



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy

**Odolnost sítě evropských leteckých spojení v průběhu pandemie
Covid-19
Resilience of the European Airline Network during the Covid-19
Pandemic**

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Letecká doprava

Vedoucí práce: doc. Ing. Peter Vittek, Ph.D.

Ing. Tereza Dvořáková

Michaela Macurová

Praha 2022

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Michaela Macurová

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský –LED– Letecká doprava

Název tématu (česky): **Odolnost sítě evropských leteckých spojení v průběhu pandemie Covid-19**

Název tématu (anglicky): **Resilience of the European Airline Network during the Covid-19 Pandemic**

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je zmapovat, analyzovat a vyhodnotit, jakým způsobem byla zajištěna konektivita letecké dopravy v rámci sítě leteckých spojení v průběhu pandemie Covid-19 v Evropě.
- Představte problematiku konektivity a odolnosti letecké sítě a příslušných metod
- Proveďte výběr důležitých evropských letišť a určete konektivitu jejich sítě před pandemií
- Na základě dat o provozu proveďte výpočet konektivity a odolnosti při postupném rušení leteckých linek
- Pro jednotlivá vybraná letiště proveďte srovnání
- Stanovte závěry, diskutujte limitace a proveďte validaci



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Airport Industry Connectivity Reports (Airport Council International - ACI)
London, O., et al., - Robustness of the Air Transport Network 2018
Chi, L., et al., - Structural Changes Caused by Error and Attack Tolerance in US Airport Network 2012

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Peter Vittek, Ph.D.**
Ing. Tereza Dvořáková

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **8. srpna 2022**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu Ústav letecké dopravy



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Michaela Macurová
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 8. října 2021

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce je analýza konektivity a odolnosti evropské letecké sítě v průběhu pandemie Covid-19. Motivací k výběru tématu bakalářské práce bylo bližší pochopení dopadů pandemie na leteckou síť a leteckou dopravu obecně. Práce se zaměřuje na konektivitu 24 nejvýznamnějších evropských letišť, která byla vybrána na základě počtu odbavených cestujících. Práce se též zaměřuje na odolnost celé letecké sítě, která je tvořena spojeními ze zkoumaných letišť. Pro stanovení hodnot konektivity byla využita metoda centrality. Pro následné posouzení stavu letecké sítě a porovnání jednotlivých letišť byly použity statistické metody, konkrétně korelační analýza a testování hypotéz. Díky provedené analýze byla odhalena silná letiště a jejich spojení, která zůstala aktivní i během největší kulminace krize a zajišťovala tak konektivitu v rámci evropské letecké sítě.

Klíčová slova: centralita, konektivita, letecká síť, odolnost, pandemie Covid-19

Abstract

The subject of the bachelor's thesis is the analysis of connectivity and resilience of the European air transport network during the Covid-19 pandemic. The reason for choosing the topic of this bachelor's thesis was a closer understanding of the impact of the pandemic on the air transport network and aviation in general. The thesis focuses on the connectivity of the 24 most important European airports, which were selected based on the number of passengers carried. The work also focuses on the resilience of the whole network, which consists of connections from the airports examined. To determine connectivity values, the centrality method was used. For the subsequent assessment of the state of the air transport network and the comparison of airports, statistical methods, specifically correlation analysis and hypothesis testing, were used. Due to conducting an analysis, strong airports and their connections were revealed. These connections remained active even during the peak of the crisis, thus ensuring connectivity within the European air transport network.

Keywords: centrality, connectivity, air transport network, resilience, Covid-19 pandemics

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Odolnost sítě evropských leteckých spojení v průběhu pandemie Covid-19 vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

Praze dne 8. srpna 2022



.....
Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucím bakalářské práce doc. Ing Peterovi Vittekovi, Ph.D. a Ing. Tereze Dvořákové za odborné vedení, cenné poznámky a připomínky a čas, který mi věnovali při vytváření této práce. Dále bych chtěla poděkovat doc. Ing. Bc. Vladimíru Sochovi, Ph.D. a Ing. Pavle Pecherkové, Ph.D. za odbornou pomoc, podnětné rady a možnost konzultací v oblasti statistiky. V neposlední řadě patří mé poděkování rodině a blízkým za jejich podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

Obsah

Úvod	11
1 Literární řešerše	12
1.1 Letecká síť.....	12
1.1.1 Vývoj letecké sítě.....	12
1.1.2 Reprezentace letecké sítě	13
1.1.3 Modely letecké sítě	13
1.2 Konektivita a odolnost	14
1.2.1 Odolnost.....	15
1.2.2 Robustnost	16
1.2.3 Chyby a útoky.....	17
1.3 Metody hodnocení konektivity	17
1.3.1 Metoda centrality.....	17
1.3.2 NetScan Metodologie.....	20
1.3.3 Ostatní metodologie.....	21
2 Výběr letišť a konektivita před pandemií.....	22
2.1 Konektivita před pandemií.....	22
3 Konektivita a odolnost v průběhu pandemie.....	24
3.1 Zdroj dat	25
3.2 Použitá metodologie	27
3.3 Gephi	28
3.4 Vyhodnocení.....	30
3.5 Shrnutí kapitoly	33
3.6 Metodologický model zpracování	33
4 Interpretace výsledků.....	35
4.1 Srovnání letišť.....	35
4.2 Odolnost.....	40
4.3 Srovnání s hodnotami před pandemií.....	44
5 Diskuze	46
Závěr.....	48
Seznam použité literatury	50
Seznam příloh.....	54

Seznam obrázků

Obrázek 1: Model point-to-point [8].....	14
Obrázek 2: Model hub-and-spoke [8]	14
Obrázek 3: Robustnost a odolnost (přeloženo a upraveno [18])	16
Obrázek 4: Součásti konceptu odolnosti (přeloženo [22])	17
Obrázek 5: Znázornění přímé centrality.....	18
Obrázek 6: Znázornění vážené centrality	18
Obrázek 7: Znázornění přestupní centrality.....	19
Obrázek 8: Znázornění centrality dostupnosti	19
Obrázek 9: Závislost přestupní centrality na přímé v případě leteckých sítí (přeloženo [1]).....	20
Obrázek 10: Druhy konektivity dle SEO (upraveno podle [14])	21
Obrázek 11: Srovnání hodnot přímé centrality pro duben 2019 a 2020	24
Obrázek 12: Srovnání hodnot vážené centrality pro duben 2019 a 2020	25
Obrázek 13: Flightera – příklad dostupných dat [40].....	26
Obrázek 14: Grafické znázornění procesu získávání dat pomocí nástroje Web Scraper	26
Obrázek 15: Výsledná podoba získaných dat ve formátu *.xlsx	26
Obrázek 16: Část kontingenční tabulky, která byla použita pro získání týdenních frekvencí letů.....	29
Obrázek 17: Vstup pro Gephi, a) část tabulky uzlů, b) část tabulky hran	29
Obrázek 18: Gephi – přehled s vykreslením sítě	30
Obrázek 19: Gephi – spočítané hodnoty pro jednotlivé uzly	30
Obrázek 20: Část statistických výsledků post-analýzy	31
Obrázek 21: Příklad grafu, který je jedním z výsledků post-analýzy	32
Obrázek 22: Příklad grafického znázornění korelační matice	33
Obrázek 23: Metodologický model zpracování.....	34
Obrázek 24: Průběh hodnot přímé centrality pro jednotlivé skupiny	36
Obrázek 25: Hodnoty přímé centrality pro letiště s nejvíce odlišným průběhem	37
Obrázek 26: Hodnoty vážené centrality pro jednotlivé skupiny	38
Obrázek 27: Průběh hodnot vážené centrality pro letiště s nejvíce odlišným průběhem.....	39
Obrázek 28: Průběh váženého stupně a průměrného váženého stupně (standardizované hodnoty) .	41
Obrázek 29: Grafický výsledek post-analýzy testování hodnot přímé centrality pro jednotlivé týdny	41
Obrázek 30: Vývoj počtu vnitrostátních letů a celkového počtu letů pro jednotlivé týdny	43
Obrázek 31: Podíl vnitrostátních letů pro jednotlivé státy v 15. týdnu	44

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty přímé, nepřímé a letištní konektivity pro rok 2019 [14]	23
Tabulka 2: Korelační matice - přímá centralita	35
Tabulka 3: Korelační matice - vážená centralita	37
Tabulka 4: Týdny, ve kterých jednotlivá letiště dosáhla minimálních hodnot přímé a vážené centrality	40
Tabulka 5: Hodnoty přímé a vážené centrality pro 15. týden.....	42
Tabulka 6: Hrany s nevyšším ohodnocením v 15. týdnu.....	43
Tabulka 7: Počet vnitrostátních letů v 15. týdnu a jejich pokles ve srovnání se stejným týdnem v roce 2019.....	44
Tabulka 8: Pokles hodnot přímé a vážené centrality ve srovnání s rokem 2019	45
Tabulka 9: Pokles průměrného stupně a průměrného váženého stupně ve srovnání se stejným obdobím v roce 2019.....	45

Seznam zkratek

ATN	Air Transport Network Letecká síť
ACI Europe	Airports Council International Europe Mezinárodní rada letišť Evropy
EFTA (ESVO)	European Free Trade Association Evropské sdružení volného obchodu
EU	European Union Evropská unie
IATA	International Air Transport Association Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAO	International Civil Aviation Organization Mezinárodní organizace pro civilní letectví
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj
WHO	World Health Organization Světová zdravotnická organizace
AMS	Letiště Amsterdam Schiphol
ARN	Letiště Stockholm Arlanda
ATH	Letiště Athény
BCN	Letiště Barcelona El Prat
BRU	Letiště Brusel
CDG	Letiště Paříž Charles de Gaulle
CPH	Letiště Kodaň
DUB	Letiště Dublin
DUS	Letiště Düsseldorf
FCO	Letiště Řím Fiumicino
FRA	Letiště Frankfurt nad Mohanem
LGW	Letiště Londýn Gatwick
LHR	Letiště Londýn Heathrow
LIS	Letiště Lisabon
MAD	Letiště Madrid Barajas
MAN	Letiště Manchester
MUC	Letiště Mnichov
MLP	Letiště Milán Malpensa
ORY	Letiště Paříž Orly

OSL	Letiště Oslo Gardermoen
PMI	Letiště Palma de Mallorca
STN	Letiště Londýn Stansted
VIE	Letiště Vídeň
ZRH	Letiště Zürich
BGO	Letiště Bergen
CGN	Letiště Kolín nad Rýnem
HAJ	Letiště Hannover
HAM	Letiště Hamburg
IBZ	Letiště Ibiza
IST	Letiště Istanbul
JFK	Letiště New York J. F. Kennedy
JMK	Letiště Mykonos
JNX	Letiště Naxos
LCA	Letiště Larnaka
MAH	Letiště Menorca
MIA	Letiště Miami
MLO	Letiště Milos
ORD	Letiště Chicago O'Hare
PAS	Letiště Paros
SFO	Letiště San Francisco
SKG	Letiště Soluň
STR	Letiště Stuttgart
SVG	Letiště Stavanger
TLV	Letiště Tel Aviv
TRD	Letiště Trondheim
VLC	Letiště Valencie

Úvod

Pandemie Covid-19 ovlivnila leteckou dopravu v dosud nepředstavitelném měřítku. V důsledku restrikcí a obav z šíření nákazy výrazně klesl počet letů i přepravených cestujících. Pro hodnocení a analýzu tohoto poklesu lze využít koncept konektivity a odolnosti. Konektivita představuje způsob zapojení jednotlivých letišť v síti a vyjadřuje jejich důležitost. Odolnost popisuje reakci sítě na rušivou událost, kvůli které dochází nejčastěji ke snížení výkonnosti celé sítě. Letecká síť může být reprezentována grafem, kde jednotlivé uzly představují letiště v síti a hrany jednotlivá letecká spojení mezi nimi.

Cílem této práce je zmapovat, analyzovat a vyhodnotit, jakým způsobem byla zajištěna konektivita letecké dopravy v rámci sítě leteckých spojení v průběhu pandemie Covid-19 v Evropě. Pro tvorbu evropské letecké sítě bylo vybráno 24 letišť, která v roce 2019 překročila hranici 25 milionů odbavených cestujících. Pro tato letiště byla získána data o odletech a příletech, na základě kterých byly stanoveny týdenní frekvence letů. Pomocí metody centrality byla vyhodnocena konektivita a odolnost při postupném rušení leteckých spojení. Motivací k výběru tématu a zkoumání této problematiky bylo bližší pochopení dopadů pandemie na leteckou síť a leteckou dopravu obecně. Letecká síť je nedílnou součástí letectví a zároveň má nezanedbatelný vliv na ekonomiku. Díky tomu nesmí být tato problematika opomenuta a zaslouží si bližší pozornost.

První část práce se věnuje problematice konektivity, odolnosti a letecké sítě. V rámci této části jsou popsány a vysvětleny vlastnosti letecké sítě, koncepty konektivity a odolnosti a jednotlivé metody, které lze pro hodnocení konektivity využívat. Druhá kapitola popisuje výběr nejdůležitějších Evropských letišť, která jsou analyzována v další části práce. Pro tato letiště jsou zároveň stanoveny hodnoty konektivity před pandemií, které vycházejí z profesionálně zpracovaných dat. Třetí kapitola se věnuje výběru vhodné metody zpracování a získání potřebných dat. Dále jsou v této části popsány metody, které lze použít pro srovnání a vyhodnocení výsledků. Čtvrtá kapitola obsahuje samotné výsledky a jejich interpretaci. V rámci páté kapitoly jsou diskutovány výsledky a limitace práce.

1 Literární rešerše

Cílem této kapitoly je představit koncept konektivity a odolnosti, který tvoří základ pro tvorbu celé práce. Pro snadnější pochopení tohoto konceptu je nejdříve představena letecká síť a její vlastnosti. Dále tato kapitola obsahuje metody, pomocí kterých lze konektivitu a odolnost zkoumat a vyhodnocovat.

1.1 Letecká síť

V mnoha zdrojích zabývajících se konektivitou a odolností se lze setkat se zkratkou ATN, neboli Air Transport Network. Tento pojem lze do češtiny přeložit jako letecká síť či síť leteckých spojení. Společně s internetovou sítí se jedná o jednu z nejdůležitějších, nejrozsáhlejších, ale zároveň i nejkritičtějších sítí [1]. Mimo to má letecká síť velký vliv na ekonomiku a nevyhýbá se ani pozornosti médií [2]. Je velmi důležitá z pohledu jednotlivých států, ale mnohem většího významu nabývá v celosvětovém měřítku. Umožňuje lepší propojenost jednotlivých částí světa a výrazně zvyšuje možnosti cestování a přepravy zboží.

1.1.1 Vývoj letecké sítě

S rozvojem letecké dopravy se začala formovat i samotná síť leteckých spojení. Za jeden z hlavních faktorů lze považovat snahu leteckých společností, později i leteckých aliancí, dosahovat co nejvyšších zisků [1]. V důsledku liberalizace a rozvoje konkurenčního prostředí se zvýšila nabídka spojení a destinací, což mělo na další vývoj letecké sítě pozitivní vliv. Z jiného pohledu byla tato síť formována s rozvojem velkých měst, která byla propojována leteckými linkami [3]. Nezanedbatelný vliv měly i další faktory, kterými jsou například geografická poloha, politická situace nebo stav ekonomiky [1]. V důsledku těchto faktorů se letecká síť v různých částech světa vyvíjela odlišným tempem.

Na budoucí vývoj ATN lze pohlížet v několika časových horizontech. Z dlouhodobého hlediska je vývoj obtížné předpovědět, jelikož je ovlivňován mnoha aspekty. Můžeme mezi ně řadit výrazné změny makroekonomických faktorů, konkurenci leteckých společností nebo omezení způsobená zákony a nařízeními [4]. Dle Wei a spol. [5] lze očekávat zvyšování poptávky po letecké dopravě, která by s sebou mimo pozitivních důsledků mohla přinášet i problémy, například v podobě limitované kapacity letišť a letových cest. Z krátkodobého hlediska je předpovídání vývoje letecké sítě výrazně jednodušší. Cestující můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin, jejímž potřebám musí být krátkodobý vývoj přizpůsoben. První skupinou jsou cestující, kteří využívají leteckou dopravu pro cestování v rámci pracovních povinností, tzv. business cestující. Je pro ně nejdůležitější rychlost přepravy, přímá spojení a určitý komfort. Business cestující využívají letecké přepravy zejména ve všedních dnech. Druhou skupinu tvoří cestující, kteří využívají leteckou přepravu ve svém volném čase, tzv. volnočasoví cestující. Nejdůležitějším faktorem je pro tuto skupinu cestujících cena letenky a jsou ochotni akceptovat lety s přestupy či omezení služeb [4]. I přes výše zmíněné překážky

se letecké společnosti snaží budoucí vývoj co nejlépe předpovídat a na základě těchto předpovědí upravit služby, které cestujícím nabízejí. Na tyto služby lze nahlížet z pohledu leteckých linek, které pak tvoří samotnou leteckou síť.

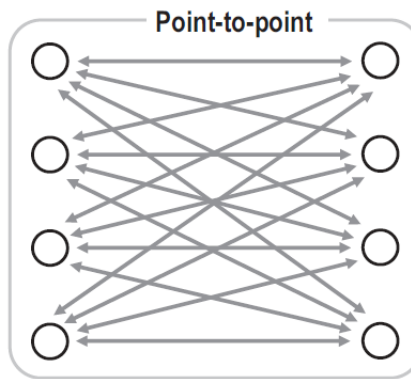
1.1.2 Reprezentace letecké sítě

Pro účely reprezentace letecké sítě je využívána zejména teorie grafů. Z této teorie vychází nemalé množství metodologií a přístupů pro zkoumání jednotlivých aspektů těchto sítí. Konkrétně je možné leteckou síť reprezentovat pomocí grafu, sestávajícího z uzlů (vrcholů) a hran, které jednotlivé uzly propojují. Letecká doprava je tvořena velkým množstvím prvků, které spolu navzájem interagují a spolupracují, což má za důsledek více možností, jak síť interpretovat [4]. Ve většině studií [5], [6] reprezentují uzly jednotlivá letiště. Pokud mezi těmito letišti existuje přímé spojení, je v grafu znázorněno hranou spojující příslušné uzly. Zanin a Lillo [4] ve svém článku jako alternativu k tomuto pohledu uvádějí například síť, ve které uzly reprezentují navigační zařízení a hrany znázorňují letové tratě.

Z pohledu teorie grafů se v případě sítě, která reprezentuje letiště a jednotlivá spojení mezi nimi, jedná ve většině případů o orientovaný graf. Ten vyjadřuje situaci, kdy mohou mezi letišti A a B existovat zároveň spojení z A do B i lety z B do A [4]. Další významnou vlastností grafu je ohodnocení hran. Na základě této vlastnosti mohou být sítě rozdělené na vážené a nevážené [3]. Nevážené sítě berou v úvahu pouze to, zda mezi jednotlivými letišti existuje přímé spojení. V případě vážených sítí jsou tato spojení ohodnocena číslem, které může vyjadřovat například počet letů, přepravených cestujících či nabízenou kapacitu [4]. V této práci je síť reprezentována váženým orientovaným grafem, kde ohodnocení hran představuje týdenní frekvenci letů.

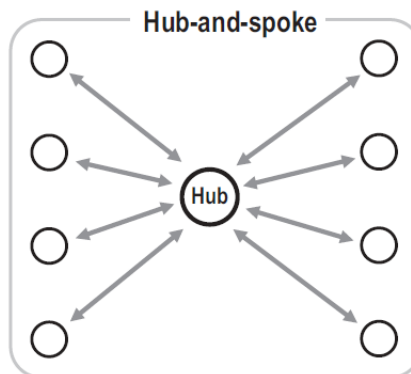
1.1.3 Modely letecké sítě

Pro tvorbu letecké sítě existují dva základní přístupy – modely „point-to-point“ a „hub-and-spoke“. Podstatou prvního modelu, point-to-point, je přeprava z jednoho bodu do druhého. Jednou z hlavních výhod je velké množství přímých spojení bez nutnosti přestupu. Tento model bývá využíván zejména nízkonákladovými leteckými společnostmi, které nejčastěji využívají menší, tzv. sekundární letiště. Nižší poplatky na vedlejších letištích pomáhají snižovat náklady na provoz celé sítě [7]. Model point-to-point zachycuje Obrázek 1.



Obrázek 1: Model point-to-point [8]

Druhý model, hub-and-spoke, by bylo možné do češtiny přeložit například jako hvězdicové uspořádání. Základem je tzv. hub, neboli uzlové letiště. Jiří Pruša [9] definuje hub jako: „*letiště využívané určitou leteckou společností jako její hlavní báze a určené pro přestupy cestujících v rámci její sítě.*“ Hlavní výhodou tohoto uspořádání je větší nabídka cílových destinací, která je zajištěna pomocí navazujících letů z uzlového letiště [7]. Z toho ale vyplývají i některé nevýhody, mezi které patří malé množství přímých spojení nebo vyšší náklady na provoz sítě. Zároveň může docházet k přetížení uzlových letišť, což má za následek zpoždění a rušení letů [10]. Model hub-and-spoke zachycuje Obrázek 2.



Obrázek 2: Model hub-and-spoke [8]

1.2 Konektivita a odolnost

Pro pojem konektivita neexistuje jednotná definice a v závislosti na úhlu pohledu může být chápána velmi odlišně. Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) [11] popisuje konektivitu jako schopnost sítě přepravovat cestující, zboží a poštu tak, aby byla cesta co nejkratší, za co nejnižší cenu a aby byla zajištěna dostatečná spokojenost uživatelů této sítě. Dle Mezinárodní asociace leteckých dopravců (IATA) [12] konektivita odráží, jak jsou jednotlivé státy propojeny se zbytkem světa a jakým způsobem přispívají letecká spojení k rozvoji ekonomiky státu. Podobný pohled nabízí i Zeigler a spol. [13], kteří uvádí, že konektivita umožňuje popisovat dostupnost konkrétních regionů na základě dostupných leteckých spojení. Mimo tohoto pohledu uvádí IATA [12] i několik dalších. Z pohledu cestujících může být konektivita chápána jako možnost cestovat z místa odletu do cílové

destinace, a to v co nejkratším čase. Z pohledu letiště pak může jít o důležitý nástroj pro posouzení hodnoty jednotlivých leteckých spojení. ACI [14] popisuje čtyři základní druhy konektivity z pohledu cestujících, které společně vypovídají o konektivitě nabízené jednotlivými letišti. Podle OECD International Transport Forum [15] lze konektivitu definovat jako dostupnost letů nabízených jednotlivými letišti, jejíž podstatou je uspokojování potřeby cestujících. Obecně lze tedy říci, že konektivita odráží, jakým způsobem jsou jednotlivé části sítě navzájem propojeny.

Burghouwt a Redondi [16] popisují dva pohledy na zkoumání konektivity. Prvním je přímá a nepřímá konektivita, která bere v úvahu počet a kvalitu leteckých spojení dostupných z letišť v síti. Druhou možností je konektivitu hodnotit na základě centrality a hubové konektivity, která vypovídá o dostupnosti ostatních uzlů v síti prostřednictvím uzlového letiště. Jak již bylo zmíněno, konektivita může být vnímána i podle toho, jestli se zaměřuje na města a letiště, jednotlivé regiony nebo celé státy. Z toho vyplývá, že pro zkoumání konektivity existuje více přístupů, ze kterých vycházejí různé metodologie. Metodologie a přístupy důležité pro tuto práci jsou popsány v kapitole 1.3.

V souvislosti s konektivitou se objevují další pojmy, kterými jsou odolnost a robustnost. Tyto pojmy spolu úzce souvisí, ale jejich význam je odlišný. V obou případech je ale důležité, že se jedná o popis chování sítě po účinku rušivé události.

1.2.1 Odolnost

V současné době je podle Reggiani a spol. [17] termín odolnost velmi populární a objevuje se nejčastěji v souvislosti s teroristickými útoky, pandemiemi či přírodními katastrofami. Ve svém díle pak odolnost popisují jako návrat sítě do rovnováhy po nějakém šoku. Podobně odolnost vnímá Datar [18], který ji popisuje jako reakci na narušení, kdy jde o schopnost vrátit se do původního stavu před narušením. Zanin a Lillo [4] definují odolnost jako: „*schopnost letecké sítě přizpůsobit své fungování před, po i během vnitřních a vnějších narušení tak, aby mohly požadované operace pokračovat za očekávaných i neočekávaných podmínek*“. Milan Janić [19] pak odolnost vysvětluje jako schopnost zůstat funkční během vlivu rušivé události a zároveň zachovat požadovanou úroveň bezpečnosti. V důsledku rušivých událostí dochází ke zpoždění a rušení linek, tedy ke zhoršení plánovaných služeb. Dle jeho práce pak rozsah tohoto zhoršení odráží odolnost sítě. Samotný termín odolnost (anglicky resilience) pochází z latinského „resilire“, což znamená odrazit se, vrátit se zpět nebo odolat [17]. Pro pojem odolnost neexistuje jednotná definice a význam může být chápán odlišně.

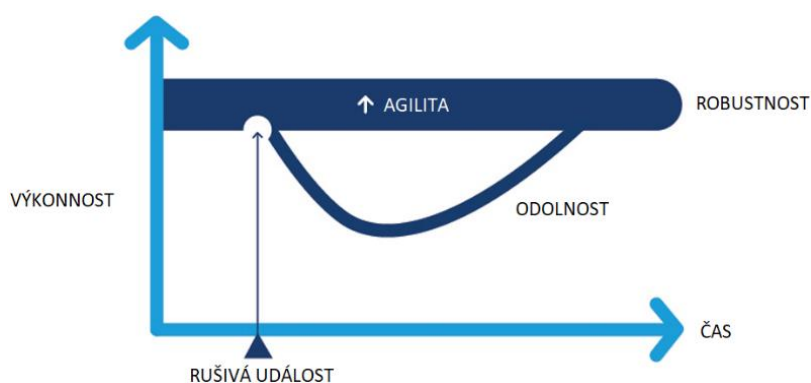
Janić [19] rozlišuje statickou a dynamickou odolnost. Statická odolnost popisuje schopnost sítě zachovat si svoji funkčnost během působení rušivé události. Dynamickou odolností lze popsat,

za jak dlouho se síť dokáže obnovit do původního či požadovaného stavu. Reggiani a spol. [17] ve své práci zmiňují i existenci technické a ekologické odolnosti.

1.2.2 Robustnost

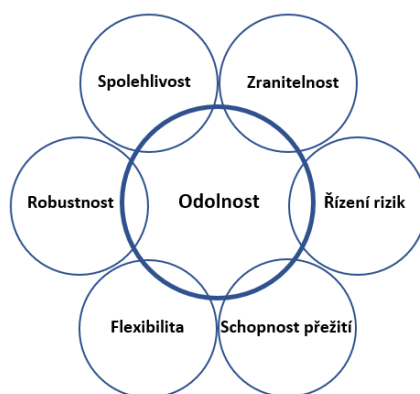
Podobně jako je tomu u pojmů konektivita a odolnost, pro pojem robustnost neexistuje jednotná definice. Dle Zhou a spol. [20] odráží robustnost schopnost systému zůstat funkční a výkonný v průběhu rušivých událostí. Bocaletti a spol. [21] popisují robustnost jako schopnost sítě vyhnout se poruše či selhání v případě, kdy dojde k poškození části sítě. Datar [18] dává robustnost do kontextu s pevností a účinností a uvádí, že čím je systém robustnější, tím méně je citlivý na rušivé události. Robustnost můžeme dělit na statickou a dynamickou. V případě statické robustnosti nedochází k redistribuci toku po odstranění uzlů v síti. Opakem je robustnost dynamická, která bere redistribuci toku v úvahu [3], [21]. Příkladem redistribuce by mohlo být uzavření letiště, namísto kterého je použito letiště záložní.

Pojmy odolnost a robustnost spolu úzce souvisí a v některých případech dochází k jejich záměně. Zásadní rozdíl, který popisuje Datar [18], spočívá v tom, že odolnost je reaktivní a robustnost proaktivní. Tento rozdíl je vyobrazen na obrázku (viz Obrázek 3). Odolnost je reakcí na rušivou událost, po které dochází ke snížení výkonnosti, a může být měřena jako doba návratu do původního stavu. V případě robustnosti by výkonnost měla být ovlivněna pouze minimálně, jelikož se s možným výskytem rušivé události počítá a bývají vyhotoveny pohotovostní plány. Schopnost rychlé implementace změn a přizpůsobení se situaci se nazývá agilita.



Obrázek 3: Robustnost a odolnost (přeloženo a upraveno [18])

Jiný pohled na vztah odolnosti a robustnosti nabízí Serdar a spol. [22]. Ve své práci odolnost popisují jako kombinaci několika aspektů, mezi které se řadí i robustnost. Jednotlivé součásti konceptu odolnosti jsou robustnost, spolehlivost, zranitelnost, řízení rizik, schopnost přežití a flexibilita (viz Obrázek 4). S podobným názorem se lze setkat i v dalších pracích. Například Reggiani a spol. [17] poukazují na to, že pokud bude odolnost vykládána jako robustnost, nebudou zohledněny všechny rozměry konceptu odolnosti.



Obrázek 4: Součásti konceptu odolnosti (přeloženo a upraveno [22])

1.2.3 Chyby a útoky

Letecká síť nebyla navržena tak, aby byla odolná vůči rušivým událostem, které by vedly k uzavírání letišť [1]. Mezi rušivé události mohou být zahrnuty například špatné počasí, přírodní katastrofy, teroristické útoky nebo letecké nehody a incidenty [19]. V této práci je odolnost a robustnost hodnocena na základě reálného rušení leteckých spojení a uzavírání letišť v průběhu pandemie Covid-19. Často ale bývá odolnost a robustnost zkoumaná pouze v teoretické úrovni a je nutné stanovit, v jakém pořadí budou uzly ze sítě odebírány. Mnoho modelů a simulací [1], [22], [23], [24] využívá koncept „errors and attacks“, neboli odebírání uzlů na základě nezamýšlených chyb a cílených útoků. V případě simulace útoku dochází k odebírání uzlů v předem stanoveném pořadí, například od nejvíce propojených uzlů, tedy těch s nejvyššími hodnotami konektivity [1], [23]. Tato situace by se dala přirovnat například k teroristickým útokům, které bývají cíleny na velká a propojená letiště, aby útok zasáhl síť co nejvíce. Jako chyba jsou popisovány situace, kdy dochází k náhodnému uzavření letišť či rušení linek [1], případně mohou být uzly odebírány na základě nejnižších hodnot konektivity [23]. Tato situace může v reálném provozu nastat například kvůli špatnému počasí, výpadku systému či dalších nepředvídatelných událostí.

1.3 Metody hodnocení konektivity

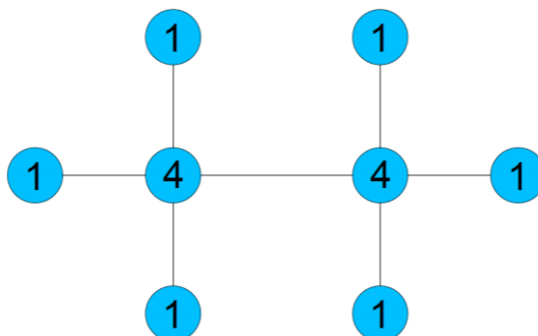
V této kapitole jsou popsány jednotlivé metodologie, které se používají pro zkoumání a hodnocení konektivity a odolnosti.

1.3.1 Metoda centrality

Koncept centrality vychází z teorie grafů, v rámci které je hojně využíván. Umožňuje určit důležitost jednotlivých uzlů v grafu, v závislosti na jejich vlivu na síť [22], [25]. Důležitost jednotlivých uzlů může být hodnocena z různých pohledů, na základě kterých jsou definovány jednotlivé druhy centrality:

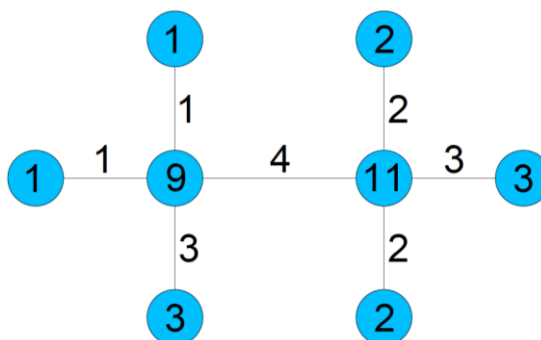
- Přímá centralita (Degree centrality)
- Vážená centralita (Weighted centrality)
- Přestupní centralita (Betweenness centrality)
- Centralita dostupnosti (Closeness centrality)

Nejjednodušším druhem centrality je přímá centralita, která odráží stupeň jednotlivých vrcholů. Stupeň vrcholu je dán počtem hran, které z vrcholu vystupují. Jinými slovy se jedná o počet vrcholů v síti, s kterými je zkoumaný vrchol přímo propojen [26]. V orientovaném grafu můžeme rozlišovat počet hran vcházejících do vrcholu (tzv. indegree) a z vrcholu vycházejících (tzv. outdegree) [25]. Pro znázornění přímé centrality byl vytvořen Obrázek 5. Ohodnocení jednotlivých uzlů, tedy hodnotu přímé centrality, představuje číslice uvnitř každého z uzlů. Nejvíce propojené uzly mají nejvyšší hodnotu přímé centrality.



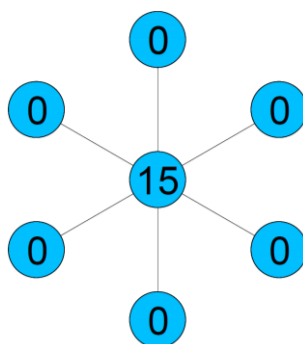
Obrázek 5: Znázornění přímé centrality

Vážená centralita, na rozdíl od přímé centrality, bere v úvahu ohodnocení hran [27]. Každé hraně je přiřazeno konkrétní číslo a jedná se tak o váženou síť. Jak již bylo zmíněno, hrany mohou být ohodnoceny například počtem letů, přepravených cestujících či nabízenou kapacitou. Vážená centralita vzniká součtem ohodnocení hran, které z uzlu vycházejí (viz Obrázek 6).



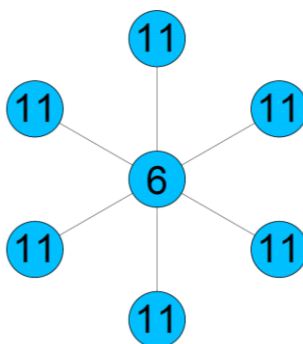
Obrázek 6: Znázornění vážené centrality

Přestupní centralita hodnotí důležitost uzlu podle toho, kolikrát se daný uzel vyskytuje na nejkratší cestě mezi dvěma jinými uzly [1]. Důležitá je zejména z pohledu leteckých společností při rozhodování o umístění uzlového letiště. Čím je tato centralita vyšší, tím je větší pravděpodobnost, že by se dané letiště mohlo stát hubem [6]. Obrázek 7 zachycuje příklad přestupní centrality. Krajní vrcholy jsou ohodnoceny nulou, jelikož jimi neprochází žádná cesta mezi jinými dvěma uzly. Centrální uzel je ohodnocen číslem 15, jelikož tímto uzlem prochází všech 15 cest mezi jednotlivými krajními uzly.



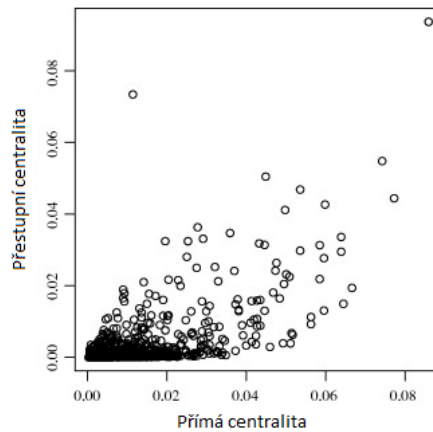
Obrázek 7: Znáznornění přestupní centrality

Centralita dostupnosti vypovídá o vzdálenosti mezi zkoumaným uzlem a ostatními uzly v síti [20]. Vyhodnocení probíhá na základě součtu nejkratších cest mezi jednotlivými uzly a zbylými uzly v síti [28]. Obrázek 8 zachycuje příklad centrality dostupnosti. Z centrálního vrcholu vede šest cest o délce jedna, vrchol je tedy ohodnocen číslem šest. Z každého z krajních uzlů vede nejkratší cesta délky jedna do centrálního uzlu. Zároveň existuje nejkratší cesta délky dva, do každého z pěti dalších krajních uzlů. V součtu je hodnota centrality dostupnosti pro každý z krajních uzlů 11.



Obrázek 8: Znáznornění centrality dostupnosti

Lordan a spol. [1] zjistili, že v letecké síti existují uzly, které mají vysoké hodnoty přestupní centrality a nízké hodnoty centrality přímé. Závislost přestupní centrality na přímé centralitě zachycuje Obrázek 9, který byl jedním z výsledků jejich práce. K podobnému závěru dospěli i Guimerá a Amaral [29]. Ve své práci uvádějí, že tento fenomén lze pozorovat jak celosvětově, tak na úrovni regionálních letišť. Sapre a Parekh [26] pak jako příklad tohoto jevu uvádějí indické letiště Guwahati, které slouží k propojení s odlehlými částmi východní Indie.



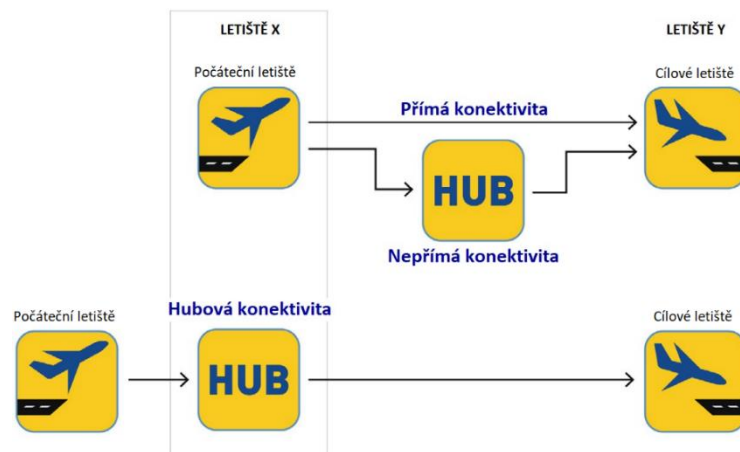
Obrázek 9: Závislost přístupní centrality na přímé v případě leteckých sítí (přeloženo [1])

1.3.2 NetScan Metodologie

Metodologie NetScan byla vyvinuta společností SEO Amsterdam Economics [12]. Dle SEO [30] lze díky modelu NetScan získat přehled například o konektivě mezi jednotlivými letišti a zbytkem světa, určit která letiště produkují nejvíce spojení nebo odhalit silné a slabé stránky leteckých sítí. Ve spolupráci s SEO tuto metodologii využívá Mezinárodní rada letišť Evropy (Airports Council International Europe, zkráceně ACI Europe) [14] pro zpracování tzv. Airport Industry Connectivity Report, neboli zprávy o konektivě letištního průmyslu. Tyto zprávy jsou vydávány jednou ročně a zachycují zejména 4 základní druhy konektivity:

- Přímá konektivita (Direct connectivity)
- Nepřímá konektivita (Indirect connectivity)
- Letištní konektivita (Airport connectivity)
- Hubová konektivita (Hub connectivity)

Přímá konektivita vyjadřuje počet přímých spojení z počátečního letiště a zároveň bere v úvahu frekvenci jednotlivých spojení. Nepřímá konektivita vyjadřuje počet spojení, která jsou nabízena z počátečního letiště díky navazujícím letům z hubového letiště. Jednotlivá spojení jsou ohodnocena na základě doby potřebné pro přestup a prodloužení trasy v důsledku nepřímého směrování [14]. Letištní konektivita popisuje celkovou míru propojenosti letiště se zbytkem světa a bere v úvahu přímou i nepřímou konektivitu [12]. Hubová konektivita vyjadřuje počet navazujících letů, které by mohly být uskutečněny z hubového letiště. V úvahu jsou brány minimální a maximální doba potřebná pro přestup a prodloužení trasy v důsledku nepřímého směrování [14]. Jednotlivé druhy konektivity zachycuje Obrázek 10.



Obrázek 10: Druhy konektivity dle SEO (upraveno podle [14])

1.3.3 Ostatní metodologie

Z pohledu této práce jsou metoda centrality a NetScan metodologie nejvýznamnější. Mimo tyto metodologie existuje i několik dalších. Jako příklad jsou uvedeny indexy konektivity využívané organizací IATA a Světovou bankou.

Na rozdíl od ACI Europe, která popisuje konektivitu na úrovni letišť, hodnotí IATA [12] konektivitu z pohledu jednotlivých měst, států a regionů. IATA index konektivity vyjadřuje, jakým způsobem letecká spojení ovlivňují a podporují vývoj ekonomiky států a jak je země integrovaná do světové letecké sítě. Odráží počet a důležitost jednotlivých destinací dostupných z letišť v dané zemi a počet navazujících spojení z těchto destinací [12].

Z pohledu Světové banky je konektivita hodnocena na úrovni států, kdy jednotlivé státy představují uzly v rámci celosvětové sítě letecké dopravy [31]. Index konektivity Světové banky popisuje vztah mezi konektivitou a světovým obchodem.

2 Výběr letišť a konektivita před pandemií

Tato práce analyzuje konektivitu a odolnost 24 evropských letišť, která byla vybrána na základě počtu odbavených cestujících za rok 2019. Hranice pro výběr byla stanovena na 25 milionů cestujících. Byla použita data Statistického úřadu Evropské unie (Eurostat) [32], konkrétně dataset „Air passenger transport by main airports in each reporting country“ (AVIA_PAOA). Eurostat zveřejňuje kvalitní evropské statistiky a ukazatele, na základě kterých je možné mimo jiné porovnávat jednotlivé státy či regiony. Eurostat data pouze zpracovává a konsoliduje. Samotný sběr dat provádí statistické úřady zemí, které jsou členy Evropské unie (EU), Evropského sdružení volného obchodu (ESVO, anglicky EFTA) a několika dalších zemí [32]. Z tohoto důvodu neobsahují statistiky Eurostatu data o evropských státech, které nejsou členy EU. Výjimku tvoří Norsko a Švýcarsko, které jsou členy ESVO. Druhou výjimku tvoří spojené království, které bylo v roce 2019 součástí EU.

Na základě výše popsaného postupu byla pro další zpracování vybrána tato letiště:

- Amsterdam Schiphol (AMS)
- Stockholm Arlanda (ARN)
- Athény (ATH)
- Barcelona El Prat (BCN)
- Brusel (BRU)
- Paříž Charles de Gaulle (CDG)
- Kodaň (CPH)
- Dublin (DUB)
- Düsseldorf (DUS)
- Řím Fiumicino (FCO)
- Frankfurt nad Mohanem (FRA)
- Londýn Gatwick (LGW)
- Londýn Heathrow (LHR)
- Lisabon (LIS)
- Madrid Barajas (MAD)
- Manchester (MAN)
- Mnichov (MUC)
- Milán Malpensa (MXP)
- Paříž Orly (ORY)
- Oslo Gardermoen (OSL)
- Palma de Mallorca (PMI)
- Londýn Stansted (STN)
- Vídeň (VIE)
- Zürich (ZRH)

Počet odbavených cestujících za rok 2019 pro vybraná letiště je uveden v příloze 1.

2.1 Konektivita před pandemií

Pro určení hodnot konektivity před pandemií byla použita zpráva o konektivě letištního průmyslu (Airport Industry Connectivity Report) 2019 [14] vydaná organizací ACI. Pro zpracování zprávy je využívána metodologie NetScan. Vstupem pro vytvoření modelu jsou data společnosti OAG [33], která poskytuje data vysoké kvality z oblasti letectví. Pro zpracování jsou konkrétně využívány údaje o přímých letech z letových řádů pro cestující [14]. Sledovaným obdobím je třetí týden v červnu, který představuje průměrný týden v roce (není zkrácený letními prázdninami, svátky či slabší zimní sezónou) [34]. Hodnoty přímé, nepřímé a letištní konektivity pro rok 2019 zachycuje Tabulka 1.

Tabulka 1: Hodnoty přímé, nepřímé a letištní konektivity pro rok 2019 [14]

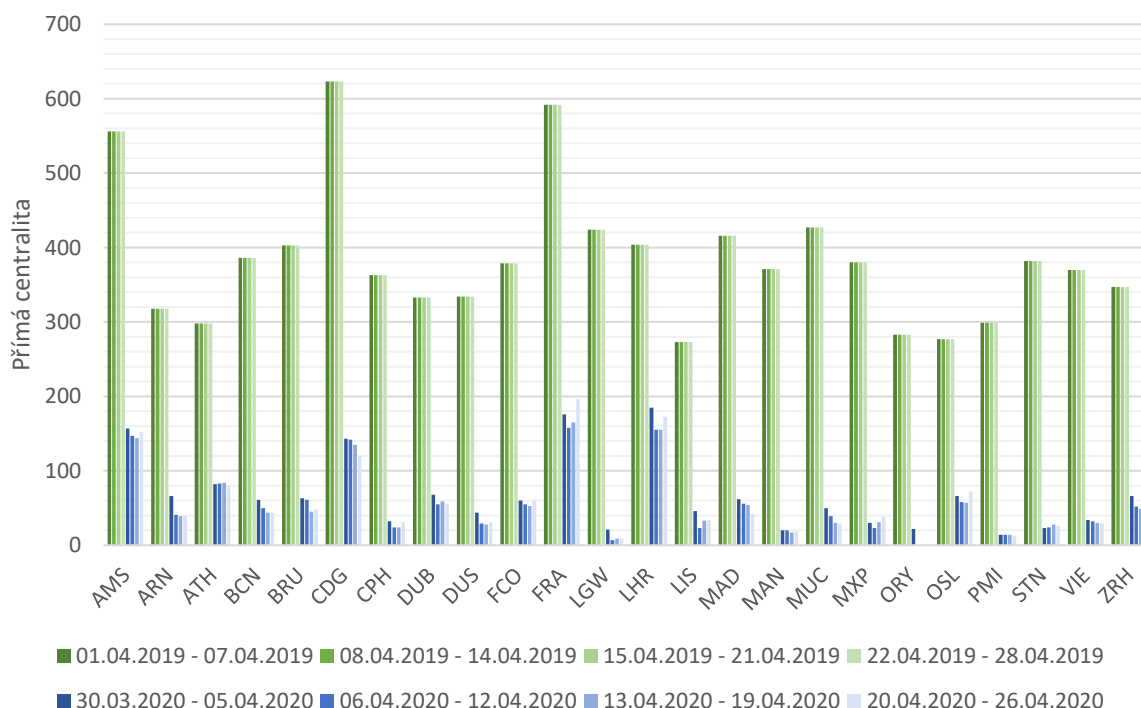
	Letiště	Přímá konektivita	Nepřímá konektivita	Letištní konektivita
1	FRA	5 098	14 145	19 243
2	AMS	4 870	11 962	16 832
3	CDG	4 760	15 710	20 469
4	LHR	4 682	21 244	25 925
5	MUC	4 051	10 735	14 786
6	MAD	3 977	8 999	12 976
7	BCN	3 453	7 768	11 221
8	FCO	3 289	8 288	11 577
9	LGW	2 961	1 721	4 683
10	VIE	2 754	6 233	8 987
11	CPH	2 630	6 179	8 809
12	PMI	2 624	2 058	4 682
13	ZRH	2 528	8 030	10 557
14	OSL	2 494	3 938	6 432
15	ORY	2 406	1 131	3 537
16	ARN	2 402	5 792	8 194
17	ATH	2 377	4 770	7 147
18	DUB	2 353	6 393	8 746
19	DUS	2 190	6 151	8 340
20	LIS	2 185	6 442	8 628
21	BRU	2 155	6 395	8 551
22	MAN	2 146	5 185	7 331
23	MPX	2 008	5 698	7 705
24	STN	1 846	394	2 239

Letiště FRA se při hodnocení přímé konektivity umístilo na prvním místě a z pohledu nepřímé a letištní konektivity zaujímalo třetí místo. Nejvyšší hodnoty nepřímé a letištní konektivity vykazovalo letiště LHR, které se z pohledu přímé konektivity umístilo na čtvrtém místě. Nejnižší hodnoty přímé, nepřímé i letištní konektivity mělo z vybraných letišť londýnské letiště Stansted. Největší rozdíly v umístění z pohledu přímé a nepřímé konektivity vykazovaly letiště LGW (9. a 22. místo), LIS (20. a 10. místo), BRU (21. a 11. místo) a PMI (12. a 21. místo).

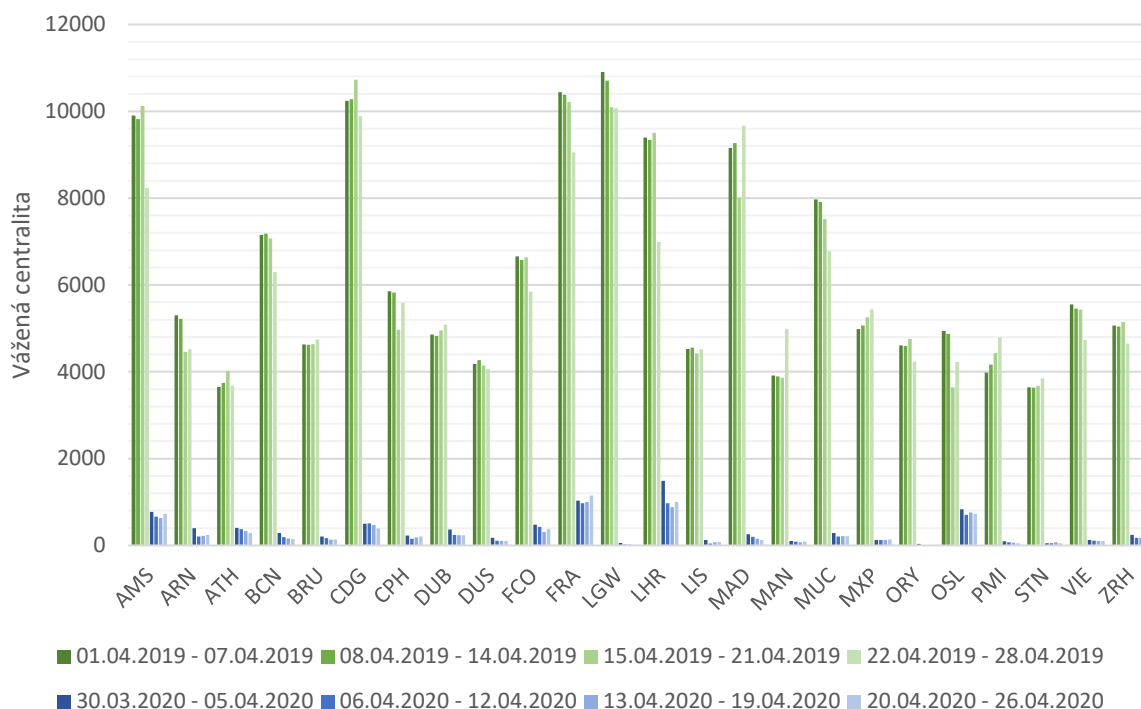
3 Konektivita a odolnost v průběhu pandemie

Pandemie Covid-19 ovlivnila leteckou dopravu v doposud nepředstavitelném měřítku. Virus Covid-19 se řadí do skupiny koronavirů. Ty mohou způsobovat onemocnění v různě závažných formách, od nachlazení až po vážná zdravotní rizika [35]. Covid-19 byl identifikován 7. ledna 2020 [36]. 30. ledna 2020 prohlásil generální ředitel WHO (World Health Organization, česky Světová zdravotnická organizace) šíření onemocnění za stav ohrožení veřejného zdraví [37]. Vzhledem k rychlému šíření mimo Čínu, kde se virus objevil poprvé, byl 11. března 2020 Covid-19 označen za pandemii [36].

Ve snaze zpomalit šíření viru začaly státy zavádět různá protikoronavirová opatření. Některé státy uzavřely letiště pro komerční leteckou dopravu, jiné zavedly až 14 denní karanténu pro cestující přilétající do země [34]. Samotná letiště pak zaváděla další opatření pro zajištění zdraví a bezpečnosti cestujících [38]. V dubnu 2020 došlo k největší kulminaci krize. Dle IATA [12] došlo v nejhorším okamžiku ke snížení počtu letů o 80 % oproti hodnotám z počátku roku. V důsledku restrikcí se snížil počet unikátních city-pairů (dvojice měst, mezi kterými je uskutečněna letecká doprava) o 67 % oproti hodnotám ze stejného období v roce 2019. ICAO [39] uvádí, že v důsledku pandemie došlo v osobní letecké přepravě za rok 2020 k poklesu o 60 % ve srovnání s rokem 2019. Pro ilustraci byly vytvořeny grafy, které zachycují hodnoty přímé a vážené centrality pro 4 týdny v dubnu 2019 a 2020 (viz Obrázek 11 a Obrázek 12). Jedná se o porovnání období největší kulminace krize se stejným obdobím v předchozím roce.



Obrázek 11: Srovnání hodnot přímé centrality pro duben 2019 a 2020



Obrázek 12: Srovnání hodnot vážené centrality pro duben 2019 a 2020

Období zkoumané v této práci je 6.1.2020 – 11.10.2020, tedy 40 týdnů. Období bylo zvoleno tak, aby zachycovalo situaci před propuknutím pandemie, největší kulminaci v dubnu 2020 a následné předpokládané zlepšení situace. Byla zvolena jednotka jeden týden, aby bylo možné zachytit i změny v průběhu jednotlivých měsíců. Pro zjednodušení neodpovídá číslování jednotlivých týdnů v práci číslování týdnů dle kalendáře. Týdny jsou číslovány od jedničky a první zkoumaný týden, 6.1.-12.1.2020, odpovídá druhému kalendářnímu týdnu.

3.1 Zdroj dat

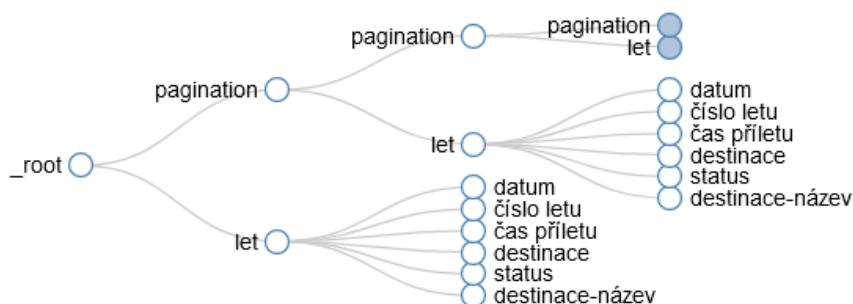
Pro zpravování byla použita data z webových stránek Flightera [40]. Flightera využívá volně dostupná data, na základě kterých jsou generovány dostupné informace. Mezi zdroje těchto dat patří například letecké společnosti, letiště či údaje získané sledováním letadel. Pro generování informací využívá Flightera i algoritmy strojového učení. Vzhledem k původu dat nelze jednoznačně prokázat konzistentnost těchto dat a musí být brána v úvahu případná chyba. Ta by ale neměla další zpracování bakalářské práce výrazně ovlivnit.

Pomocí webu Flightera lze získat informace o jednotlivých odletech a příletech pro vybrané letiště. Jako ukázka jsou zobrazeny přílety na letiště AMS (viz Obrázek 13). Informace mimo jiné obsahují datum a čas příletu, počáteční letiště, leteckou společnost, kód letu a status (přistálo, zrušeno apod.). U každého letu lze získat i podrobnější informace, které ale pro zpracování bakalářské práce nebyly využity.

DATE / STATUS	FLIGHT	FROM	SCHEDULED ARRIVAL	DEPARTED	ARRIVED	DURATION
Wed, 15. Jan 2020 Landed	BA2762 BAW81HM British Airways BA/BAW	London (LGW / EGKK)	18:05 CET 17:05 UTC	15:38 GMT 7min early	17:41 CET 24min early	1h 3m
Wed, 15. Jan 2020 Landed	VY8308 VLG8308 Vueling VY/VLG	Barcelona (BCN / LEBL)	18:15 CET 17:15 UTC	15:42 CET 3min early	17:46 CET 28min early	2h 4m
Wed, 15. Jan 2020 Landed	SK1555 SAS1555 SAS Scandinavian Airlines SK/SAS	Stockholm (ARN / ESSA)	18:15 CET 17:15 UTC	16:08 CET 2min early	18:32 CET 17min late	2h 24m
Wed, 15. Jan 2020 Landed	U27934 EJU7934 easyJet U2/EZY	Tel Aviv (TLV / LLBG)	18:20 CET 17:20 UTC	14:23 IST 23min late	18:06 CET 13min early	4h 43m
Wed, 15. Jan 2020 Landed	AY1305 FIN2XL Finnair AY/FIN	Helsinki (HEL / EFHK)	18:20 CET 17:20 UTC	16:46 EET 6min late	18:38 CET 18min late	2h 52m
Wed, 15. Jan 2020 Landed	AF1140 AFR114Q Air France AF/AFR	Paris (CDG / LFPG)	18:20 CET 17:20 UTC	16:51 CET 4min early	18:01 CET 19min early	1h 10m

Obrázek 13: Flightera – příklad dostupných dat [40]

Pro získání potřebných dat byl využit volně dostupný nástroj Web Scraper [41]. Nejdříve byla vytvořena „mapa stránky“ (sitemap), pomocí které byla nadefinována data pro extrakci. Pro potřeby bakalářské práce byla zvolena tato data: datum, číslo letu, čas příletu/odletu, kód a název destinace a status. Po získání těchto dat se pomocí příkazu „pagination“ zobrazí následující stránka a celý proces se opakuje. Grafické znázornění celého procesu zachycuje Obrázek 14. Získaná data lze exportovat do formátu *.xlsx nebo *.csv. Na obrázku je uveden příklad výsledné podoby dat ve formátu *.xlsx (viz Obrázek 15). Tímto způsobem byla získána data o odletech a příletech pro každé z 24 vybraných letišť.



Obrázek 14: Grafické znázornění procesu získávání dat pomocí nástroje Web Scraper

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	web-scrap	web-scrap	paginatio	datum	číslo letu	čas příletu	destinace	status	destinace-název
2	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	BA2762	17:05 UTC	London	Landed	London
3	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	VY8308	17:15 UTC	Barcelona	Landed	Barcelona
4	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	SK1555	17:15 UTC	Stockholm	Landed	Stockholm
5	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	U27934	17:20 UTC	Tel Aviv	Landed	Tel Aviv
6	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	AY1305	17:20 UTC	Helsinki	Landed	Helsinki
7	16570116;	https://w							
8	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	AF1140	17:20 UTC	Paris	Landed	Paris
9	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	HV5616	17:25 UTC	Eilat	Landed	Eilat
10	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	SK827	17:25 UTC	Oslo	Landed	Oslo
11	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	KL876	17:30 UTC	Bangkok	Landed	Bangkok
12	16570116;	https://w		Wed, 15. Jan 2020	IB3724	17:30 UTC	Madrid	Landed	Madrid

Obrázek 15: Výsledná podoba získaných dat ve formátu *.xlsx

3.2 Použitá metodologie

V kapitole 1.3 byly popsány jednotlivé metodologie, které je možné použít pro hodnocení konektivity. Metoda centrality je teoretický přístup, zatímco v případě metodologií využívaných ACI, IATA či Světovou bankou se již jedná o praktické využití konektivity. Pro zpracování bakalářské práce byla zvolena metoda centrality. Jedním z důvodů je povaha a množství dat, které bylo možné získat. Metodologie NetScan pro provedení analýzy vyžaduje velké množství dat a zároveň je závislá na dalších kvalitativních parametrech. IATA a Světová banka hodnotí konektivitu na úrovni států, tudíž se pro práci také nehodí. Pro hodnocení konektivity byly použity dva druhy centrality – přímá a vážená.

Přímá centralita je určena stupněm vrcholu k_i , tedy počtem hran, které z vrcholu vystupují. V případě letecké sítě se jedná o počet letišť, na které existuje přímé spojení ze zkoumaného letiště. Matematicky lze přímou centralitu vyjádřit jako:

$$k_i = \sum_j a_{ij} \quad (1)$$

kde a_{ij} představuje prvky matice sousednosti A . Pro každý letištní pár (i – letiště odletu, j – letiště příletu) má prvek a_{ij} hodnotu 1, pokud mezi těmito letišti existuje minimálně jedno přímé spojení. Pokud takové spojení neexistuje, prvek a_{ij} nabývá hodnoty 0 [1].

Vážená centralita bere v úvahu mimo stupně vrcholu i ohodnocení jednotlivých hran. Je určena váženým stupněm s_i , který představuje součet ohodnocení všech hran, které z vrcholu vystupují. Ve zkoumané síti je každé hraně přiřazeno číslo, které znázorňuje týdenní frekvenci letů mezi danou dvojicí letišť. Vážená centralita tedy představuje počet letů, které ze zkoumaného letiště v daném týdnu odlétají, nebo na něj přilétají. Matematicky lze váženou centralitu vyjádřit jako:

$$s_i = \sum_j w_{ij} \quad (2)$$

kde w_{ij} představuje prvky vážené matice sousednosti W . Pro každý letištní pár (i – letiště odletu, j – letiště příletu) nabývá prvek w_{ij} kladných hodnot, pokud mezi letišti existuje přímé spojení. Konkrétní hodnoty jsou dány ohodnocením jednotlivých hran. Pokud některé hraně není přiřazeno ohodnocení, je hodnota rovna 1. Pokud mezi danými letišti spojení neexistuje, hodnota prvku w_{ij} je 0 [27].

Přestupní centralita a centralita dostupnosti nebyly pro analýzu použity. Data pro každé z 24 vybraných letišť mají podobu přímých spojení z těchto letišť. Podobu sítě každého ze zkoumaných letišť je možné přirovnat k modelu hub-and-spoke. Výsledná síť, která je tvořena 24 vybranými letišti a jejich sítěmi, obsahuje v součtu téměř 900 uzlů. Mezi těmito

uzly mohou existovat letecká spojení, která v práci nejsou zachycena. Pro jejich zachycení by bylo nutné získat data o odletech a příletech z každého letiště v současné síti, což je s metodikou sběru dat, která byla v práci použita, téměř nemožné. Z důvodu absence těchto dat nelze přestupní centralitu a centralitu dostupnosti do analýzy zahrnout, jelikož by výsledky byly zkreslené.

Pro hodnocení odolnosti nebyla nalezena žádná definovaná metodologie. Odolnost je vnímána velmi různě a neexistuje pro ni jednoznačná definice. Na rozdíl od konektivity, která byla hodnocena pro jednotlivá letiště, byla v této práci hodnocena odolnost sítě jako celku. Pro ohodnocení celé sítě byl použit průměrný stupeň, matematicky vyjádřený jako:

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_i^N k_i \quad (3)$$

kde k_i představuje stupeň vrcholu i a N je celkový počet vrcholů [23]. Podobným způsobem byl v této práci použit průměrný vážený stupeň, tedy průměr součtu ohodnocení hran vycházejících z jednotlivých uzlů [42]. Matematicky lze průměrný vážený stupeň vyjádřit jako:

$$\langle s \rangle = \frac{1}{N} \sum_i^N s_i \quad (4)$$

kde N je celkový počet vrcholů a s_i představuje vážený stupeň vrcholu i . Tyto metriky byly použity pro stanovení období největší kulminace krize. Část sítě, která zůstala v tomto období funkční, je považována za nejodolnější.

3.3 Gephi

Pro zpracování dat byl použit software Gephi. Dle oficiálního popisu slouží pro vizualizaci a analýzu všech druhů grafů a sítí [43]. V bakalářské práci je software použit pro výpočet hodnot centrality.

Aby bylo možné s Gephi pracovat, bylo nejdříve nutné data upravit a získat týdenní frekvence letů mezi jednotlivými letišti. Data byla upravena v MS Excel a pro získání frekvencí byla využita kontingenční tabulka (viz Obrázek 16), která umožňuje jednoduché zpracování a analýzu dat. Lety byly vyfiltrovány na základě statusu. Pro další zpracování byly použity pouze lety označené statusem Landed, v překladu přistál. Statusy, které se v datové sadě objevily, ale pro další zpracování byly vyfiltrovány jsou Cancelled (zrušený), Diverted (odkloněný) a Unknown (neznámý). Jako ukázka dat získaných po úpravě, byla vytvořena příloha 2, která obsahuje část týdenních frekvencí letů.

	A	B	C	D	E	F
1	status	Landed	Y			
2						
3	Počet z číslo letu datum					
4	City pair	06.01.2020 - 12.01.2020	13.01.2020 - 19.01.2020	20.01.2020 - 26.01.2020	27.01.2020 - 02.02.2020	03.02.2020 - 09.02.2020
5	MAN-AUH	14	14	14	14	14
6	MAN-DXB	20	21	21	21	21
7	MAN-CRL	9	9	9	9	8
8	MAN-DUB	73	72	71	71	73
9	MAN-EDI	15	13	15	15	15
10	MAN-BHD	38	37	42	41	40
11	MAN-EXT	18	17	18	18	16
12	MAN-SNN	5	4	5	5	5
13	MAN-ABZ	26	24	29	28	28
14	MAN-INV	12	14	15	15	13
15	MAN-BFS	23	23	23	27	26
16	MAN-ZRH	14	14	14	14	15
17	MAN-CDG	58	57	57	57	56
18	MAN-LHR	37	37	38	39	40
19	MAN-BLL	12	12	11	12	12
20	MAN-ORK	16	16	16	14	18
21	MAN-WRO	2	2	2	2	2

Obrázek 16: Část kontingenční tabulky, která byla použita pro získání týdenních frekvencí letů

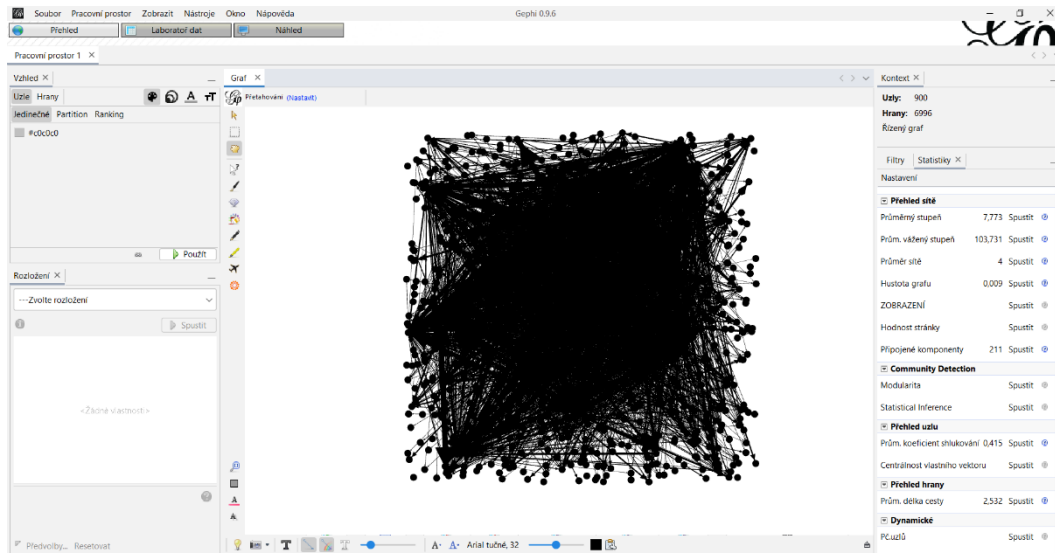
Jako vstup pro Gephi slouží tabulka uzlů a hran. Tabulka uzlů musí obsahovat označení jednotlivých uzlů (Label) a jejich jednoznačnou identifikaci (ID), například jedinečné číslo. Tabulka hran musí obsahovat zdroj (Source), v tomto případě letiště odletu a cíl (Target), neboli letiště příletu. Dále by měla obsahovat typ hran (Type), pomocí kterého lze definovat, zda je hrana orientovaná či neorientovaná a ohodnocení hrany (Weight), které v tomto případě vyjadřuje týdenní frekvence letů. Část tabulky uzlů a hran zachycuje Obrázek 17.

a)	A	B
1	ID	Label
2	AAE	AAE
3	AAL	AAL
4	AAR	AAR
5	ABC	ABC
6	ABJ	ABJ
7	ABV	ABV
8	ABZ	ABZ
9	ACC	ACC
10	ACE	ACE
11	ADA	ADA
12	ADB	ADB
13	ADD	ADD
14	AER	AER
15	AES	AES

b)	A	B	C	D
1	Source	Target	Type	Weight
2	AAE	CDG	Directed	3
3	AAE	ORY	Directed	3
4	AAL	AMS	Directed	21
5	AAL	BCN	Directed	1
6	AAL	CPH	Directed	78
7	AAL	OSL	Directed	9
8	AAL	STN	Directed	3
9	AAR	ARN	Directed	6
10	AAR	CPH	Directed	44
11	AAR	LGW	Directed	2
12	AAR	MAN	Directed	2
13	AAR	MUC	Directed	1
14	AAR	OSL	Directed	9
15	AAR	STN	Directed	5

Obrázek 17: Vstup pro Gephi, a) část tabulky uzlů, b) část tabulky hran

Po nahrání vstupních dat vykreslí Gephi síť, kterou lze najít pod záložkou „Přehled“ (viz Obrázek 18). Zobrazený graf je možné upravovat, například měnit rozložení uzlů či barvy jednotlivých uzlů a hran. Pomocí nabídky „Statistiky“ je možné nechat spočítat jednotlivé metriky, mezi které patří hodnoty centrality. Výsledné hodnoty lze najít pod záložkou „Laboratoř dat“ (viz Obrázek 19). Pro další zpracování je možné tyto hodnoty exportovat do formátu *.csv.



Obrázek 18: Gephi – přehled s vykreslením sítě

Id	Label	Interval	Stupeň Down...	Stupeň Ven	Stupeň v	Vážený stupeň down...	Vážený stupeň in...	Vážený stupeň...	Clustering Coefficient...	Eccentricity	Closeness Centrall...	Harmonic Closeness Centrall...	Betweenness Centrall...	Component L...	Strongly Connected ...
FRA	FRA	260	256	516	3975.0	3970.0	7945.0	0.067042	3.0	0.602151	0.683532	54617.703667	0	17	
CDG	CDG	253	253	506	4031.0	4043.0	8074.0	0.064006	3.0	0.602332	0.68254	65215.348591	0	17	
AMS	AMS	245	247	492	4167.0	4161.0	8328.0	0.066524	2.0	0.61258	0.68378	51640.488628	0	17	
LHR	LHR	185	187	372	4308.0	4295.0	8603.0	0.062575	3.0	0.557676	0.627232	42289.761388	0	17	
MUC	MUC	185	184	369	3387.0	3276.0	6543.0	0.113656	3.0	0.560847	0.6312	20495.658112	0	17	
MAD	MAD	183	183	366	3559.0	3559.0	7118.0	0.1098	2.0	0.578811	0.636161	39084.210019	0	17	
LGW	LGW	171	170	341	2065.0	2058.0	4123.0	0.089164	3.0	0.535032	0.606151	22786.303665	0	17	
BCN	BCN	162	165	327	2550.0	2558.0	5108.0	0.133516	2.0	0.569975	0.622768	19665.985434	0	17	
FCO	FCO	161	166	327	2454.0	2469.0	4923.0	0.120153	3.0	0.560935	0.618552	21131.598865	0	17	
VEF	VEF	161	164	325	2163.0	2185.0	4346.0	0.130084	3.0	0.558603	0.616319	20438.715396	0	17	
STN	STN	152	154	306	1461.0	1464.0	2925.0	0.079032	3.0	0.525822	0.592758	35957.347686	0	17	
MAN	MAN	148	148	296	1401.0	1398.0	2799.0	0.122384	3.0	0.541063	0.59871	18636.263896	0	17	
BRU	BRU	144	148	292	1629.0	1631.0	3260.0	0.123875	3.0	0.540628	0.598462	14345.523751	0	17	
MXP	MXP	149	142	291	1638.0	1633.0	3271.0	0.134688	2.0	0.539068	0.606955	20953.808956	0	17	
CPH	CPH	144	145	289	1999.0	2022.0	4021.0	0.152081	2.0	0.506467	0.607887	20098.049494	0	17	
DUB	DUB	140	139	279	1784.0	1794.0	3578.0	0.153383	3.0	0.557214	0.603175	20045.586346	0	17	
ZRH	ZRH	140	139	279	2015.0	2017.0	4032.0	0.168215	3.0	0.539326	0.593254	7763.984338	0	17	
LIS	LIS	128	128	256	1891.0	1899.0	3790.0	0.165057	2.0	0.552632	0.595238	2913.33557	0	17	
DUS	DUS	126	126	252	1659.0	1674.0	3333.0	0.159399	3.0	0.532067	0.582589	14128.931437	0	17	
ATH	ATH	119	120	239	1459.0	1468.0	2927.0	0.150928	3.0	0.539759	0.584077	43683.90139	0	17	
ARN	ARN	117	119	236	1691.0	1705.0	3396.0	0.164341	3.0	0.538006	0.578373	30451.870118	0	17	
ORY	ORY	103	104	207	1865.0	1859.0	3744.0	0.064061	3.0	0.472906	0.55249	34784.790927	0	17	
OSL	OSL	99	101	200	1918.0	1919.0	3837.0	0.180825	3.0	0.518119	0.561756	30231.889105	0	17	
PMI	PMI	61	61	122	775.0	777.0	1552.0	0.269117	3.0	0.492308	0.52505	4990.560717	0	17	
TXL	TXL	24	24	48	843.0	837.0	1680.0	0.88587	2.0	0.509091	0.517857	312.850415	0	17	
AGP	AGP	23	23	46	433.0	431.0	864.0	0.883399	3.0	0.497409	0.509673	277.095472	0	17	
GVA	GVA	23	23	46	800.0	807.0	1607.0	0.875484	3.0	0.506787	0.515873	312.850415	0	17	
HAM	HAM	23	23	46	662.0	659.0	1321.0	0.926877	3.0	0.5	0.511409	93.307131	0	17	
PRG	PRG	23	23	46	453.0	451.0	904.0	0.899209	3.0	0.508321	0.516865	300.407137	0	17	

Obrázek 19: Gephi – spočítané hodnoty pro jednotlivé uzly

3.4 Vyhodnocení

Pro vyhodnocení výsledků byl použit Matlab. Aby bylo možné provnávat data pro jednotlivá letiště, byla standardizována pomocí z-skóre. Jedná se o nejčastější způsob standardizace a lze se setkat i s označením standardizace směrodatnou odchylkou. Matematicky lze tento proces vyjádřit jako:

$$y_{ij} = z = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_{jj}} \quad (5)$$

kde x_{ij} představuje původní hodnotu, \bar{x}_j výběrový průměr a s_{jj} směrodatnou odchylku. Výsledná data mají průměr 0, rozptyl 1 a jednotlivé hodnoty se pohybují v rozmezí -3 až 3 [44].

Pro srovnání jednotlivých skupin dat, například zkoumaných letišť či týdnů, lze použít testování hypotéz. Základem je stanovení hypotéz, tzv. nulové a alternativní. Nulová hypotéza, která

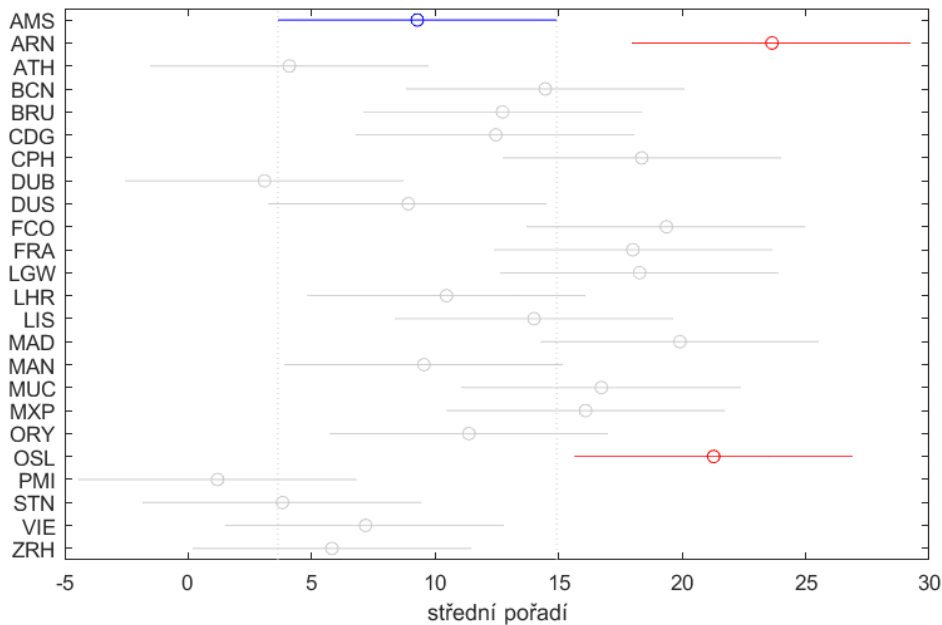
bývá označována H_0 , bývá nějaké tvrzení o souboru dat. Alternativní hypotéza, H_A , nulovou hypotézu popírá. Jedním z výstupů testu je p-hodnota (p_h), na základě které je nulová hypotéza zamítnuta či nikoli. Zároveň je potřeba stanovit hladinu významnosti α , která se zpravidla stanovuje na 0,05. O výsledku testu je rozhodnuto na základě porovnání p-hodnoty a hladiny významnosti. Platí-li $p_h < \alpha$, nulová hypotéza je zamítnuta [45]. Existuje několik druhů testů, mezi kterými lze volit na základě podoby dat.

Pro vyhodnocení byl v této práci zvolen Friedmanův test. Jedná se o neparametrický test pro více výběrů, u kterých se nepředpokládá normální rozložení dat [45]. Nulová hypotéza říká, že výběry (sloupce) pocházejí ze stejného rozdělení. Alternativní hypotéza ji popírá, tedy říká, že data nepocházejí ze stejného rozdělení. Vrácená p-hodnota se pohybuje v rozmezí od 0 do 1. Pokud je p-hodnota nízká (pod hladinou významnosti), nulová hypotéza je zamítnuta [46]. Zároveň je pro každý sloupec spočten „mean rank“, což by bylo možné do češtiny přeložit jako střední pořadí. Hodnoty jednotlivých pozorování (řádků) jsou seřazeny a ohodnoceny dle jejich pořadí. Nejmenší hodnota má pořadí 1, nejvyšší hodnota má pořadí odpovídající počtu prvků. Pro každý výběr (sloupec) je následně spočten průměr pořadí všech jeho prvků. Tento průměr vyjadřuje střední pořadí [47]. V případech, kdy byla nulová hypotéza zamítnuta, byla využita post-analýza.

Post-analýza umožňuje určit, které výběry se od sebe liší. V této práci byl použit Bonferroniho test určený pro neparametrické testy [45]. Bonferroniho test porovnává dvojice výběrů a na základě p-hodnoty je možné určit, zda se od sebe jednotlivé dvojice liší. Část statistických výsledků testu zachycuje Obrázek 20. První dva sloupce představují porovnávané skupiny, v posledním sloupci je výsledná p-hodnota. Mimo statistických výsledků je výstupem i graf (viz Obrázek 21). Průměr skupiny reprezentuje symbol (kolečko) a čára představuje interval pro porovnávání. Pokud se intervaly (čáry) nepřekrývají, průměry skupin se výrazně liší. V opačném případě, tedy pokud se intervaly překrývají, mezi průměry skupin není výrazný rozdíl [48]. Graf je interaktivní a zvolená skupina je zvýrazněna modře.

1.0000	2.0000	-25.6520	-14.3636	-3.0752	0.0005
1.0000	3.0000	-6.1066	5.1818	16.4702	1.0000
1.0000	4.0000	-16.4702	-5.1818	6.1066	1.0000
1.0000	5.0000	-14.7429	-3.4545	7.8338	1.0000
1.0000	6.0000	-14.4702	-3.1818	8.1066	1.0000
1.0000	7.0000	-20.3793	-9.0909	2.1975	0.7090
1.0000	8.0000	-5.1066	6.1818	17.4702	1.0000
1.0000	9.0000	-10.9248	0.3636	11.6520	1.0000
1.0000	10.0000	-21.3793	-10.0909	1.1975	0.2257
1.0000	11.0000	-20.0157	-8.7273	2.5611	1.0000
⋮					

Obrázek 20: Část statistických výsledků post-analýzy



Obrázek 21: Příklad grafu, který je jedním z výsledků post-analýzy

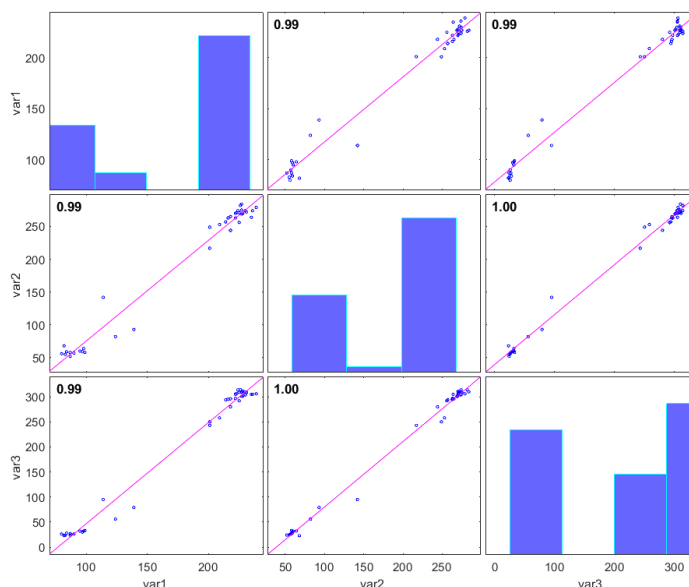
Pro porovnání průběhů spočtených hodnot centrality pro jednotlivá letiště byla použita korelační analýza. Korelace umožňuje zjistit, zda spolu dvě spojitě náhodné veličiny souvisí a hodnotí jejich vzájemný vztah [49]. Konkrétně byl pro hodnocení vztahu použit Pearsonův korelační koeficient. Tento koeficient může nabývat hodnot od -1 do 1 a umožňuje porovnávat lineární vztah zkoumaných veličin. Hodnoty blízké 1 vyjadřují přímou závislost veličin, tzv. korelovanost. Hodnoty blízké -1 naopak vyjadřují nepřímou závislost, tzv. antikorelaci [45]. Matematicky lze Pearsonův korelační koeficient vyjádřit jako:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) s_x s_y} \quad (6)$$

kde x_i a y_i jsou prvky veličin X a Y , \bar{x} a \bar{y} jsou výběrové průměry, s_x a s_y představují výběrové směrodatné odchylky a n je počet prvků jednotlivých veličin [49].

Pro výpočet Pearsonových koeficientů pro jednotlivé dvojice letišť byl použit v Matlabu příkaz „corrplot“. Výstupem je korelační matice, její grafické znázornění a matice p-hodnot. Korelační matice obsahuje jednotlivé Pearsonovy korelační koeficienty. Matice p-hodnot slouží pro stanovení statistické významnosti korelace pomocí testování hypotéz. Nulová hypotéza říká, že jednotlivé proměnné spolu nekorelují, a na základě výsledné p-hodnoty může být zamítnuta. Grafické znázornění korelační matice (viz Obrázek 22) obsahuje několik grafů. Diagonála je tvořena histogramy pro každou z proměnných, které vyobrazují rozložení hodnot proměnné. Grafy mimo diagonálu jsou bodové grafy, kde jsou vykresleny hodnoty jedné veličiny v závislosti na druhé. Tyto hodnoty jsou proloženy referenční přímkou a její sklon odpovídá korelačnímu koeficientu, který je u každého grafu vyobrazen [50]. V tomto

konkrétním případě jsou korelační koeficienty blízké 1, což značí, že mezi zkoumanými veličinami je silná přímá závislost.



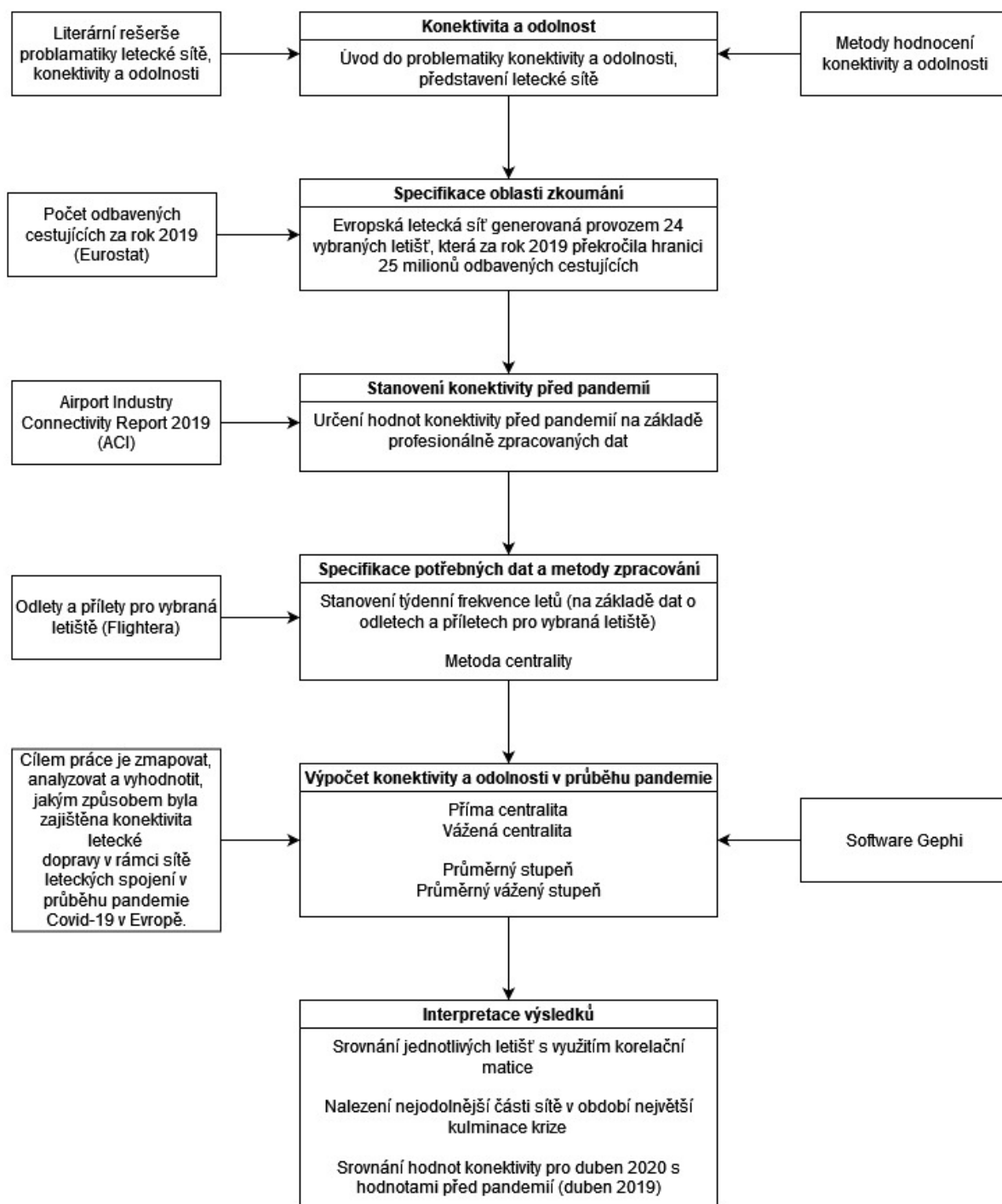
Obrázek 22: Příklad grafického znázornění korelační matice

3.5 Shrnutí kapitoly

Aby bylo možné zkoumat dopady pandemie Covid-19 na leteckou síť, byla sbírána data z webových stránek Flightera. Data obsahovala informace o odletech a příletech pro zvolená letiště. K samotnému sběru byl využit nástroj Web Scraper. Po dokončení sběru dat, byla data upravena a pomocí kontingenční tabulky byly získány týdenní frekvence letů, které sloužily jako vstup do softwaru Gephi. Tento software byl využit pro výpočet hodnot centrality. Vzhledem k povaze a množství dat jsou v práci vyhodnocovány přímá a vážená centralita. Pro hodnocení odolnosti byl použit průměrný stupeň a průměrný vážený stupeň. Za nejodolnější část sítě je považována ta část, která zůstala funkční během největšího poklesu těchto metrik. Pro vyhodnocení výsledků byl použit Matlab. Aby bylo možné výsledné hodnoty porovnávat, byly standardizovány pomocí z-skóre. Dále byly pro vyhodnocení použity testy hypotéz, Friedmanův test včetně post-analýzy, a korelační analýza.

3.6 Metodologický model zpracování

Na základě výše popsané metodologie byl vytvořen metodologický model (viz Obrázek 23), který zjednodušeně zachycuje celý postup zpracování bakalářské práce. Centrální část modelu reprezentuje jednotlivé kroky zpracování. Pravá a levá strana modelu zachycuje vstupy, které jednotlivé kroky ovlivňovaly.



Obrázek 23: Metodologický model zpracování

4 Interpretace výsledků

Tato kapitola obsahuje výsledky analýzy, která byla provedena na základě výše popsané metodologie.

4.1 Srovnání letišť

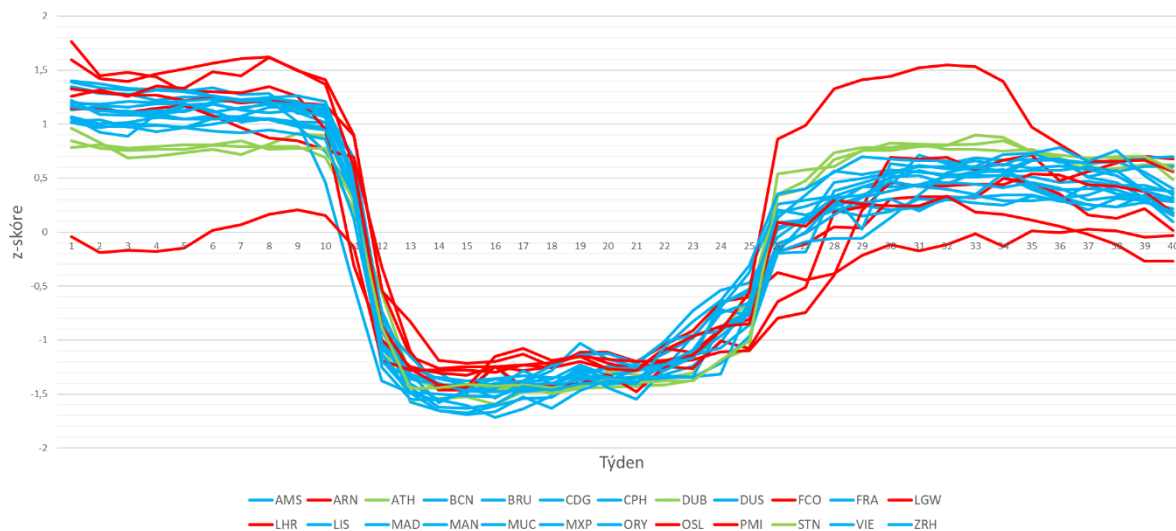
Pro srovnání jednotlivých letišť může být využito více přístupů. Pro tuto práci bylo vybráno porovnání průběhů centrality pro jednotlivá letiště pomocí korelační analýzy. Srovnání letišť bylo provedeno pro hodnoty přímé a vážené centrality. Výsledné hodnoty přímé centrality pro zkoumaná letiště jsou uvedeny v příloze 3, hodnoty vážené centrality v příloze 4.

Nejprve byla vytvořena korelační matice pro hodnoty přímé centrality (viz Tabulka 2), na základě které byla letiště rozdělena do tří skupin. První skupinu tvoří letiště AMS, BCN, BRU, CDG, CPH, DUS, FRA, LIS, MAD, MAN, MUC, MXP, ORY, VIE a ZRH. Při porovnání hodnot pro tato letiště přesahují Pearsonovy koeficienty hodnotu 0,95. Výjimku tvoří pouze pár ZRH a MAD, při jejichž porovnání byl korelační koeficient 0,948. Vzhledem k ostatním korelačním koeficientům byla tato letiště ve skupině ponechána. Hodnoty přímé konektivity mají pro tato letiště obdobné průběhy a chovají se velmi podobně. Druhou skupinu tvoří letiště ATH, DUB a STN, při jejichž porovnání získáme korelační koeficienty vyšší než 0,98. Přímá konektivita pro tato letiště má velmi podobné průběhy, ale liší se od první skupiny. Poslední skupinu tvoří letiště, u kterých nebyla zjištěna dostatečná závislost. Jedná se o letiště ARN, FCO, LGW, LHR, OSL a PMI. Matice p-hodnot neobsahuje prvky vyšší než 0,05. Díky tomu lze zamítnout nulovou hypotézu, že jednotlivé proměnné spolu nekorelují.

Tabulka 2: Korelační matice - přímá centralita

	AMS	ARN	ATH	BCN	BRU	CDG	CPH	DUB	DUS	FCO	FRA	LGW	LHR	LIS	MAD	MAN	MUC	MPX	ORY	OSL	PMI	STN	VIE	ZRH
AMS	1,00	0,87	0,97	0,98	0,98	0,99	0,97	0,96	0,99	0,95	0,98	0,94	0,96	0,98	0,97	0,98	0,99	0,96	0,98	0,93	0,74	0,97	0,99	0,99
ARN	0,87	1,00	0,78	0,91	0,90	0,89	0,94	0,76	0,87	0,94	0,94	0,94	0,87	0,92	0,95	0,87	0,93	0,88	0,89	0,96	0,35	0,77	0,86	0,83
ATH	0,97	0,78	1,00	0,96	0,97	0,96	0,93	0,99	0,98	0,89	0,93	0,89	0,94	0,94	0,93	0,97	0,95	0,93	0,96	0,87	0,85	0,99	0,98	0,98
BCN	0,98	0,91	0,96	1,00	1,00	0,98	0,98	0,95	0,98	0,97	0,98	0,96	0,96	0,98	0,99	0,98	0,99	0,97	0,98	0,96	0,70	0,96	0,98	0,97
BRU	0,98	0,90	0,97	1,00	1,00	0,98	0,98	0,95	0,98	0,96	0,98	0,95	0,95	0,97	0,98	0,98	0,99	0,96	0,98	0,96	0,72	0,96	0,98	0,97
CDG	0,99	0,89	0,96	0,98	0,98	1,00	0,98	0,94	0,99	0,96	0,98	0,94	0,95	0,97	0,98	0,97	0,99	0,97	0,97	0,94	0,69	0,95	0,98	0,99
CPH	0,97	0,94	0,93	0,98	0,98	0,98	1,00	0,91	0,98	0,98	0,99	0,95	0,94	0,98	0,99	0,97	0,99	0,97	0,97	0,97	0,62	0,92	0,97	0,96
DUB	0,96	0,76	0,99	0,95	0,95	0,94	0,91	1,00	0,96	0,89	0,92	0,88	0,94	0,94	0,91	0,97	0,94	0,92	0,96	0,86	0,85	1,00	0,97	0,97
DUS	0,99	0,87	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98	0,96	1,00	0,95	0,97	0,93	0,95	0,97	0,97	0,98	0,99	0,96	0,98	0,93	0,75	0,97	0,99	0,99
FCO	0,95	0,94	0,89	0,97	0,96	0,96	0,98	0,89	0,95	1,00	0,97	0,95	0,93	0,96	0,98	0,96	0,97	0,98	0,95	0,97	0,57	0,89	0,94	0,93
FRA	0,98	0,94	0,93	0,98	0,98	0,98	0,99	0,92	0,97	0,97	1,00	0,96	0,96	0,99	0,99	0,97	0,99	0,96	0,98	0,97	0,62	0,93	0,97	0,96
LGW	0,94	0,94	0,89	0,96	0,95	0,94	0,95	0,88	0,93	0,95	0,96	1,00	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,92	0,96	0,94	0,56	0,89	0,93	0,90
LHR	0,96	0,87	0,94	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,95	0,93	0,96	0,97	1,00	0,98	0,95	0,98	0,96	0,93	0,98	0,90	0,69	0,95	0,96	0,94
LIS	0,98	0,92	0,94	0,98	0,97	0,97	0,98	0,94	0,97	0,96	0,99	0,97	0,98	1,00	0,98	0,98	0,98	0,95	0,99	0,94	0,66	0,95	0,98	0,95
MAD	0,97	0,95	0,93	0,99	0,98	0,98	0,99	0,91	0,97	0,98	0,99	0,97	0,95	0,98	1,00	0,97	0,99	0,97	0,97	0,98	0,61	0,92	0,96	0,95
MAN	0,98	0,87	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,98	0,96	0,97	0,96	0,98	0,97	0,97	1,00	0,98	0,96	0,99	0,92	0,73	0,98	0,98	0,97
MUC	0,99	0,93	0,95	0,99	0,99	0,99	0,99	0,94	0,99	0,97	0,99	0,96	0,96	0,98	0,99	0,98	1,00	0,97	0,98	0,97	0,67	0,94	0,98	0,97
MPX	0,96	0,88	0,93	0,97	0,96	0,97	0,97	0,92	0,96	0,98	0,96	0,92	0,93	0,95	0,97	0,96	0,97	1,00	0,95	0,94	0,67	0,93	0,96	0,96
ORY	0,98	0,89	0,96	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,98	0,95	0,98	0,96	0,98	0,99	0,97	0,99	0,98	0,95	1,00	0,93	0,70	0,96	0,98	0,96
OSL	0,93	0,96	0,87	0,96	0,96	0,94	0,97	0,86	0,93	0,97	0,97	0,94	0,90	0,94	0,98	0,92	0,97	0,94	0,93	1,00	0,53	0,86	0,92	0,91
PMI	0,74	0,35	0,85	0,70	0,72	0,69	0,62	0,85	0,75	0,57	0,62	0,56	0,69	0,66	0,61	0,73	0,67	0,67	0,70	0,53	1,00	0,85	0,76	0,79
STN	0,97	0,77	0,99	0,96	0,96	0,95	0,92	1,00	0,97	0,89	0,93	0,89	0,95	0,95	0,92	0,98	0,94	0,93	0,96	0,86	0,85	1,00	0,97	0,97
VIE	0,99	0,86	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,99	0,94	0,97	0,93	0,96	0,98	0,96	0,98	0,98	0,96	0,98	0,92	0,76	0,97	1,00	0,99
ZRH	0,99	0,83	0,98	0,97	0,97	0,99	0,96	0,97	0,99	0,93	0,96	0,90	0,94	0,95	0,95	0,97	0,97	0,96	0,96	0,91	0,79	0,97	0,99	1,00

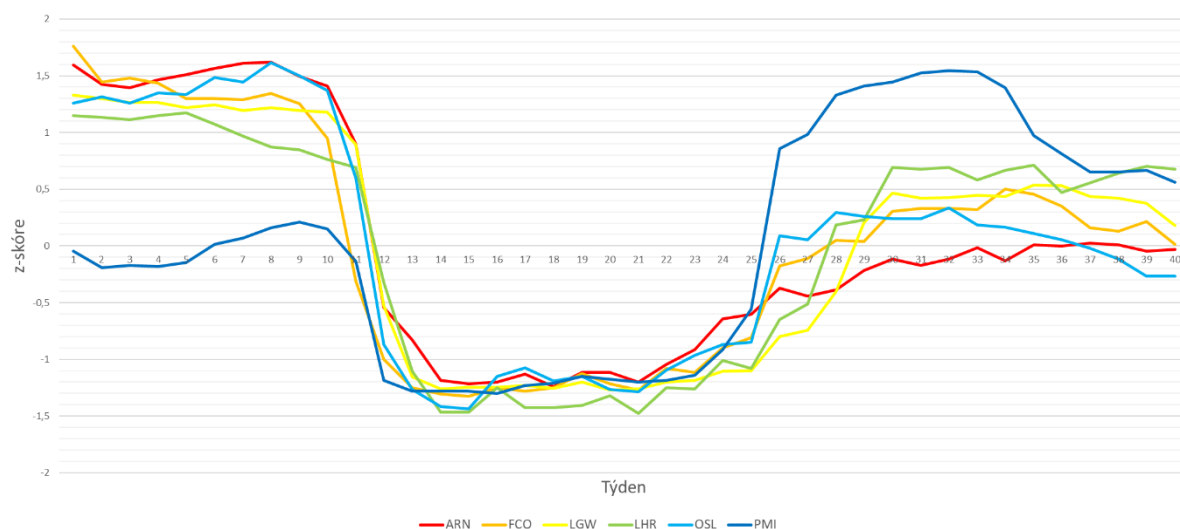
Jednotlivé skupiny jsou vyobrazeny pomocí různých barev (viz Obrázek 24). Aby bylo možné jednotlivá letiště porovnávat, byly hodnoty přímé centrality standardizovány. Průměrné hodnoty jsou vyjádřeny nulou, nadprůměrné hodnoty mají kladné z-skóre a podprůměrné naopak záporné.



Obrázek 24: Průběh hodnot přímé centrality pro jednotlivé skupiny

Pro snadnější popis jednotlivých skupin lze rozdělit časové období na tři části – před poklesem (1.-11. týden), období největšího poklesu (12.-25. týden) a období po poklesu (26.-40. týden). Tato období byla stanovena pouze pro popis chování jednotlivých skupin a pro analýzu nebyla využita. Skupina označená zelenou barvou nabývala po období největšího poklesu podobných hodnot přímé centrality jako před poklesem. Skupina označená modře měla v období před poklesem vyšší hodnoty přímé centrality, než v období po poklesu, ale v obou těchto obdobích byly hodnoty nadprůměrné. Třetí skupinu, která je vyobrazena červenou barvou, nelze popsat jako celek, jelikož se jedná o letiště s odlišným průběhem. Pro přehlednost jsou tato letiště vyobrazena v samostatném grafu (viz Obrázek 25).

Nejvíce odlišný průběh mělo letiště PMI. V období po poklesu mělo letiště vyšší hodnoty konektivity, než v období před poklesem. Porovnáním nejvyšších hodnot v těchto dvou obdobích (9. a 32. týden) bylo zjištěno, že se maximální počet destinací, do kterých existovalo přímé spojení, v období po poklesu zvýšil o 117. Letiště ARN vykazovalo v období po poklesu průměrné hodnoty, tedy výrazně nižší, než v období před poklesem.



Obrázek 25: Hodnoty přímé centrality pro letiště s nejvíce odlišným průběhem

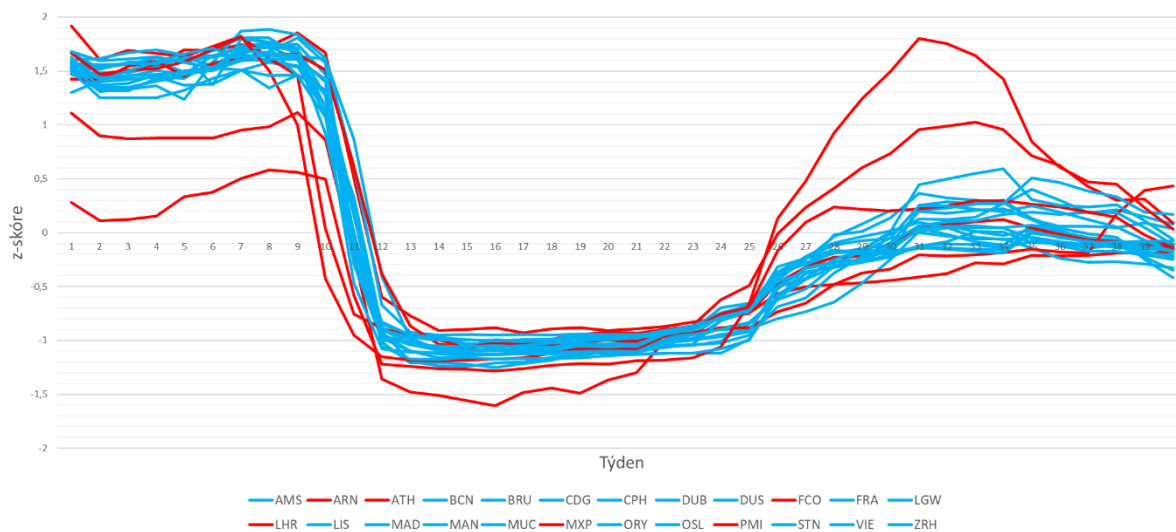
Podobně jako u přímé centrality byla pro hodnoty vážené centrality vytvořena korelační matice (viz Tabulka 3). Matice p-hodnot je tvořena prvky s hodnotou nižší než 0,05. Na základě toho byla zamítnuta nulová hypotéza, že jednotlivé proměnné spolu nekorelují.

Tabulka 3: Korelační matice - vážená centralita

	AMS	ARN	ATH	BCN	BRU	CDG	CPH	DUB	DUS	FCO	FRA	LGW	LHR	LIS	MAD	MAN	MUC	MXP	ORY	OSL	PMI	STN	VIE	ZRH
AMS	1,00	0,94	0,88	0,98	0,97	0,99	0,98	0,97	0,98	0,95	0,97	0,97	0,96	1,00	0,98	0,99	0,97	0,92	0,99	0,97	0,63	0,99	0,99	0,98
ARN	0,94	1,00	0,70	0,94	0,98	0,94	0,98	0,98	0,97	0,92	0,98	0,98	0,98	0,96	0,98	0,96	0,98	0,84	0,93	0,98	0,38	0,92	0,94	0,96
ATH	0,88	0,70	1,00	0,87	0,80	0,89	0,82	0,80	0,83	0,80	0,79	0,77	0,75	0,86	0,80	0,84	0,79	0,87	0,88	0,80	0,90	0,91	0,88	0,83
BCN	0,98	0,94	0,87	1,00	0,98	0,99	0,99	0,97	0,99	0,96	0,98	0,96	0,95	0,99	0,99	0,98	0,98	0,94	0,98	0,98	0,64	0,98	0,99	0,99
BRU	0,97	0,98	0,80	0,98	1,00	0,98	0,99	0,98	1,00	0,96	0,99	0,97	0,96	0,98	0,99	0,98	0,99	0,92	0,96	0,99	0,52	0,95	0,98	0,99
CDG	0,99	0,94	0,89	0,99	0,98	1,00	0,99	0,97	0,99	0,96	0,98	0,96	0,95	0,99	0,98	0,98	0,98	0,95	0,98	0,98	0,64	0,98	0,99	0,99
CPH	0,98	0,98	0,82	0,99	0,99	0,99	1,00	0,98	1,00	0,96	1,00	0,98	0,97	0,99	0,99	0,98	0,99	0,92	0,97	1,00	0,53	0,96	0,99	0,99
DUB	0,97	0,98	0,80	0,97	0,98	0,97	0,98	1,00	0,98	0,92	0,98	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,87	0,96	0,98	0,52	0,96	0,96	0,97
DUS	0,98	0,97	0,83	0,99	1,00	0,99	1,00	0,98	1,00	0,97	1,00	0,97	0,97	0,99	0,99	0,99	1,00	0,93	0,97	0,99	0,54	0,97	0,99	1,00
FCO	0,95	0,92	0,80	0,96	0,96	0,96	0,92	0,97	1,00	0,97	0,97	0,92	0,92	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,94	0,95	0,53	0,93	0,97	0,98
FRA	0,97	0,98	0,79	0,98	0,99	0,98	1,00	0,98	1,00	0,97	1,00	0,98	0,97	0,98	0,99	0,98	1,00	0,92	0,96	0,99	0,49	0,95	0,98	0,99
LGW	0,97	0,98	0,77	0,96	0,97	0,96	0,98	0,99	0,97	0,92	0,98	1,00	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,85	0,96	0,97	0,48	0,96	0,96	0,96
LHR	0,96	0,98	0,75	0,95	0,96	0,95	0,97	0,98	0,97	0,92	0,97	0,97	1,00	0,97	0,97	0,97	0,97	0,85	0,96	0,97	0,44	0,94	0,94	0,96
LIS	1,00	0,96	0,86	0,99	0,98	0,99	0,99	0,98	0,99	0,95	0,98	0,98	0,97	1,00	0,99	0,99	0,98	0,92	0,99	0,98	0,60	0,99	0,99	0,98
MAD	0,98	0,98	0,80	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,96	0,99	0,98	0,97	0,99	1,00	0,99	0,99	0,91	0,97	0,99	0,52	0,96	0,98	0,99
MAN	0,99	0,96	0,84	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,96	0,98	0,98	0,97	0,99	0,99	1,00	0,98	0,92	0,99	0,98	0,57	0,98	0,98	0,98
MUC	0,97	0,98	0,79	0,98	0,99	0,98	0,99	0,97	1,00	0,97	1,00	0,97	0,97	0,98	0,99	0,98	1,00	0,92	0,96	0,99	0,48	0,95	0,98	0,99
MXP	0,92	0,84	0,87	0,94	0,92	0,95	0,92	0,87	0,93	0,97	0,92	0,85	0,85	0,92	0,91	0,92	0,92	1,00	0,92	0,91	0,65	0,91	0,95	0,95
ORY	0,99	0,93	0,88	0,98	0,96	0,98	0,97	0,96	0,97	0,94	0,96	0,96	0,96	0,99	0,97	0,99	0,96	0,92	1,00	0,97	0,63	0,99	0,98	0,97
OSL	0,97	0,98	0,80	0,98	0,99	0,98	1,00	0,98	0,99	0,95	0,99	0,97	0,97	0,98	0,99	0,98	0,99	0,91	0,97	1,00	0,51	0,95	0,98	0,99
PMI	0,63	0,38	0,90	0,64	0,52	0,64	0,53	0,52	0,54	0,53	0,49	0,48	0,44	0,60	0,52	0,57	0,48	0,65	0,63	0,51	1,00	0,69	0,63	0,56
STN	0,99	0,92	0,91	0,98	0,95	0,98	0,96	0,96	0,97	0,93	0,95	0,96	0,94	0,99	0,96	0,98	0,95	0,91	0,99	0,95	0,69	1,00	0,98	0,96
VIE	0,99	0,94	0,88	0,99	0,98	0,99	0,99	0,96	0,99	0,97	0,98	0,96	0,94	0,99	0,98	0,98	0,98	0,95	0,98	0,98	0,63	0,98	1,00	0,99
ZRH	0,98	0,96	0,83	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	1,00	0,98	0,99	0,96	0,96	0,98	0,99	0,98	0,99	0,95	0,97	0,99	0,56	0,96	0,99	1,00

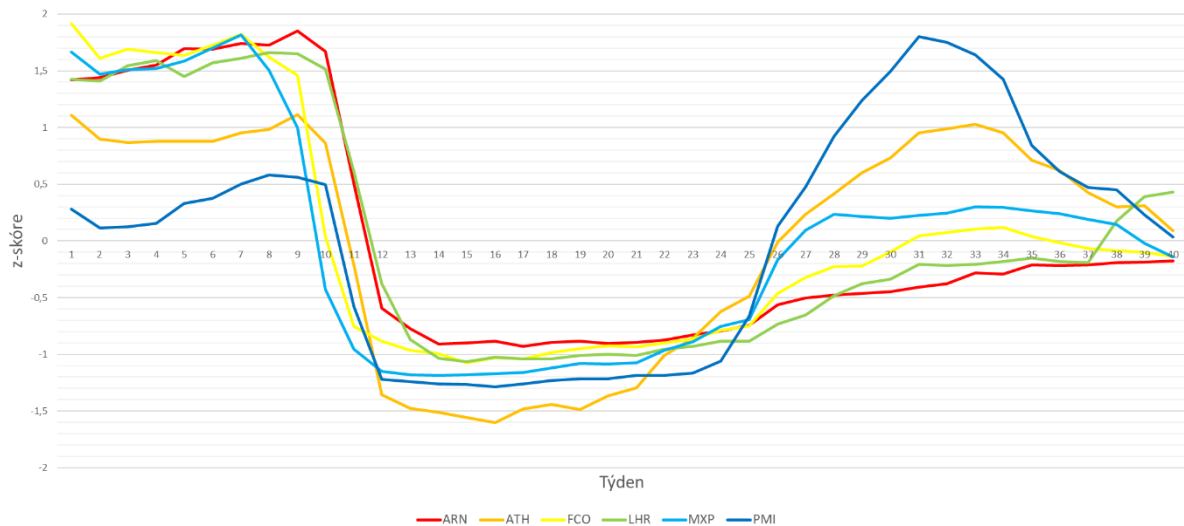
V tomto případě byla letiště rozdělena do dvou skupin. První skupinu tvoří letiště, při jejichž porovnání neklesly hodnoty korelačního koeficientu pod 0,95. Jedná se o letiště AMS, BCN, BRU, CDG, DPH, DUB, DUS, FRA, LGW, LIS, MAD, MAN, MUC, ORY, OSL, STN, VIE a ZRH. Ve skupině byla ponechána letiště STN a MUC, pro která je Pearsonův koeficient 0,949. Druhou skupinu tvoří letiště ARN, ATH, FCO, LHR, MXP a PMI. Pro tato letiště klesly korelační

koeficienty pod hodnotu 0,95. Obě skupiny vyobrazuje Obrázek 26. Pro snadnější porovnání byly hodnoty vážené centrality standardizovány.



Obrázek 26: Hodnoty vážené centrality pro jednotlivé skupiny

Skupina letišť označená modře vykazovala po poklesu výrazně nižší hodnoty vážené centrality než v období před poklesem. Letiště označená červenou barvou jsou pro přehlednost znázorněna v samostatném grafu (viz Obrázek 27). Letiště s nejvíce odlišným průběhem bylo PMI. Období největšího poklesu bylo způsobeno zejména omezením letů do Španělska a Německa. Největší vliv mělo snížení frekvence letů na španělská letiště BCN, MAD, IBZ, VLC a MAH. V období po poklesu, zejména v 31. týdnu, vykazovalo letiště výrazně vyšší hodnoty vážené centrality než v období před poklesem. Na tento nárůst měly největší vliv lety do Německa. Jednalo se zejména o lety na letiště DUS, STR, HAM, CGN, MUC a HAJ. Letiště ATH se v období po poklesu dostalo na podobné hodnoty vážené centrality jako před poklesem. V období po poklesu se zvýšil počet letů na řecká letiště PAS, JMK, JNX nebo MLO a ke snížení frekvence došlo zejména u letů na letiště IST, SKG, TLV nebo LCA. Letiště LHR mělo v období po poklesu podprůměrné hodnoty. Od 37. týdne začaly hodnoty vážené centrality stoupat díky rostoucím frekvencím letů do USA, například na letiště JFK, ORD, SFO nebo MIA. V případě letišť MXP a FCO došlo k začátku poklesu o týden až dva dříve, než v případě modré skupiny. Letiště ARN vykazovalo v období po poklesu podprůměrné hodnoty vážené centrality.



Obrázek 27: Průběh hodnot vážené centrality pro letiště s nejvíce odlišným průběhem

Mimo korelační analýzy byla letiště porovnána podle toho, kdy dosáhla minima hodnot přímé a vážené centrality (viz Tabulka 4). Minimum přímé centrality dosáhlo jako první letiště STN ve 13. týdnu a jako poslední letiště LHR a BCN v 21. týdnu. U vážené centrality dosáhla minimálních hodnot nejdříve letiště STN, FRA, LIS, MXP, ORY a OSL, a to ve 14. týdnu. Jako poslední dosáhlo minimálních hodnot letiště MAN v 19. týdnu.

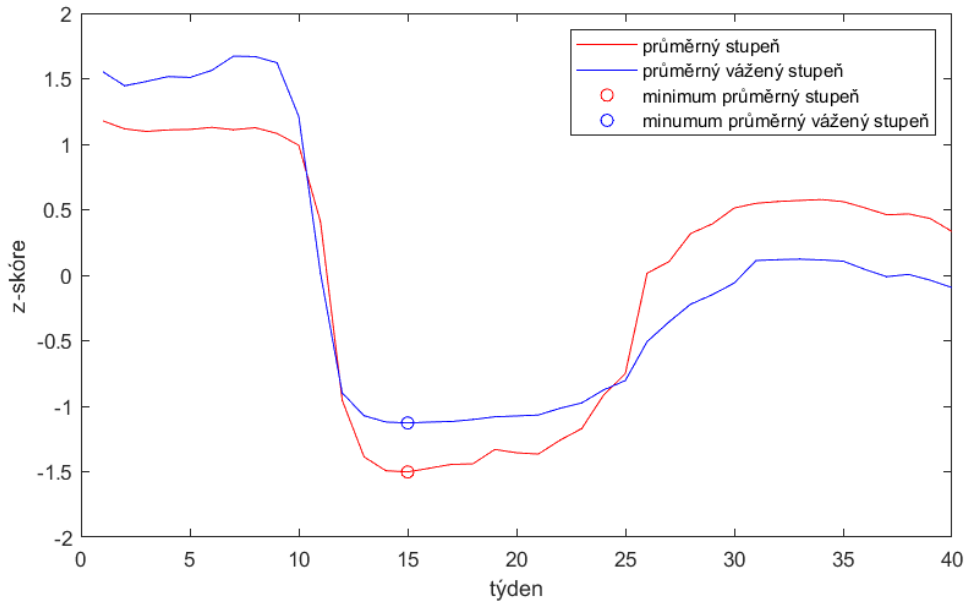
14 letišť dosáhlo minima hodnot přímé i vážené centrality ve stejném týdnu. Ve většině případů se jednalo o 14.-16. týden. Ze zbývajících letišť dosáhla čtyři letiště dříve minima přímé centrality a šest letišť naopak dříve dosáhlo minima vážené centrality. Největší rozdíl lze pozorovat u letiště LHR, které dosáhlo minimálních hodnot vážené centrality o 6 týdnů dříve, než minimálních hodnot přímé centrality. Opačným případem je letiště MAN, kdy byly minimální hodnoty přímé centrality dosaženy o 4 týdny dříve, než minimum vážené centrality.

Tabulka 4: Týdny, ve kterých jednotlivá letiště dosáhla minimálních hodnot přímé a vážené centrality

Letiště	Týden – minimum přímé centrality	Týden – minimum vážené centrality
AMS	15	15
ARN	18	17
ATH	16	16
BCN	21	16
BRU	15	15
CDG	16	16
CPH	14	17
DUB	18	18
DUS	15	15
FCO	15	15
FRA	14	14
LGW	20	18
LHR	21	15
LIS	14	14
MAD	16	16
MAN	15	19
MUC	16	18
MXP	14	14
ORY	14	14
OSL	15	14
PMI	16	16
STN	13	14
VIE	16	16
ZRH	15	16

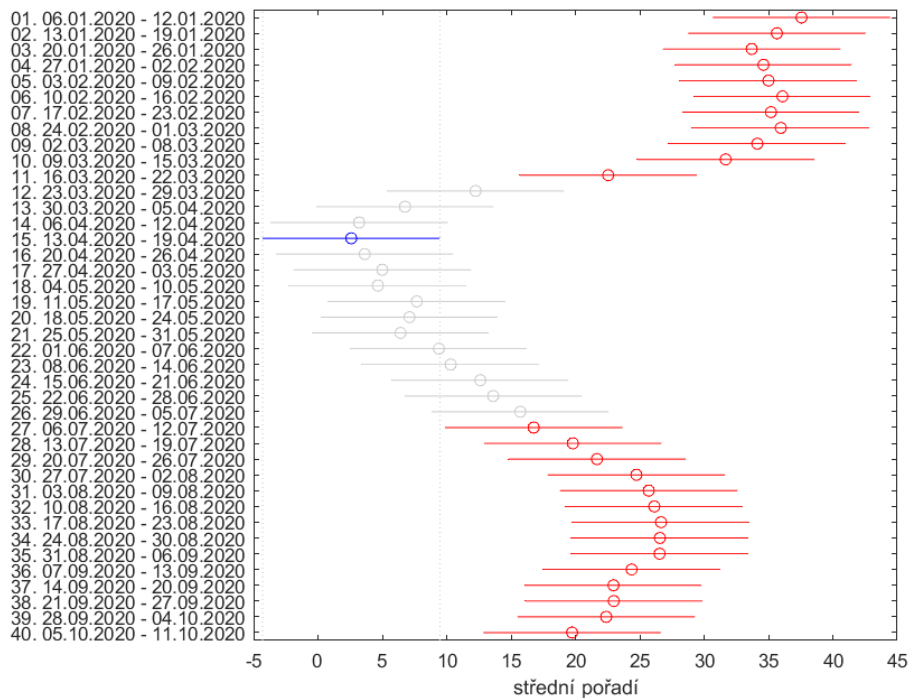
4.2 Odolnost

Aby bylo možné nalézt nejodolnější část sítě, bylo stanoveno období největší kulminace krize. Toto období odpovídá 15. týdnu, tedy 13.-19.4.2020, kdy hodnoty průměrného stupně a průměrného váženého stupně dosahují svého minima. Průběh těchto dvou veličin zachycuje Obrázek 28. Na vodorovné ose jsou vyobrazeny jednotlivé týdny, svislá osa pak představuje standardizované hodnoty průměrného stupně a průměrného váženého stupně.



Obrázek 28: Průběh váženého stupně a průměrného váženého stupně (standardizované hodnoty)

Pro ověření tohoto postupu byly využity testy hypotéz pro jednotlivé týdny. Testovány byly hodnoty přímé i vážené centrality. V obou případech se potvrdilo, že týden s největším poklesem hodnot centrality je 15. týden. Pro testování hypotéz byla odebrána letiště, která vykazovala extrémní hodnoty a mohla by tak ovlivnit výsledky. V případě přímé centrality se jednalo o letiště PMI, v případě vážené centrality byla vyřazena letiště PMI a ATH. Obrázek 29 zachycuje grafický výsledek post-analýzy testování hypotéz pro hodnoty přímé centrality. Modře je zvýrazněn 15. týden, kdy došlo k největšímu poklesu konektivity.



Obrázek 29: Grafický výsledek post-analýzy testování hodnot přímé centrality pro jednotlivé týdny

Průběh hodnot centrality (viz Obrázek 28 a Obrázek 29) odpovídá výše popsanému průběhu pandemie. Od 11. března 2020, kdy byl virus označen za pandemii, lze pozorovat výrazný pokles hodnot centrality. K největší kulminaci krize došlo v dubnu 2020, kdy byly zjištěny i nejnižší hodnoty přímé i vážené centrality. Nejdolnější část sítě, která zůstala funkční během největší kulminace krize byla tvořena 304 uzly a 1 169 hranami. V rámci této sítě bylo uskutečněno 5 406 letů. Nejvyšší hodnoty přímé centrality vykazovala letiště FRA, LHR, AMS a CDG. U každého z těchto letišť byly hodnoty přímé centrality vyšší než 100. Nejvyšší hodnoty vážené centrality vykazovala letiště FRA, LHR, OSL a AMS. Letiště FRA mělo hodnoty vážené centrality vyšší než 1 000, ostatní zmíněná letiště měla tyto hodnoty vyšší než 500. Letiště OSL vykazovalo vysoké hodnoty vážené centrality, ale výrazně nižší hodnoty přímé centrality, tzn. že v rámci této sítě nabízel vysoký počet letů do malého počtu destinací. Hodnoty přímé a vážené centrality pro zkoumaná letiště zachycuje Tabulka 5. Na tuto část sítě lze pohlížet i z pohledu hran. Tabulka 6 obsahuje hrany s nejvyšším ohodnocením.

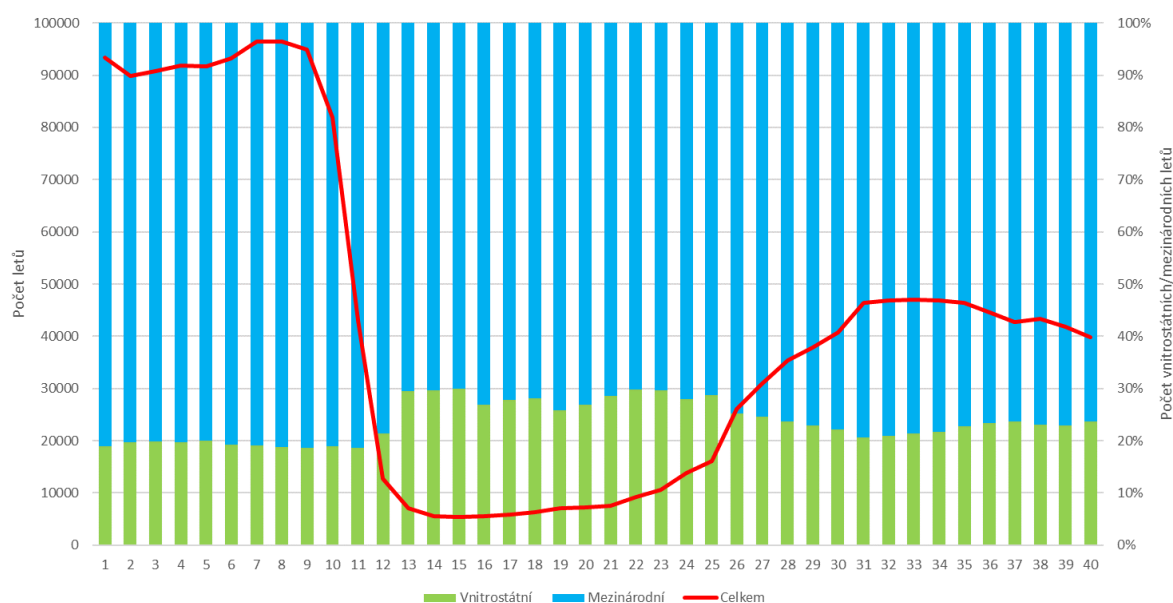
Tabulka 5: Hodnoty přímé a vážené centrality pro 15. týden

Letiště	Přímá centralita	Vážená centralita
FRA	165	1005
LHR	155	884
AMS	144	636
CDG	135	472
ATH	84	329
DUB	59	238
OSL	57	758
MAD	54	152
FCO	53	308
ZRH	49	177
BRU	45	130
BCN	44	160
ARN	39	223
LIS	33	71
MPX	31	127
MUC	30	211
VIE	30	102
DUS	28	101
STN	28	70
CPH	24	183
MAN	17	74
PMI	14	68
LGW	9	24
ORY	0	0

Tabulka 6: Hrany s nevyšším ohodnocením v 15. týdnu

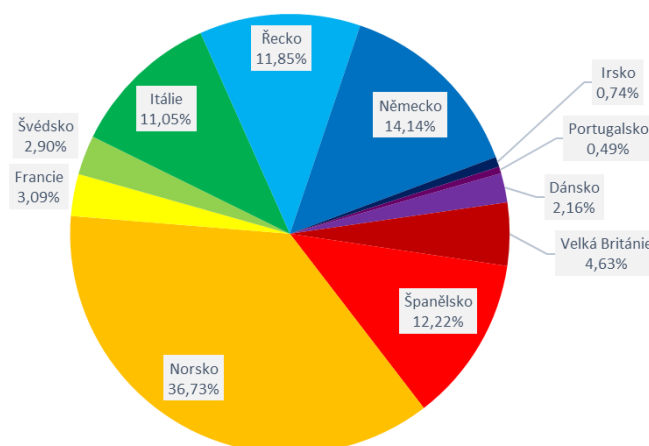
Počáteční letiště	Cílové letiště	Ohodnocení
TRD	OSL	56
OSL	TRD	52
BGO	OSL	44
OSL	BGO	44
JFK	LHR	43
OSL	SVG	42
SVG	OSL	42

Většina z výše uvedených spojení (hran) se zachází uvnitř Norska, jedná se tedy o vnitrostátní lety. V rámci nejodolnější části sítě bylo zjištěno 1 620 vnitrostátních letů, což tvoří téměř 30 % z celkového počtu letů. Vývoj počtu vnitrostátních letů a celkového počtu letů je vyobrazen na obrázku (viz Obrázek 30). V období, kdy byl celkový počet letů na nejnižších hodnotách, se výrazně zvýšil počet vnitrostátních letů.



Obrázek 30: Vývoj počtu vnitrostátních letů a celkového počtu letů pro jednotlivé týdny

Nejvíce vnitrostátních letů bylo uskutečněno v Norsku. Norské vnitrostátní lety tvořily 36,73 % z celkového počtu vnitrostátních letů. Více než 10 % vnitrostátních letů bylo uskutečněno v Německu, Španělsku, Řecku a Itálii. Rozdělení vnitrostátních letů zachycuje Obrázek 31.



Obrázek 31: Podíl vnitrostátních letů pro jednotlivé státy v 15. týdnu

Počet vnitrostátních letů v Norsku se snížil ve srovnání s předchozím rokem pouze o 45,46 %, v rámci Irsku se jednalo o 76% pokles a počet vnitrostátních letů v Řecku klesl o 83,28 %. V ostatních státech byl pokles více než 90 %. Pokles počtu vnitrostátních letů a jejich počet v jednotlivých státech je uveden v tabulce (viz Tabulka 7).

Tabulka 7: Počet vnitrostátních letů v 15. týdnu a jejich pokles ve srovnání se stejným týdnem v roce 2019

Stát	15. týden 2020	15. týden 2019	Pokles
Norsko	595	1091	-45,46%
Irsko	12	50	-76,00%
Řecko	192	1148	-83,28%
Dánsko	35	439	-92,03%
Itálie	179	2476	-92,77%
Německo	229	3260	-92,98%
Švédsko	47	770	-93,90%
Španělsko	198	4379	-95,48%
Velká Británie	75	2050	-96,34%
Francie	50	3142	-98,41%
Portugalsko	8	592	-98,65%
Rakousko	0	127	-100,00%
Švýcarsko	0	127	-100,00%
Nizozemí	0	10	-100,00%
Belgie	0	2	-100,00%

4.3 Srovnání s hodnotami před pandemií

Pro lepší pochopení dopadu pandemie Covid-19 na leteckou síť bylo provedeno srovnání hodnot konektivity v dubnu 2020 se stejným obdobím v předchozím roce. Pokles hodnot přímé a vážené centrality pro jednotlivá letiště zachycuje Tabulka 8. Data jsou porovnávána s odpovídajícími týdny roku 2019. Letiště ORY bylo během krize na několik týdnů úplně uzavřeno, což vysvětluje 100% pokles přímé i vážené centrality. Pokles hodnot přímé centrality je možné prezentovat i jako procentuální pokles počtu destinací, do kterých se v dané týdny

létalo. Pokles váženě centrality představuje pokles celkového počtu letů z daných letišť. Při pohledu na tabulku je patrné, že se počet destinací snížil méně výrazně, než počet letů.

Tabulka 8: Pokles hodnot přímé a vážené centrality ve srovnání s rokem 2019

Letiště	13. 30.03. - 05.04.2020		14. 06.04. - 12.04.2020		15. 13.04. - 19.04.2020		16. 20.04. - 26.04.2020	
	Přímá	Vážená	Přímá	Vážená	Přímá	Vážená	Přímá	Vážená
AMS	-71,76%	-92,21%	-73,56%	-93,27%	-74,10%	-93,72%	-72,66%	-91,15%
ARN	-79,25%	-92,56%	-87,11%	-96,05%	-87,74%	-95,00%	-87,42%	-94,62%
ATH	-72,48%	-88,87%	-72,15%	-89,98%	-71,81%	-91,81%	-73,15%	-92,28%
BCN	-84,20%	-96,00%	-87,05%	-97,37%	-88,60%	-97,74%	-88,60%	-97,70%
BRU	-84,37%	-95,55%	-84,86%	-96,39%	-88,83%	-97,20%	-88,09%	-97,11%
CDG	-77,05%	-95,14%	-77,21%	-95,05%	-78,33%	-95,60%	-80,74%	-96,03%
CPH	-91,18%	-96,10%	-93,39%	-97,31%	-93,39%	-96,32%	-91,46%	-96,39%
DUB	-79,58%	-92,40%	-83,48%	-94,99%	-82,28%	-95,20%	-83,18%	-95,40%
DUS	-86,83%	-95,82%	-91,32%	-97,44%	-91,62%	-97,56%	-90,72%	-97,39%
FCO	-84,17%	-92,81%	-85,49%	-93,48%	-86,02%	-95,36%	-84,17%	-93,54%
FRA	-70,27%	-90,13%	-73,31%	-90,64%	-72,13%	-90,16%	-66,89%	-87,30%
LGW	-95,05%	-99,44%	-98,35%	-99,80%	-97,88%	-99,76%	-97,88%	-99,83%
LHR	-54,21%	-84,16%	-61,63%	-89,61%	-61,63%	-90,70%	-57,18%	-85,64%
LIS	-83,15%	-97,31%	-91,58%	-99,12%	-87,91%	-98,39%	-87,55%	-98,30%
MAD	-85,10%	-97,18%	-86,54%	-97,89%	-87,02%	-98,10%	-89,90%	-98,72%
MAN	-94,61%	-97,42%	-94,61%	-97,81%	-95,42%	-98,09%	-94,88%	-98,22%
MUC	-88,29%	-96,45%	-90,87%	-97,36%	-92,97%	-97,19%	-93,21%	-96,90%
MXP	-92,11%	-97,47%	-93,95%	-97,59%	-91,84%	-97,58%	-90,00%	-97,46%
ORY	-92,23%	-99,15%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%	-100,00%
OSL	-76,17%	-83,14%	-79,06%	-85,51%	-79,42%	-79,18%	-74,01%	-82,75%
PMI	-95,32%	-97,69%	-95,32%	-98,25%	-95,32%	-98,47%	-95,99%	-98,89%
STN	-93,98%	-98,57%	-93,72%	-98,65%	-92,67%	-98,10%	-93,19%	-98,65%
VIE	-90,81%	-97,78%	-91,35%	-97,93%	-91,89%	-98,12%	-92,16%	-97,91%
ZRH	-80,98%	-95,28%	-85,01%	-96,57%	-85,88%	-96,56%	-85,30%	-96,45%

Pro porovnání hodnot celé sítě byla vytvořena Tabulka 9, která zachycuje pokles průměrného stupně a průměrného váženého stupně. Podobně jako u předchozí tabulky bylo srovnání provedeno pro hodnoty v dubnu 2019 a 2020.

Tabulka 9: Pokles průměrného stupně a průměrného váženého stupně ve srovnání se stejným obdobím v roce 2019

Týden	Průměrný stupeň	Průměrný vážený stupeň
13. 30.03. - 05.04.2020	-82,78%	-94,28%
14. 06.04. - 12.04.2020	-85,41%	-95,52%
15. 13.04. - 19.04.2020	-85,64%	-95,60%
16. 20.04. - 26.04.2020	-84,93%	-95,24%

5 Diskuze

Byla provedena analýza konektivity a odolnosti evropské letecké sítě a výsledky analýzy byly prezentovány v kapitole 4. V rámci analýzy bylo zkoumáno 24 evropských letišť, která za rok 2019 přesáhla hranici 25 milionů odbavených cestujících. Obecně lze říci, že dosažené výsledky odpovídaly průběhu samotné pandemie zmíněnému v kapitole 1.2 a měly předpokládanou podobu. V době, kdy se virus začal šířit mimo Čínu a byl prohlášen za pandemii začalo docházet ke snižování hodnot konektivity. Data zároveň potvrdila, že k největší kulminaci krize došlo během dubna 2020.

Jednou z hlavních limitací práce byla dostupná data. Vzhledem k metodice sběru dat a jejich podobě bylo možné vyhodnocovat pouze přímou a váženou centralitu. Data měla podobu přímých spojení ze zkoumaných letišť. Pro hodnocení dalších druhů centrality by bylo nutné získat data o odletech a příletech ze všech letišť v současné síti. Tato data by přinesla informaci o leteckých spojeních s přestupem v těchto uzlech. Díky tomu by bylo možné, mimo jiné, zkoumat i nepřímou konektivitu. Vzhledem k množství dat bylo hodnoceno pouze 40 týdnů. Pokud by byl soubor dat větší, bylo by možné porovnat stav letecké sítě před pandemií v roce 2019, během počátku pandemie v roce 2020 a další vývoj při pokračování krize v roce 2021. Druhou limitací je, že nelze brát v úvahu pouze pravidelná letecká spojení. Během pandemie docházelo ke snižování frekvencí leteckých spojení, případně k jejich úplnému rušení. Zároveň se mimo pravidelných letů začaly objevovat tzv. repatriční lety, které sloužily pro návrat občanů, kteří zůstali v cizí zemi a vzhledem k restrikcím neměli jinou možnost návratu. Tyto lety mohly mít za důsledek umělé navýšení počtu destinací, frekvencí letů a tedy i konektivity jako takové.

První část analýzy se zaměřovala na jednotlivá letiště a jejich konektivitu. Výsledky pro jednotlivá letiště byly navzájem porovnány dvěma způsoby. Prvním způsobem bylo využití korelační matice. Většina letišť se v průběhu pandemie chovala velmi podobně a v průběhu hodnot centrality nebyly výrazné rozdíly. Celkem osm letišť se svým průběhem lišilo. Z pohledu přímé i vážené centrality současně se svým průběhem lišila letiště ARN, FCO, LHR a PMI. Nejvíce se lišilo letiště PMI. To mohlo být mimo jiné dáno i geografickou polohou, jelikož se letiště nachází na ostrově, který patří pevninskému státu. Letiště LGW a OSL se lišila z pohledu přímé centrality, letiště ATH a MXP pak z pohledu centrality vážené. Druhým způsobem porovnání letišť bylo stanovení období, ve kterém letiště dosáhlo minimálních hodnot přímé a vážené centrality. Některá letiště dosáhla minima obou hodnot centrality současně. To znamená, že zároveň došlo k největšímu omezení počtu destinací a frekvencí letů do těchto destinací. Pokud došlo dříve k minimu přímé centrality, mohlo by to znamenat, že byl výrazně omezen počet destinací, ale s vyšší frekvencí letů. V opačném případě, kdy došlo nejdříve k minimu vážené centrality mohly být snižovány frekvence letů,

ale nemuselo dojít k jejich úplnému zrušení. Bez ohledu na způsob porovnání byl u všech letišť dokázán negativní dopad pandemie Covid-19 na hodnoty konektivity.

Druhá část analýzy byla zaměřena na zkoumanou síť jako celek a na její odolnost. V práci byla nalezena a popsána nejodolnější část sítě. Vzhledem k rozsáhlosti konceptu odolnosti a různým možnostem jeho výkladu by bylo možné zaměřit samostatnou práci pouze na toto téma. Nejodolnější část sítě byla tvořena 304 uzly a 1 169 hranami spojující tyto uzly. Ve skutečnosti mohla být síť rozsáhlejší, jelikož analyzovaná síť neobsahuje spojení mezi všemi uzly v síti. Z celkového počtu 5 406 letů bylo zjištěno 1620 vnitrostátních letů, tedy téměř 30 %. Se snižujícím se počtem letů se zvyšoval podíl vnitrostátních letů. To mohlo být způsobeno restrikcemi, kdy mnohdy nebylo možné vycestovat mimo hranice státu, ale lety uvnitř státu nemusely být omezeny. Nejvyšší počet vnitrostátních letů, více než jedna třetina, byl uskutečněn v Norsku. Více než 10 % pak bylo uskutečněno ve státech Německo, Španělsko, Řecko a Itálie. Vysoký počet vnitrostátních letů mohl být dán velkou rozlohou státu, případně ostrovy, které státu patří a bylo nutné s nimi zajistit spojení.

Aby bylo možné zhodnotit dopady pandemie, byla data pro měsíc duben porovnána s hodnotami v předchozím roce. Došlo k poklesu hodnot přímé i vážené centrality, přičemž pokles centrality vážené byl výraznější. Z toho je možné usuzovat, že spojení do některých destinací zůstala zachována, ale výrazně se snížila frekvence letů do těchto destinací. Druhým možným vysvětlením je umělé navýšení počtu destinací repatriačními lety.

Během zpracování práce nebyl nalezen podobný výzkum konektivity, se kterým by bylo možné výsledky práce přímo porovnat. Pro porovnání byly využity statistiky, které využívají jiné metody nebo zkoumají jiné charakteristiky sítě. IATA [12] uvádí, že k největšímu poklesu konektivity došlo v dubnu 2020, kdy v Evropě klesly hodnoty konektivity o 93 %, ve srovnání s dubnem 2019. Přestože v této práci byla konektivita zkoumána z pohledu letišť a byla využita jiná metodologie, bylo dosaženo podobných výsledků. ICAO [39] se ve své publikaci zaměřuje mimo jiné na počet přepravených cestujících v jednotlivých měsících roku 2020. Jedním ze zjištěných výsledků je zvyšující se podíl cestujících na vnitrostátních letech při současném poklesu celkového počtu cestujících. V této práci byl odhalen podobný trend, tedy že s klesajícím počtem letů se podíl vnitrostátních letů zvyšoval.

Závěr

Tato bakalářská práce byla zpracována s cílem zmapovat, analyzovat a vyhodnotit, jakým způsobem byla zajištěna konektivita letecké dopravy v rámci sítě leteckých spojení v průběhu pandemie Covid-19 v Evropě. Pandemie Covid-19 ovlivnila leteckou dopravu velmi negativním způsobem, který nemá v historii letectví obdoby. Pro hodnocení dopadů pandemie na leteckou dopravu byly využity koncepty konektivity a odolnosti.

V rámci literární rešerše byla popsána letecká síť a koncepty konektivity a odolnosti. Vytvoření letecké sítě bylo nedílnou součástí zkoumání konektivity a odolnosti, které tvoří základ celé práce. Na základě rešerše byla zvolena vhodná metodologie, kterou byla pro tuto práci metoda centrality. V rámci práce byla provedena analýza 24 evropských letišť a jejich letecké sítě. Letiště byla vybrána na základě počtu odbavených cestujících za rok 2019 a pro výběr byly využity statistiky Eurostatu. V rámci analýzy byl nejdříve proveden sběr dat, ke kterému byl využit nástroj Web Scraper. Data byla získána z webových stránek Flightera a měla podobu odletů a příletů ze zkoumaných letišť. Získaná data bylo nutné upravit do podoby týdenních frekvencí letů a vyfiltrovat pouze lety se statusem „přistál“. Takto připravená data byla zpracována pomocí softwaru Gephi, kde byly spočteny hodnoty centrality. Pro vyhodnocení zpracovaných dat byl použit software Matlab. Data byla standardizována a vyhodnocována pomocí korelační analýzy a testování hypotéz.

Na základě provedené analýzy byl popsán vliv pandemie na evropská letiště a spojení, která tato letiště nabízejí. Pro všech 24 letišť byl popsán vliv pandemie na konektivitu pomocí průběhu hodnot přímé a vážené centrality. K největší kulminaci krize došlo v dubnu 2020, kdy zůstala aktivní pouze malá část sítě. Tato část sítě byla považována za nejodolnější. Výsledky pro jednotlivá letiště byly navzájem porovnány. Většina letišť měla podobný a očekávaný průběh hodnot centrality. Několik letišť se svým průběhem lišilo, ale všechna měla shodné období největšího poklesu hodnot v rozmezí několika týdnů. Nejvíce odlišný průběh obou hodnot centrality vykazovalo letiště PMI. V rámci analýzy bylo zjištěno, že hodnoty vážené centrality byly nejvíce ovlivněny lety do Španělska a Německa. V průběhu vyhodnocení bylo odhaleno velké množství vnitrostátních letů, jejichž podíl se zvyšoval s klesajícím počtem celkových letů. Díky tomuto zjištění byly vnitrostátní lety dále zkoumány. Největší počet vnitrostátních letů byl uskutečněn v rámci Norska, přičemž ve srovnání se stejným obdobím v roce 2019 klesl o méně než polovinu. Pro vyhodnocení celkového dopadu pandemie byly porovnány hodnoty v dubnu 2019 a 2020. Toto porovnání potvrdilo předpokládaný pokles hodnot centrality. Zároveň bylo zjištěno, že hodnoty vážené centrality klesly výrazně více, než hodnoty centrality přímé.

Zpracování práce bylo limitováno povahou dat a metodikou jejich sběru. Na základě množství získaných dat bylo možné vyhodnotit 40 týdnů a vzhledem k jejich podobě bylo možné zkoumat pouze přímou a váženou centralitu. Dále bylo zpracování ovlivněno lety, které nebyly pravidelné a mohly ovlivnit počet uzlů v síti.

Problematika konektivity a odolnosti, případně i celé letecké sítě by si zasloužila bližší pozornost. Pokud by byl k dispozici větší soubor dat, bylo by možné zkoumat další druhy centrality, jako jsou například přestupní centralita a centralita dostupnosti. Výsledky by byly komplexnější a bylo by možné odhalit další zajímavé poznatky. Následný výzkum by mohl pracovat i s dalšími daty, jako jsou počty cestujících na jednotlivých linkách nebo ceny letenek. Došlo by tak k propojení konektivity a ekonomiky, na kterou má konektivita nezanedbatelný vliv.

Přínosem této práce je zhodnocení stavu letecké sítě během pandemie Covid-19 a vlivu pandemie na jednotlivá letecká spojení a zkoumaná letiště v síti. Byla odhalena silná spojení, která zůstala aktivní i během největší kulminace krize a letiště, ze kterých byla tato spojení nabízena.

Seznam použité literatury

- [1] LORDAN, Oriol, Jose SALLAN, Pep SIMO a David GONZALEZ-PRIETO. Robustness of the air transport network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [online]. 2014, **68**, 155-163 [cit. 2022-06-27]. ISSN 13665545. Dostupné z: doi:10.1016/j.tre.2014.05.011
- [2] PALEARI, Stefano, Renato REDONDI a Paolo MALIGHETTI. A comparative study of airport connectivity in China, Europe and US: Which network provides the best service to passengers?. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [online]. 2010, **46**(2), 198-210 [cit. 2022-06-27]. ISSN 13665545. Dostupné z: doi:10.1016/j.tre.2009.08.003
- [3] LORDAN, Oriol, Jose SALLAN a Pep SIMO. Study of the topology and robustness of airline route networks from the complex network approach: a survey and research agenda. *Journal of Transport Geography* [online]. 2014, **37**, 112-120 [cit. 2022-06-27]. ISSN 09666923. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.04.015
- [4] ZANIN, Massimiliano a Fabrizio LILLO. Modelling the air transport with complex networks: A short review. *The European Physical Journal Special Topics* [online]. 2013, **215**(1), 5-21 [cit. 2022-06-27]. ISSN 1951-6355. Dostupné z: doi:10.1140/epjst/e2013-01711-9
- [5] WEI, P., L. CHEN a D. SUN. Algebraic connectivity maximization of an air transportation network: The flight routes' addition/deletion problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [online]. 2014, **61**, 13-27 [cit. 2022-06-27]. ISSN 13665545. Dostupné z: doi:10.1016/j.tre.2013.10.008
- [6] SONG, Min a Gi YEO. Analysis of the Air Transport Network Characteristics of Major Airports. *The Asian Journal of Shipping and Logistics* [online]. 2017, **33**(3), 117-125 [cit. 2022-06-27]. ISSN 20925212. Dostupné z: doi:10.1016/j.ajsl.2017.09.002
- [7] MARADA, Miroslav. Důsledky deregulace letecké dopravy. *Geografické rozhledy* [online]. 2011, **20**(5), 8-9 [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.geograficke-rozhledy.cz/archiv/clanek/500/pdf>
- [8] RODRIGUE, Jean-Paul. *The Geography of Transport Systems* [online]. 5th Edition. London: Routledge, 2020 [cit. 2022-07-01]. ISBN 9780429346323. Dostupné z: doi:10.4324/9780429346323
- [9] PRUŠA, Jiří. *Svět letecké dopravy*. Praha: Galileo CEE Service ČR, 2007. ISBN 978-80-239-9206-9.
- [10] ALDERIGHI, Marco, Alessandro CENTO, Peter NIJKAMP a Piet RIETVELD. Network competition—the coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management* [online]. 2005, **11**(5), 328-334 [cit. 2022-07-01]. ISSN 09696997. Dostupné z: doi:10.1016/j.jairtraman.2005.07.006
- [11] ICAO. Connectivity. In: *ICAO: Economic development* [online]. [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.icao.int/sustainability/Pages/Connectivity.aspx>
- [12] IATA. Air connectivity: Measuring the connections that drive economic growth. In: *IATA - Economics* [online]. 2020 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-connectivity-measuring-the-connections-that-drive-economic-growth/>
- [13] ZEIGLER, Patrick, Romano PAGLIARI, Pere SUAUA-SANCHEZ, Paolo MALIGHETTI a Renato REDONDI. Low-cost carrier entry at small European airports: Low-cost carrier effects on network

- connectivity and self-transfer potential. *Journal of Transport Geography* [online]. 2017, **60**, 68-79 [cit. 2022-06-27]. ISSN 09666923. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtrangeo.2017.02.011
- [14] AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL EUROPE. Airport Industry Connectivity Report 2019. In: *Airports Council International Europe* [online]. 2019 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.aci-europe.org/component/attachments/attachments.html?id=213&task=download>
- [15] INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. Defining, Measuring and Improving Air Connectivity. In: *International Transport Forum* [online]. 2018 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/defining-measuring-improving-air-connectivity.pdf>
- [16] BURGHOUWT, Guillaume a Renato REDONDI. Connectivity in Air Transport Networks: An Assessment of Models and Applications. *Journal of Transport Economics and Policy* [online]. 2013, (47), 35-53 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257547529_Connectivity_in_Air_Transport_Networks_An_Assessment_of_Models_and_Applications
- [17] REGGIANI, Aura, Peter NIJKAMP a Diego LANZI. Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* [online]. 2015, **81**, 4-15 [cit. 2022-06-27]. ISSN 09658564. Dostupné z: doi:10.1016/j.tra.2014.12.012
- [18] DATAR, Girish. Robust or Resilient?: How to navigate uncertainty and the new normal. In: *Wipro* [online]. 2020 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.wipro.com/blogs/girish-datar/robust-or-resilient/>
- [19] JANIĆ, Milan. Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* [online]. 2015, **71**, 1-16 [cit. 2022-06-27]. ISSN 09658564. Dostupné z: doi:10.1016/j.tra.2014.10.023
- [20] ZHOU, Yaoming, Junwei WANG a George HUANG. Efficiency and robustness of weighted air transport networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* [online]. 2019, **122**, 14-26 [cit. 2022-06-27]. ISSN 13665545. Dostupné z: doi:10.1016/j.tre.2018.11.008
- [21] BOCCALETTI, S, V LATORA, Y MORENO, M CHAVEZ a D HWANG. Complex networks: Structure and dynamics. *Physics Reports* [online]. 2006, **424**(4-5), 175-308 [cit. 2022-06-27]. ISSN 03701573. Dostupné z: doi:10.1016/j.physrep.2005.10.009
- [22] SERDAR, Mohammad, Muammer KOÇ a Sami AL-GHAMDI. Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods. *Sustainable Cities and Society* [online]. 2022, **76** [cit. 2022-06-27]. ISSN 22106707. Dostupné z: doi:10.1016/j.scs.2021.103452
- [23] CHI, L. a X. CAI. Structural changes caused by error and attack tolerance in us airport network. *International Journal of Modern Physics B* [online]. 2012, **18**(1719), 2394-2400 [cit. 2022-06-27]. ISSN 0217-9792. Dostupné z: doi:10.1142/S0217979204025427
- [24] KLAU, Gunnar a René WEISKIRCHER. Robustness and Resilience. *Network Analysis* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, 417-437 [cit. 2022-06-27]. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-540-24979-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-31955-9_15
- [25] BHASIN, Jatin. Graph Analytics - Introduction and Concepts of Centrality. In: *Towards Data Science* [online]. 2019 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/graph-analytics-introduction-and-concepts-of-centrality-8f5543b55de3>

- [26] SAPRE, Manasi a Nita PAREKH. Analysis of Centrality Measures of Airport Network of India. *Pattern Recognition and Machine Intelligence* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, 376-381 [cit. 2022-06-27]. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-642-21785-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-21786-9_61
- [27] KALOČAYOVÁ, Michaela. *Metodologie hodnocení stavu letecké sítě*. Praha, 2020. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/88303>. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy. Vedoucí práce Helena Bínová.
- [28] DISNEY, Andrew. Social network analysis 101: centrality measures explained. In: *Cambridge Intelligence* [online]. 2020 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://cambridge-intelligence.com/keylines-faqs-social-network-analysis/>
- [29] GUIMERÁ, R. a L. AMARAL. Modeling the world-wide airport network. *The European Physical Journal B - Condensed Matter* [online]. 2004, **38**(2), 381-385 [cit. 2022-06-27]. ISSN 1434-6028. Dostupné z: doi:10.1140/epjb/e2004-00131-0
- [30] *SEO Amsterdam Economics* [online]. 2020 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.seo.nl/>
- [31] ARVIS, Jean-François a Ben SHEPHERD. The Air Connectivity Index: Measuring Integration in the Global Air Transport Network. *Policy Research working paper* [online]. World Bank, 2011 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/3486>
- [32] EUROSTAT. Air passenger transport by main airports in each reporting country. In: *Data browser: AVIA_PAOA* [online]. Eurostat [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/AVIA_PAOA/default/table?lang=en
- [33] *OAG: Flight database & Statistics* [online]. OAG, 2022 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.oag.com/>
- [34] AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL EUROPE. Airport Industry Connectivity Report 2020. In: *Airports Council International Europe* [online]. 2020 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.aci-europe.org/component/attachments/attachments.html?id=1285&task=download>
- [35] About coronaviruses. In: *Healthdirect Australia* [online]. 2021 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.healthdirect.gov.au/about-coronaviruses>
- [36] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Coronavirus disease (COVID-19) pandemic. In: *World Health Organization: Emergencies - Situations* [online]. 2022 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.who.int/europe/emergencies/situations/covid-19>
- [37] WORLD HEALTH ORGANIZATION. Updated WHO recommendations for international traffic in relation to COVID-19 outbreak. In: *World Health Organization: Newsroom* [online]. 2020 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.who.int/news-room/articles-detail/updated-who-recommendations-for-international-traffic-in-relation-to-covid-19-outbreak>
- [38] AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL. The impact of COVID-19 on the airport business and the path to recovery. In: *Airports Council International: Advisory Bulletins* [online]. 2021 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://aci.aero/2021/03/25/the-impact-of-covid-19-on-the-airport-business-and-the-path-to-recovery/>
- [39] ICAO. Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis. In: *ICAO: Economic development* [online]. 2022 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf

- [40] *Flightera* [online]. 2021 [cit. 2022-06-27]. Dostupné z: <https://www.flightera.net/>
- [41] *Web Scraper* [online]. 2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://webscraper.io/>
- [42] OUYANG, Fan a Christiane REILLY. Terminology: Basic Network Terminology. In: *Social Network Analysis* [online]. [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <https://sites.google.com/a/umn.edu/social-network-analysis/terminology>
- [43] *Gephi* [online]. c2008-2022 [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://gephi.org/>
- [44] INSTITUT BIOSTATISTIKY A ANALÝZ LÉKAŘSKÉ FAKULTY MASARYKOVY UNIVERZITY. Standardizace dat. In: *Matematická biologie* [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologickych-dat--vicerozmerne-metody-pro-analyzu-dat--vicerozmerna-rozdeleni-pravdepodobnosti--transformace-dat--standardizace-dat>
- [45] Přednášky. In: *Statistika* [online]. 2010 [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <http://staff.utia.cas.cz/uglickich/prp.html>
- [46] MATHWORKS. Friedman: Friedman's test. In: *MathWorks* [online]. c1994-2022 [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/friedman.html>
- [47] MINITAB. Interpret all statistics for Kruskal-Wallis Test. In: *Minitab 19 Support* [online]. 2022 [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/19/help-and-how-to/statistics/nonparametrics/how-to/kruskal-wallis-test/interpret-the-results/all-statistics/#mean-rank>
- [48] MATHWORKS. Multcompare: Multiple comparison test. In: *MathWorks* [online]. c1994-2022 [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/stats/multcompare.html>
- [49] INSTITUT BIOSTATISTIKY A ANALÝZ LÉKAŘSKÉ FAKULTY MASARYKOVY UNIVERZITY. Základy korelační analýzy. In: *Matematická biologie* [online]. [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinickych-a-biologickych-dat--biostatistika-pro-matematickou-biologii--zaklady-korelacni-analyzy>
- [50] MATHWORKS. Corrplot: Plot variable correlations. In: *MathWorks* [online]. c1994-2022 [cit. 2022-07-17]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/econ/corrplot.html>

Seznam příloh

Příloha 1: Seznam letišť, která za rok 2019 překročila hranici 25 milionů odbavených cestujících

Příloha 2: Týdenní frekvence letů – ukázka dat

Příloha 3: Výsledné hodnoty přímé centrality

Příloha 4: Výsledné hodnoty vážené centrality

Příloha 1: Seznam letišť, která za rok 2019 překročila hranici 25 milionů odbavených cestujících

Letiště	IATA kód	Počet odbavených cestujících
Londýn Heathrow	LHR	80 886 588
Paříž Charles de Gaulle	CDG	76 136 816
Amsterdam Schiphol	AMS	71 689 636
Frankfurt nad Mohanem	FRA	70 435 867
Madrid Barajas	MAD	59 747 242
Barcelona El Prat	BCN	51 734 144
Mnichov	MUC	47 891 776
Londýn Gatwick	LGW	46 560 536
Řím Fiumicino	FCO	43 397 751
Dublin	DUB	32 653 249
Paříž Orly	ORY	31 853 675
Vídeň	VIE	31 634 898
Zürich	ZRH	31 472 879
Lisabon	LIS	31 190 125
Kodaň	CPH	30 120 542
Palma de Mallorca	PMI	29 621 269
Manchester	MAN	29 320 609
Milán Malpensa	MXP	28 705 273
Oslo Gardermoen	OSL	28 472 061
Londýn Stansted	STN	28 118 264
Brusel	BRU	26 287 166
Stockholm Arlanda	ARN	25 633 469
Athény	ATH	25 572 131
Düsseldorf	DUS	25 476 454

Příloha 2: Týdenní frekvence letů – ukázka dat

City pair	1. týden	2. týden	3. týden	4. týden	5. týden	6. týden	7. týden
OSL-TRD	150	157	173	171	175	173	150
BCN-MAD	148	157	156	167	184	170	163
MAD-BCN	148	157	156	167	184	170	163
TRD-OSL	147	153	170	167	174	169	144
TLS-ORY	146	170	177	181	174	146	141
FRA-TXL	141	142	142	143	151	150	161
TXL-FRA	140	142	141	142	149	149	159
OSL-BGO	138	149	158	160	165	163	149
BGO-OSL	136	147	157	157	163	160	148
HAM-MUC	136	138	148	144	138	117	146
MUC-HAM	136	139	148	144	137	121	146
ORY-TLS	136	159	167	171	165	136	133
DUS-MUC	131	130	137	138	132	112	140
MUC-DUS	131	130	137	139	128	113	138
ARN-CPH	129	130	130	128	135	115	126
CPH-ARN	129	131	130	130	131	121	132
AMS-LHR	128	128	129	130	111	123	128
LHR-AMS	127	127	129	131	110	124	130
OSL-SVG	127	135	145	146	158	147	143
LHR-JFK	125	119	202	253	211	174	162
PMI-BCN	125	121	120	121	127	125	127
BCN-PMI	124	121	120	124	139	128	131
JFK-LHR	124	146	193	194	190	192	218
SVG-OSL	124	133	144	145	156	145	143
FCO-LIN	123	107	110	109	110	110	113
LIN-FCO	123	107	109	109	110	110	111
ORY-NCE	123	121	126	133	124	121	119
ARN-OSL	122	124	131	135	137	136	118
OSL-ARN	122	123	131	132	138	135	123
CPH-OSL	115	122	122	123	124	114	112
MAD-PMI	115	111	110	111	133	113	108
NCE-ORY	115	114	121	123	117	110	110
PMI-MAD	115	111	110	111	133	113	108
MUC-TXL	113	118	126	131	125	106	130
DUB-LHR	112	115	115	117	112	116	122
LHR-DUB	112	115	115	117	111	115	122
TXL-MUC	111	119	126	130	126	108	129
FRA-LHR	109	106	108	122	102	116	116
HEL-ARN	109	112	115	114	116	121	112

City pair	1. týden	2. týden	3. týden	4. týden	5. týden	6. týden	7. týden
LIS-MAD	109	104	110	111	117	114	115
MAD-LIS	109	104	110	111	117	114	115
OSL-CPH	109	117	117	118	116	109	107
LHR-FRA	108	106	108	122	102	113	117
ARN-HEL	107	106	111	113	115	122	108
GVA-LHR	105	108	116	114	102	112	107
LHR-GVA	105	108	116	114	102	111	109
EDI-LHR	99	95	100	101	94	88	93
LHR-EDI	99	95	100	101	96	86	95
LHR-MUC	99	99	104	107	94	87	102
MUC-LHR	99	98	104	107	92	89	101
OPO-LIS	96	82	87	91	90	85	92
LIS-OPO	93	82	90	89	87	83	91
CPH-AAL	92	90	89	90	90	95	93
CTA-FCO	92	83	83	86	84	84	84
FCO-CTA	92	83	81	84	83	83	83
DUS-TXL	91	93	94	94	90	89	92
TXL-DUS	91	93	94	94	90	89	90
LHR-CDG	90	86	84	83	82	92	93
LHR-ZRH	88	92	89	89	85	91	95
ZRH-LHR	88	92	89	89	84	93	92
CDG-LHR	87	84	82	80	80	89	90
AMS-LCY	86	83	83	94	88	89	92
LCY-AMS	86	81	82	94	88	89	91
FRA-HAM	85	85	85	85	80	95	101
HAM-FRA	85	85	84	85	80	91	101
LHR-MAD	85	85	99	95	95	97	97
MAD-LHR	85	85	99	95	95	97	97
SKG-ATH	85	82	83	83	83	83	83
ATH-SKG	84	82	83	83	83	83	83
GVA-LGW	84	85	85	85	73	82	88
DUB-LGW	82	73	73	82	84	91	94
AMS-CDG	81	81	81	82	80	81	81
AMS-MAN	81	82	82	81	78	79	82
CDG-AMS	81	81	81	81	81	81	83
FRA-MUC	81	86	88	85	79	81	96
LGW-DUB	81	73	73	82	84	92	92
LGW-GVA	81	85	85	85	76	79	88
MAD-OPO	81	83	83	85	86	85	83
MAN-AMS	81	81	82	82	78	79	82
MUC-CGN	81	94	95	95	92	77	95

Příloha 3: Výsledné hodnoty přímé centrality

Letiště/ Týden	AMS	ARN	ATH	BCN	BRU	CDG	CPH	DUB	DUS	FCO	FRA	LGW
01.	492	236	239	327	292	506	289	279	252	327	516	341
02.	484	224	231	313	295	502	284	272	246	299	509	337
03.	485	222	222	312	289	500	283	270	246	302	507	333
04.	491	227	223	312	285	504	287	271	242	298	500	333
05.	489	230	225	317	295	504	286	271	245	286	504	327
06.	493	234	227	325	290	496	289	275	252	286	504	330
07.	492	237	224	327	294	482	283	274	254	285	498	324
08.	489	238	230	328	297	486	284	274	261	290	498	327
09.	483	229	236	320	290	482	266	274	261	282	493	324
10.	480	223	235	316	281	481	266	264	253	255	491	322
11.	411	187	201	254	250	399	206	217	187	143	434	285
12.	260	86	114	86	81	182	47	142	80	82	251	102
13.	157	66	82	61	63	143	32	68	44	60	176	21
14.	147	41	83	50	61	142	24	55	29	55	158	7
15.	144	39	84	44	45	135	24	59	28	53	165	9
16.	152	40	80	44	48	120	31	56	31	60	196	9
17.	161	45	87	44	48	131	28	58	43	57	167	11
18.	162	37	87	44	49	147	31	52	44	60	171	8
19.	183	46	90	60	60	171	44	57	57	71	196	15
20.	179	46	99	49	50	183	35	58	44	63	180	6
21.	198	40	97	42	53	185	39	59	35	58	192	7
22.	214	51	95	54	56	213	43	60	58	75	198	15
23.	232	60	98	62	57	251	49	64	84	72	213	17
24.	273	79	124	86	101	276	99	82	106	91	261	27
25.	286	82	139	124	115	285	108	93	133	99	254	28
26.	362	98	201	176	197	341	170	249	186	155	355	67
27.	373	93	209	206	217	365	172	253	189	161	362	74
28.	397	97	225	245	238	381	181	256	192	175	374	118
29.	400	109	228	249	235	402	185	270	199	174	368	196
30.	411	116	228	255	239	402	181	270	206	198	373	230
31.	447	112	230	262	237	405	183	274	212	200	387	224
32.	437	116	227	259	235	415	190	275	207	200	386	225
33.	444	123	227	258	234	414	187	284	211	199	391	227
34.	441	115	226	257	234	417	185	282	211	215	385	226
35.	442	125	227	241	222	415	193	269	221	211	385	239
36.	441	124	222	231	213	408	189	263	221	202	388	238
37.	421	126	214	223	204	409	203	257	207	185	392	226
38.	415	125	216	221	214	404	195	263	212	182	403	224
39.	397	121	218	225	212	404	191	265	196	190	399	218
40.	397	122	218	219	199	395	188	244	188	172	396	193

Letiště/ Týden	LHR	LIS	MAD	MAN	MUC	MPX	ORY	OSL	PMI	STN	VIE	ZRH
01.	372	256	366	296	369	291	207	200	122	306	325	279
02.	371	252	360	291	368	289	195	203	109	309	327	275
03.	369	250	358	291	371	285	192	200	111	305	319	278
04.	372	252	358	289	370	284	209	205	110	307	321	277
05.	374	251	356	283	372	284	216	204	113	309	319	275
06.	366	257	352	283	374	279	217	212	127	309	322	272
07.	357	253	348	284	373	274	212	210	132	314	328	271
08.	349	258	350	283	375	275	210	219	140	304	327	273
09.	347	257	352	276	371	257	212	213	144	305	320	270
10.	340	256	346	250	353	206	207	206	139	305	316	266
11.	334	200	268	209	283	119	159	165	114	243	244	203
12.	250	95	116	67	85	40	46	87	22	95	68	97
13.	185	46	62	20	50	30	22	66	14	23	34	66
14.	155	23	56	20	39	23	0	58	14	24	32	52
15.	155	33	54	17	30	31	0	57	14	28	30	49
16.	173	34	42	19	29	38	0	72	12	26	29	51
17.	158	48	58	22	30	40	0	76	18	27	40	63
18.	158	38	70	20	33	53	1	70	20	24	36	54
19.	160	45	98	20	45	62	7	72	25	26	43	68
20.	167	50	82	19	41	63	6	66	23	33	45	76
21.	154	50	74	21	45	55	2	65	21	30	45	73
22.	173	53	70	21	61	73	7	75	22	32	63	102
23.	172	60	84	20	69	78	6	82	26	32	79	122
24.	193	66	106	35	132	82	8	87	46	56	119	139
25.	187	84	128	62	150	97	60	88	77	79	130	166
26.	223	141	196	147	220	183	109	138	201	250	227	223
27.	234	149	212	148	234	179	117	136	212	258	234	227
28.	292	152	244	210	247	187	131	149	242	292	244	240
29.	296	152	242	218	258	194	145	147	249	302	209	252
30.	334	168	246	227	266	211	157	146	252	311	280	250
31.	333	186	234	235	273	212	153	146	259	310	276	249
32.	334	203	248	234	276	205	151	151	261	309	277	249
33.	325	208	248	235	274	214	147	143	260	310	283	243
34.	332	204	250	247	270	217	163	142	248	314	278	246
35.	336	205	250	248	276	205	173	139	211	301	291	243
36.	316	205	244	239	269	200	174	136	197	297	297	245
37.	323	208	240	239	255	201	171	132	183	294	282	242
38.	330	204	238	240	259	200	172	127	183	295	294	237
39.	335	208	250	229	254	193	175	119	184	296	267	225
40.	333	208	230	212	241	173	176	119	175	280	246	219

Příloha 4: Výsledné hodnoty vážené centrality

Letiště/ Týden	AMS	ARN	ATH	BCN	BRU	CDG	CPH	DUB	DUS	FCO	FRA	LGW
01.	8328	3396	2927	5108	3260	8074	4021	3578	3333	4923	7945	4123
02.	8135	3426	2721	4774	3238	7696	4036	3329	3290	4444	7913	3788
03.	8189	3515	2693	4771	3316	7649	4036	3350	3331	4568	7935	3818
04.	8266	3576	2701	4879	3327	7703	4120	3449	3363	4527	8086	3870
05.	8048	3775	2699	4968	3335	7676	4256	3433	3243	4483	7976	3665
06.	8075	3768	2701	5162	3378	8068	4132	3559	3277	4626	8260	4234
07.	8442	3839	2772	5417	3508	8154	4305	3654	3517	4773	8577	4719
08.	8645	3817	2805	5495	3536	8120	4414	3677	3533	4460	8580	4743
09.	8530	3990	2930	5247	3475	7981	4439	3669	3476	4215	8154	4663
10.	7866	3738	2686	4626	2946	6806	4014	3637	2852	2022	6681	4302
11.	4625	2148	1638	1663	1365	3726	1581	2701	1439	799	3641	2628
12.	1573	636	524	331	353	1034	307	1091	280	599	1419	487
13.	771	394	406	286	206	498	228	369	175	479	1031	61
14.	661	206	375	189	167	509	157	242	109	429	972	21
15.	636	223	329	160	130	472	183	238	101	308	1005	24
16.	729	243	284	145	137	393	202	234	106	378	1150	17
17.	764	177	402	151	140	492	146	239	115	362	1110	23
18.	884	226	441	167	149	577	188	216	137	443	1146	14
19.	942	242	397	184	185	730	205	264	157	502	1243	38
20.	1009	211	514	165	173	758	184	308	147	541	1216	24
21.	1044	227	582	149	176	825	205	313	160	524	1257	25
22.	1226	257	863	217	228	1094	255	327	198	579	1375	49
23.	1390	318	1010	240	175	1404	387	356	287	629	1492	57
24.	1644	364	1238	309	392	1768	625	384	494	747	1803	106
25.	1790	430	1369	615	483	1950	712	449	630	809	1863	112
26.	2461	679	1836	1055	944	2587	1190	993	986	1250	2581	270
27.	3077	766	2074	1605	1110	3104	1335	1188	1092	1469	2813	375
28.	3298	795	2249	2179	1247	3678	1423	1255	1205	1613	2951	527
29.	3436	815	2430	2234	1298	3992	1467	1365	1256	1619	3064	821
30.	3527	842	2559	2477	1323	4350	1485	1437	1299	1815	3187	1189
31.	4875	891	2776	2911	1390	4345	1578	1640	1487	2035	3460	1615
32.	4968	934	2807	2824	1347	4394	1644	1684	1417	2077	3509	1670
33.	4934	1065	2846	2789	1319	4506	1794	1622	1330	2121	3487	1682
34.	4905	1053	2776	2745	1315	4605	1735	1613	1292	2148	3411	1684
35.	5298	1162	2540	2470	1216	4110	1818	1494	1508	2026	3578	1716
36.	5020	1158	2451	2290	1099	3807	1706	1475	1445	1942	3497	1670
37.	4691	1165	2262	2000	1050	3648	1665	1428	1377	1858	3442	1582
38.	4767	1192	2138	1977	1062	3538	1666	1460	1351	1831	3530	1534
39.	4586	1193	2147	1869	1031	3331	1593	1321	1271	1806	3540	1186
40.	4392	1208	1931	1818	989	3165	1539	1166	1271	1755	3502	908

Letiště/ Týden	LHR	LIS	MAD	MAN	MUC	MPX	ORY	OSL	PMI	STN	VIE	ZRH
01.	8603	3790	7118	2799	6543	3271	3744	3837	1552	2925	4348	4032
02.	8556	3410	6726	2686	6580	3056	3443	3980	1392	2663	4185	3915
03.	8977	3410	6848	2710	6704	3100	3435	4101	1401	2660	4218	3936
04.	9125	3502	6856	2771	6770	3112	3604	4211	1430	2663	4234	3967
05.	8691	3578	6994	2734	6660	3184	3694	4306	1602	2733	4252	3895
06.	9059	3631	7038	2914	5986	3313	3734	4372	1643	2853	4340	3828
07.	9178	3752	7050	2984	7019	3439	3713	4233	1764	2932	4456	4038
08.	9332	3774	7050	2992	6953	3095	3471	4336	1839	2882	4534	4016
09.	9311	3767	7008	2719	6809	2537	3645	4499	1822	2889	4517	3956
10.	8881	3513	6408	2317	5263	958	3423	4198	1758	2742	3624	2968
11.	6085	1814	2664	1539	2491	380	1569	1937	727	1591	1144	1359
12.	3006	336	570	265	443	161	210	948	114	176	179	360
13.	1488	122	258	101	283	126	39	833	92	52	123	239
14.	970	40	196	85	209	122	0	706	73	49	113	173
15.	884	71	152	74	211	127	0	758	68	70	102	177
16.	1004	77	124	89	210	138	0	729	53	52	99	165
17.	950	96	154	70	187	150	0	755	76	62	128	190
18.	962	98	166	71	180	194	1	786	102	60	122	184
19.	1055	119	238	66	191	240	10	787	119	66	132	229
20.	1081	150	230	71	219	232	8	771	116	88	142	235
21.	1053	157	222	80	256	243	2	774	145	101	134	218
22.	1226	223	220	90	378	368	9	897	149	110	189	373
23.	1292	258	278	92	433	448	8	994	168	113	244	441
24.	1440	327	390	111	940	597	9	1082	266	155	589	603
25.	1439	380	568	190	1042	667	199	1164	649	244	742	687
26.	1899	901	1116	466	1423	1249	727	1714	1410	697	1285	1119
27.	2152	1162	1384	552	1601	1538	980	1820	1739	859	1524	1384
28.	2687	1239	1936	793	1856	1693	1134	1883	2168	1046	1629	1557
29.	3016	1260	2096	957	1966	1670	1371	1908	2472	1136	1599	1641
30.	3136	1471	2320	1087	2156	1652	1570	1910	2716	1326	1819	1711
31.	3539	1864	2842	1255	2295	1679	1761	1945	3009	1789	2289	1821
32.	3509	1841	2894	1293	2288	1706	1755	1925	2963	1849	2293	1759
33.	3541	1881	2906	1307	2273	1762	1790	1904	2856	1908	2241	1629
34.	3613	1899	2854	1366	2250	1757	1968	1883	2649	1950	2203	1605
35.	3716	1764	2610	1386	2679	1724	2301	2121	2093	1646	2288	1631
36.	3624	1678	2434	1365	2524	1698	2239	2078	1868	1589	2195	1575
37.	3592	1681	2288	1389	2445	1641	2128	2009	1734	1569	2087	1539
38.	4719	1663	2294	1381	2377	1592	2052	2013	1714	1593	1978	1502
39.	5391	1726	2200	1237	2300	1407	1855	2023	1505	1435	1782	1488
40.	5527	1655	2096	1072	2217	1277	1826	2024	1315	1248	1601	1460