segmentů; meze přepravních kapacit tak mohou vycházet z ryze praktických omezení konkrétními disponibilními anebo plánovanými vozidly, např. minimální nabízená přepravní kapacita je tvořena autobusem délky 8,5 m nebo motorovým vozem DMU120, zrovna tak horní mez může vycházet např. z délky nástupiště, tj. např. souprava o délce 12 vozů. Při stanovení mezí je nutné již zohlednit i součinitel využití přepravní kapacity vozidla (viz kapitola 3.1.), který se bude lišit s ohledem na charakter řešené sítě – MHD / regionální doprava / dálková doprava a variaci poptávky.

6) Stanovení taktu sítě

Stanovení taktu sítě určuje společnou hodnotu doby taktu všech linek na řešené síti, od které se bude odvíjet stanovení taktových uzlů a potřebné délky SJD; zároveň takt sítě předurčuje, jakým způsobem lze koncepčně nakládat s prostorovým souběhem linek v určité části sítě – zda se bude jednat o časový proklad půlící základní takt, anebo zda se může jednat o polohu neurčenou dalšími vazbami / technologicky možnou, anebo zda lze příslušný prostorový souběh využít pro segmentaci v příslušném úseku; zároveň, takt sítě je určující pro řešení těch relací, kde je s ohledem na poptávku takt sítě příliš dlouhý – tj. zda vložené spoje budou / nebudou v kontextu ostatní nabídky systematizovány, zda se bude jednat o spoje posilové, účelové apod.

7) Určení výchozí množiny linek

Podle stanoveného taktu sítě, přepravních vztahů v jednotlivých relacích a dolní meze přepravní kapacity je vypočteno, jaké relace jsou poptávkově relevantní pro samostatnou linku spojující dva body ve smyslu zdroj – cíl (každý zdroj / cíl cest tak představuje uzel, ve kterém mohou linky začínat, končit, anebo uzlem procházet).

8) Vymezení bodů na síti bez obsluhy

Všechny body / uzly, které na základě předchozího kroku zůstaly nenapojeny ve smyslu jakékoli linky zdroj – cíl, jsou ponechány pro další řešení, přičemž na konci postupu nesmí v rámci sítě zůstat žádný bod (zdroj / cíl) neobsloužený (resp. nenapojený na nějakou linku).

9) Výpočet vstupního indikativního přepravního výkonu sítě

Zavádí se pojem „indikativní přepravní výkon sítě“ (IPVS), který je vyjádřen jako podíl mezi teoretickými přepravními proudy a navrženým dopravním výkonem jednotlivých linek v jedné periodě taktu sítě; jedná se tak o základní ohodnocení celé řešené sítě linek; hodnocení přepravního výkonu sítě je založeno na tom, že předmětem představeného postupu není dobrat se finální podoby jízdního řádu v rámci celého občanského dne, ale vytvořit základ provozní koncepce, tj. koncepční základ pro řešení návrhu jízdního řádu v jedné taktové periodě; (IPVS je číselná hodnota, kterou se v následujících krocích sleduje zlepšení / zhoršení navrženého řešení).

10) Napojování neobsloužených bodů na síť linek – 1. iterace

Jedná se o iterativní proces, kdy je pro každý neobsloužený bod vybrána varianta obsluhy některou z již zavedených linek formou dodatečného zastavení, závlekem trasy linky nebo prodloužením linky a to tak, že snahou je dosáhnout co nejmenší ztrátu IPVS. Prodloužení cestovní doby v existující relaci znamená dle bodu 3 snížení modal split, tj. dojde k úpravě hodnot v matici přepravních vztahů – za tímto účelem je vhodné postupovat při doplňování dodatečné obsluhy tak, že jsou přednostně prověřovány přepravně nejslabší linky, avšak ve směru s největší poptávkou z přidávaného bodu - sleduje se tak přednostně řešení, kdy snahou je poškodit co nejmenší přepravní proud a zároveň, v nově zajištěné relaci zajistit řešení, kdy nejsilnější přepravní vztah je realizován bez přestupu (zároveň je při přidávání bodů nezbytné sledovat, aby nedošlo k překročení horní meze přepravní kapacity – řešení které vede k překročení horní meze přepravní kapacity je vyloučeno a dále již není prověřováno). Existuje-li více možností řešení, jak neobsloužený bod na síť linek napojit, pak je nutné všechny varianty prověřit a vybrat takovou, kde dojde k největšímu nárůstu IPVS. Pro napojování bodů ve smyslu přidávání zastavení lze využít autorův postup prezentovaný v kapitole 3.5.4. Pokud neexistuje řešení, které by vedlo k nárůstu IPVS, pak se takový bod na síť linek v tomto kroku nenapojí (a pro další řešení se zaznamená zhoršení IPVS).

11) Napojování neobsloužených bodů na síť linek – 2. iterace

Zatímco výsledkem 1. iterace by měla být síť linek s nejvyšším dosažitelným IPVS, tak každý další přidání bod v tomto kroku ukazatel IPVS již jen sníží (= zhorší); jedná se o „socializační“ krok, neboť na jedné straně je úkolem řešení obsloužit všechny body v řešené síti, avšak na druhé straně ne každá dodatečná obsluha znamená zvýšení IPVS). V tomto kroku tak pracujeme již jen s body, jejichž zařazení do sítě znamená vždy jen zhoršení IPVS, přičemž z předchozího kroku je nám známa hodnota zhoršení pro každý takový bod. Před zařazením těchto bodů do sítě se nezařazené body roztřídí do skupin podle nejsilnější směrové spádovosti – tj. body s největším přepravním proudem vůči stejnému zdroji / cíli budou zařazeny do stejné skupiny, pro každou skupinu se vytvoří samostatná linka která dané body propojí s příslušným nejsilnějším zdrojem / cílem; následně se přepočítá IPVS a srovná se zhoršení IPVS ve variantě s novou linkou, oproti variantě, kdy by se jednotlivé body přidaly se zhoršením IPVS dle kroku 10. Při přepočtu variant se zohlední i varianta, ve které by se nově zaváděná linka, zřízovaná kvůli obsluze

dosud neobsloužených bodů, využila i pro obsluhu některého /některých z bodů, které byly přidávány v kroku 10 – v takovém případě by iterace vedla k vícesegmentové obsluze v příslušné přepravní ose. Opakují se tak kroky 8 – 11 až do úplného napojení všech bodů na síť linek.

12) Stanovení časových délek hran pro ITJŘ

Ukotvená obsluha jednotlivých bodů (zdrojů / cílů cest) ve stabilizovaném linkovém vedení umožňuje výpočet jízdních dob mezi jednotlivými body na linkách a vzniknou tak konstrukční možnosti, které body se mohou stát uzly ve smyslu ITJŘ (při výpočtech jízdních dob je v této fázi nezbytné pracovat s nadprůměrně vysokými přírážkami k jízdním dobám – např. ve výši 10%, neboť je nezbytné ponechat určitý prostor pro výslednou minutovou konstrukci jízdního řádu – vysoké přírážky v prvotní koncepční úvaze jsou základním předpokladem k tomu, aby se po zpracování dopravně-technologického detailu uvažovaná provozní koncepce nestala nerealizovatelnou - Walter, 2016).

13) Vymezení možných uzlů ITJŘ

Na základě stabilizovaného linkového vedení je zřejmé, jaké relace jsou obsluhovány přímo a jaké přímé spojení nemají, tj. bude nezbytné realizovat spojení s přestupem.

S ohledem na skutečnost, že s počtem přestupů razantně klesá atraktivita spojení (Hackney, Axhausen, 2004), jsou v postupu dále zohledňovány pouze relace, které vedou na spojení s jedním přestupem. Pro každý potenciální uzel ITJŘ je tak vytvořena tabulka možných přestupů s vyznačením příslušného přepravního proudu v dané relaci. Při určování uzlů ITJŘ se tak postupuje sestupně, od nejvýznamnějších přestupních přepravních proudů k nejméně významným. Rozdíl je přirozeně mezi potřebou stanovení úplného taktového uzlu ITJŘ a vedlejšího taktového ITJŘ, příp. pouze směrové vazby, podle toho, v jakých směrech probíhají dominující přepravní proudy. Častým výsledkem je, že jako vhodné uzly ITJŘ vycházejí ty body na síti, které samy o sobě nemají příliš významný zdroj / cílový potenciál. Na konci tohoto kroku je k dispozici několik málo variant uspořádání linkové sítě ukotvené do možných uzlů ITJŘ.

14) Výběr schématu ITJŘ

Pro počáteční výběr je uvažováno, že v každém uzlu ITJŘ mají všechny linky pobyt odpovídající alespoň minimální přestupní době v daném uzlu, tj. jednotlivé časové délky hran se navyšují do podoby možných SJD. U všech takto vzniklých variant se přepočítá IPVS. Pro další postup je vybráno řešení s nejvyšší hodnotou IPVS. Při přepočítávání hodnoty IPVS by nemělo být překvapující, že důsledkem napojování linek na uzly ITJŘ vznikají vlivem výše uvedených pobytů potřebných pro přestupy časové ztráty, které se příslušným způsobem projevují v IPVS.

15) Synchronizace uzlů ITJŘ

Před samotnou detailní technologickou konstrukcí je účelné časově synchronizovat jednotlivé linky v jednotlivých uzlech ITJŘ, aby bylo zřejmé, k jakému cíli má směřovat technologická konstrukce řešené taktové periody. Pro tento krok je nejjednodušší využít již některou z existujících metod pro optimalizaci síťové podmíněných čekacích dob (např. Nachtigall, 1998). V tomto kroku se tak zredukuje přestupní doby, které byly jako vstupní uvažovány v kroku 14.

16) Finalizace provozní koncepce v taktové periodě

V tomto závěrečném kroku postupu dochází ke konstrukci vzorových tras v jedné taktové periodě (resp. stanovené době taktu sítě), kdy je na základě časové synchronizace uzlů již zřejmé, jaké časové polohy jednotlivých linek mají být cílem konstrukce v jednotlivých uzlech ITJŘ. Pro dosažení požadovaných konstrukčních poloh je tak obvykle pro řešení technologických konfliktů nezbytné „spotřebovat“ nadměrné přírážky, které byly do návrhu řešení zapracovány v kroku 12 (pro systematizaci tras lze použít např. postup dle Opitz, 2009). Výsledkem je pak finalizovaná konstrukční perioda ITJŘ, která tvoří základ pro provozní koncepci a následný návrh jízdního řádu pro celou provozní periodu.

6.3. Obecné závěry pro tvorbu provozní koncepce

Zkušenosti autora plynoucí z řešených studií a projektů, které vyústily v představený postup, ukazují, že vysoká míra systematizace vede sice jednoznačně k vysoké uživatelské atraktivitě dopravních systémů, avšak v situaci, kdy systematizace není úplná (např. vlivem nestejného základního taktu sítě, chybějících spojení v rámci taktové linky, omezená stabilita systému a tedy i přestupních vazeb apod.), je zapotřebí kombinovat i nástroje komerčního jízdního řádu s ITJŘ (jako jsou např. účelová přímá spojení, nebo expresní vlaky typu „sprinter“), anebo prvky komerčního jízdního řádu používat jako nabídkovou nadstavbu k ucelenému systému ITJŘ.

Částečné doplňování systematické provozní koncepce na bázi ITJŘ prvky komerčního jízdního řádu v současné době již ani nesnižuje „přehlednost“ nabídky. Uživatelská přehlednost nabídky byla vždy prezentována jako jedna ze základních výhod ITJŘ, neboť cestující se díky jasně strukturované a přehledné nabídce snadno orientovali v jízdním řádu a takto koncipovanou nabídku si i snadno pamatovali. S rozvojem informačních technologií ubývá vyhledávání spojení v klasickém „papírovém“ jízdním řádu a spojení jsou vyhledávána pomocí aplikací. U cestující veřejnosti se tak velmi rychle vytrácí vnímání nabídky spojení v širším kontextu linek a přestupních vazeb, a zůstává orientace na vybraný spoj / množinu spojů či konkrétních spojení. Účelově doplňovaná nesystematizovaná nabídka spojení na základní rámec ITJŘ tak z uživatelského pohledu představuje „nalezené spojení“.

Mimo dodatečných účelových spojů, příp. i linek nad rámec ITJŘ lze využívat i další, méně obvyklé přístupy upravující provozní koncepci. Může se jednat např. o kombinaci přepravních funkcí linky (ve smyslu obslužného segmentu) v různých úsecích trasy. Zde lze jako příklady uvést některé linky dálkové dopravy v ČR.

Linka R15 Praha – Ústí n.L. – Cheb, kde se v úseku Praha – Ústí n.L. jedná funkčně o 1. přepravní segment (úroveň A2) a v úseku Ústí n.L. – Cheb o 2. přepravní segment (úroveň B2).

Dalším příkladem jsou linky Ex2 a R18 v úseku Praha – Olomouc, které byly z původního 2-segmentového uspořádání (Ex2 úroveň A2, R18 úroveň B1) v JŘ 2016/17 upraveny na rovnocenné z pohledu cestovní rychlosti – zatímco lince Ex2 byla přidána zastavení v úseku Česká Třebová – Olomouc (což prodloužilo cestovní dobu o 9 minut), tak lince R18 byla zastavení v témže úseku ubrána, což v kombinaci s ukončením vzájemné přestupní vazby Ex2/R18 v Olomouci vedlo ke zkrácení cestovní doby o 23 minut. Tím, že ani jedna z linek netvořila v úseku Praha – Olomouc ani nejvyšší, ani nejnižší přepravní segment, byla tato změna cílena primárně na cestující tranzitující přes uzel Olomouc a

v souhrnu došlo ke zkrácení cestovních dob pro velkou část relací a zároveň se zvýšil počet „akceptovatelně rychlých“ spojů mezi Prahou a Olomoucí.

Jiný přístup je reprezentován např. „střídavým zastavováním“, což v ČR zatím nikde aplikováno nebylo. Jedná se o stav, kdy velké množství linek obsluhuje v prostorovém souběhu nějaký úsek infrastruktury, zároveň je zapotřebí obsloužit nácestné stanice, avšak z pohledu poptávky není nezbytné zastavovat všude všemi spoji všech linek. Nácestná zastavení se tak „rozdělí“ mezi více linek. V daném přepravním segmentu pak sice nejsou možná vzájemná spojení menších stanic, avšak většina linek si udrží vysokou přepravní rychlost ve smyslu zdroj-cíl, neboť počet přidávaných zastavení je relativně malý, a navíc dochází ke kapacitnímu benefitu, protože takto upravené trasy vlaků jednotlivých linek vykazují větší homogenitu tras, než by tomu bylo v běžném vícesegmentovém uspořádání. Příkladem mohou být dálkové linky vysokorychlostních vlaků v Číně na trati Peking – Šanghaj (Schumann, 2018).

Na základě celkového zhodnocení výše uvedených či obecně známých skutečností a získání přehledu o relativním významu jednotlivých přepravních relací v rámci řešené oblasti lze vyvodit následující závěry:

- v dálkové dopravě je nutné prioritně se zaměřit na vzájemná spojení významných aglomeračních oblastí a to s cílem dosažení co nejnižší cestovní doby
- v páteřní regionální dopravě je třeba prioritně sledovat rozvoj systémů příměstské dopravy a soustředit se na dosažení atraktivních cestovních dob a krátkých intervalů spojení v aglomeracích a spojení vymezených pravidelnou denní dojížděnkou
- regionální doprava (včetně páteřní) mimo aglomerace mezi méně významnými obvody navzájem vykazuje až na výjimky jen okrajový význam, kvalitní řešení tohoto přepravního segmentu je tak obvykle navrhováno s nejnižším stupněm priority. S ohledem na očekávatelné absolutní velikosti přepravních proudů je zde obvykle jen velmi obtížně obhajitelný interval kratší než 60 minut, a za těchto podmínek není při obvykle krátké jízdní době možné dosáhnout významného podílu na přepravní práci. Ztráta přepravních výkonů vlivem utlumení těchto relací, vyjádřená absolutně, se však nejvíce významná. Obhajitelnou přepravní funkci lze v takovýchto případech nalézt zejména tehdy, pokud taková spojení představují síťotvorný prvek v rámci prostorové dostupnosti území.
- s ohledem na požadavek co nejmenší ekonomické náročnosti systému veřejné dopravy je třeba sledovat také rovnoměrné vytížení vozidel. Následkem výše uvedených skutečností z hlediska relativního významu jednotlivých dopravních

segmentů je třeba aplikovat zásady tvorby dopravního systému s architekturou páteřních a obslužných spojení (linek). Není účelné snažit se maximalizovat počet přímých linkových spojení za každou cenu, je nezbytné rozlišovat jednotlivé případy podle přepravních funkcí jednotlivých linek.

- s ohledem na rozdílný časový průběh špiček přepravních potřeb v různých přepravních vztazích (podle intenzity, podle přepravní vzdálenosti, podle charakteru cest apod.) je klíčové za základní formu nabídky považovat provoz systematizovaných linek v průběhu celého občanského dne, což umožňuje nabízet výrazně vyšší četnost spojení v delších relacích průběžně po celý den napříč celou řešenou sítí. Doplnkově je možné jak nadstavbu systematizované nabídky používat i prvky komerčního jízdního řádu.

Při návrhu provozní koncepce, která vyžaduje systematizaci platí, že z čím vyšší plánovací úrovně je provozní koncepce navrhována, tím vyšší je dosažená míra systematizace, a zároveň tím méně jsou respektovány místně poptávané či vyžadované odchylky od taktových poloh, či přesné polohy uzlů ITJŘ. České prostředí je v evropském srovnání specifické třemi objednatelskými úrovněmi: stát – kraje – obce, což právě vysokou úroveň systematizace a provázání nabídky veřejné dopravy znesnadňuje.

7. Požadavky provozní koncepce na infrastrukturu

Proces dopravního plánování a tvorba provozní koncepce nekončí samotným uvedením provozní koncepce do provozu, ale pokračuje dále – sledováním a vyhodnocováním přepravních a provozních parametrů (Břečka a kol., 2010).

Každý dopravní systém postavený na nějakém konkrétním výchozím technologickém dopravním řešení (linková síť, jízdní řád, parametry vozidel, parametry infrastruktury) vykazuje pro své uživatele konkrétní užité vlastnosti v dostupnosti území. Při vyhodnocování funkčnosti dopravního systému, jeho rentability, dosahovaného modal split, spolehlivosti apod. je tak žádoucí vymezit i požadavky na úpravy infrastruktury, které umožní další kvalitativní zlepšování vlastností dopravního systému (Baudyš, Janoš, 2007b).

Jedním z hlavních významů cílených úprav infrastruktury dle potřeb ITJŘ je mimo dosažení SJD a zkracování cestovních dob i odstraňování příčin směrové asymetrie v ITJŘ, která může být způsobována např. absencí peronizace (nástupištní intervaly, nestejnost přestupních dob), konfigurací stanice (kolizními vlakovými cestami na zhlavích), odlišnými traťovými rychlostmi v jednotlivých směrech (např. různé rychlosti při jízdě do odbočky, odlišné rozhledové poměry na nezabezpečených přejezdech apod.) anebo i omezeními možností technologických úkonů.

V podmínkách České republiky je, bohužel, stále ještě běžné, že se zejména na železnici nejdříve vybuduje / modernizuje dopravní infrastruktura podle projektu, který sice obsahuje dopravní technologii, např. včetně návrhu taktových tras, které ale v síťovém kontextu ITJŘ nejsou uplatnitelné, ale teprve na skutečných parametrech hotové infrastruktury se hledá vhodná provozní koncepce. V případech, kdy je snahou modernizovat infrastrukturu na podmínky ITJŘ, je výsledkem velmi úsporný rozsah infrastruktury, který zpravidla připouští pouze jednu (modelovou) provozní koncepci, infrastruktura postrádá robustnost a je pak prakticky nemožné provozní koncepci změnit - např. v souvislosti s úpravami a zrychlením navazující sítě. Vzniká proto celá řada okrajových podmínek, které ztěžují či dokonce znemožňují optimalizaci provozní koncepce. Nedochozí tak pouze k „vnitřním konfliktům“ v rámci tvorby ITJŘ, ale i k problémům při určení vhodné pásmovací stanice při vícesegmentové obsluze (Vávra, Janoš, 2021), nebo kapacitním konfliktům mezi osobní dopravou obecně a nákladní dopravou (Drábek a kol., 2016). Ještě náročnější případ při koordinaci využití infrastruktury nastává tehdy, když se mimo požadavků osobní dopravy na ITJŘ a nákladní dopravy objeví ještě požadavky open-access služeb (Gašparík, Cempírek, 2019). V českém prostředí chybí detailní vazba mezi projektovou „mikroúrovň“ a síťovou koncepcí v celé své komplexitě tak, aby mohl být jízdní řád precizován v celém

kontextu napříč jednotlivými plánovacími úrovněmi (Ropelius, Schröder, 2018). V zemích, kde je dopravní plánování již dlouhodobě užíváno (např. Švýcarsko, Německo, Rakousko, Nizozemí) se do dopravní infrastruktury investuje téměř výhradně tak, aby vyhověla nejen konkrétním potřebám výhledových provozních koncepcí, ale zachovala si i potřebnou kapacitní rezervu a robustnost (Smoliner 2019). Tyto nároky nejsou patrné pouze „na trati“, ale i ve struktuře a konfiguraci uzlů, neboť vzájemná provázanost mezi úsekovou jízdní dobou a kapacitou uzlu výrazně ovlivňuje SJD (Heimerl a kol., 1997).

K odstranění uvedených problémů v české praxi měla přispět i povinnost tvorby plánů dopravní obslužnosti, kterou objednatelům dopravy ukládá zákon 194/2010 Sb. Jedním z výstupů plánů dopravní obslužnosti je formulace nároků objednatele dopravy na rozsah, funkčnost a parametry infrastruktury pro všechny uvažované tratě, neboť i malá bodová opatření mohou znamenat mnoho, při změně dělby přepravní práce. Popis musí být velmi podrobný a být rozdělen do čtyř základních částí:

1. rozsah úpravy včetně požadavku na případnou elektrizaci, požadovaná (maximální) traťová rychlost, požadované úsekové JD a SJD
2. místa křižování a požadavky na zdvojkolejnění tratí
3. požadavky na úpravy traťového zabezpečovacího zařízení
4. informace o zrušení obslužnosti některých stávajících nácestných zastávek a stanic, požadavky na nové nácestné zastávky a změny poloh zastávek
5. v autobusové dopravě požadavky na úpravy autobusových nádraží, řízení křižovatek, kruhové objezdy, vyhrazené pruhy, místa otáčení vozidel, místa odstavování vozidel

Přestože dnes stále ještě panuje rozšířený názor, že ke zkrácení cestovních dob je třeba upravit především tratě, tak časové úspory nutné k realizaci projektů ITJŘ jsou představovány celkovými úsporami v SJD, které obsahují nejen jízdní dobu mezi uzly, ale také poměrnou část přestupních dob v uzlech. Obecná nedostatečnost kvalitní infrastruktury omezuje tvorbu kvalitní přepravní nabídky (Dedík a kol., 2019).

Na již optimalizované či modernizované infrastruktuře (např. tranzitní koridory) je obtížné hledat další úspory v jízdních dobách. Zkušenosti zahraničních manažerů infrastruktury (SBB, ÖBB) plynoucí z praxe (Kummer a kol., 2007; Weidmann a kol., 2011; Smoliner a kol., 2018 b/c) hovoří jasně:

1 ušpořená minuta cestovní doby stojí

- při modernizaci tratě 120 – 150 mil. EUR – v těžkých terénních podmínkách nebo při modernizaci relativně nové tratě až 200 mil. EUR
- při optimalizaci a nasazení vozidel s naklápěním vozové skříňe 12 mil. EUR
- při optimalizaci uzlů ve smyslu opatření vedoucích ke zkrácení přestupních dob od 1 mil. EUR výše

Další zkracování jízdních dob na již optimalizovaných tratích je investičně velmi náročné, přičemž náklady rostou skokově. Proto je v mnoha případech vhodnější navrhovat v některých uzlech kratší přestupní doby podložené potřebou a vlastním návrhem pobytu určitých linek v uzlu v kratší přestupní vzdálenosti a tato zkrácení kompenzovat jinými časovými rezervami. Jedná se o přestupy hrana-hrana a pobytu na sousedních nástupištích. V některých uzlech je účelné vybudovat další příchody na nástupiště – jeden excentricky umístěný podchod nepředstavuje ideální stav. V kontextu se zahraničními zkušenostmi je třeba zdůraznit, že stavba podchodu je efektivnější než stavba rozsáhlé přeložky tratě. Kratších přestupních dob je možné dosáhnout také výrazně lepší informovaností cestujících. Je bezpodmínečně nutné zkvalitnit informační systémy ve stanicích. O možnostech přestupních vazeb je třeba informovat už ve vlaku (dálkové i regionální dopravy, případně návazné autobusové dopravy) a zlepšit možnosti orientace cestujících v přestupních uzlech. Je nutné zaměřit se i na jasné a pokud možno bezkolizní vedení proudů cestujících po stanici (Jacura, Týfa, 2012), nabídnout dostatečně široké koridory pro pěší a odstranit veškeré překážky (např. malé písmo na informačních tabulích zpomalující proud cestujících, fronty u bankomatů a stánků s občerstvením zasahující do hlavních pěších koridorů, klasické bariéry pro osoby se sníženou schopností orientace a pohybu – výškové rozdíly, rozhraní vozidlo – nástupiště, atp.).

Zkrácení SJD realizovaná mimo trať, tj. ve stanicích je možné i zvyšováním kapacity uzlů a propustnosti zhlaví, především možnostmi současných vjezdů a odjezdů, jakož i příjezdy a odjezdy vlaků nesníženou rychlostí umožněnou vhodnou konfigurací zhlaví.

Dalšími parametry rozhodujícími o délkách cestovních dob jsou provozní intervaly (staniční i traťové) a následná mezidobí. Obecně platí, že je třeba dosáhnout co nejmenších hodnot. Čím blíže po sobě mohou vlaky odjíždět a přijíždět, tím delší mohou mít jízdní dobu mezi dvěma uzly. Mezi častá opatření se tak řadí zkracování prostorových oddílů - a tedy zvyšování jejich počtu, přestavby zhlaví stanic (současné bezkolizní vjezdy / odjezdy) či modernizace zabezpečovacího zařízení vedoucí ke zkrácení provozních intervalů. V případě kolizních vjezdů do uzlů ITJŘ má značný vliv na délky SJD (pro všechny směry

do / z příslušného uzlu) možnost vjíždět na předjízdné koleje bez omezení aktuální rychlosti cílené k příslušnému místu zastavení nebo průjezdu. Investice do výhybek umožňujících jízdu do odbočky nesníženou rychlostí je v tomto kontextu mnohem významnější, než jak bývá obvykle vnímána.

Výše uvedené je tak možné rozřadit do principiálně cílených opatření, která lze rozdělit do základních skupin:

A. úprava infrastruktury konvenčních železničních tratí:

- modernizace resp. novostavby pro rychlost do 200 km/h
- optimalizace pro rychlost do 160 km/h
- uvedení do normového stavu se zavedením rychlostních profilů pro vyšší hodnoty nedostatku převýšení ($l=130$ mm, $l=150$ mm) za současného umožnění provozu vozidel s naklápěcí technikou vyššími rychlostmi (úprava přechodnic a přibližovacích úseků přejezdů)
- elektrizace (s možností rekuperace) s pozitivním vlivem na délku jízdních dob z důvodu příznivější trakční charakteristiky elektrických vozidel a větší tažné síly
- úprava napájecí sítě umožňující nárazový odběr elektrické energie při rozjezdech vlaků z velkých taktových uzlů při krátkých následných mezidobích
- úprava infrastruktury regionálních drah (samovratné výhybky – odolné nepříznivým povětrnostním vlivům, zabezpečení přejezdů PZZ), lokální zvyšování traťové rychlosti, zabezpečení přejezdů

B. úprava infrastruktury železničních uzlů:

- umožnění současných vjezdů a odjezdů – rekonfigurace zhlaví, paralelní spojky, ve vybraných případech budování mimoúrovňových křížení
- rozdělení vybraných staničních kolejí cestovými návěstidly pro možnost využití dlouhé nástupištní hrany
- vytvoření předpokladů pro co nejkratší přestupy v uzlech, větší počet podchodů pro nástup / výstup / přestup cestujících v závislosti na uvažovaných délkách nasazených souprav (problém zejména u dlouhých

souprav vlaků dálkové dopravy nebo excentricky umístěných příchodů na nástupiště)

- specifické opatření v oblasti velkých železničních uzlů je oddělení přepravní a dopravně-technologické funkce jednotlivých stanic v rámci velkého uzlu – stanice fungující jako uzel ITJŘ by měla být konfigurována pro potřeby ITJŘ v kontextu potřebných SJD a měla by být maximálně oprostěna od dopravně technologických funkcí (posilování / zeslabování souprav, odstavy apod.), aby se snížila zatížení zhlaví v exponovaných symetrických časech; technologické práce by měly být soustředěny do nejbližší stanice, která zároveň nebude mít funkci uzlu ITJŘ

C. úprava řídicí a zabezpečovací techniky:

- řešení problematiky zabezpečení jízdy vlaků rychlostí vyšší než 160 km/h (ETCS 2. úrovně)
- řešení kapacity v silně vytížených úsecích – řešení krátkých intervalů následné jízdy na volné trati a zejména v okolí velkých uzlů (potřeba krátkých prostorových oddílů pod dohledem ETCS)
- řešení stability provozu – rozšiřování vybavení tratí a uzlů systémy ATO, resp. magnetickými informačními body (MIB) pro možnosti využití AVV v kombinaci s ETCS a z toho plynoucí možnosti přesného časového „navádění“ vlaků do přesných poloh při operativním řízení provozu
- u návazné silniční dopravy se jedná především o rozvoj telematických systémů, které umožní pohyb vozidel veřejné dopravy tak, aby se zvyšovala pravděpodobnost přesného dojezdu v souladu s jízdním řádem a bylo možno snižovat hodnoty přírážek k jízdním dobám a nezatěžovat přestupní vazby vlak / bus nadměrnými přestupními dobami

Všechna výše uvedená infrastrukturní opatření tvoří potřebnou část celkových opatření potřebných pro dosahování SJD, která vychází z interakce mezi infrastrukturou, vozidlem, provozem a nabídkou.

Závěr

Celková problematika dopravního plánování je velice obsáhlá. Není cílem této práce popsat absolutně podrobně všechny postupy a metody, které se skrývají za jednotlivými kroky dopravního plánování. Dopravní plánování představuje komplexní úlohu, která zasahuje do mnoha vědeckých oborů. Snahou bylo projít všechny kroky, které jsou nezbytné od počátečního zadání, vytvoření provozní koncepce až po finální produkt, jízdní řád včetně jeho technického zabezpečení.

Mnoho postupů v dopravním plánování má ryze heuristický a empirický charakter. Není tak mnohdy možné ověřit, zda představené postupy vždy vedou k systémovému optimu. Autorovy bohaté projekční zkušenosti však potvrdily, že představované postupy vždy vedou ke zlepšení sledovaných kritérií. Heuristické a empirické postupy nejsou upřednostňovány proto, že by v mnoha ohledech exaktní aparát neexistoval, ale především proto, že v prostředí ČR neexistuje systematický sběr souměřitelných datových podkladů, které by byly pro dopravní plánování plnohodnotně využitelné, což je mj. i příčinou nedostatečně rozšířených funkčních, kalibrovaných a průběžně udržovaných dopravních modelů, které by jinak tvořily významnou základnu a podporu dopravního plánování. Mnohdy tak nezbývá, než na jedné straně pro úlohy dopravního plánování používat hrubé modely (gravitační model, náhodný model), nebo na straně druhé při podrobnějších úlohách vycházet z údajů zjištěných průzkumy dopravního chování v zahraničí a spoléhat na podobnost rozhodování českého a např. německého cestujícího, případně si takové údaje verifikovat jednorázovými cílenými průzkumy na omezeném počtu respondentů.

Dopravní plánování v České republice, které ustanovuje Zákon o veřejných službách v přepravě cestujících (194/2010 Sb.), je stále ve svých faktických počátcích. V současné době objednatelé dopravy zpracovávají v pořadí teprve historicky třetí dopravní plány.

S ohledem na již zmiňované datově chudé prostředí a neznalost potřebných dopravně-plánovacích postupů se řada objednatelů veřejné dopravy uchyluje k pasivitě a dopravní plánování má tak pouze formální charakter, anebo k přehnaným projekcím budoucích řešení dopravní obslužnosti, a to jak z pohledu rozsahu a nabídkových předpokladů, tak i z pohledu nároků na dopravní infrastrukturu.

Jedním z nejdůležitějších úkolů dopravního plánování je dosažení vysoké dělby přepravní práce pro druhy veřejné dopravy pomocí provozně efektivních dopravních koncepcí a to za akceptovatelných nákladů.

Ambicí této práce tak je, vytvořit sumární přehled potřebných kroků dopravního plánování a vytvořit jakési pomyslné vodítko dopravního plánovače, aby bylo zřejmé jak lze přistupovat k aplikacím dopravního plánování a dosahovat tak pozitivních výsledků, i přes absenci tolik potřebných dat o přepravním procesu.

Mimo řady metod a postupů mnoha uznávaných autorů z oboru dopravního plánování a dopravní technologie, představil v kapitolách (3.5.4., 5.2. a 6.2.) autor práce i postupy vlastní. Mnoho představených metod, včetně ověření funkčnosti postupů vlastních, měl již autor možnost opakovaně aplikovat v praxi. Mezi nejvýznamnější projekty, které byly implementovány, patří jednoznačně projekt ITJŘ v železniční dálkové dopravě v objednavce MD ČR, na jehož vytváření se autor od roku 2004 velmi významnou měrou podílel a návazný projekt regionální taktové dopravy v Ústeckém kraji (od roku 2006 dále). V rovině metodické uplatňuje autor své postupy v rámci spolupráce s příslušnými veřejnými autoritami v Plánech dopravní obslužnosti území vlaky celostátní dopravy a v Plánech dopravní obslužnosti Ústeckého kraje.

Směr dalšího výzkumu spatřuje autor v rozvíjení dopravně-plánovacích metod tak, aby bylo více sledované a akcentované společenské optimum. Současné postupy a aplikace jsou obvykle zaměřeny na dílčí část komplexního problému – např. regionální doprava, nebo dálková doprava, nebo úprava infrastruktury v určité ose, přičemž na řešení kontextu, v kterém je daný problém usazen, není časový či finanční prostor, nebo zasahuje příliš mnoho subjektů, které na potřebě řešení nenaleznou shodu, anebo po komplexním řešení není ani poptávka. Akcentování společenského optima by mělo vést ke komplexním dopravním projektům, které budou otázky plánování nabídky, návrhu a tvorby obslužných segmentů, dopravní technologie, vozidlového zajištění a rozvoje dopravní infrastruktury řešit propojeně.

Summary

This thesis focuses on the issue of transport planning in public transport systems, with a focus on passenger rail transport. The individual steps of transport planning are presented, as well as selected procedures and methods, both exact and heuristic, which are applicable in transport planning.

It is not the aim of this paper to describe in absolute detail all the procedures and methods behind the individual steps of transport planning. As such, transport planning is a complex task that cuts across many scientific disciplines. The aim was to go through all the steps that are necessary from the initial assignment, the need to develop an operational concept, to the final product, the timetable including its technical support.

Many procedures in transport planning are purely heuristic and empirical in nature. It is often not possible to verify that the presented procedures always lead to the system optimum. However, the author's extensive design experience has confirmed that the presented procedures always lead to an improvement of the criteria under consideration. Heuristic and empirical procedures are not preferred because in many respects the exact apparatus does not exist, but mainly because in the Czech environment there is no systematic collection of commensurable data that would be fully usable for transport planning, which is among other things the reason for the lack of widespread functional, calibrated and continuously maintained traffic models, which would otherwise form an important basis and support for transport planning. Often, there is no choice but to use coarse models (gravity model, random model) for transport planning tasks on the one hand, or on the other hand, for more detailed tasks, to rely on data from surveys of transport behaviour abroad and to rely on the similarity of the decision-making of Czech and, for example, German travellers, or to verify such data with one-off targeted surveys on a limited number of respondents.

Transport planning in the Czech Republic, which is provided for in the Act on Public Services in Passenger Transport (194/2010 Coll.), is still in its actual infancy - at present, public authorities (PSO-contractors) are only preparing their third transport plans in a row.

In view of the aforementioned data-poor environment and ignorance of the necessary transport planning procedures, many public transport commissioners resort to passivity and transport planning has only a formal character, or to exaggerated projections of future transport service solutions, both in terms of scope and supply assumptions and in terms of demands on transport infrastructure.

One of the most important tasks of transport planning is to achieve a high modal split for single public transport modes through operationally efficient transport concepts at acceptable costs.

Thus, the ambition of this paper is to provide a summary of the necessary steps of transport planning and to create a kind of imaginary guide for the transport planner to see how transport planning applications can be approached to achieve positive results, despite the absence of much needed data on the transport process.

In addition to a number of methods and procedures of many respected authors in the field of transport planning and transport technology, the author of this thesis has presented his own procedures in chapters (3.5.4, 5.2 and 6.2). The author has already had the opportunity to apply many of the methods presented, including verifying the functionality of his own procedures, in practice. Among the most important projects that have been implemented are clearly the IPT (Integrated Periodic Timetable) project in long-distance railway transport commissioned by the Ministry of Transport of the Czech Republic, in the creation of which the author has participated to a very significant extent since 2004, and the follow-up project of regional IPT transport in the Ústí nad Labem region (from 2006 onwards). On the methodological level, the author applies his methods in cooperation with the relevant public authorities in the Plans of territorial transport services of long-distance trains of the Czech Ministry of Transport and in the Plans of public transport services of the Ústí nad Labem Region.

The author sees the direction of further research in the development of transport planning methods so that the societal optimum is more closely monitored and emphasised. The current methods and applications are usually focused on a sub-part of a complex problem - e.g. regional transport, or long-distance transport, or infrastructure modification in a certain axis, while there is no time or financial space for solving the context in which the problem is situated, or too many subjects intervene and do not find agreement on the need for a solution, or there is no demand for a comprehensive solution. Emphasising the societal optimum should lead to comprehensive transport projects that address issues of supply planning in public transport, design and development of transportation segments, transport technology, vehicle deployment and transport infrastructure development in an interconnected way.

Seznam tabulek:

Tab. 2.1. Charakteristiky území relevantní pro dopravní modelování

Tab. 2.2: Rozdělení do 13 ZCS

Tab. 2.3: Matice přepravních vztahů

Tab. 2.4: Druhy modelů volby cíle dle elasticity okrajových podmínek

Tab. 3.1. Jednotlivé segmenty veřejné dopravy

Tab. 3.2. Doporučené délky intervalů pro jednotlivé segmenty dopravní obslužnosti

Tab. 3.3. Doporučená cestovní rychlost a mezizastávková vzdálenost pro jednotlivé segmenty dopravní obslužnosti

Seznam obrázků:

Obr. 2.1: Rozdělení vyšetřovaného území na dopravní okrsky

Obr. 2.2. Minimální rozsah aktivit

Obr. 2.3. Konfidenční elipsa

Obr. 2.4. Rozdělení velikosti konfidenčních elips

Obr. 2.5: Prognóza poptávky po přepravě pomocí dopravního modelování

Obr. 2.6. modal split železnice – logaritmické vyjádření

Obr. 2.7. modal split železnice

Obr. 2.8. Modal split IAD ve vazbě na absolutní rozdíl cestovní doby IAD / VD, absolutní časové difference (10 min) při cestách nad 10 km

Obr. 2.9. Modal split IAD ve vazbě na relativní rozdíl cestovní doby IAD / VD, relativní časové difference (10% cestovní doby) při cestách nad 10 km

Obr. 2.10. Délka jízdní doby T_j dosahovaná v jednom mezistaničním úseku

Obr. 3.1. Vzor síťového grafu pro železniční uzel

Obr. 3.2. Rozdělení přepravního proudu v závislosti na časové úspoře

Obr. 3.3. Schematický postup tvorby nabídky

Obr. 4.1. Vhodnost typu JŘ v závislosti na poptávce

Obr. 4.2. Postup při tvorbě jízdního řádu s volnou vazbou

Obr. 4.3. Diagram dráha – čas znázorňující taktový jízdní řád tratě mezi uzly $U_1 - U_3$

Obr. 4.4. Postup při tvorbě taktového jízdního řádu

Obr. 4.5. Znázornění principu integrálního taktového jízdního řádu

Obr. 4.6. Úplný taktový uzel, vedlejší taktový uzel

Obr. 4.7. Decentralizovaný taktový uzel Ústí n.L., JŘ 2015/16

Obr. 4.8. Síť dálkové dopravy a uzly ITJŘ v ČR, JŘ 2021/22

Obr. 5.1.: Vývoj kompenzace v závislosti na rozvoji taktového jízdního řádu

Obr. 5.2. Atraktivita veřejné dopravy pro choice riders

Obr. 5.3. Denní variace ve stanici Zürich HBf v roce 2005

Obr. 6.1. Afinita železniční dopravy v regionální dopravě – příklad

Obr. 6.2. Schematické znázornění posloupnosti jednotlivých kroků

Seznam zkratek:

ČD	České dráhy, a.s.
ČR	Česká republika
ČSD	Československé státní dráhy
ČSÚ	Český statistický úřad
DB AG	německé dráhy (<i>Deutsche Bahn, AG</i>)
GVD	grafikon vlakové dopravy
IAD	individuální automobilová doprava
ID	individuální doprava
ITJŘ	integrovaný taktový jízdní řád
IPVS	indikativní přepravní výkon sítě
JŘ	jízdní řád
KZ	koeficient zlepšení
MD ČR	Ministerstvo dopravy České republiky
P+R	parkoviště park and ride
PSO	objednávka veřejné služby (<i>public service obligation</i>)
SBB	švýcarské spolkové dráhy (<i>Schweizerische Bundesbahnen</i>)
SJD	systemová jízdní doba
SLDB	sčítání lidu, domů a bytů
TSK	Technická správa komunikací
UIC	Mezinárodní železniční unie (<i>Union Internationale des Chemins</i>)
VD	veřejná doprava
VR	vysokorychlostní

Použitá literatura:

- [1] Alexandersson, G.; Henriksson, L.; Hultén, S.: Competition between commercial and subsidized railway services – The case of the greater Stockholm region. In: *Research in Transportation Economics*, 69, 349–359, 2018; doi: 10.1016/j.retrec.2018.03.008
- [2] Amstutz, J.: Algorithm-based design of line & timetable variants for long-distance trains in Switzerland. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, 69 (4), 56–61, 2020
- [3] Arx, v.W.; Thao, V.T.; Wegelin, P.: The development of international passenger rail services from 2007 to 2016: The case of Switzerland. In: *Research in Transportation Economics*, 69, 326–336, 2018; doi: 10.1016/j.retrec.2018.07.020
- [4] Axhausen, K.W.: Nachfragemodelle für den ÖPNV auf der Grundlage von RP- und SP-Daten, In: Vortrag auf der Heureka'99, Karlsruhe, März 1999. Arbeitsberichte Verkehrs-und Raumplanung, 1999; doi: 10.3929/ethz-a-004242499
- [5] Axhausen, K.W.: Modellierung der Verkehrsnachfrage auf der Basis von Individualentscheidungen, In: *DLR Sommerschule*, Berlin, 2001
- [6] Axhausen, K.W.; König, A.; Abay, G.; Bates, J.J.; Bierlaire, M.: Swiss value of travel time savings. In: *European Transport Conference 2004 (ETC 2004)*, Association for European Transport, 2004; doi: 10.3929/ethz-b-000023559
- [7] Bacares, C.A.O.; Brunel, J.; Sigaud, D.: Influence of the evolution of high-speed railway infrastructure on the success of Italian liberalization. In: *Competition and Regulation in Network Industries*, 1–32., 2019; doi: 10.1177/1783591719847615
- [8] Baudyš, K.; Janoš, V.: Plánování linek v taktové dopravě, In: Konference „Věda o dopravě“, FD ČVUT Praha, ISBN: 80-01-02437-7, Praha, 2001a
- [9] Baudyš, K.; Janoš, V.: Optimalizační metody používané při sestavě ITG, In: Konference „Věda o dopravě“, FD ČVUT Praha, ISBN: 80-01-02437-7, Praha, 2001b
- [10] Baudyš, K.; Janoš, V.; Pěnička, M.: Technická podpora tvorby oběhů hnacích vozidel. In: *ŽEL 2001 - Železnice na prelome tretieho tisícročia*. Žilinský vzdelávací servis, ISBN: 80-7135-055-9, Žilina, 2001
- [11] Baudyš, K.; Janoš, V.; Nálevka, J.: Zabezpečení dopravních potřeb České republiky dálkovou železniční dopravou. In: *Dopravní politika a přepravní trh v ČR a Evropské unii*. ABF Praha, Praha, 2005

- [12] Baudyš, K.; Janoš, V.; Pospíšil, J.: Systematická podpora dopravní obsluhy území pomocí aplikace integrálního taktového jízdního řádu, In: *Konference „Telematika pro regionální dopravu 2006“*, Kurdějov, ISBN 80-239-7472-6, Brno, 2006
- [13] Baudyš, K.; Janoš, V.: Hierarchické plánování v regionální dopravě. In: *„Telematika pro regionální dopravu 2007“*, Plzeň, ISBN 978-80-239-9273-1, Brno, 2007a
- [14] Baudyš, K.; Janoš, V.: Modernizace železničních tratí ve vztahu k dosažení systémových jízdních dob. In: *From Horse-drawn Railway to High-speed Transportation Systems*, Czech Technical University in Prague, ISBN 978-80-01-03699-0, Praha, 2007b
- [15] Baudyš, K.; Janoš, V.; Polák, O.; Walla, L.: Makroskopické dopravní modely jako podklady užítka-nákladových analýz. In: *„Telematika pro regionální dopravu 2008“ Skalice*, ISBN 978-80-904167-0-3, Brno, 2008
- [16] Baudyš, K.; Janoš, V.: Competitiveness of the National Rail Carrier in the Process of Market Opening for Public Passenger Rail Transport, In: *21st International Symposium EURO - ŽEL 2013 - Recent Challenges for European Railways - Symposium Proceedings*, ŽILINSKÁ UNIVERZITA, ISBN 978-80-263-0380-0, Žilina, 2013
- [17] Bär, M.: Integraler Taktfahrplan – Definitionen, Randbedingungen, Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen im Fern-, Regional- und Nahverkehr. In: *Arbeitsausschuss „Öffentlicher Verkehr“ Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, TU Dresden*, 1999
- [18] Behrens, Ch.; Pels, E.: Intermodal competition in the London–Paris passenger market: High-Speed Rail and air transport, In: *Journal of Urban Economics, Volume 71, Issue 3*, Pages 278-288, 2012; doi: 10.1016/j.jue.2011.12.005
- [19] Ben-Akiva, M.; Lerman, S.R.: Discrete choice analysis: Theory and Application to Travel Demand, MIT Press, 1985
- [20] Ben-Akiva, M.; Morikawa, T.: Estimation of switching models from revealed preferences and stated intentions, In: *Transportation Research Part A: General*, Volume 24, Issue 6, 1990; doi: 10.1016/0191-2607(90)90037-7
- [21] Borndörfer, R.; Hoppmann, H.; Karbstein, M.: Passenger routing for periodic timetable optimization In: *Public Transport*, 2016; doi: 10.1007/s12469-016-0132-0

- [22] Borza, V.; Janoš, V.; Neumann, I.: 'More is less': Regular interval timetable in central Eastern Europe. In: *EASTERN EUROPEAN RAILWAYS IN TRANSITION*. England: ASHGATE Publishing Limited, s. 327-342, ISBN 978-1-4094-2782-7., 2013
- [23] Brugger, P.; Herbst, S.; Lenz, P.; Steiger, E.; Krampe, S.; Prinz, T.: Public Transport Screener – praxisorientierte Planungstools zur Bewertung der ÖV-Angebotsqualität. In: *STROBL, J., BLASCHKE, T., GRIESEBNER, G. (Hrsg.), Angewandte Geoinformatik 2012*. Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, 158-163, ISBN 978-3-87907-520-1; 2012
- [24] Břečka, P.; Kopecký, F.; Kohl, J.: Organizational level of public transport controlling in the public transport system. In: *Proceedings of the 5th international scientific conference "Theoretical and Practical Issues in Transport"*, Pardubice, 2010
- [25] Bussieck, M.R.; Kreuzer, P.; Zimmermann, U.T.: Optimal lines for railway systems. In: *European Journal of Operational Research*, 96, 54–63, 1996; doi: 10.1016/0377-2217(95)00367-3
- [26] Bussieck, M.R.; Winter, T.; Zimmermann, U.T.: Discrete optimization in public rail transport. In: *Mathematical Programming* 79, 1997; doi: 10.1007/BF02614327
- [27] Caimi, G.C.: Algorithmic decision support for train scheduling in a large and highly utilised railway network. *Doctoral thesis*, ETH Zürich, 2009; doi: 10.3929/ethz-a-005947637
- [28] Caimi, G.C.; Kroon, L.; Liebchen, Ch.: Models for railway timetable optimization: Applicability and applications in practice, In: *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Vol. 6, Issue 4, Pages 285-312, 2017; doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.11.002
- [29] Canca, D.; De-Los-Santos, A.; Laporte, G.; Mesa, J.: Integrated Railway Rapid Transit Network Design and Line Planning problem with maximum profit. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 127, Pages 1-30, 2019; doi: 10.1016/j.tre.2019.04.007
- [30] Cats, O.; Hartl, M.: Modelling public transport on-board congestion: comparing schedule-based and agent-based assignment approaches and their implications, In: *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 50, Issue 6, Pages 1209–1224, 2016; doi: 10.1002/atr.1398

- [31] Dedík, M.; Kendra, M.; Čechovič, T.; Vojtek, M.: Determining traffic potential as an important part of sustainable railway passenger transport, In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019*, Sozopol, Vol. 664, 012030, 2019
- [32] Desaulniers, G.; Hickman, M.D.: Public transit In: *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 14, Pages 69-127, 2007; doi: 10.1016/S0927-0507(06)14002-5
- [33] Dienst, H.: Linienplanung im spurgeführten Personenfernverkehr mit Hilfe eines heuristischen Verfahrens, Dissertation TU Braunschweig, 1978
- [34] Drábek, M.; Janoš, V.: Construction of Differentiated Periodic Freight Train Paths in Dense Mixed Traffic, In: *SUSTAINABILITY*, 13,8330, 2021; doi: 10.3390/su13158330
- [35] Drábek, M.; Janoš, V.; Michl, Z.: Quantitative Determination of Bottlenecks in Railway Networks with Periodic Service. In: *Proceedings of 20th International Conference Transport Means 2016*, Juodkrante, Kauno technologijos universitetas, Kaunas, Pages 594-598, ISSN 1822-296X, 2016
- [36] Econsult: Strategie podpory dopravní obsluhy území, MD ČR, Praha, 2006
- [37] FD ČVUT, Telematix: Vytvoření komplexního modelu zjišťování přepravních vztahů v území ČR; projekt vědy a výzkumu MD ČR CG721-125-190, 2007-2010
- [38] FD ČVUT, KPM Consult: Konfigurace taktových uzlů v železniční síti ČR; projekt vědy a výzkumu MD ČR CG723-138-190, 2007-2009
- [39] Fengler, W.: Linienplanung und Infrastrukturuntersuchung im Schienenpersonenverkehr, In: *Fachseminar: Systemregelung im öffentlichen Verkehr und bei den Eisenbahnen*, Tagungsband, S. 17-35. 1. Auflage Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 1988
- [40] Fitzová, H.; Kališ, R.; Pařil, V.; Kasa, M.: Competition in long distance transport: Impacts on prices, frequencies, and demand in the Czech Republic, In: *Research in Transportation Business & Management*, 2021; doi: 10.1016/j.rtbm.2021.100655
- [41] Friedrich, M.; Hartl, M.; Schiewe, A.; Schöbel, A.: Angebotsplanung im öffentlichen Verkehr – planerische und algorithmische Lösungen, In: *Heureka'17*, Stuttgart, 2017
- [42] Friedrich, M.; Nökel, K.: Erweiterung strategischer Verkehrsnachfragemodelle für die operationale Planung im ÖV. In: *Tagungsband der 19. Verkehrswissenschaftlichen Tage*, Dresden, 2003

- [43] Gašparík, J.; Dedík, M.; Čechovič, L.; Blaho, P.: Estimation of Transport Potential in Regional Rail Passenger Transport by Using the Innovative Mathematical-Statistical Gravity Approach, In: *Sustainability* 12, No: 9. 3821, 2020; doi: 10.3390/su12093821
- [44] Gašparík, J.; Cempírek, V.: Railway Infrastructure Capacity in the Open Access Condition: Case Studies on SŽDC and ŽSR Networks. In: *Transportation Systems Analysis and Assessment*, 2019, doi: 10.5772/intechopen.88929
- [45] Gentile, G.; Nökel, K.: Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems, In: *Springer Tracts on Transportation and Traffic*, Springer-Verlag, ISBN 9783319250809, 2016
- [46] Guihaire, V.; Hao, J-K.: Transit network design and scheduling: A global review, In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 42 (10):1251– 1273, 2008; doi:10.1016/j.tra.2008.03.011
- [47] Hackney, J.K., Axhausen, K.W.: Qualität des Verkehrsangebots: Öffentlicher Verkehr, In: *Bericht an das Amt für Verkehr des Kantons Zürich*, Zürich, 2004
- [48] Halás, M.; Klapka, P.; Kladivo, P.: Distance-decay functions for daily travel-to-work flows, In: *Journal of Transport Geography*, Vol. 35, 2014; doi: 10.1016/j.jtrangeo.2014.02.001
- [49] Hartl, M.: Integrierte ÖV-Planung – Entwurf, Vergleich und Bewertung von planerischen und algorithmischen Lösungsverfahren; Dissertation TU Stuttgart, 2020; doi: 10.18419/opus-10816
- [50] Heimerl, E.h.G.; Dobeschinski, H.; Reul, S.: Stuttgart 21 Ergänzende betriebliche Untersuchungen - Teil 1: Integraler Taktfahrplan (ITF) und gewähltes Betriebsprogramm für Stuttgart 21; Verkehrswissenschaftliches Institut an der Universität Stuttgart, 1997
- [51] Hesse, W.; Baudyš, K.; Janoš, V.; Pospíšil, J.; Guckert, M.: Landesweiter Integraler Taktfahrplan für Tschechien, In: *Eisenbahn-Revue International* 11/2010, 2010
- [52] Huisman, D.; Kroon, L.; Lentink, R.; Vromans, M.: Operations research in passenger railway transportation, In: *Statistica Neerlandica* 59(4):467–497 (2005); doi: 10.1111/j.1467-9574.2005.00303.x
- [53] iRFP Praha – „Stanovení rozsahu výkonů plynoucích ze závazku veřejné služby v drážní dopravě k zabezpečení dopravních potřeb státu v letech 2007 – 2012,“ studie pro MD ČR, Praha, 2005

- [54] Jacura, M.; Týfa, L.: Utilisation of Decision Tables for Proposal of Transfer Node Conception, In: *Promet - Traffic&Transportation* 1;24(5):425-31, 2012; doi: 10.7307/ptt.v24i5.1178
- [55] Janoš, V. - Plánování nabídky v integrálním taktovém grafikonu. [Doktorská práce (Ph.D.)]. Praha: Fakulta dopravní ČVUT, 2006
- [56] Janoš V., Baudyš K., Bräuer D., Krauss, V. - Softwarové řešení problémů souvisejících s konstrukcí taktového grafikonu. *Doprava a telekomunikace pro 3.tisíciletí*. Praha: ČVUT, Fakulta dopravní, ISBN 80-01-02741-4., Praha, 2003
- [57] Janoš, V.; Baudyš, K.; Vichta, F.: Problematika financování veřejné dopravy v oblasti regulované konkurence. In: *Sborník konference Euro Traffic 2006*, ABF Praha, ISBN 80-86905-15-2, Praha, 2006
- [58] Janoš V., Baudyš K., Pospíšil J. - Railway timetable in Czech Republic, In: *Transbaltica 2009*, Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University, pp. 7-11. ISSN 2029-2376., 2009
- [59] Janoš, V.; Baudyš, K.: Development of Periodic Timetable in the Czech Republic. In: *CETRA 2012 - Road and Rail infrastructure II.*, 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure, Dubrovnik; University of Zagreb, 2012. p. 869-873. ISBN 978-953-6272-49-5., Zagreb, 2012
- [60] Janoš, V.; Baudyš, K.: Transport Planning of Public Services, In: *Proceedings of the 11th European Transport Congress*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní 2013, ISBN 978-80-01-05321-8., 2013
- [61] Janoš, V.; Baudyš, K.: Transport Planning on the Liberalized Market of Public Services, In: *trans&MOTAUTO´14 XXII INTERNATIONAL CONFERENCE PROCEEDINGS*, Sofia: Scientific-technical union of mechanical engineering, ISSN 1310-3946., 2014
- [62] Janoš, V.; Kříž, M.: Vehicle- and Staff Productivity in Bus Urban Transport, In: *trans & MOTAUTO WORLD*, 2016, I(4/2016), 24-26, ISSN 2367-8399, 2016
- [63] Janoš, V.; Kříž, M.: Smart Urban Transport. In: *Smart City Symposium Prague 2018*, New York: IEEE Press, 2018a; doi: 10.1109/SCSP.2018.8402664
- [64] Janoš, V.; Kříž, M.: Using of the EVA Model in the Czech Republic. In: *Road and Rail Infrastructure V*, 5th International Conference CETRA 2018, Zadar; Zagreb: University of Zagreb, 2018b; doi: 10.5592/CO/cetra.2018.879

- [65] Janoš, V.; Kříž, M.: Pragmatic Approach in Regional Rail Transport Planning, In: *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*. 2018c, doi: 10.20858/sjsutst.2018.100.4
- [66] Kaspi, M.; Raviv, T.: Service-oriented line planning and timetabling for passenger trains, In: *Transportation Science* 47(3):295–311, 2013
- [67] Klabes, S.G.: Algorithmic Railway Capacity Allocation in a Competitive European Railway Market. *Dissertation*, RWTH Aachen, Aachen, 2010
- [68] König, A.: Zeitwerte im Personenverkehr – Eine aktuelle Schweizer Studie, ETH Zürich, Zürich 2002
- [69] Kraft, S.; Marada, M.: Delimitation of functional transport regions: understanding the transport flows patterns at the micro-regional level, In: *Geografiska Annaler: Series B, Human Geography*, 99:1, 79-93, 2017; doi: 10.1080/04353684.2017.1291741
- [70] Krista, M.: Verfahren zur Fahrplanoptimierung dargestellt am Beispiel der Synchronzeiten, Schriftenreihe des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung der TU Braunschweig, Braunschweig, 1996
- [71] Kříž, M.; Janoš, V.: Factors Influencing Season Ticket Ownership: An Example from the Czech Republic. In: *TRANSPORT MEANS 2019 - PROCEEDINGS OF THE 23rd INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE*, Palanga, 2019-10-02/2019-10-04, Kaunas: Kaunas University of Technology, s. 398-402, ISSN 1822-296X., 2019
- [72] Kummer, S.; Nagl, P.; Schlaak, J.P.: Die Zukunft mit Milliardeninvestitionen verbaut? Beobachtungen zur Effizienz von Schienen-infrastruktur-Projekten1, In: *Ideenimport: Experten aus aller Welt geben Impulse*, Schäffer – Poeschel Verlag, Stuttgart, 2007
- [73] Lichtenegger, M.: Der Taktfahrplan, Dissertation TU Graz, Graz, 1990
- [74] Liebchen, C.: Periodic Timetable Optimization in Public Transport, In: *Operations Research Proceedings*, Vol. 2006, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006; doi: 10.1007/978-3-540-69995-8_5
- [75] Liebchen, C.: Planung im Nah- und Fernverkehr: Mathematische Optimierungsverfahren decken mehr Ziele ab. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (6), 363–368., 2008
- [76] Lill, E.: Das Reisegesetz und seine Anwendung auf den Eisenbahnverkehr; Im Commissions-Verlag von Spielhagen & Schurich, Wien, 1891

- [77] Lindner, T.: Train Schedule Optimization in Public Rail Transport, Ph.D. thesis, TU Braunschweig, Braunschweig 2000
- [78] Lorenz, F.; Janoš, V.; Teichmann, D.; Dorda, M.: Time Coordination of Periodic Passenger Train Connections in Conditions of Single-Track Lines, In: *Mathematical Problems in Engineering*, 2021; doi: 10.1155/2021/3876561
- [79] Marada, M.: Dopravní hierarchie středisek v Česku, Dizertační práce, PŘF Univerzita Karlova Praha, Praha, 2003
- [80] Metelka, S.; Janoš, V.: Demand variation in regional transport, In: *2021 Smart City Symposium Prague (SCSP)*, 2021; doi: 10.1109/SCSP52043.2021.9447373
- [81] Michaelis, M.; Schöbel, A.: Integrating line planning, timetabling, and vehicle scheduling: a customer-oriented heuristic. In: *Public Transport* (1), 211-232, 2009; doi: 10.1007/s12469-009-0014-9
- [82] Nachtigall, K.: Periodic network optimization with different arc frequencies, In: *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 69, Issues 1–2, Pages 1-17, 1996; doi: 10.1016/0166-218X(95)00073-Z
- [83] Nachtigall, K.: Periodic Network Optimization and Fixed Interval Timetables, Habilitationsschrift, Universität Hildesheim, Hildesheim, 1998
- [84] Nachtigall, K.; Voget, S.: Minimizing waiting times in integrated fixed interval timetables by upgrading railway tracks, In: *European Journal of Operational Research*, Vol. 103, Issue 3, Pages 610-627, 1997; doi: 10.1016/S0377-2217(96)00284-6
- [85] Newell, G. F.; Potts, R. B.: Maintaining a bus schedule. In: *Proceedings of the 2nd Australian Road Research Board*, Vol. 2, S. 388–393, Melbourne, 1964
- [86] Oltrogge, C.: Linienplanung für mehrstufige Bedienungssysteme im öffentlichen Personenverkehr, Dissertation TU Braunschweig, Braunschweig, 1994
- [87] Opitz, J.: Automatische Erzeugung und Optimierung von Taktfahrplänen in Schienenverkehrsnetzen; Gabler Verlag, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009
- [88] Ortúzar, J.d.D.; Willumsen, L.G.: Modelling Transport, 4th ed., John Wiley & Sons., Chichester UK, ISBN 978-0-470-76039-0, 2011
- [89] Pachel, J.: Control of Railway Operation on Open Access Networks. In: *Proceedings of 7th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Yildiz Technical University, Istanbul, October 11-13, 2006

- [90] Pastor, O.; Janoš, V.; Baudyš, K.; Pospíšil, J.: Telematické aplikace jako nástroje pro podporu dopravního plánování, In: *Konference „Telematika pro regionální dopravu“*, Kurdějov 2006, ISBN 80-239-7472-6, Brno, 2006
- [91] Pätzold, J.; Schiewe A.; Schöbel, A.: Cost-Minimal Public Transport Planning, In: *18th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2018)*, Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2018; doi: 10.4230/OASICS.ATMOS.2018.8
- [92] Prinz, T.; Krampe, S.; Lenz, P.; Herbst, S.: Demographieorientiertes Bewertungsmodell für die Zugänglichkeit und Angebotsqualität im Öffentlichen Verkehr. In: *Angewandte Geoinformatik 2011*, 409-414.; Wichmann Verlag, ISBN 978-3-87907-508-9, Berlin/Heidelberg, 2011
- [93] Rey, G.: Entwicklung des ITF, Anfänge – Gegenwart – Zukunft; Eisenbahntechnisches Kolloquium, 05.07.2007, TU Darmstadt, 2007
- [94] Ropelius, F.; Schröder, P.: Stufengerechte Angebotskonzeption im Spannungsfeld zwischen Detailgenauigkeit und Variantenvielfalt, In: *Proceedings of the 1st International Railway Symposium Aachen 2017*, 468–479., RWTH Aachen, 2018
- [95] SBB Personenverkehr, Statistisches Vademecum 2005, Bern, 2005
- [96] Schiewe, P.: Integrated optimization in public transport planning, PhD thesis, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, 2018
- [97] Schnabel, W., Lohse, D.: Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung 2 Baende; Verlag für Bauwesen, Berlin, 1997
- [98] Schumann, T.: Erhöhung der Streckenkapazität des Shinkansen mit dynamischem Flügeln, In: *16. Internationale Schienenfahrzeugtagung Rad-Schiene*, 12.09.2018, Dresden, 2018
- [99] Schöbel, A.: Line planning in public transportation: models and methods, In: *OR Spectrum*, 34(3), pp.491-510., 2012; doi: 10.1007/s00291-011-0251-6
- [100] Smoliner, M.: System train paths as key to efficient infrastructure usage for on-track competition in ITF-regimes. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 12 (7+8), 100147., 2019; doi: 10.1016/j.jrtpm.2019.100147
- [101] Smoliner, M.: The Integrated Timetable in Liberalised Railway Networks, Dissertation TU Graz, Graz, 2021

- [102] Smoliner, M.; Walter, S.; Marschnig, S.: Optimal Coordination of Timetable and Infrastructure Development in a Liberalised Railway Market. In: *Journal of Management and Financial Sciences*, (33), 97-115. doi: 10.33119/JMFS.2018.33.6
- [103] Smoliner, M.; Walter, S.; Marschnig, S.: Der Weg zur optimalen Abstimmung von Fahrplan und Infrastruktur, Teil 1. In: *ZEVrail*. 2018 Mai;142(5):180-184., 2018b
- [104] Smoliner, M.; Walter, S.; Marschnig, S.: Der Weg zur optimalen Abstimmung von Fahrplan und Infrastruktur, Teil 2. In: *ZEVrail*. 2018 Jun;142(5):212-217., 2018c
- [105] Sonntag, H.: Linienplanung im öffentlichen Personennahverkehr, Dissertation TU Berlin, Berlin, 1977
- [106] Sonntag, H.: Ein heuristisches Verfahren zum Entwurf nachfrageorientierter Linienführung im öffentlichen Personennahverkehr. In: *Zeitschrift für Operations Research*, 23 (2), B15-B31., 1979; doi: 10.1007/BF01951496
- [107] Sparing, D.; Goverde, R.M.P.: A cycle time optimization model for generating stable periodic railway timetables, In: *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 98, Pages 198-223, 2017; doi: 10.1016/j.trb.2016.12.020
- [108] Stohler, W.: Zeitdistanzen statt Raumdistanzen – Flächendeckende Angebotskonzepte für Bahn und Bus., In: *SRL Schriftenreihe, Bericht über die Tagung „um die Wette leben – Geschwindigkeit, Raum, Zeit“*, Bochum, 1994
- [109] Temple, S.: Open Access Long Distance Passenger Rail Services in the United Kingdom: The Grand Central Experience. In: *Transportation Research Procedia*, Vol. 8, Pages 114-124, 2015; doi: 10.1016/j.trpro.2015.06.047
- [110] Tomeš, Z.; a kol.: prezentace dílčích výstupů projektu „Nová mobilita – vysokorychlostní dopravní systémy a dopravní chování populace“, projekt OP VVV v řešení 2018 – 2022
- [111] Ústecký kraj: Plán dopravní obslužnosti Ústeckého kraje 2012 - 2016, Ústí nad Labem, 2011
- [112] Vávra, R.; Janoš, V.: Comparison of Different Conceptions of Suburban Railway Transport, In: *2019 Smart City Symposium Prague*, New York: IEEE Press 2019, Praha 2019; doi: 10.1109/SCSP.2019.8805699
- [113] Vávra, R.; Janoš, V.: Zone-Oriented Suburban Railway Timetable, In: *2021 Smart City Symposium Prague*, Piscataway: IEEE Signal Processing Society 2021, Praha 2021; doi: 10.1109/SCSP52043.2021.9447380

- [114] Vrtic, M.: Ein hierarchisches („Nested“) Logit-Modell für die Analyse kombinierter SP- und RP-Daten zur Verkehrsmittelwahl, In: *Schriftenreihe 12 Workshop DVWG e. V. (Hrsg.), „Statistik und Verkehr“*, Berlin, 2004
- [115] Vrtic, M.; Axhausen, K.W.: Modelle der Verkehrsmittelwahl auf der Grundlage von RP- und SP-Daten. In: *HEUREKA'02 - Optimierung in Verkehr und Transport: Vortragsveranstaltung mit Vorstellung von Hard- und Software*, Forschungsstelle für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, 2002
- [116] Vrtic, M.; Axhausen, K. W.; Rossera, F.; Maggi, R.: Verifizierung von Prognosemethoden im Personenverkehr, im Auftrag der SBB und dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE); *IVT, ETH Zürich und USI Lugano*, Zürich - Lugano, 2003
- [117] Walter, S.: Long-Term Railway Infrastructure Development: Expansion of the Integrated Timetable on Mixed-Traffic Passenger Railway Networks, Dissertation TU, Graz, Graz, 2016
- [118] Wardman, M.: Public transport values of time, In: *Transport Policy*, Vol. 11, Issue 4, Pages 363-377, 2004; doi: 10.1016/j.tranpol.2004.05.001
- [119] Wardman, M.; Shires, J.; Lythgoe, W.; Tyler, J.: Consumer Benefits and Demand Impacts of Regular Train Timetables, In: *International Journal of Transport Management*, Vol. 2, Issue 1, Pages 39-49, 2004; doi: 10.1016/j.ijtm.2004.04.002
- [120] Wegel, H.: Fahrplangestaltung für taktbetriebene Nahverkehrsnetze, Dissertation TU Braunschweig, Braunschweig, 1974
- [121] Weidmann, U.: Angebotsplanung der SBB zwischen Markt und Möglichkeiten, In: *Internationales Verkehrswesen*, Vol. 53, Issue 10, 2001
- [122] Weidmann, U.: Netzplanung und Systemauslegung, ETH Zürich, Zürich, 2008
- [123] Weidmann, U.; Bruckmann, D.; Frank, P.; Höppner, S.: NBS Chestenberg, Studienauftrag im Rahmen der Projekte STEP; ETH Zürich, Zürich, 2011
- [124] Wong, R.C.W.; Yuen, T.W.Y.; Fung, K.W.; Leung, J.M.Y.: Optimizing Timetable Synchronization for Rail Mass Transit, In: *Transportation Science*, 42(1):57-69, 2008; doi: 10.1287/trsc.1070.0200