Utjecaj uvođenja cjelodnevnog FRA u gornjem zračnom prostoru oblasne kontrole zračnog prometa Maastrichta na kompleksnost zračnog prometa

Cicnjak, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:089828

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Matija Cicnjak

Utjecaj uvođenja cjelodnevnog FRA u gornjem zračnom prostoru oblasne kontrole zračnog prometa Maastricht na kompleksnost zračnog prometa

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 3. travnja 2019.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Upravljanje kapacitetom i protokom zračnog prometa**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 5252

Pristupnik: **Matija Cicnjak (0135233014)**
Studij: Aeronautika

Zadatak: **Utjecaj uvođenja cjelodnevnog FRA u gornjem zračnom prostoru oblasne kontrole zračnog prometa Maastrichta na kompleksnost zračnog prometa**

Opis zadatka:

Cilj ovog rada je, uz pomoć programa NEST, simulirati sadašnje stanje u gornjem zračnom prostoru oblasne kontrole zračnog prometa Maastrichta (MUAC) te stanje nakon uvođenja FRA u isti.
Potrebno je pokazati u kojoj mjeri dolazi do promjene prometnih tokova nakon implementacije FRA u MUAC te analizirati utjecaj na kompleksnost zračnog prometa. Analizirati promjene duljine letova, potrošnje goriva i utjecaja na okoliš u zračnom prostoru ovog FRA.

Mentor:

doc. dr. sc. Tomislav Radišić

Predsjednik povjerenstva za diplomski ispit:

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

DIPLOMSKI RAD

Utjecaj uvođenja cjelodnevnog FRA u gornjem zračnom prostoru oblasne kontrole zračnog prometa Maastricht na kompleksnost zračnog prometa

Impact of 24-hour FRA Implementation in Maastricht Upper Area Control Centre on Air Traffic Complexity

Mentor: doc. dr. sc. Tomislav Radišić **Student: Matija Cicnjak**

JMBAG: 0135233014

Zagreb, 2020

SAŽETAK

Zbog sve veće prometne potražnje osnovana je inicijativa Jedinstvenog europskog neba kojoj je glavni cilj smanjiti fragmentaciju zračnog prostora i omogućiti zračnim prijevoznicima odabir kraćih ruta u svrhu smanjenja operativnih troškova i smanjenja utjecaja zračnog prometa na okoliš. Implementacijom prostora slobodnih ruta moguće je ostvariti ovaj cilj, unutar ovog prostora korisnici mogu slobodno planirati rute između ulazno-izlaznih točaka. Unutar ovog rada provedena je analiza implementacije cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta unutar gornjeg zračnog prostora oblasne kontrole zračnog prometa Maastricht. Analiziran je utjecaj implementacije na promet, prometne tokove, kompleksnost i indikatore kompleksnosti unutar ovog zračnog prostora. Analize su provedene korištenjem programskog alata NEST.

KLJUČNE RIJEČI: jedinstveno europsko nebo, prostor slobodnih ruta, kompleksnost, NEST

SUMMARY

Due to the growing traffic demand, the Single European Sky initiative has been established with the main goal of reducing airspace fragmentation and enabling air space users to choose shorter routes in order to reduce operating costs and reduce the environmental impact of air traffic. By implementing Free Route Airspace it is possible to achieve this goal, within this airspace users are free to plan routes between entry and exit points. Within this paper, an analysis of the implementation of 24 hour Free Route Airspace operations within the Maastricht Upper Area Control Centre was performed. The impact of implementation on traffic, traffic flows, complexity and complexity indicators within this airspace has been analyzed. Analyzes were performed using the NEST software.

KEY WORDS: Single European Sky; Free Route Airspace; complexity: NEST

Sadržaj

Contents

1. Uvod 1

2. Opis koncepta prostora slobodnih ruta 3

2.1. Jedinstveno europsko nebo 3

2.1.1. SES 1 paket mjera 3

2.1.2. SES 2 paket mjera 4

2.2. Koncept slobodnih ruta 7

2.2.1. Ograničenja FRA 7

2.2.2. Rezervacije zračnog prostora 8

2.2.3. Sektorizacija FRA 9

2.2.4. Implementacija FRA u europskom zračnom prostoru 9

3. Pregled karakteristika gornjeg zračnog prostora Maastrichta 12

3.1. Promet kroz gornjeg zračnog prostora Maastrichta 16

3.2. FRA u gornjem zračnom prostoru Maastrichta 18

4. Simulacija prometa nakon uvođenja cjelodnevnog FRA u gornji zračni prostor Maastrichta 19

4.1. Simulacija putanja prije uvođenja cjelodnevnog FRA u gornji zračni prostor Maastrichta 20

4.2. Simulacija putanja nakon uvođenja cjelodnevnog FRA u gornji zračni prostor Maastrichta 24

5. Analiza utjecaja uvođenja FRA na karakteristike prometnih tokova 26

5.1. Analiza prometnih tokova kroz gornji zračni prostor Nizozemske 27

5.2. Analiza prometnih tokova kroz gornji zračni prostor Belgije 30

5.3. Analiza prometnih tokova kroz gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke33

6. Analiza utjecaja uvođenja FRA na kompleksnost zračnog prometa 37

6.1. Dimenzije kompleksnosti 37

6.1.1. Dimenzije karakteristika prometa 37
6.1.2. Dimenzija karakteristike zračnog prostora 38
6.1.3. Dimenzije vanjskih ograničenja 39
6.2. Indikatori kompleksnosti 39
6.2.1. Dimenzije ćelije 40
6.2.2. Interakcije 41
6.2.3. Prilagođena gustoća 42
6.2.4. Vertikalne interakcije 43
6.2.5. Horizontalne interakcije 44
6.2.6. Interakcije brzine 46
6.3. Rezultat kompleksnosti 47
6.4. Strukturalni indeks 47
6.5. Kompleksnost unutar programskog alata NEST 48
6.6. Izračun kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Maastrichta pomoću programskog alata NEST 50
6.6.1. Indikatori kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Nizozemske 51
6.6.2. Indikatori kompleksnosti gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke 55
6.6.3. Indikatori kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Belgije 58
7. Zaključak 63

1. Uvod

Zbog sve većeg trenda porasta prometne potražnje, početkom 21. stoljeća pokrenuta inicijativa Jedinstvenog europskog neba. Cilj ove inicijative je povećanje učinkovitosti pružanja usluga zračne plovidbe integracijom rascjepkanih zračnih prostora u funkcionalne blokove. Već provedene implementacije prostora slobodnih ruta imale su pozitivan utjecaj na smanjenje zagušenja zračnog prostora, potrošnje gorica, troškova leta, kompleksnosti zračnog prostora i radnog opterećenja kontrolora. Cilj ovog diplomskog rada je odrediti utjecaj uvođenja prostora slobodnih ruta na prometne tokove i kompleksnost unutar gornjeg zračnog prostora oblasne kontrole zračnog prometa Maastricht.

Ovaj diplomski rad je podijeljen na 7 cjelina:

1. Uvod
2. Opis koncepta prostora slobodnih ruta
3. Pregled karakteristika gornjeg zračnog prostora Maastrichta
4. Simulacija prometa nakon uvođenja cjelodnevnog FRA u gornji zračni prostor Maastrichta
5. Analiza utjecaja uvođenja FRA na karakteristike prometnih tokova
6. Analiza utjecaja uvođenja FRA na kompleksnost zračnog prometa
7. Zaključak

U drugom poglavlju je opisan koncept prostora slobodnih ruta, ciljevi inicijative Jedinstveno europsko nebo. Opisani su preduvjeti za uvođenje prostora slobodnih ruta, te ograničenja, rezervacije, sektorizacije i već trenutno implementirani prostori slobodnih ruta.

U trećem poglavlju je opisan gornji zračni prostor Maastrichta. Navedene su zemlje članice, analizirana je sektorizacija prostora i promet kroz gornji tračni prostora Maastrichta.

U četvrtom poglavlju je napravljena simulacija uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta koristeći programski alat NEST. Opisan je proces analize prostora prije i nakon implementacije prostora slobodnih ruta.

U petom poglavlju je napravljena usporedba podataka o prometnim tokovima prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta. Analiza prometnih tokova je provedena za svaku državu unutar gornjeg zračnog prostora Maastrichta.

U šestom poglavlju je definirana kompleksnost, dimenzije kompleksnosti i indikatori kompleksnosti. Također je napravljena analiza kompleksnosti svake države unutar gornjeg zračnog prostora Maastrichta.

2. Opis koncepta prostora slobodnih ruta

Krajem 20. stoljeća zabilježen je velik rast zračnog prometa unutar europskog zračnog prostora zbog razvoja turizma i liberalizacije zračnog prometa. Ovaj rast prikazao je probleme unutar infrastrukture zračnih mreža i infrastrukture aerodroma na kojima su se pojavljivala sve veća zagušenja. Upravljanje zračnim prometom (ATM[1]) se također smatralo ključnim uzrokom povećanja zagušenja zračnog prometa u zraku i na zemlji, zbog toga je jedan od glavnih interesa bio ustanovljenje suradnje između pružatelja zračnih usluga (ANSP[2]) sa ciljem kreiranja efikasne usluge upravljanja zračnim prometom. [1]

Potražnja za zračnim prometa iznosila je između 5 i 7 % godišnje, sa prognoziranim udvostručenjem zračnog prometa svakih 12 godina. Dok su 1999. godine kašnjenja po letu prosječno iznosila 25 minuta, a 21% svih letova je iskusilo kašnjenje. [1]

Jedan od uzroka zagušenja europskog zračnog prostora je fragmentacija prostora između pružatelja usluga zračne plovidbe. Zbog toga se javlja potreba za reformom europskog zračnog prostora sa ciljem povećanja kapaciteta i smanjenja kašnjenja prometa.

2.1. Jedinstveno europsko nebo

Inicijativa Jedinstvenog europskog neba (SES[3]) je pokrenuta 2000. godine od strane Europske komisije. Glavni ciljevi SES regulative su poboljšanje sigurnosti i efikasnosti zračnog prometa u Europi, smanjenje kašnjenja, unaprjeđenje usluga i smanjenje troškova usluga, i unaprjeđenje integracije vojnih operacija u ATM sustave.

2.1.1. SES 1 paket mjera

Prva legislativa je prihvaćena 2004. godine i sastoji se od četiri osnovne regulacije. Ove regulacije pružaju jedinstveni okvir koji služi poboljšanju kapaciteta i efikasnosti ATM sustava u Europi.

[1] ATM- *Air Traffic Managment*
[2] ANSP- *Air Navigation Service Provider*
[3] SES- *Single European Sky*

Četiri glavne regulative SES 1 paketa su:

- Okvirna uredba (EC No 549/2004) – utvrđivanje okvira za stvaranje Jedinstvenog europskog neba
- Uredba o pružanju usluga (EC No 550/2004) – pružanje usluga zračne plovidbe u Jedinstvenom europskom nebu
- Uredba o zračnom prostoru (EC No 551/2004) organizacija i korištenje zračnog prostora u Jedinstvenom europskom nebu
- Uredba o interoperabilnosti (EC No 552/2004) – interoperabilnost europske mreže upravljanja zračnim prometom [2]

Prema okvirnoj uredbi Europska komisija mora periodično provjeriti aplikaciju SES legislative i izdati izvješće o implementaciji. U prosincu 2007. izdano je prvo izvješće implementacije SES 1 paketa.

Postignuća istaknuta u izvješću su:

- uspostavljanje nacionalnih nadzornih vlasti (NSA[4]) odgovornih za certifikaciju pružatelja zračnih usluga
- poboljšanje fleksibilnog korištenja zračnog prostora i pristup vojnom zračnom prostoru
- harmonizacija klasifikacije gornjeg zračnog prostora
- ustanovljenje mehanizma interoperabilnosti između država članica. [3]

Unatoč ovim postignućima mnoge planirane mjere još nisu bile implementirane. To dovodi do uspostave SES 2 paketa mjera koji se uvodi 2008. godine.

2.1.2. SES 2 paket mjera

SES 2 paket mjera donesen je prema prijedlogu Europske komisije i sadrži sljedeća rješenja kako bi se osigurao sigurniji i efikasniji protok prometa:

- uvođenje okvira praćenja performansi europskog ATM sustava
- stvaranje jedinstvenog sigurnosnog okvira koji omogućuje usklađeni razvoj sigurnosnih regulacija i efektivno uvođenje istih
- razvoj i implementacija novih tehnologija (SESAR[5]) i povećanje sigurnosne razine za faktor 10

[4] NSA – National Supervisory Authority
[5] SESAR – Single European Sky ATM Research

- unapređenje kapaciteta zračnih luka [4]

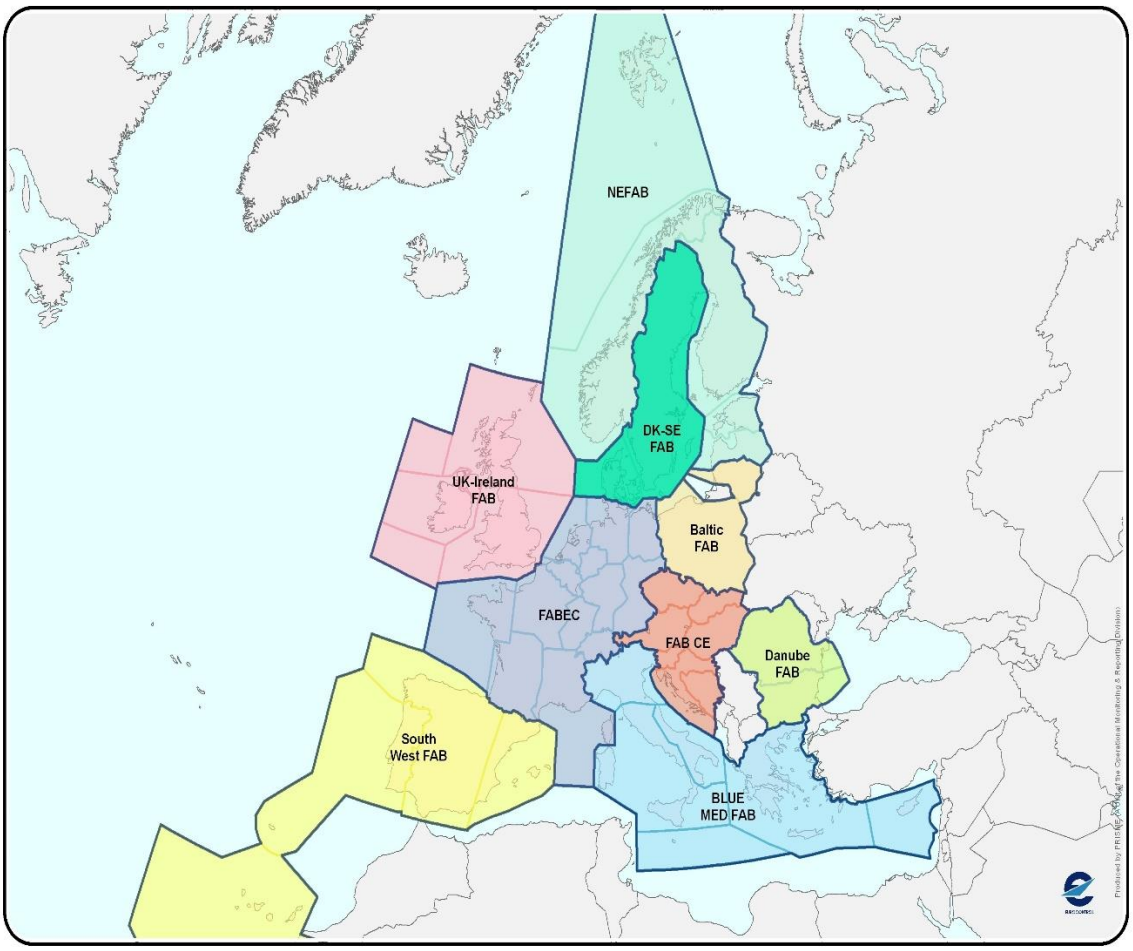
Jedan od glavnih zadataka SES 2 paketa mjera je reforma podjele europskog zračnog prostora u funkcionalne zračne blokove (FAB[6]). Glavni cilj ove reforme je smanjiti fragmentaciju zračnog prostora i povećati suradnju između pružatelja usluga zračne plovidbe.

Dosad je ustanovljeno 9 FAB-ova:

- UK-Ireland FAB - Ujedinjeno Kraljevstvo, Irska
- Danish-Swedish FAB – Danska, Švedska
- Baltic FAB – Litva, Poljska
- BLUE MED FAB – Cipar, Grčka, Italija i Malta
- FAB CE – Austrija, Bosna i Hercegovina, Hrvatska, Češka, Mađarska, Slovačka, Slovenija
- FABEC – Belgija, Francuska, Njemačka, Luksemburg, Nizozemska i Švicarska
- North European FAB – Estonija, Finska, Latvija i Norveška
- Souh West FAB – Portugal Španjolska [5]

Na slici 1. prikazani su ustanovljeni FAB-ovi.

[6] FAB - -Functional Airspace Block



Slika 1: Europski FAB-ovi [5]

Zbog ubrzanog razvoja potražnje za zračnim prometom također je bilo potrebno razviti nove tehnologije i poboljšati dosadašnje ATM sustave jer se tadašnji sustav smatra zastarjelim, nesigurnim i loše prilagođenim brzom ekonomskom rastu avijacije u Europi. Zbog toga je definiran projekt SESAR koji bi trebao osigurati razvoj tehnologija u skladu sa potrebama avijacije. Implementacija SESAR-a je podijeljena u više faza zbog razlika u sustavima pružatelja usluga zračne plovidbe kako bi se osiguralo potrebno razdoblje tranzicije. [6]

Faze implementacije SESAR-a su sljedeće:

- faza A – rješavanje poznatih kritičnih grešaka u mreži – ova faza se bavi razvijanjem ATM sustava i infrastrukture pomoću kojih će se olakšati izmjena podataka između državnih granica i pružatelja usluga
- faza B – implementacija efikasnih usluga i infrastrukture – implementacija ovih sustava omogućiti će pomak od fizičke infrastrukture u virtualnu infrastrukturu sa većom razinom automatizacije i izmjene podataka

- faza C – defragmentacija neba pomoću virtualizacije – nakon dostizanja ove faze očekuje se visoka razina automatizacije i povezanosti, što će omogućiti veću produktivnosti i veoma lako dijeljenje informacija između pružatelja usluga. Planovi unutar ove faze su: uključivanje zračnih luka u ATM mrežu, pružanje usluga kontrole zračne plovidbe neovisno o državnim granicama, uvođenje operacija bespilotnih letjelica u rutinske operacije
- faza D – digitalno europsko nebo – cilj ove faze je dovesti automatizaciju sustava na višu razinu uz korištenje umjetne inteligencije koja će pomagati pružateljima zračnih pri donošenju ključnih odluka. Uvođenje ovih se očekuje do 2040. godine [20]

2.2. Koncept slobodnih ruta

Prostor slobodnih ruta (FRA[7]) je specificirani volumen zračnog prostora unutar kojeg korisnici mogu slobodno planirati rutu između unaprijed definiranih ulaznih i izlaznih točaka. Ovisno o dostupnosti unutar zračnog prostora pri planiranju rute također je moguće korištenje definiranih međutočaka, bez korištenja fiksne mreže ruta, pod uvjetom da je zračni prostor dostupan za planiranje. Svi letovi unutar FRA prostora su podložni kontroli zračnog prometa. [7]

Sveukupni opseg koncepta prostora slobodnih ruta (FRA) je pružiti okvir za usklađenu provedbu FRA-a u Europi kad god država/FAB/ANSP, skupina država/ FAB-ova/ANSP-a odluči provesti implementaciju.

Uvjeti potrebni za implementaciju FRA su:

- prikladna sistemska podrška – poboljšanja u planiranju letenja i ATFCM[8]
- procedure – poboljšane procedure za potrebe operacija unutar FRA
- provedene prilagodbe strukture zračnog prometa
- provedene prilagodbe upravljanja zračnim prostorom
- modifikacije sustava planiranja letenja u svrhu korištenja prednosti FRA [8]

2.2.1. Ograničenja FRA

Korištenje prostora slobodnih ruta može biti ograničeno vremenski ili strukturalno. Vremenski ograničena implementacija prostora slobodnih ruta koristi se kroz period

[7] FRA – Free Route Airspace
[8] ATFCM – Air Traffic Flow and Capacity Managment

rane implementacije i omogućava lakšu tranziciju u nove procedure. Pri tome se moraju definirati procedure za tranziciju između FRA operacija i operacija fiksnih ATS[9] ruta. Strukturalno ograničeno korištenje prostora slobodnih ruta koristi se unutar kompleksnih zračnih prostora unutar kojih bi potpuna implementacija prostora slobodnih ruta mogla imati štetan utjecaj na kapacitet zračnog prostora. U takvom zračnom prostoru/FAB-u/ANSP-u može se implementirati prostor slobodnih ruta na strukturalno ograničenoj razini, primjerice ograničenje dostupnih horizontalnih ulaznih točaka, što će smanjiti broj potencijalnih konflikata unutar prostora. [8]

Vertikalne granice FRA moraju biti objavljenje unutar državnih AIS[10] publikacija. Postavljanje donje granice FRA ne smije utjecati na okolna područja u kojima FRA još nije uveden, ili je djelomično uveden. Sa ciljem usklađivanja zračnog prostora potrebno je koordinirati donju vertikalnu granicu prostora na razini europske mreže i odabrati najmanju moguću razinu uzimajući u obzir kompleksnost zračnog prostora i potražnju. Horizontalne granice FRA se također objavljuju unutar državnih AIS publikacija. Kako bi se osiguralo smanjenje trajanja letova kroz FRA prostor poželjno je bazirati horizontalne granice prema operativnim zahtjevima, umjesto geografskih granica država/FAB-a. Poželjna je suradnja sa okolnim pružateljima usluga kako bi se osigurale jasno definirane ulazne i izlazne točke te nesmetana tranzicija između FRA i prostora fiksnih ruta. [8]

2.2.2. Rezervacije zračnog prostora

Rezervacija zračnog prostora označava volumen zračnog prostora određenih dimenzija namijenjen za korištenje od specifičnog korisnika. Rezervacije zračnog prometa mogu biti trajno aktivne ili aktivne samo na određeni period vremena.[8]

Rezervacije zračnog prostora mogu se podijeliti na sljedeće:

- TRA (Temporary Reserved Area) - definiran volumen zračnog prostora pod nadležnošću jedne zrakoplovne vlasti koji je privremeno rezerviran za upotrebu od strane druge zrakoplovne vlasti. Ostali promet može prometovati kroz ovaj prostor uz ATC odobrenje.
- TSA (Temporary Segregated Areas) - definiran volumen zračnog prostora pod nadležnošću jedne zrakoplovne vlasti koji je privremeno odvojen

[9] ATS – Air Traffic Services
[10] AIS – Aeronautical Information Service

samo za upotrebu od strane druge zrakoplovne vlasti. Ostali promet nema dozvolu prolaziti kroz ovaj prostor.

- CBA (Cross-Border Areas) - rezervacija zračnog prostora iznad nacionalnih granica za specifične operacije. Uspostavlja se za omogućavanje vojnih vježbi i ostalih OAT letova s obje strane granice.
- D (Danger Area) – definiran volumen zračnog prostora unutar kojeg se mogu odvijati aktivnosti opasne za let zrakoplova
- R (Restricted Area) – definiran volumen zračnog prostora unutar kojeg se ograničava let zrakoplova u skladu sa specificiranim uvjetima
- P (Prohibited Area) – definiran volumen zračnog prostora unutar kojeg je zabranjen let zrakoplova [9]

2.2.3. Sektorizacija FRA

Da bi se uspješno provodila sektorizacija unutar FRA prostora potrebno je promijenit shemu sektorizacije zračnog prostora u svrhu prilagodbe prometnim tokovima unutar FRA i u skladu sa fiksnim ATS rutama. Planiranje sektora trebalo bi biti fleksibilnije i uzeti u obzir promjenjive vrijednosti prometne potražnje. Sektori unutar FRA ne smiju biti određeni državnim granicama ili granicama FIR[11]-a, i mora postojati mogućnost rekonfiguracije sektora prema prometnoj potražnji. Pružatelj usluga dužan je obavijestiti NMOC[12] i okolne pružatelje usluga o svakoj promjeni strukture sektora. [8]

Kriteriji koji se moraju uzeti u obzir pri planiranju sektora su:

- orijentacija prometnih tokova unutar zračnog prostora
- smanjenje kratkih preleta kroz sektore
- smanjenje ponovnih ulazaka u sektor
- pozicije rezervacija zračnog prostora
- povezanost sa fiksnom ATS rutom susjednih sektora
- koordinacija civilnog i vojnog zrakoplovstva [8]

2.2.4. Implementacija FRA u europskom zračnom prostoru

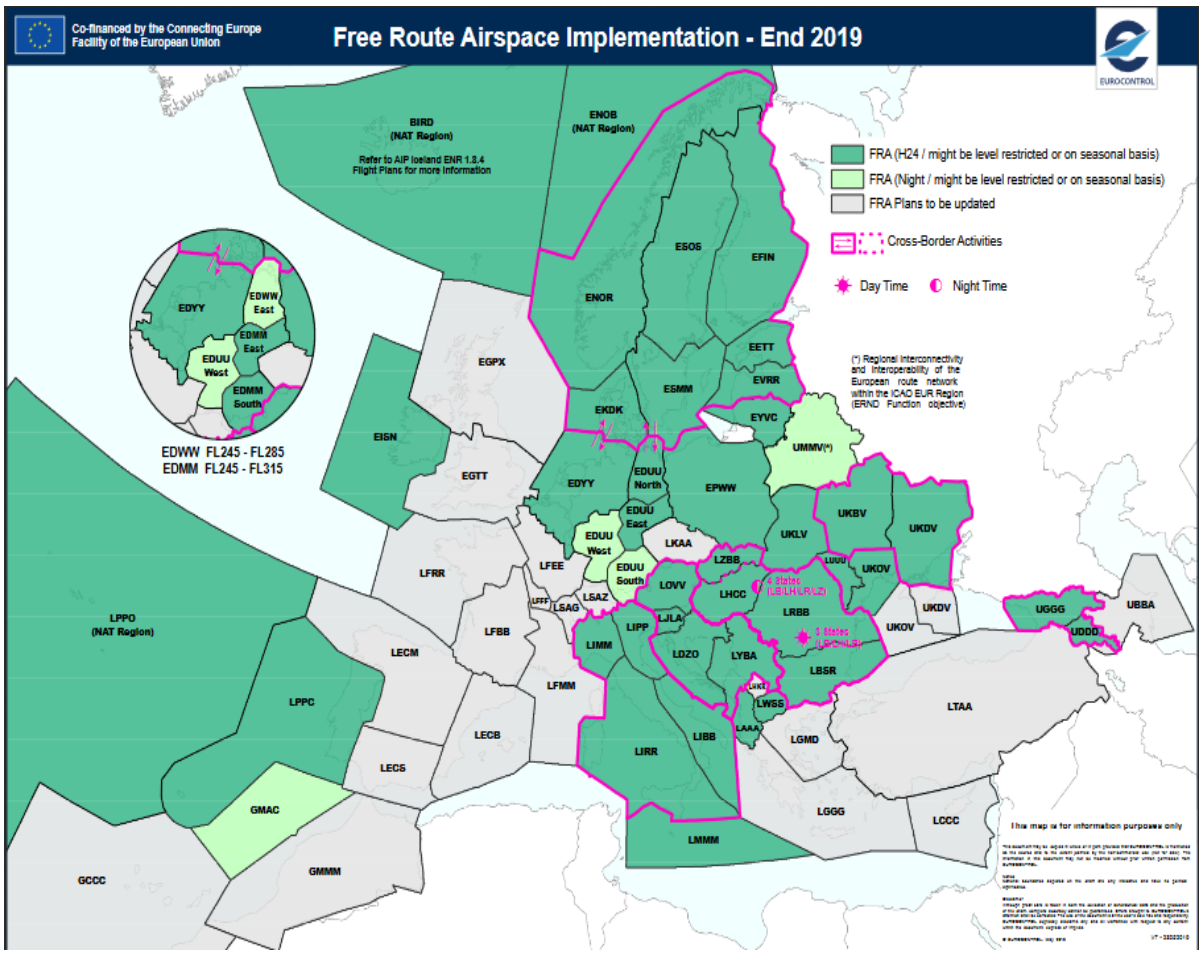
U ljetu 2019. godine 24 satne FRA operacije su u potpunosti implementirane u sljedećim ACC[13]-ovima: Beograd ACC, Bodo ACC, Bratislava ACC, Brindisi ACC,

[11] FIR – Flight Information Region
[12] NMOC – Network Manager Operations Centre
[13] ACC – Area Control Center

Budapest ACC, Chisinau ACC, Dnipropetrovs ACC, Karlsruhe UAC North, Karlsruhe UAC East, Munich ACC East i Munich ACC South, Kyiv ACC, Kobenhavn ACC, Lisboa ACC, L'viv ACC, Ljubljana ACC, Malmo ACC , Malta ACC, Milano ACC, Maastricht UAC (tijekom vikenda), OsloACC, Padova ACC, Riga ACC, Roma ACC, Shannon ACC, Skopje ACC, Sofia ACC, Stavanger ACC, Stockholm ACC, Tallinn ACC, Tampere ACC, Tbilisi ACC, Tirana ACC, Vilnius ACC, Warszawa ACC, Wien ACC, Yeveran ACC, Zagreb ACC i Bodo Oceanic FIR. [10]

Noćne FRA operacije su implementiranje u sljedećim ACC-ovima: Bucuresti ACC, Maastricht UAC, Minsk ACC, Odessa ACC, Karlsruhe UAC West, Karlsruhe UAC South, Bremen ACC East. [10]

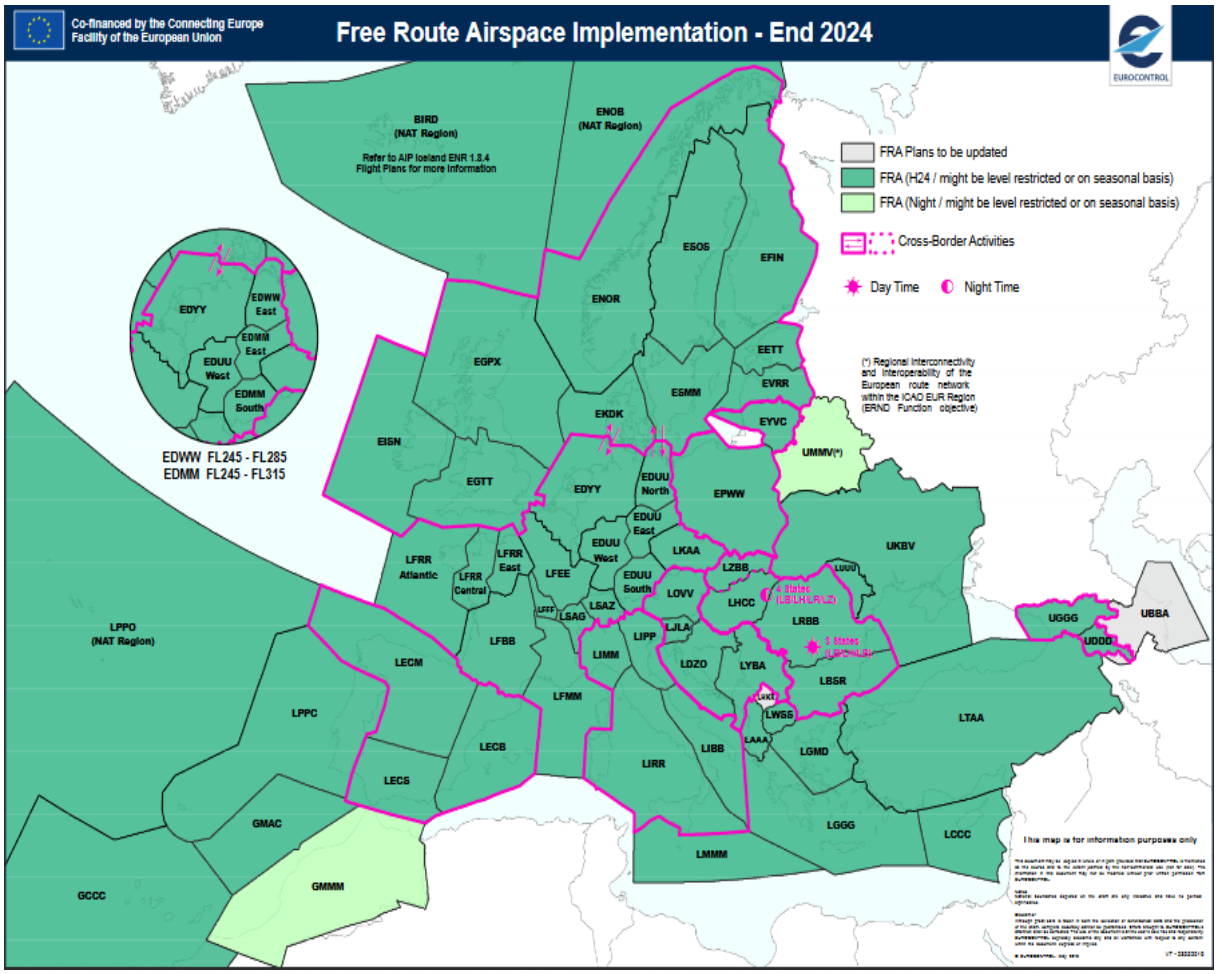
Na slici 2. prikazana je planirana implementacija FRA u Europi do kraja 2019. godine:



Slika 2: Implementacija FRA u Europi do kraja 2019. godine [10]

Predviđa se da će do kraja 2019. godine većina europskog zračnog prometa implementirati FRA. Također se predviđa da će sav europski zračni prostor implementirati FRA operacije do 2023./2024. godine.

Na slici 3 je prikazana planirana implementacija FRA u Europi do kraj 2024. godine:



Slika 3: Implementacija FRA u Europi do kraja 2024. godine [10]

3. Pregled karakteristika gornjeg zračnog prostora Maastrichta

Kontrola gornjeg zračnog prostora Maastrichta (MUAC[14]) pruža uslugu kontrole gornjeg zračnog prostora iznad Belgije Nizozemske, Luksemburga i sjeveroistočne njemačke. Smatra se jednim od najsloženijih i najprometnijih prostora u Europi.

MUAC pruža usluge kontrole zračnog prometa temeljem sporazuma o pružanju i upravljanju uslugama i uslugama zračnog prometa u centru za nadzor gornjeg područja Maastrichta („Maastrichtski sporazum“), potpisanog 25. studenog 1986. Koordinacijska skupina Maastricht je osnovana radi olakšavanja donošenja odluka utvrđivanjem o svim pitanjima koja se odnose na funkcioniranje usluga zračnog prometa u MUAC-u. Odgovornost za svakodnevne operacije je povjerena generalnom direktoru MUAC-a, dok svaka od četiri države zadržava svoju regulatornu nadležnost. [11]

Glavni sudionici u upravljanju usluga zračnog prometa MUAC-a su odgovarajuća ministarstva prometa ili odgovarajuća ministarstva za opći zračni promet (GAT[15]) i njemačko i nizozemsko ministarstvo obrane za operativni zračni promet (OAT[16]). Koordinacijska skupina iz Maastrichta osigurava da je suradnja između subjekata koji posluju s MUAC-om na visokoj razini. [12]

Pružanje ATS-a unutar MUAC prostora podliježe nacionalnim regulatornim režimima četiriju različitih država, od kojih svaka posebno definira primjenjiva pravila i propise. Reguliranje i nadzor pružanja usluga zračne plovidbe koji se obavlja u MUAC prostoru provodi se koordinirano između četiri dotične države. Odredba o ATS-u u MUAC zračnom prostoru podliježe zakonodavstvu Jedinstvenog europskog neba. [12]

Svaka od četiri države je ustanovila svoje nacionalno nadzorno tijelo. Nacionalna nadzorna tijela za dotične države su:

- Belgijsko nadzorno tijelo ta ANS (BSA-ANS) – Belgija
- Federalno nadzorno tijelo za ANS (Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung) – Njemačka

[14] MUAC – Maastricht Upper Area Control Centre
[15] GAT – General Air Traffic
[16] OAT – Operational Air Traffic

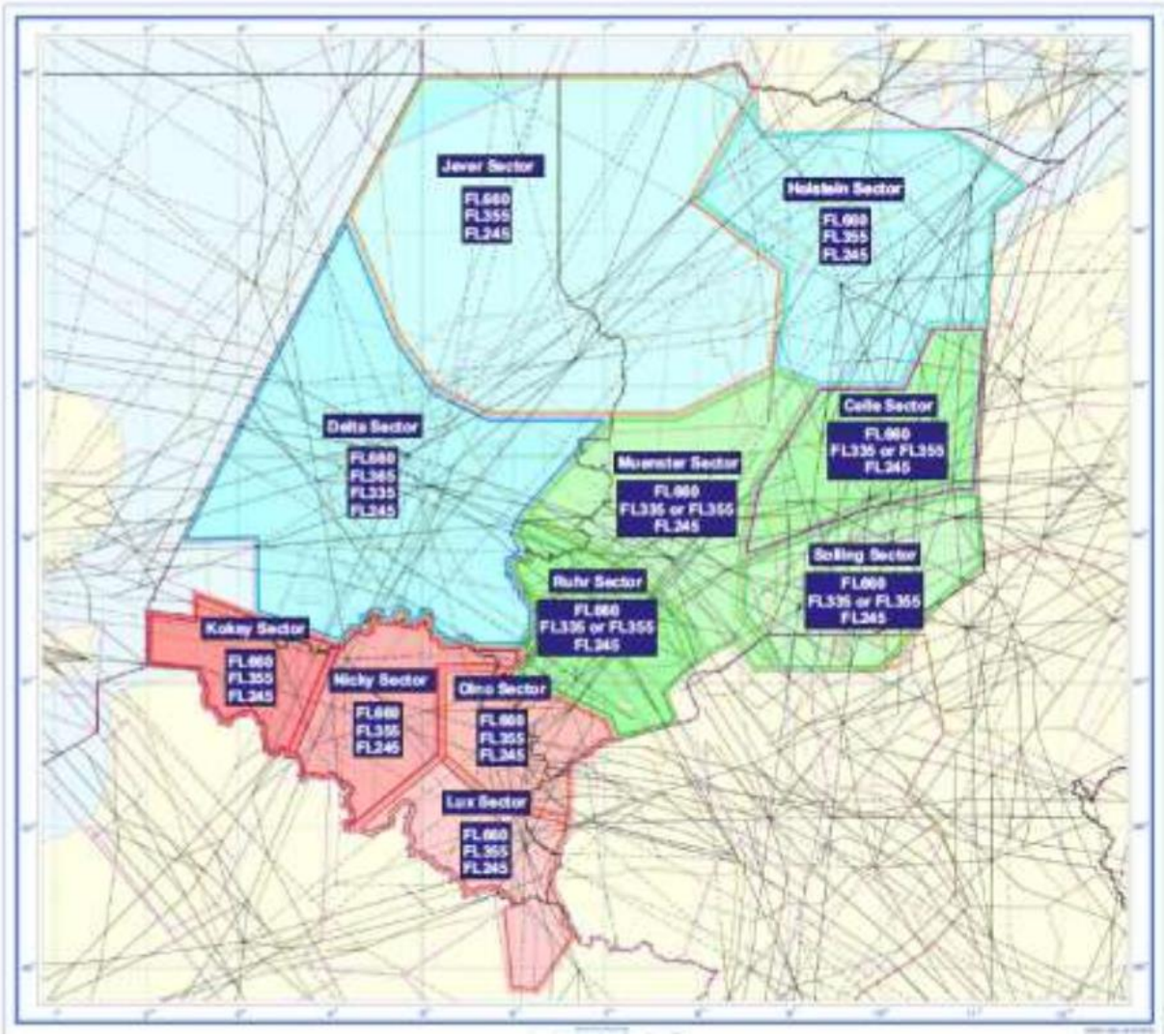
- Uprava civilnog zrakoplovsta (CAA), Luksemburg

Tri obuhvaćena zračna područja su:

- Brussels Upper Infomation Region – Belgija i Luksemburg
- Amsterdam Flight Information Region – Nizozemska
- Hannover Upper Infrmation Region – sjeveroistočna njemačka

Zračni prostor nad kojim je nadležan MUAC proteže se od razine leta (FL[17]) 245 do razine leta 660. Prema klasifikaciji Organizacije za međunarodno civilno zrakoplovstvo (ICAO[18]) cijeli prostor spada u C kategoriju. [12]

Na slici 4 prikazan je zračni prostor pod nadležnošću MUAC-a:



Slika 4: MUAC gornji zračni prostor [12]

[17] FL – Flight Level
[18] ICAO – International Civil Aviation Organization

MUAC ne uključuje vojnu vlast članica u svoju vlastitu strukturu upravljanja. Međutim, detalji o civilno-vojnoj koordinaciji, pružanju OAT usluga u AMS FIR-u iznad FL245 i FUA aplikaciji u zračnom prostoru Maastricht UAC-a dostupni su u 1. poglavlju LSSIP[19]-a za Nizozemsku (budući da je nizozemski NSA certifikacijsko tijelo za Maastricht UAC). Više informacija može se naći i u Poglavlju 1. dokumenata o LSSIP-u ostale tri dotične države (DE, BE i LU). Direktor Nizozemske uprave za vojno zrakoplovstvo MUAC je 2018. službeno certificiran kao pružatelj ATS-a za OAT (MAA) u ime ministra obrane. [12]

MUAC ne pruža usluge aerodromske kontrole zračnog prometa jer se unutar granica odgovornosti MUAC-a (gornji zračni prostor) ne nalaze aerodromi.

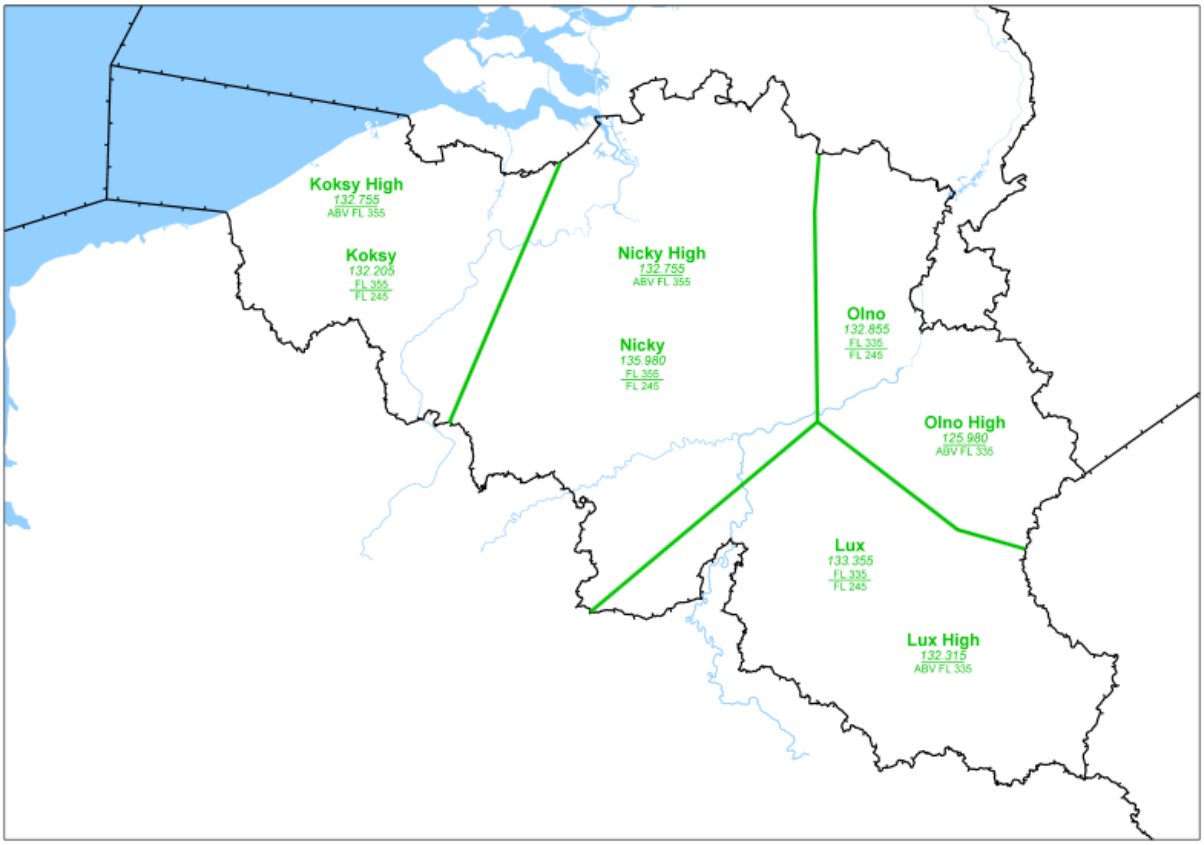
Gornji zračni prostor Belgije se sastoji od 4 glavna sektora koji su dodatno podijeljeni vertikalnim granicama. Sektori gornjeg zračnog prostora Belgije prikazani su u tablici 1:

Ime Sektora	**Donja granica**	**Gornja granica**
Koksy	FL245	FL355
Koksy High	FL355	FL660
Nicky	FL245	FL355
Nicky High	FL355	FL660
Olno	FL245	FL335
Olno High	FL335	FL660
Lux	FL245	FL335
Lux High	FL335	FL660

Tablica 1: Sektorizacija gornjeg zračnog prostora Belgije [13]

Na slici 5. prikazan je gornji zračni prostor Belgije:

[19] LSSIP - Local Single Sky ImPlementation



Slika 5: Gornji zračni prostor Belgije [14]

Gornji zračni prostor Nizozemske se sastoji od 3 glavna sektora koji su dodatno podijeljeni vertikalnim granicama: Sektori gornjeg zračnog prostora Nizozemske prikazani su u tablici 2:

Ime Sektora	**Donja granica**	**Gornja granica**
Delta	FL245	FL335
Delta Middle	FL335	FL365
Delta High	FL365	FL660
Jever	FL245	FL355
Jever High	FL355	FL660
Holstein	FL245	FL355
Holstein High	FL355	FL660

Tablica 2: Sektorizacija gornjeg zračnog prostora Nizozemske [15]

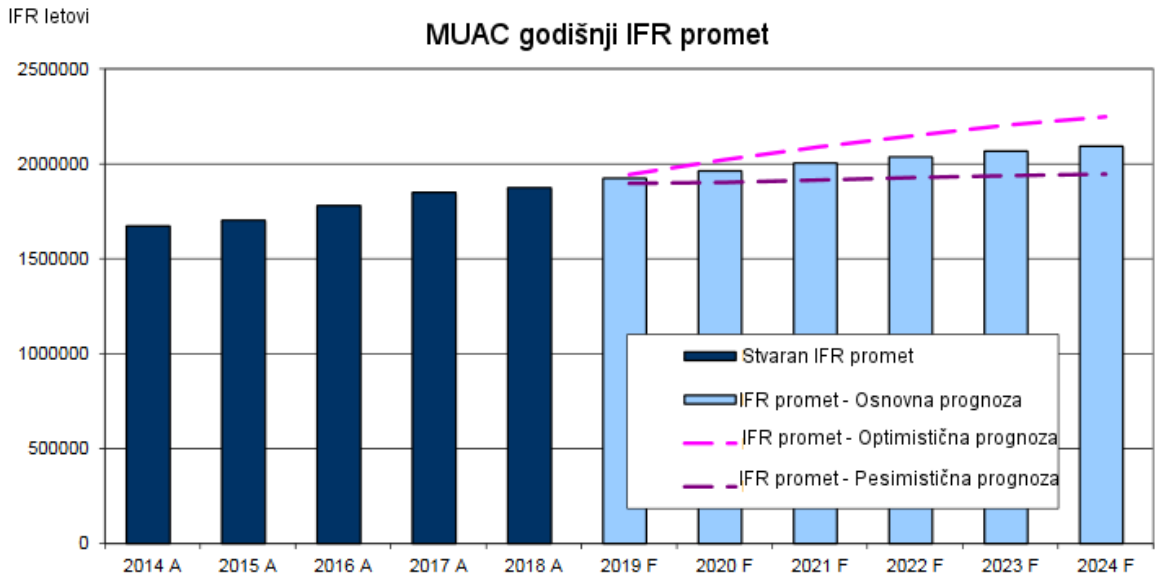
Gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke se sastoji od 3 glavna sektora koji su dodatno podijeljeni vertikalnim granicama: Sektori gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke prikazani su u tablici 3:

Ime Sektora	Donja granica	Gornja granica
Ruhr	FL245	FL355
Ruhr High	FL355	FL660
Muenster	FL245	FL355
Muenster High	FL355	FL660
Celle	FL245	FL355
Celle High	FL355	F660
Solling	FL245	FL355
Solling High	FL355	FL660

Tablica 3: Sektorizacija gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke[15]

3.1. Promet kroz gornjeg zračnog prostora Maastrichta

Na slici 6 prikazan je godišnji IFR[20] promet kroz gornji zračni prostor Maastrichta:

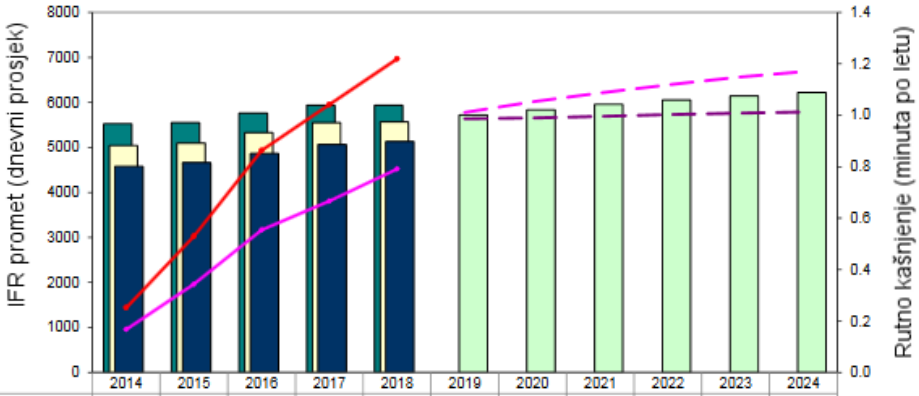


Slika 6: Godišnji IFR promet gornjeg zračnog prostora Maastrichta [15]

[20] IFR - *Instrument flight rules*

Vidljiv je trend konstantnog porasta prometne potražnje. Promet u gornjem zračnom prostoru Maastrichta porastao je za 0,3% tijekom ljeta 2018.u odnosu na ljeto 2017. Međutim, postoje značajne razlike u rastu prometne potražnje između pojedinih zemalja. Za cijelu 2018. rast prometa iznad zračnog prostora Belgije bio je 1,9%; za zračni prostor iznad sjeveroistočne Njemačke 0,8% dok je rast iznad zračnog prostora Nizozemske iznosio 5,2%. [15]

Na slici 7. prikazani su dnevni prosjeci IFR promet za cijelu godinu i na ljeto, kašnjenja postignuta tijekom leta rutom i promet postignut tijekom vršnog dana u godini:



	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Promet na vršni dan	5526	5552	5760	5937	5934						
Promet ljeti	5043	5096	5330	5549	5568						
Godišnji promet	4579	4664	4863	5065	5131						
Prognoza ljetnog prometa						5721	5835	5958	6055	6145	6221
Optimistična prognoza - ljeto						5779	6013	6213	6390	6559	6686
Pesimistična prognoza - ljeto						5639	5654	5692	5730	5761	5787
Rutno kašnjenje - ljeto	0.25	0.53	0.86	1.04	1.22						
Rutno kašnjenje	0.17	0.34	0.55	0.67	0.79						

Slika 7: Prosječni broj letova i kašnjenja za gornji zračni prosto Masstrichta [15]

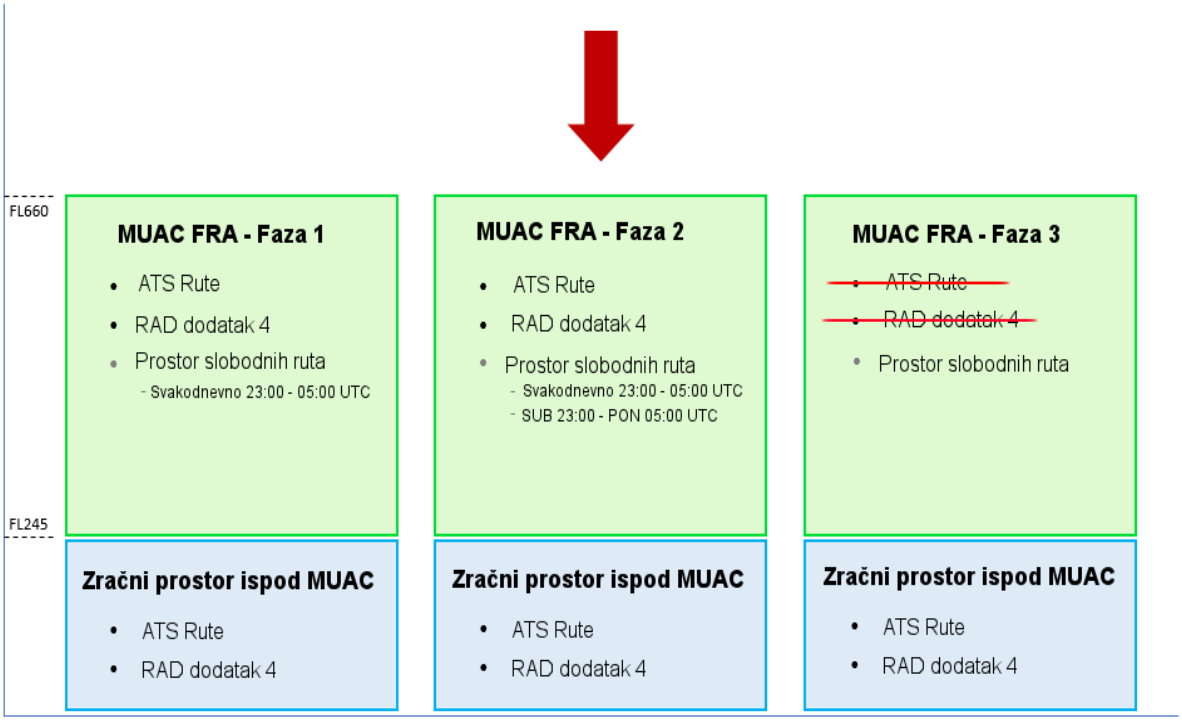
Na slici je vidljivo da se kašnjenje letova na ruti drastično povećalo od 2013. do 2018. godine, sa 0.2 minute po letu na 0.7 minuta po letu tijekom cijele godine. Tijekom ljetnog perioda je više izraženo povećanje kašnjenja na ruti, sa 0.3 minute po letu na 1.2 minute po letu. U usporedbi sa 2013. godinom povećao se godišnji promet za 12%, ljetni promet za 10%, a promet na vršni dan u godini za 7,3%.

Prognoze za 2024 godinu predviđaju povećanje ljetnog prometa u odnosu na 2018. godinu za 11,72% u osnovnom slučaju, 18.3% u optimističnom slučaju i 3,9% u pesimističnom slučaju.

3.2. FRA u gornjem zračnom prostoru Maastrichta

Uvođenje FRA u gornji zračni prostor Maastrichta je podijeljeno u 3 faze. Prva faza uvedena je 7. prosinca 2017. Tijekom prve faze FRA je dostupan za planiranje ruta između 23:00 - 05:00 UTC[21], zajedno s ATS mrežom ruta i dodatkom 4 dokumenta dostupnosti ruta (RAD[22]). Dostupan je između FL245 i FL660, i nije ograničen državnim ili regionalnim granicama. Druga faza je uvedena 6. prosinca 2018. Tijekom druge faze FRA je dostupan zajedno sa ATS mrežom ruta od ponedjeljka do četvrtka između 23:00 - 05:00 UTC te od petka od 23:00 do ponedjeljka u 05:00 UTC. Faza 3 se planira uvesti 5. prosinca 2019. Nakon uvođenja faze 3 trebale bi započeti 24 satne FRA operacije, a korištenje ATS mreže ruta se u potpunosti ukida. [15]

Na slici 8. prikazane su faze uvođenja FRA u gornji zračni prostor Maastrichta:



Slika 8: Faze uvođenja FRA u gornji zračni prostor Maastrichta

[21] UTC – Coordinated Universal Time
[22] RAD – Route Availability Document

4. Simulacija prometa nakon uvođenja cjelodnevnog FRA u gornji zračni prostor Maastrichta

Za provođenje simulacija uvođenja cjelodnevnog FRA u gornji zračni prostor Maastricta koristi se NEST[23] programski alat razvijen od strane EUROCONTROL-a. NEST programski alat je napravljen integracijom SAAM[24] programskog alata, koji se koristi u svrhe operativnog planiranja za optimizaciju strateških prometnih tokova, za projektiranje mreže ruta i zračnog prostora, te za analizu prošlih i budućih prometnih tokova te za prikaz i usporedbu projekata, sa NEVAC[25] programskim alatom za analizu kapaciteta prostora. [16]

Glavne funkcije NEST programskog alata su:

- optimizacija raspoloživih resursa i poboljšanje performansa na mrežnoj razini
- dizajn i razvoj struktura zračnog prostora
- planiranje kapaciteta i provođenje post-operativnih analiza
- organizacija prometnih tokova tijekom strateške faze planiranja upravljanja kapacitetom i protokom zračnog prometa
- priprema scenarija za podršku fast-time simulacija, simulacija u stvarnom vremenu i ad-hoc studija na lokalnoj i mrežnoj razini [16]

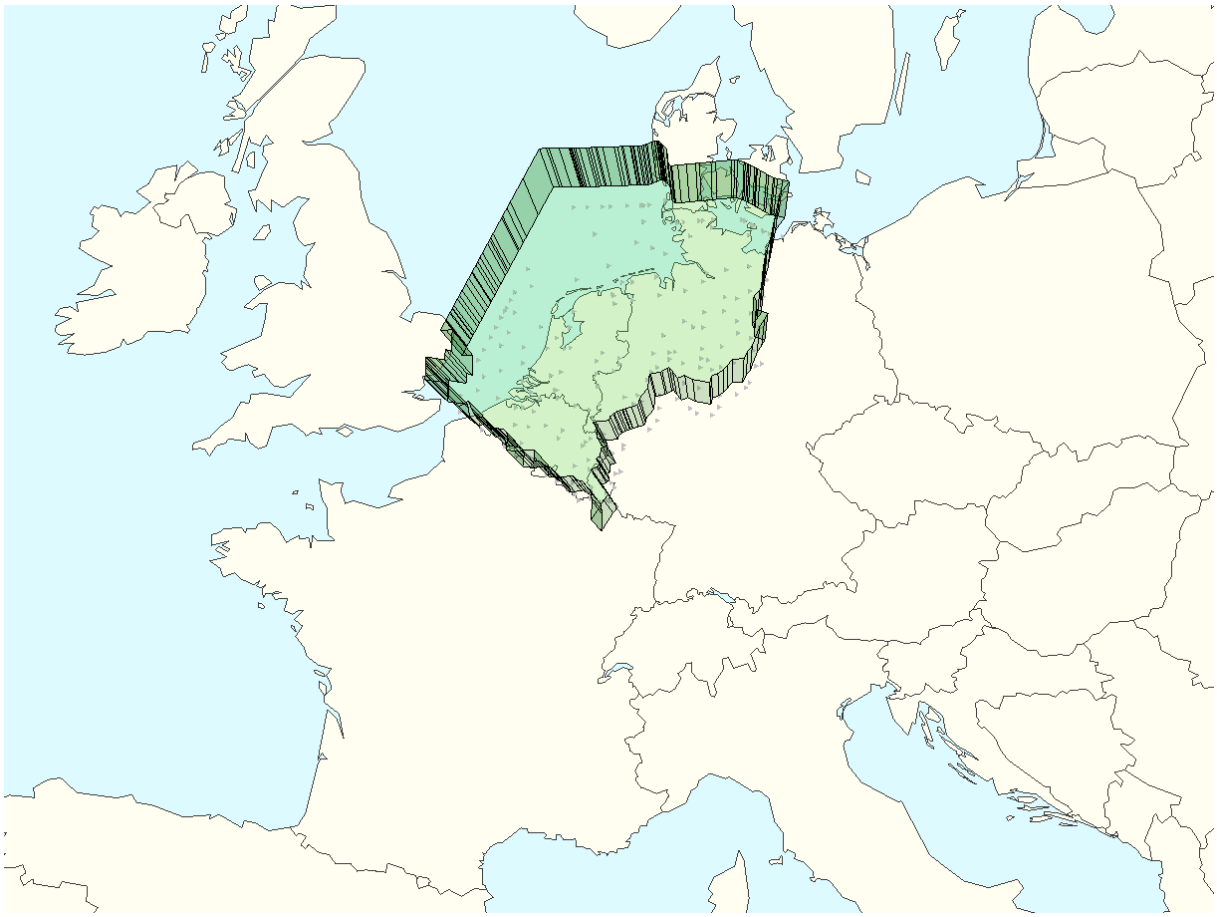
Glavni skup podatak koje koristi programski alat NEST nalazi se unutar datoteke s .nest nastavkom. Unutar te datoteke sadržane su informacije o zračnom prostoru, kapacitetu, STATFOR-ove prognoze zračnog prometa i određene restrikcije zračnog prometa za jedan AIRAC[26] ciklus koji traje 28 dana. Ulaznu datoteku s nastavkom – nest moguće je modificirati unutar programskog alata da bi se dobila datoteka scenarija s nastavkom .scn. Unutar te datoteke sadržane su sve izrađene modifikacije prostora i sve simulacije prometa provedene. [16]

[23] NEST – Network Strategic Tool
[24] SAAM – System for traffic Assigment and Analysis at a Macroscopic level
[25] NEVAC – Network Estimation and Visualization of ACC Capacity
[26] AIRAC - *Aeronautical Information Regulation And Control*

4.1. Simulacija putanja prije uvođenja cjelodnevnog FRA u gornji zračni prostor Maastrichta

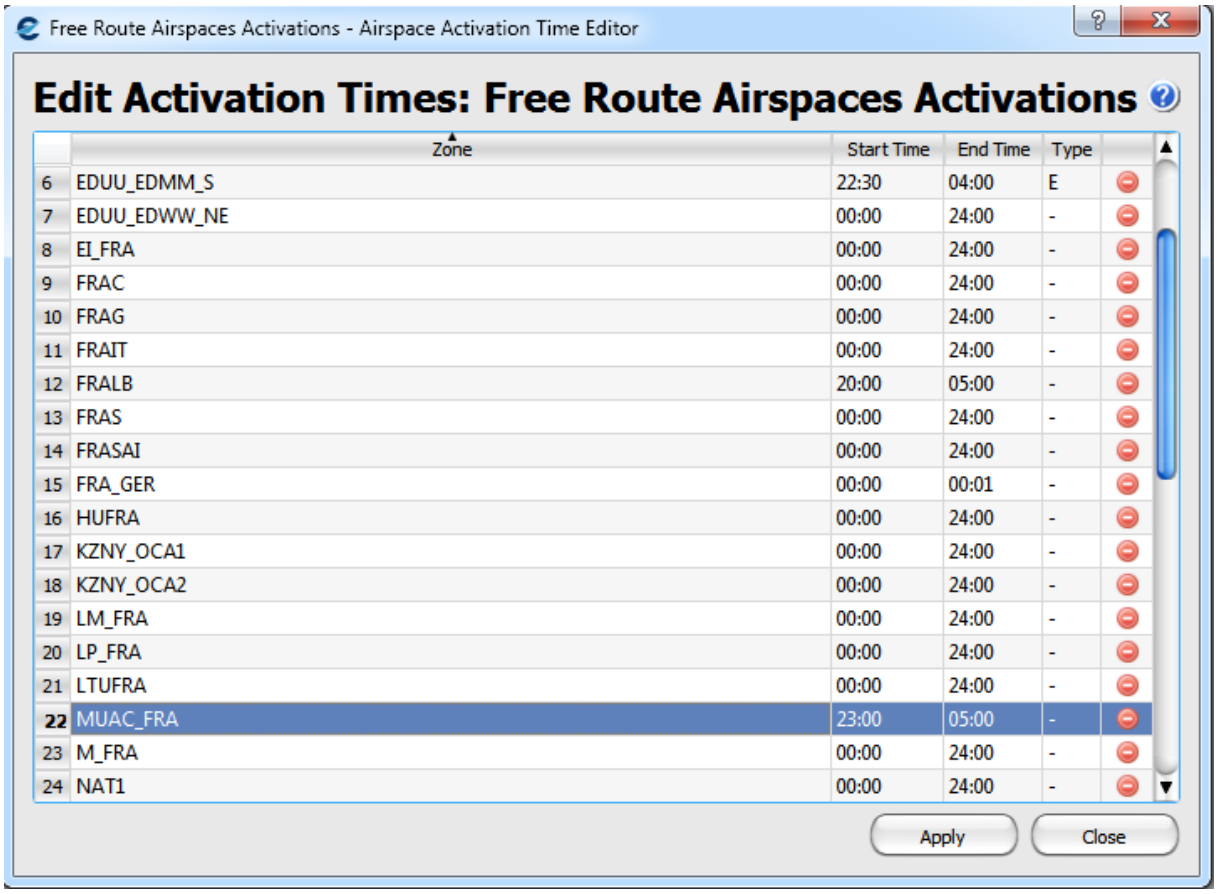
Da bi uspješno napravila usporedba uvođenja FRA u gornji zračni prostor Maastrichta, prvo je potrebno napraviti simulaciju prometa prije cjelodnevne implementacije FRA.

Unutar AIRAC ciklusa 1808_441 već je kreiran gornji zračni prostor slobodnih ruta Masstrichta koji je nastao spajanjem gornjih zračnih prostora Belgije (EDYYBUTA), Nizozemske (EDYYDUTA) i sjeveroistočne Njemačke (EDYYHUTA). Gornji zračni prostor slobodnih ruta Maastrichta prikazan je na slici 9:



Slika 9: Gornji zračni prostor slobodnih ruta Maastrichta

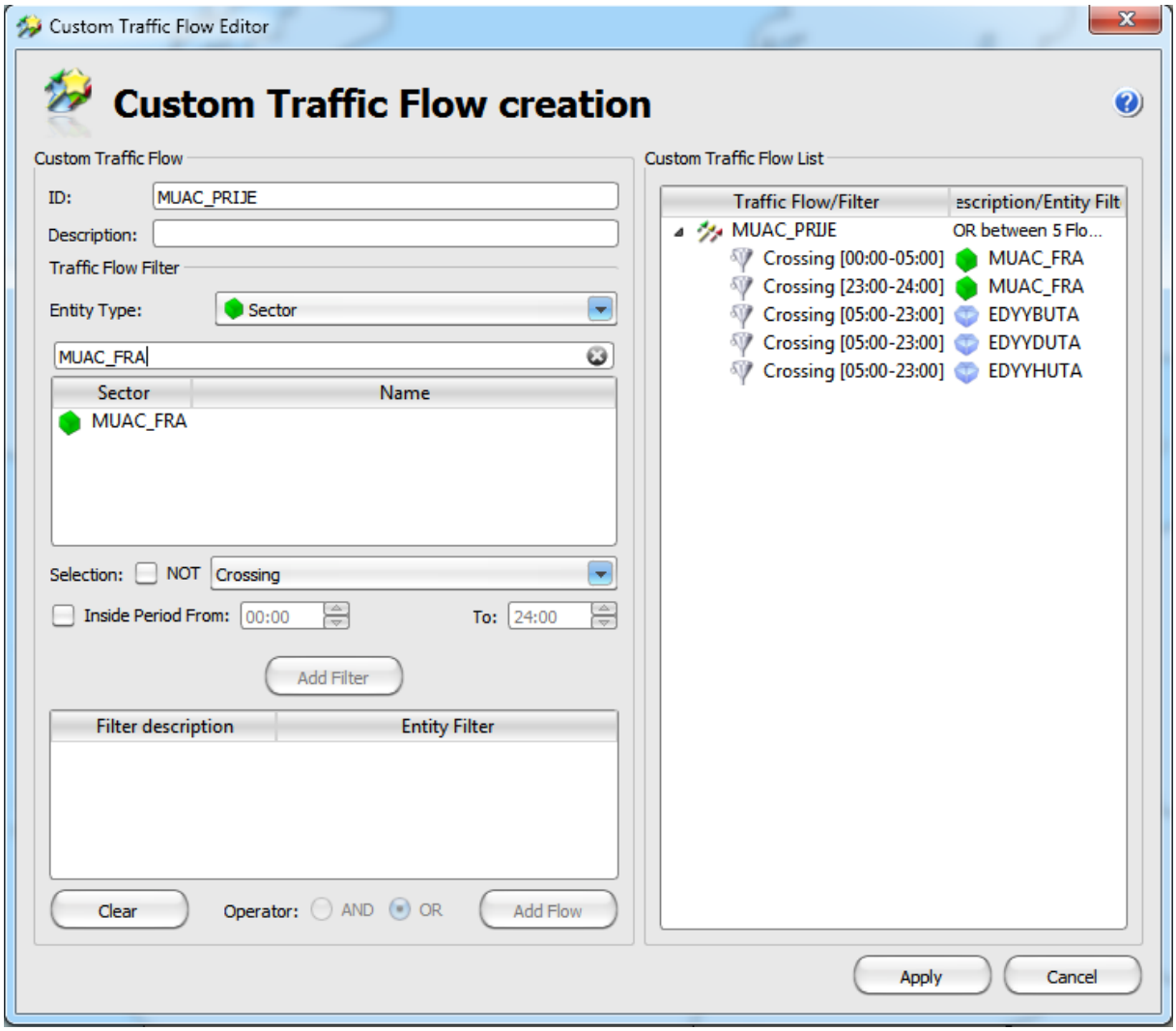
Prije provedbe analize prometnih tokova potrebno je odrediti period aktivnog korištenja prostora slobodnih ruta. Period aktivnog korištenja prostora slobodnih ruta moguće je odrediti pomoću opcije *Free Route Airspace Activations*. Postupak određivanja je prikazan na slici 10. Potrebno je odabrati početno vrijeme 23:00 i završno vrijeme 05:00.



	Zone	Start Time	End Time	Type
6	EDUU_EDMM_S	22:30	04:00	E
7	EDUU_EDWW_NE	00:00	24:00	-
8	EI_FRA	00:00	24:00	-
9	FRAC	00:00	24:00	-
10	FRAG	00:00	24:00	-
11	FRAIT	00:00	24:00	-
12	FRALB	20:00	05:00	-
13	FRAS	00:00	24:00	-
14	FRASAI	00:00	24:00	-
15	FRA_GER	00:00	00:01	-
16	HUFRA	00:00	24:00	-
17	KZNY_OCA1	00:00	24:00	-
18	KZNY_OCA2	00:00	24:00	-
19	LM_FRA	00:00	24:00	-
20	LP_FRA	00:00	24:00	-
21	LTUFRA	00:00	24:00	-
22	MUAC_FRA	23:00	05:00	-
23	M_FRA	00:00	24:00	-
24	NAT1	00:00	24:00	-

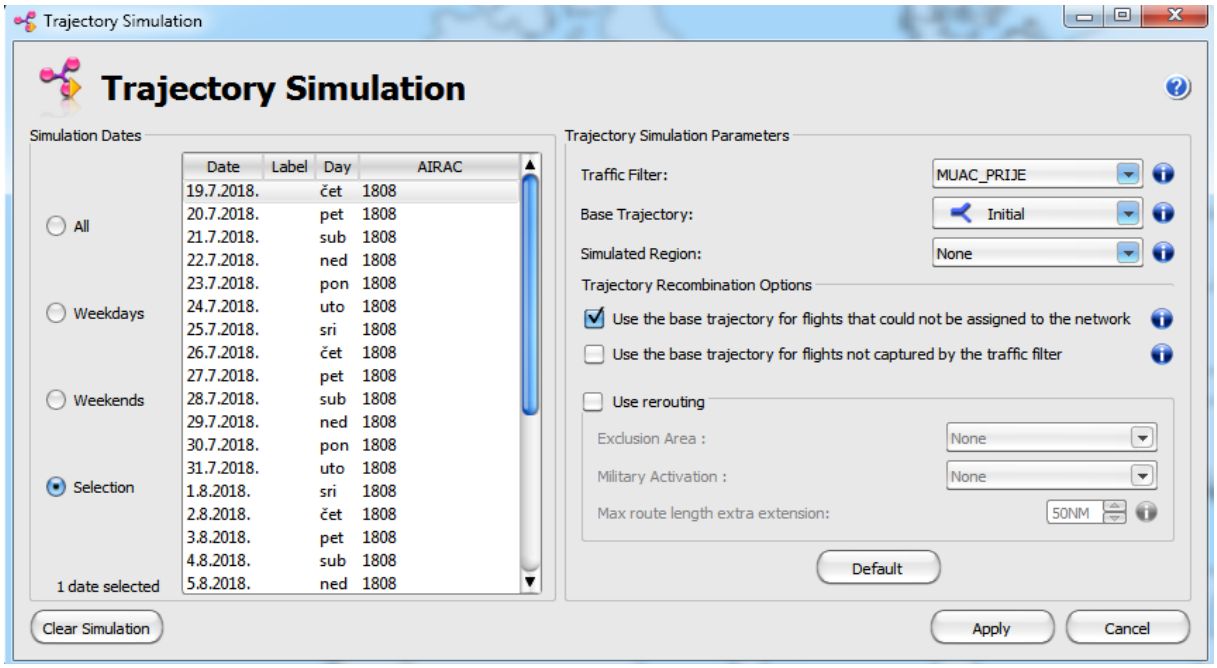
Slika 10: Određivanje perioda korištenja prostora slobodnih ruta

Zatim je potrebno odrediti referentni prometni tok, da bi se filtrirao sav promet koji ne prolazi kroz odabrani prostor. Referentni prometni to moguće je izraditi alatom *Create Custom Traffic Flow*. Postupak izrade je prikazan na slici 11. Odabran je promet koji prolazi kroz prostor MUAC_FRA u periodu od 00:00 do 05:00 ili od 23:00 do 24:00, ili kroz prostore EDYYBUTA, EDYYDUTA i EDYYHUTA u periodu od 05:00 do 23:00.



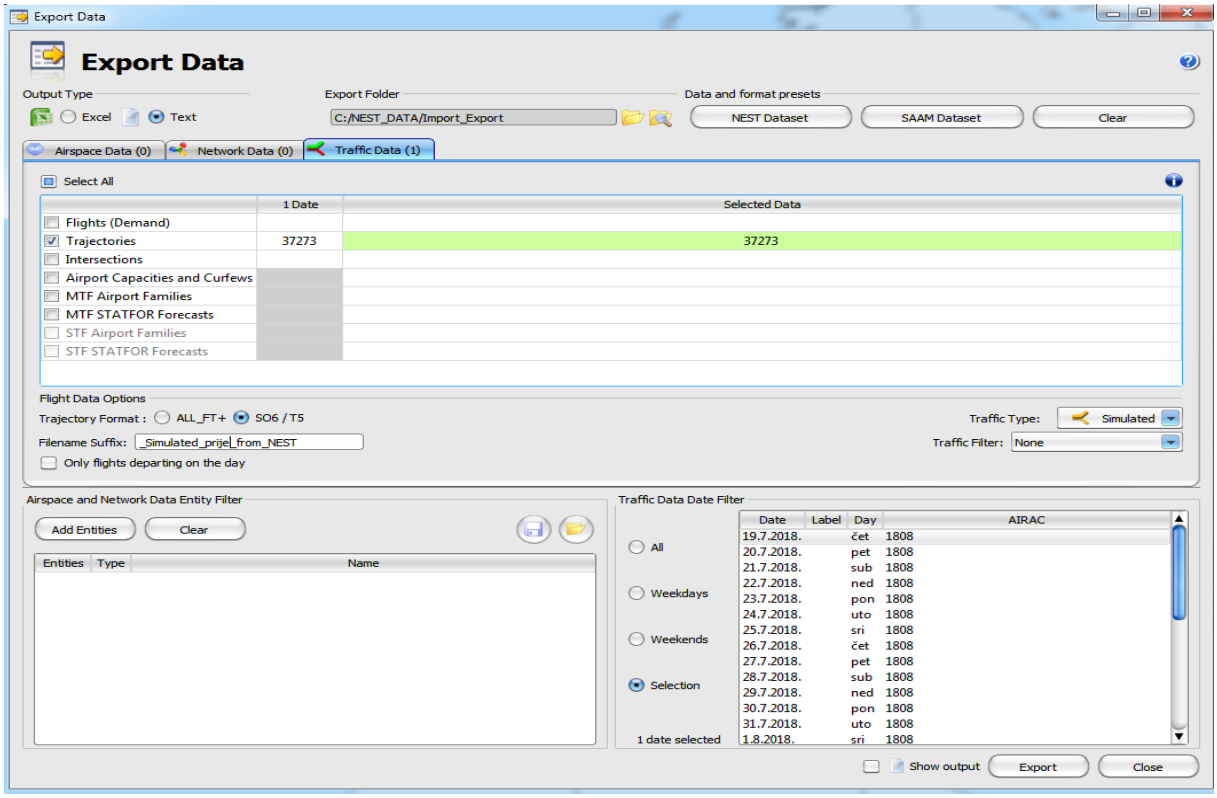
Slika 11: Izrada referentnog prometnog toka

Nakon izrade referentnog prometnog toka, provodi se simulacija putanja pomoću alata *Simulate Trajectory*. Postupak izrade je prikazan na slici 12. Potrebno je odabrati referentni prometni tok izrađen u koraku prije, i inicijalne putanje leta za referencu putanja.



Slika 12: Simulacija putanja

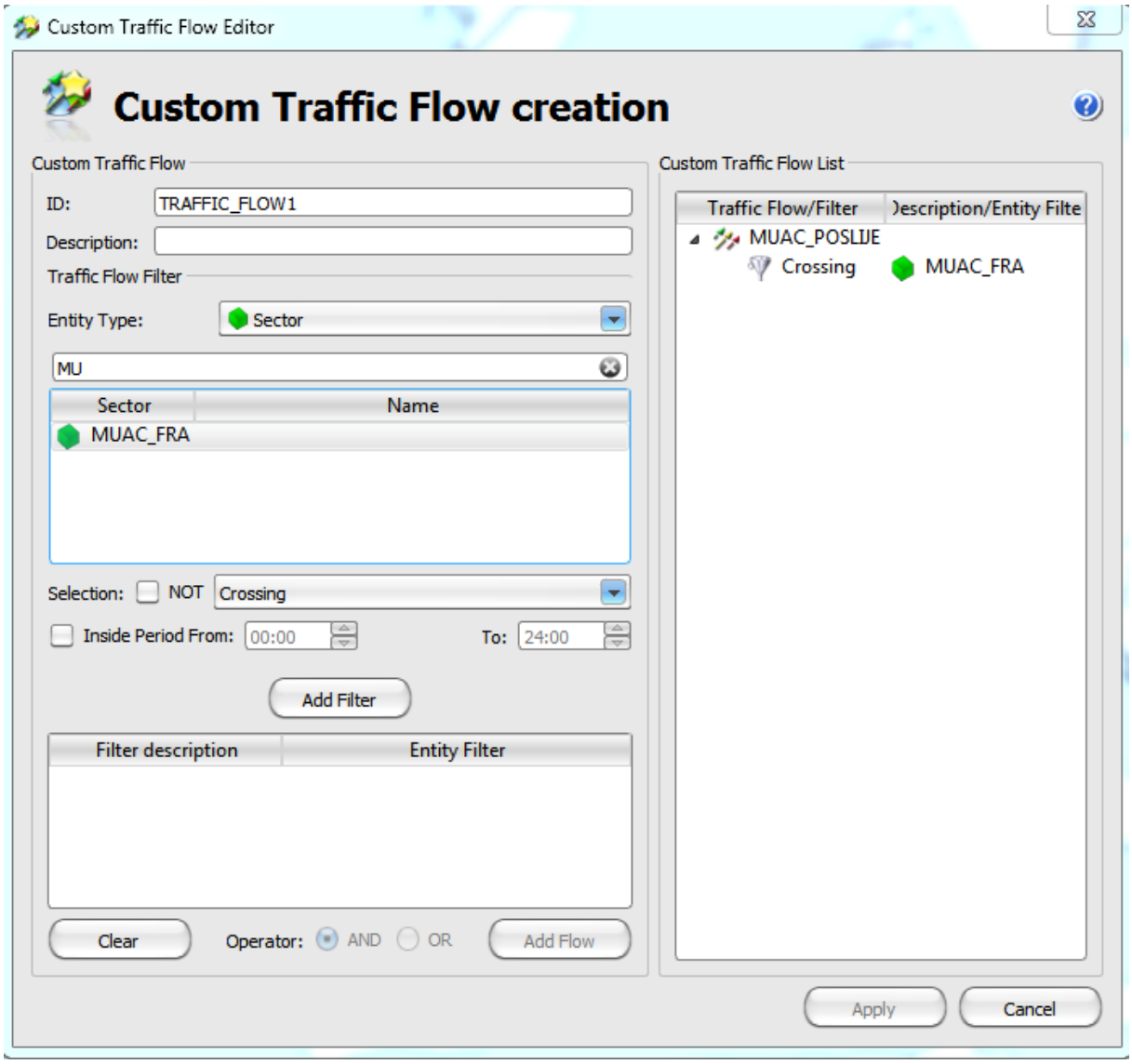
Zadnje je potrebno izvesti podatke o putanjama koristeći alat *Export Data.* Proces izvoza podataka je prikazan na slici 13. Potrebno je odabrati simulirani tip prometa i odrediti ekstenziju datoteke .so6. Ova datoteka će se kasnije koristiti za usporedbu prometa prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta.



Slika 13: Izvoz podataka o putanjama zrakoplova

4.2. Simulacija putanja nakon uvođenja cjelodnevnog FRA u gornji zračni prostor Maastrichta

Unutar korištenog AIRAC ciklusa nalaze se podatci o prometu za 2018. godinu. Da bi se dobili mogla provesti usporedba nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta, potrebno je napraviti odrediti novi referentni prometni tok. Na slici 14. prikazan je postupak određivanja novog referentnog prometnog toka. Odabran je promet koji prolazi kroz prostor MUAC_FRA u periodu od 00:00 do 24:00.



Slika 14: Izrada novog referentnog prometnog toka

Za provedbu simulacije putanja nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta potrebno je odrediti novi period korištenja prostora slobodnih ruta pomoću opcije *Free Route Airspace Activations*. Odabrano je početno vrijeme 00:00 i završno vrijeme 24:00.

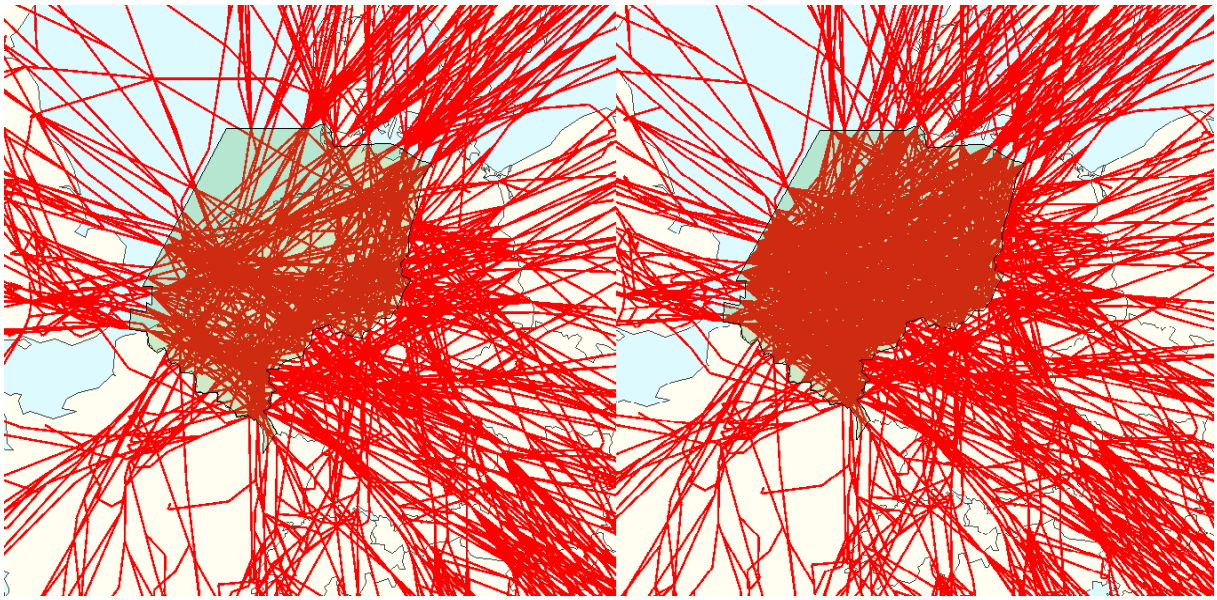
Provodi se nova simulacija putanja pomoću alata *Simulate Trajectory* koristeći novoodređeni referentni prometni tok. Nakon simulacije putanja potrebno je izvesti podatke koristeći alat *Export Data,* postavke su iste kao i u prvoj simulaciji.

Nakon izvoza podataka o putanjama zrakoplova prije i poslije uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta, može se provesti analiza utjecaja uvođenja FRA na karakteristike prometnih tokova. Ovaj proces će biti opisan u idućem poglavlju.

5. Analiza utjecaja uvođenja FRA na karakteristike prometnih tokova

Za izvedbu usporedbe promjene prometnih tokova odabran je datum 23.07. unutar AIRAC ciklusa. Sve usporedbe prometnih tokova unutar ovog poglavlja odnositi će se na ovaj datum.

Na slici 15. prikazana je usporedba prometnih okova kroz gornji zračni prostor Maastrichta prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija slobodnih ruta.

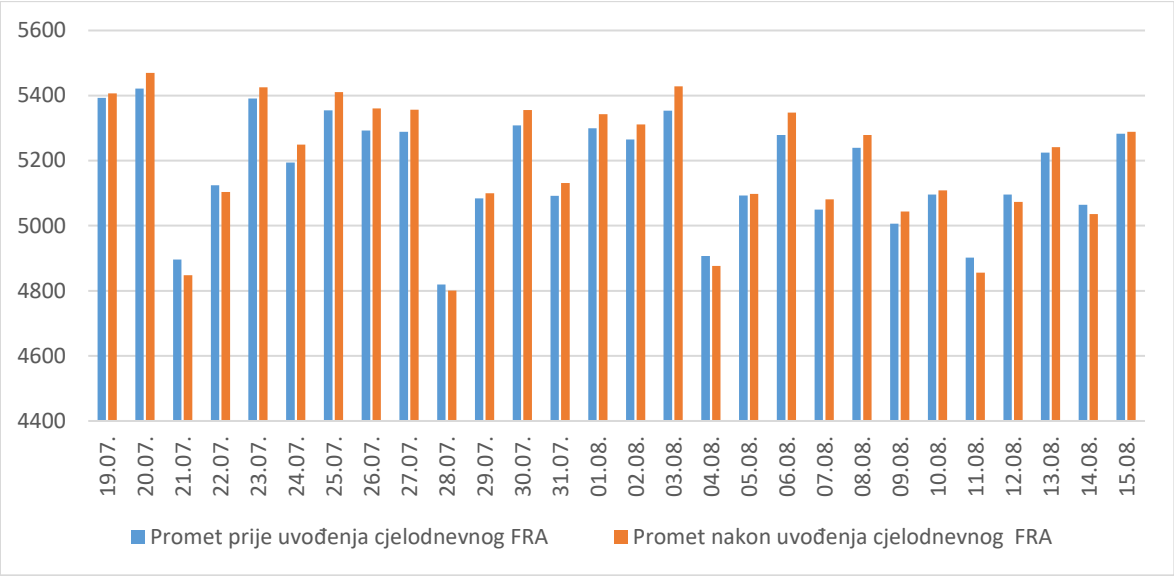


Slika 15: Usporedba prometnih tokova prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta.

Uvođenje cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta dovelo je do rasterećenja ulazno izlaznih točaka i povećanja raspršenja prometnih tokova unutar prostora, ovo raspršenje tokova najviše je izraženo na područjima prijašnjih granica gornjih zračnih prostora država i na sjevernom dijelu prostora.

Broj letova prija uvođenja cjelodnevnih operacija slobodnih ruta je iznosio 5391, a nakon uvođenja iznosi 5425, što je 34 leta više ili povećanje od 0.63%..

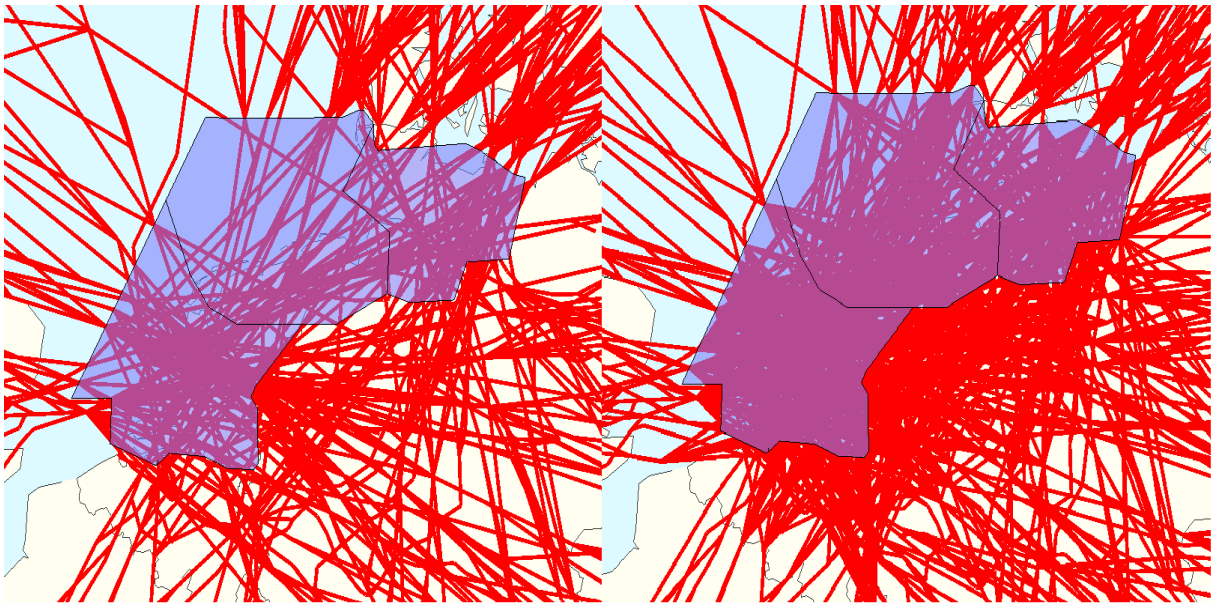
U grafu 1 prikazano je povećanje prometa nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta na području gornjeg zračnog prostora Maastrichta.



Graf 1: Porast prometa nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta

5.1. Analiza prometnih tokova kroz gornji zračni prostor Nizozemske

Promjena prometnih tokova kroz gornji zračni prostor Nizozemske prikazana je na slici 16.



Slika 16: Usporedba prometnih tokova na području Nizozemske prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta.

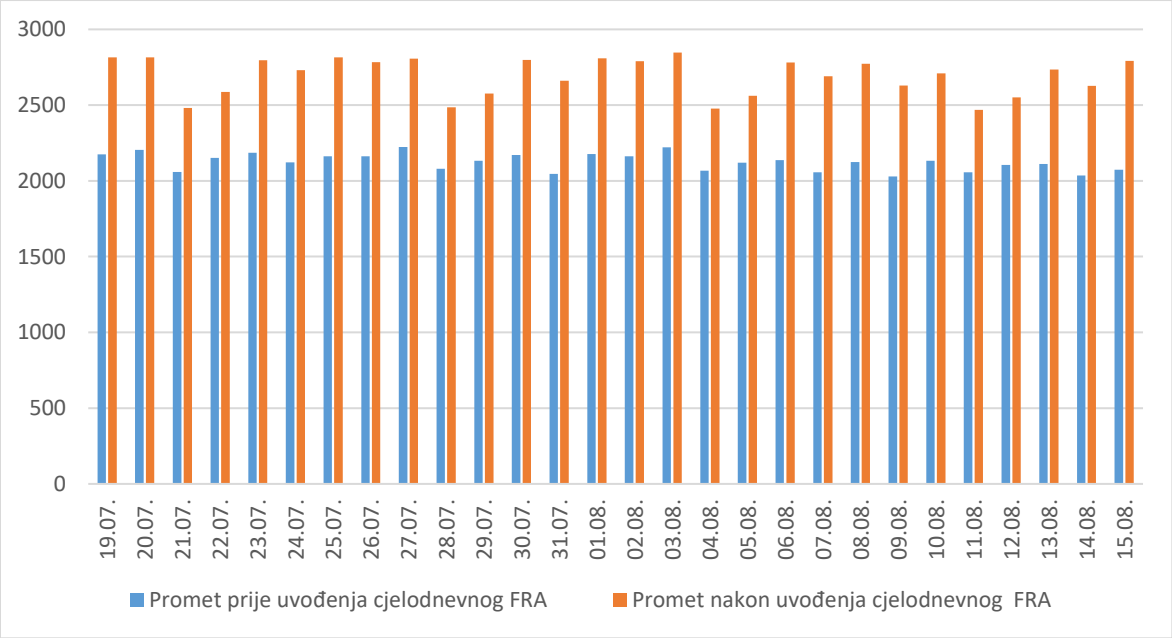
Vidljivo je veliko raspršenje prometnih tokova na području granica sa ostalim zemljama gornjeg zračnog prostora Maastrichta prostora, jer zrakoplovi više nisu ograničeni ulazno-izlaznim točkama. Također je vidljivo veliko povećanje raspršenja

prometnih tokova unutar *Delta* i *Jever* sektora, jer zrakoplovi ne moraju pratiti ATS rutu mreža i mogu slobodno prolaziti od ulazne do izlazne točke unutar prostora. Povećanje prometa kroz gornji zračni prostor i kroz glavne sektore prostora prikazano je u tablici 4.

Prostor	Promet prije uvođenja cjelodnevnog FRA	Promet nakon uvođenja cjelodnevnog FRA	Povećanje prometa
Delta	1605	2030	26.48%
Jever	881	1004	13.96%
Holstein	854	875	2.46%
Nizozemska	2185	2796	27.96%

Tablica 4: Povećanje prometa unutar gornjeg zračnog prostora Nizozemske

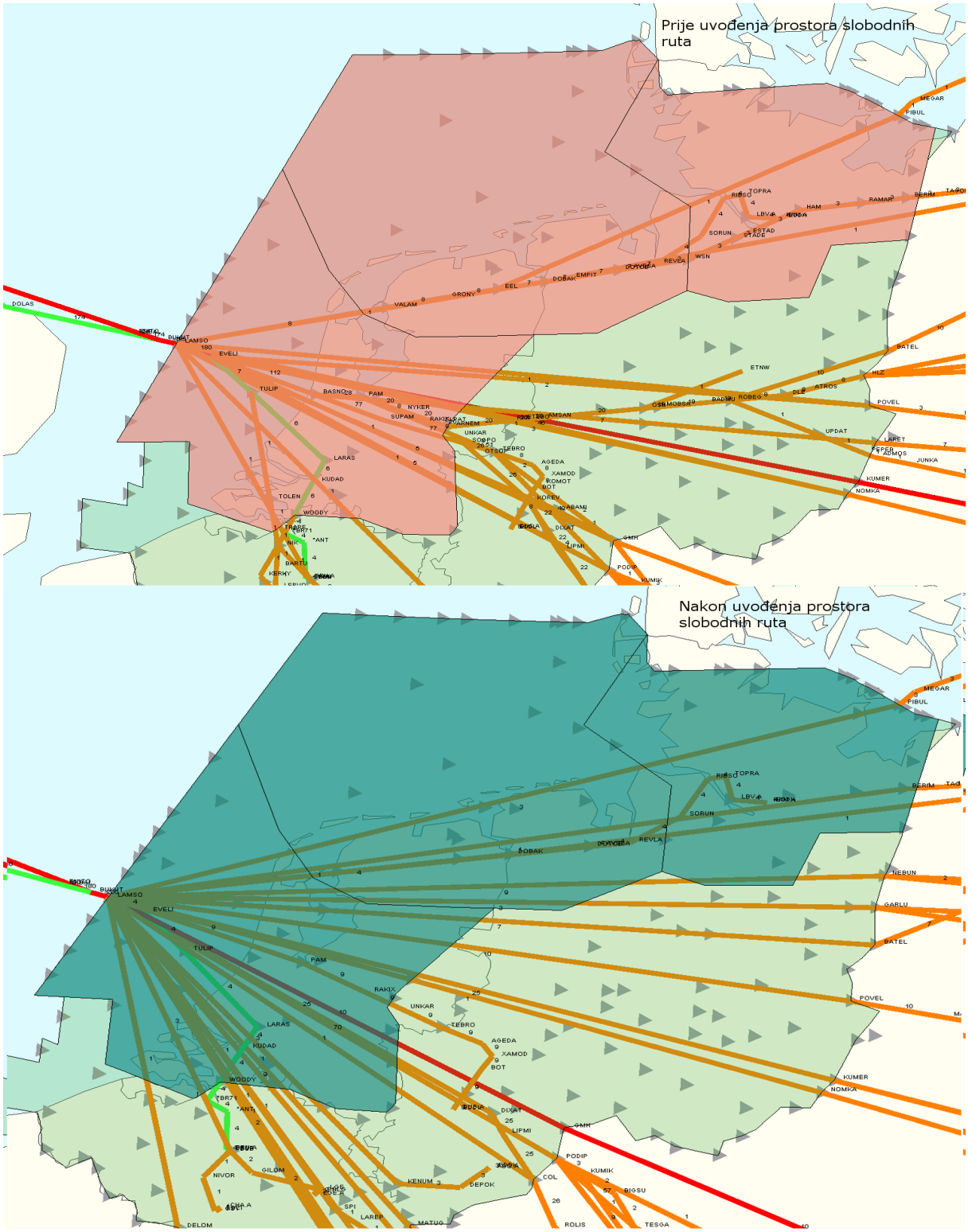
U grafu 2 prikazano je povećanje prometa nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta na području Nizozemske.



Graf 2: Porast prometa na području Nizozemske nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta

Najprometniji segment gornjeg zračnog prostora Nizozemske je segment toka BUKUT-EVELI. Na slici 17 je prikazana usporedba ovog segmenta prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta. Prije implementacije kroz

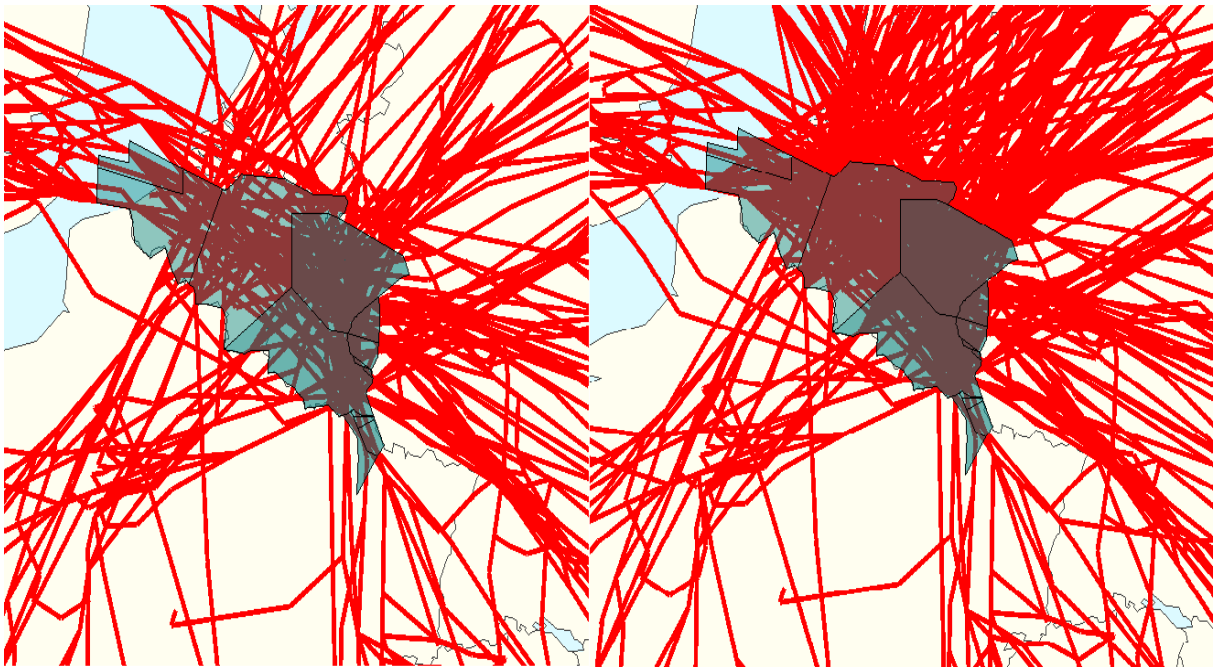
ovaj segment je prošlo 195 letova, a nakon implementacije ovaj broj je povećan na 206 letova. Implementacija prostora slobodnih ruta uzrokovala je povećanje broja tokova koji dovode do ovog segmenta, rezultat toga je povećanje prometa ali i smanjenje broja letova kroz već postojeće tokove.



Slika 17: Segment toka BUKUT-EVELI prije i nakon uvođenja prostora slobodnih ruta

5.2. Analiza prometnih tokova kroz gornji zračni prostor Belgije

Usporedba prometnih tokova kroz gornji zračni prostor Belgije prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta prikazana je na slici 18.



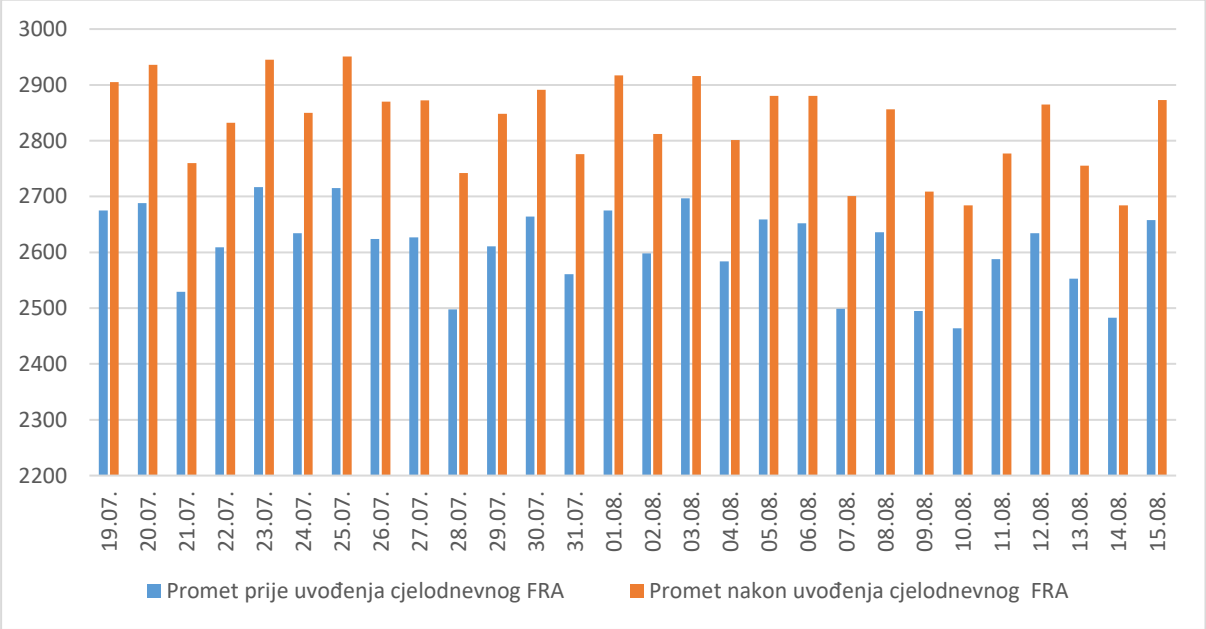
Slika 18: Usporedba prometnih tokova na području Belgije prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta.

Unutar gornjeg zračnog prostora Belgije također dolazi do raspršenja prometnih tokova, to je najviše izraženo unutar sektora *Nicky* i *Olno*, jer ovi sektori imaju najveće površine granica sa ostalim zemljama gornjeg zračnog prostora Maastrichta. Manje je izraženo unutar sektora *Lux* zbog manje površine granica sa ostalim zemljama gornjeg zračnog prostora Maastrichta. Unutar sektora Koksy došlo je do smanjenja prometa, pretpostavka je da je došlo do zagušenja ulazno izlaznih točaka unutar ovog sektora, jer se ovaj sektor nalazi na jednom od glavnih prometnih tokova koji povezuju Europu i Veliku Britaniju. Usporedba prometa prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta prikazana je u tablici 5.

Prostor	Promet prije uvođenja cjelodnevnog FRA	Promet poslije uvođenja cjelodnevnog FRA	Povećanje prometa
Koksy	1387	1324	-4,54%
Nicky	1581	1735	9.74%
Olno	1307	1465	12.08%
Lux	1037	1073	3.47%
Belgija	2717	2945	8.39%

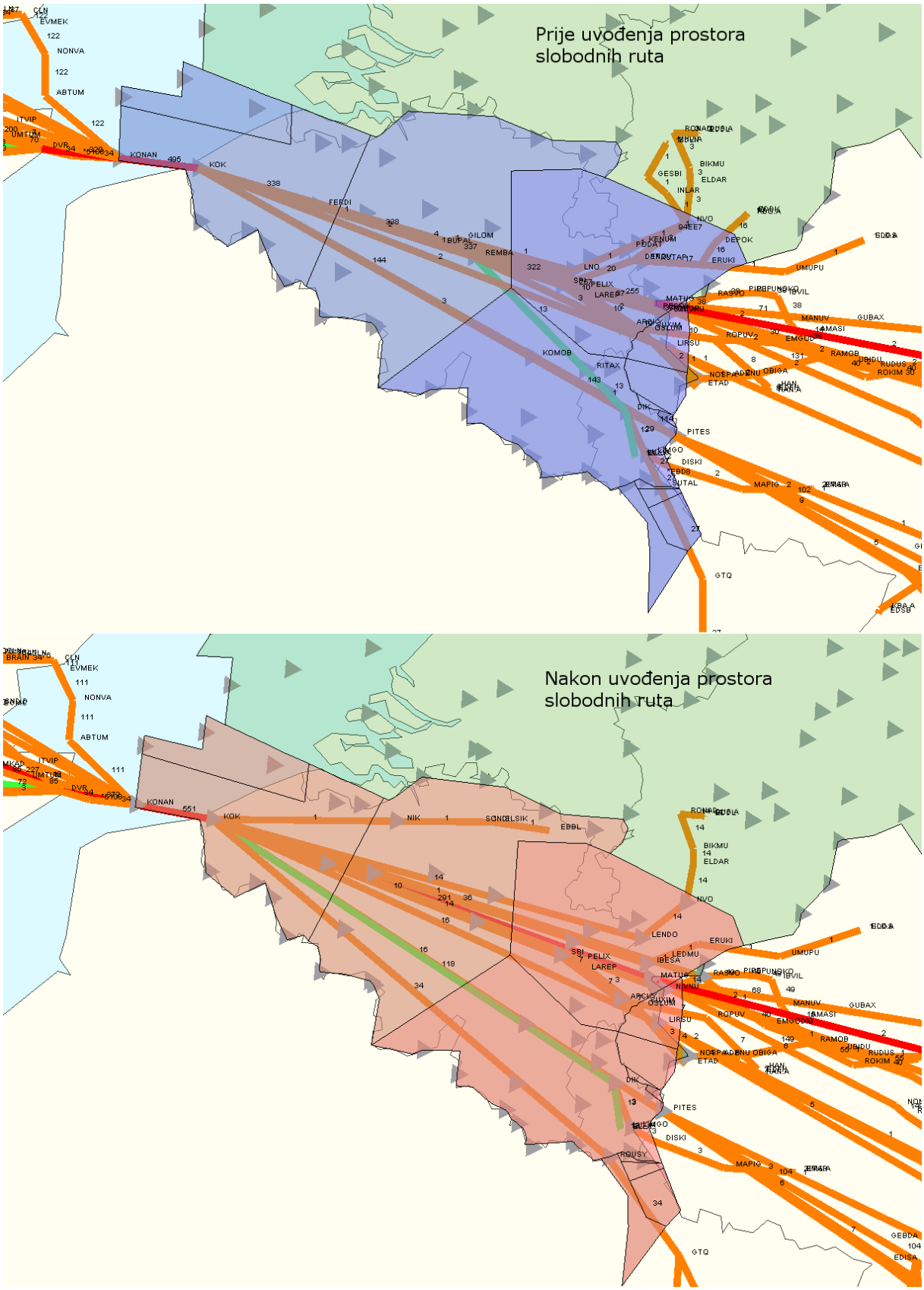
Tablica 5: Usporedba prometa unutar gornjeg zračnog prostora Belgije

U grafu 3 prikazano je povećanje prometa nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta na području Belgije.



Graf 3: Porast prometa na području Belgije nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta

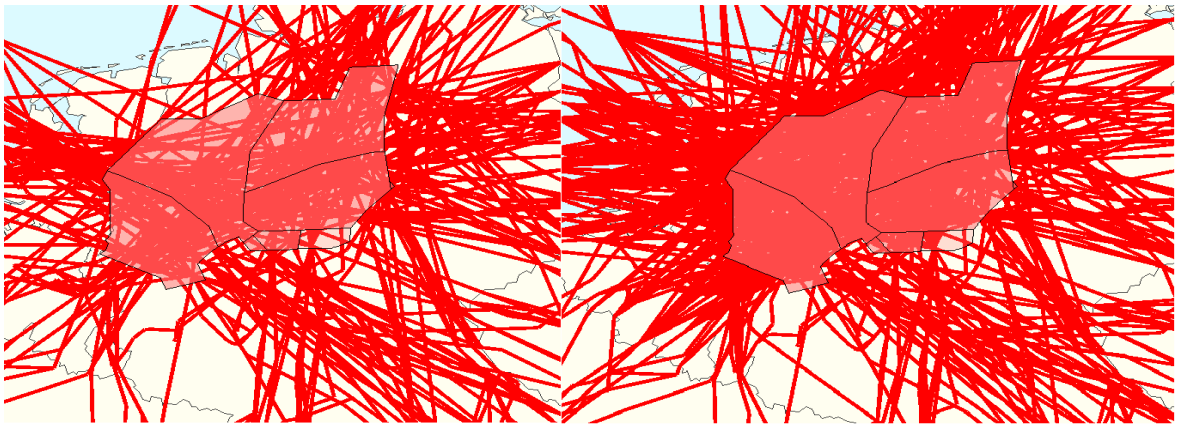
Najprometniji segment gornjeg zračnog prostora Belgije je segment toka KONAN-KOK. Na slici 19 je prikazana usporedba ovog segmenta prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta. Prije implementacije kroz ovaj segment je prošlo 495 letova, a nakon implementacije ovaj broj je povećan na 551 letova. Kao i kod najprometnijeg segmenta u zračnom prostoru nizozemske došlo je do povećanja broja prometnih tokova i smanjenja prometa kroz već postojeće tokove.



Slika 19: Segment toka KONAN-KOK prije i nakon uvođenja prostora slobodnih ruta

5.3. Analiza prometnih tokova kroz gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke

Na slici 20 prikazana je promjena prometnih tokova na području sjeveroistočne Njemačke prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta.



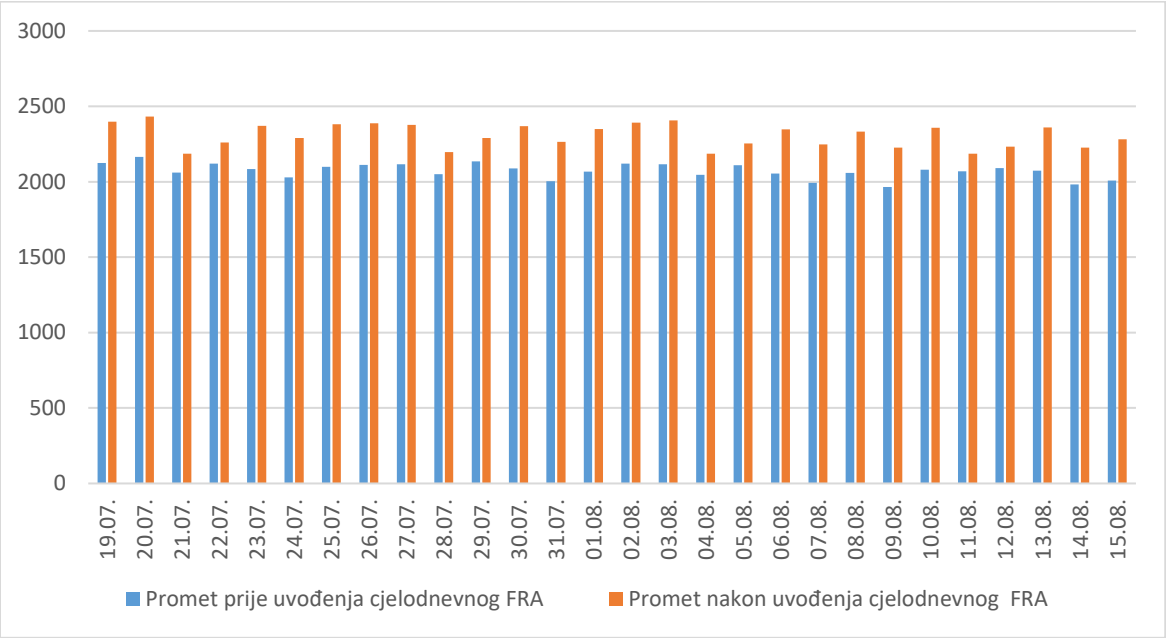
Slika 20: Usporedba prometnih tokova na području sjeveroistočne Njemačke prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta.

Unutar prostora sjeveroistočne Njemačke vidljivo je veliko povećanje prometa unutar sektora *Ruhr* i *Muenster*. Takav porast prometa može se pripisati geografskoj lokaciji ovih sektora, jer se nalaze u sredini gornjeg zračnog prostora Maastrichta, te će promet koji mijenja rutu zbog implementacije cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta prolaziti kroz njih. Povećanje prometa kroz gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke prikazano je u tablici 6.

Prostor	Promet prije uvođenja cjelodnevnog FRA	Promet poslije uvođenja cjelodnevnog FRA	Povećanje prometa
Ruhr	887	1097	23.68%
Muenster	1072	1299	21.18%
Celle	940	988	5.11%
Solling	1090	1095	0.45%
Sjeveroistočna Njemačka	2084	2371	13.77%

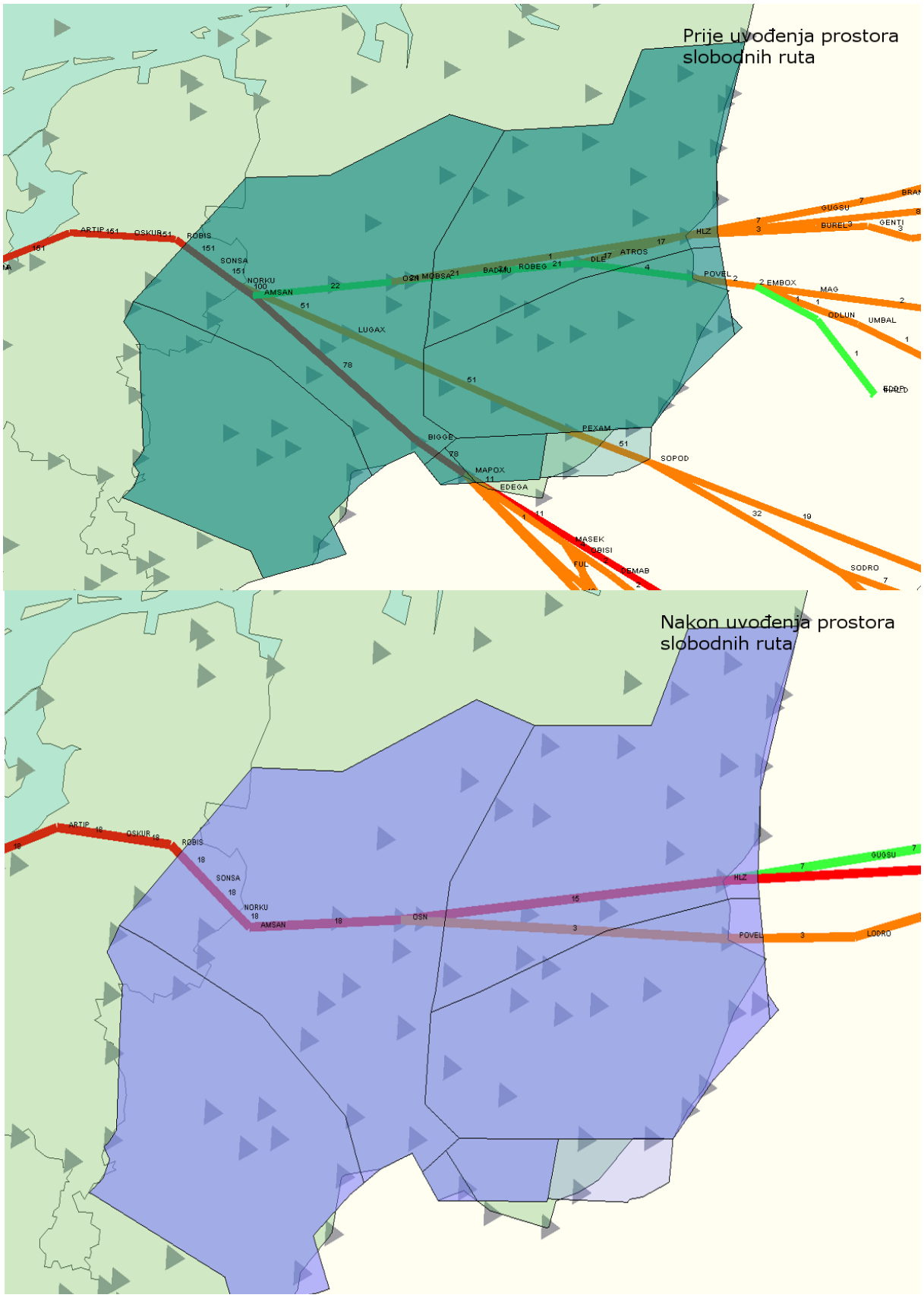
Tablica 6: Usporedba prometa unutar gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke

U grafu 4 prikazano je povećanje prometa nakon uvođenja cjelodnevnih operacija slobodnih ruta na području sjeveroistočne Njemačke.



Graf 4: Porast prometa na području sjeveroistočne Njemačke nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta

Najprometniji segment gornjeg zračnog prostora Belgije je segment toka NORKU-SONSA. Na slici 21 je prikazana usporedba ovog segmenta prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta. Prije implementacije kroz ovaj segment je prošlo 151 let, a nakon implementacije ovaj broj je smanjen na 18 letova. Pretpostavlja se da se uvođenjem prostora slobodnih ruta uvelike smanjila potreba za korištenjem ovog segmenta toka kao izlaznog toka iz prostora sjeveroistočne Njemačke.



Slika 21: Segment toka NORKU-SONSA prije i nakon uvođenja prostora slobodnih ruta

Uvođenje prostora slobodnih ruta unutar gornjeg zračnog prostora Maastrichta povećalo je broj letova unutar ovog AIRAC datuma sa 144817 letova na 145431, ili 0.42%. Ovaj zračni prostor služi kao poveznica između jugoistočne Europe i Velike Britanije, također povezuje zapadnu i sjeveroistočnu Europu. Zbog specifičnog geografskog položaja dolazi do visokih iznosa kompleksnosti i velike popunjenosti kapaciteta ovog zračnog prostora, i ne može se očekivati veliko povećanje broja letova uvođenjem cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta.

Također je došlo do rasprostiranja tokova kroz veće područje prostora, pogotovo unutar gornjeg zračnog prostora Nizozemske, i do smanjenja opterećenosti tokova prometa koji spajaju države unutar gornjeg zračnog prostora Maastrichta.

6. Analiza utjecaja uvođenja FRA na kompleksnost zračnog prometa

Kompleksnost se definira kao pojam koji predstavlja težinu izvođenja određene zadaće, ali ne postoji univerzalna definicija koja bi se mogla primijeniti na sustav upravljanja zračnim prometom. Prema studiji koja je napravljena u 2006. godini identificirano je više aspekata koji utječu na težinu obavljanja određene zadaće, to jest koje doprinose dodatnom opterećenju kontrolora zračne plovidbe.[18]

Aspekti kompleksnost su:

- Kompleksnost vezana za ATC procedure – dodatno opterećenje kontrolora vezano za rad u prometu, ATC procedure, organizacija zračnog prostora, struktura ruta. Ovi aspekti su većinom unutarnji u odnosu na pružatelja zračnih usluga.
- Kompleksnost vezana za karakteristike prometa – dodatno opterećenje kontrolora vezano za koncentraciju prometa, interakciju promet. Ovi aspekti su većinom vanjski u odnosu na pružatelja zračnih usluga.
- Vanjska kompleksnost – dodatno opterećenje kontrolora vezano za strukturu zračnog prostora kroz koji prolazi promet. Ovi aspekti su većinom vanjski u odnosu na pružatelja zračnih usluga.[18]

Unutar ove studije kompleksnost je definirana kao vanjski faktori koji imaju utjecaj na radno opterećenje kontrolora i/ili težina ATC zadaće, a unutarnji faktori i faktori vezani za ATC procedure nisu uzeti u obzir. Svrha je vrednovanje promjene koje u najvećoj mogućoj mjeri odražavaju karakteristike prometa i vanjska ograničenja neovisno o mreži ruta i organizaciji sektora.[18]

6.1. Dimenzije kompleksnosti

Dimenzije kompleksnosti mogu se podijeliti u tri kategorije, a one su: dimenzija karakteristike prometa, dimenzija karakteristike zračnog prostora i dimenzija vanjskih ograničenja.[18]

6.1.1. Dimenzije karakteristika prometa

Karakteristike prometa odnose se na gustoću prometa, promet u penjanju ili spuštanju, strukturu toka prometa i izmiješanost prometa. [18]

Gustoća prometa se odnosi na raspored prometa unutar određenog zračnog prostora. Koncentracija prometa može biti povećana u određenim lokacijama zračnog prometa, ili se može drastično povećati unutar određenih perioda u danu. Kompleksnost se povećava kad promet nije ravnomjerno raspoređen tijekom dana i kontrolor mora upravljati sa više zrakoplova u manjem volumenu zračnog prostora i/ili u manjoj količini vremena. Na gustoću prometa mogu utjecati unutarnji faktori kao struktura ruta, ali na neravnomjernu gustoću prometa najviše utječu vanjski faktori poput prometne potražnje u određenim područjima i ograničenja uzrokovana otvaranjem vojnih zona.[18]

Dimenzija koja se odnosi na promet u penjanju i/ili spuštanje promatra vertikalno kretanje zrakoplova. Smatra se da je rad prometom u penjanju spuštanju i krstarenju kompleksniji od rada samo sa prometom u penjanju i krstarenju. Na ovu dimenziju utječu vanjski faktori poput blizine velikih aerodromi zbog kojih dolazi do povećanja prometa u penjanju ili spuštanju.[18]

Struktura toka prometa se odnosi na horizontalno kretanje zrakoplova. Smatra se da je rad sa protocima prometa koji se križaju kompleksniji od rada sa paralelnim protocima prometa. Glavni vanjski faktor koji utječe na križanje tokova prometa je prometna potražnja. Na lokaciju i pojavu križanja tokova prometa također može utjecati struktura ruta susjednih pružatelja zračnih usluga.[18]

Izmiješanost prometa se odnosi na varijacije u brzini zrakoplova. Smatra se da će se kompleksnost povećati ako se unutar određenog zračnog prostora pojave zrakoplovi sa značajno različitim brzinama leta. Razlike u brzinama leta zrakoplova su općenito uzrokovane različitim tipovima zrakoplova unutar prostora i smatraju se vanjskim faktorom.[16]

6.1.2. Dimenzija karakteristike zračnog prostora

Karakteristike zračnog prostora odnose se na sektorizaciju i strukture ruta.[18]

Dimenzija sektorizacije odnosi se na efekte koje sektorizacija prostora ima na kompleksnost. Način na koji se podijeli zračni prostor može povećati ili smanjiti kompleksnost. Općenito pružatelji zračnih usluga mogu promijenit svoju sektorizacija pa se ovo smatra unutarnjim faktorom, ali mogu se pojaviti vanjski utjecaju poput otvaranja vojnih zona koji će smanjiti mogućnost optimizacije sektorizacije.[18]

Dimenzija struktura ruta promatra način na koji su strukturirane rute unutar određenog zračnog prostora. Strukture ruta smatraju se vanjskim faktorom zbog velikog utjecaja prometne potražnje. Doke se optimizacija strukture ruta smatra unutarnjim faktorom zbog mogućnosti promjene zračnih ruta, primjerice kompleksne dvosmjerne rute mogu se promijenit u jednosmjerne rute.[18]

6.1.3. Dimenzije vanjskih ograničenja

Vanjska ograničenja odnose se na vojne zone i suradnji sa susjednim pružateljima usluga.[18]

Dimenzija vojnih zona promatra utjecaj vojnog zračnog prostora na kompleksnost. Smatra se da se kompleksnost povećava otvaranje vojnih zona, jer se smanjuje operativni zračni prosto unutar kojeg kontrolor može vršiti operacije. Lokacije veličina vojnih zona smatraju se vanjskim faktorima, ali mogu imati velik utjecaj na radno opterećenje kontrolora. Velik utjecaj na radno opterećenje kontrolora također ima vrsta i kvaliteta suradnje između vojnih i civilnih operacija.[18]

Dimenzija suradnje sa susjednim pružateljima usluga promatra utjecaj kvalitete odnosa između dviju susjednih pružatelja usluga. Suradnja između različitih radnih okruženja može doprinijeti povećanju kompleksnosti, primjerice pri suradnji dvaju pružatelja usluga sa različitim propisanim minimumima razdvajanja zrakoplova. Suradnja dvaju susjednih pružatelja usluga smatra se vanjskima faktorom, a moguće je postavili mjere koje olakšavaju prebačaj zrakoplova između pružatelja usluga, primjerice uvođenje međusobnog sporazuma dvaju pružatelja usluga.[18]

6.2. Indikatori kompleksnosti

Unutar studije koja je provedena 2006. godine odabrani su indikatori koji predstavljaju glavne dimenzije kompleksnosti zračnog prometa. Definiran je jedan indikator za svaku od 4 glavnih dimenzija kompleksnosti. Indikatori kompleksnosti su prikazani u tablici .[18]

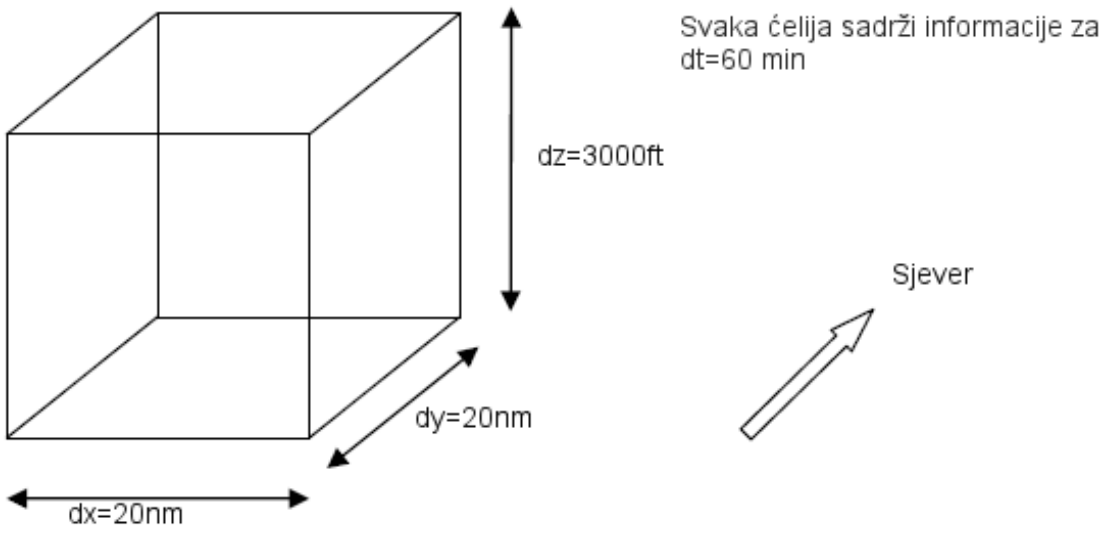
Dimenzija kompleksnosti	Indikator
Gustoća prometa	Prilagođena gustoća
Promet u evoluciji	Vertikalne interakcije (VDIF)
Struktura toka	Horizontalne interakcije (HDIF)
Izmiješanost prometa	Interakcije brzine (SDIF)

Tablica 7: Indikatori kompleksnosti

6.2.1. Dimenzije ćelije

Indikatori kompleksnosti računaju se koristeći mrežu koja podjeljuje cijelo ECAC područje u identične 4D ćelije. Ovo omogućuje fleksibilnosti pri prikupljanju podataka na razini pružatelja usluga, jer se indikatori računaju posebno za svaku ćeliju.[18]

Za računanje indikatora kompleksnosti odabrana je ćelija dimenzija 20NM x 20NM x 3000 ft. Ćelije ovih dimenzija su odabrane zbog lakšeg određivanja granica pružatelja usluga zračne plovidbe, u usporedbi sa ćelijama većeg volumena. Na slici 22 su prikazane dimenzije ćelije. [18]



Slika 22: Dimenzije ćelije [18]

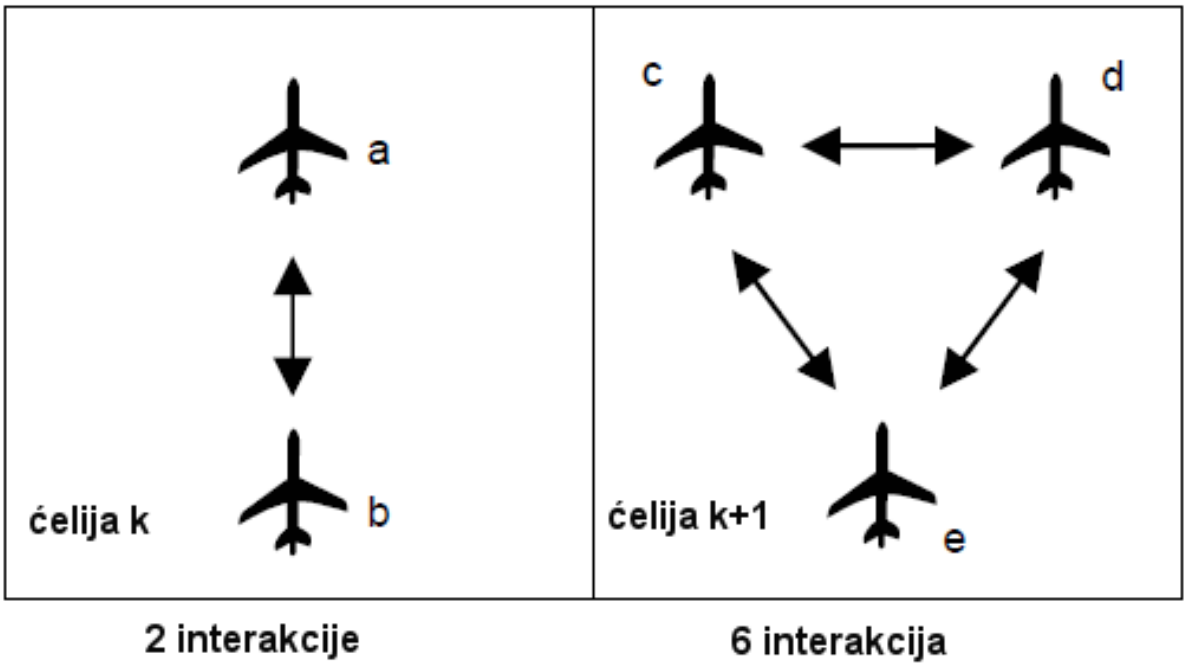
Unutar svake ćelije prikupljaju se informacije o prometu u periodima koji traju 60 minuta. Znači, unutar simulacije prometa u trajanju jednog dana napraviti će se 24 seta informacija za svaku ćeliju. [18]

Ćelije koje se nalaze na granicama prostora 2 pružatelja usluga zračnog prometa dodjeljuju se pružatelju usluga unutar čijih granica se nalazi središnja točka ćelije. Da bi se smanjio utjecaj granica na mrežu indikatori se računaju koristeći 12 različitih mreža. Moguće je napraviti 4 horizontalna pomaka ćelije. Veličina pomaka ćelije je kombinacija od 0nm i 10nm unutar x i y dimenzije. Također je moguće napraviti vertikalni pomak granica ćelije u koracima od 1000ft. [18]

6.2.2. Interakcije

Interakcija je definirana kao prisutnost nekoliko zrakoplova u istom prostoru u isto vrijeme, time se stvara kompleksnost pogotovo ako se zrakoplovi nalaze u različitim fazama leta, imaju različiti pravac leta ili različite brzine. [18]

Na slici 23 je prikazana međusobna interakcija zrakoplova. Svaka interakcija se promatra iz perspektive pojedinog zrakoplova, i maksimalni broj zrakoplova unutar jedne interakcije je dva. Prema tome unutar ćelije k postoje 2 interakcije, a unutar ćelije k+1 postoji 6 interakcija. [18]



Slika 23: Interakcije [18]

Važno je napomenuti da indikatori kompleksnosti ne prikazuju stvaran broj interakcija zrakoplova, nego samo vjerojatnost potencijalnih interakcija zrakoplova prema zadanom toku prometa. [18]

Promatra se samo količina vremena koju je zrakoplov proveo unutar određene ćelije i uzima se u obzir da je zrakoplov mogao proći kroz ćeliju u bilo koje vrijeme unutar promatranog sata. Prema tome, ako su t_a i t_b zabilježene količine vremena (u satima) koje su zrakoplovi proveli unutar određene ćelije, onda je očekivana duljina interakcije između dva zrakoplova jednaka produktu tih dvaju vremena ($t_a * t_b$).[18]

Ako se promatra primjer na slici 21 i svaki zrakoplov provede 2 minute unutar ćelije onda će očekivana duljina interakcije zrakoplova unutar ćelije k biti:

$$2 * \left(\frac{1}{30} * \frac{1}{30}\right) = \frac{1}{450}\ h$$

,a za ćeliju k+1:

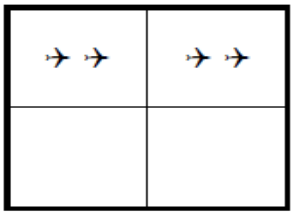
$$6 * \left(\frac{1}{30} * \frac{1}{30}\right) = \frac{1}{150}\ h$$

6.2.3. Prilagođena gustoća

Prilagođena gustoća je definirana kao omjer sati interakcije i sati leta. Sati interakcije se dobivaju zbrajanjem trajanja svih interakcija u svim ćelijama dodijeljenim određenom pružatelju usluga zračnog prometa, da bi se dobila prilagođena gustoća ovaj broje je potrebno podijeliti sa zbrojem satova leta unutar područja pružatelja usluga. Ćelije bez letova ne pridonose izračunu prilagođene gustoće, a ćelija koje sadrže samo jedan let doprinose samo iznosu satova leta unutar područja pružatelja usluga.[18]

$$Prilagođena\ gustoća = \frac{Sati\ interakcije}{Sati\ leta} \tag{6.1}$$

Na slici 24 prikazan je primjer izračuna prilagođene gustoće za 2 centra. Centar 2 ima upola manje zrakoplova i prema tome upola manje gustoće od centra 1. Međutim, prilagođena gustoća i broj interakcija po letu je jednak za oba centra. [18]

Centar 1		 Centar 2
2+2+2+2=8	Broj interakcija	2+2=4
$Prilagođena\ gustoća = \frac{Sati\ interakcije}{Sati\ leta}$		
$8 \times \frac{1}{400} = 0.02$	Sati interakcije	$4 \times \frac{1}{400} = 0.01$
$8 \times \frac{1}{20} = 0.4$	Sati leta	$4 \times \frac{1}{20} = 0.2$
$\frac{0.02}{0.4} = 0.05$	Prilagođena gustoća	$\frac{0.01}{0.2} = 0.05$

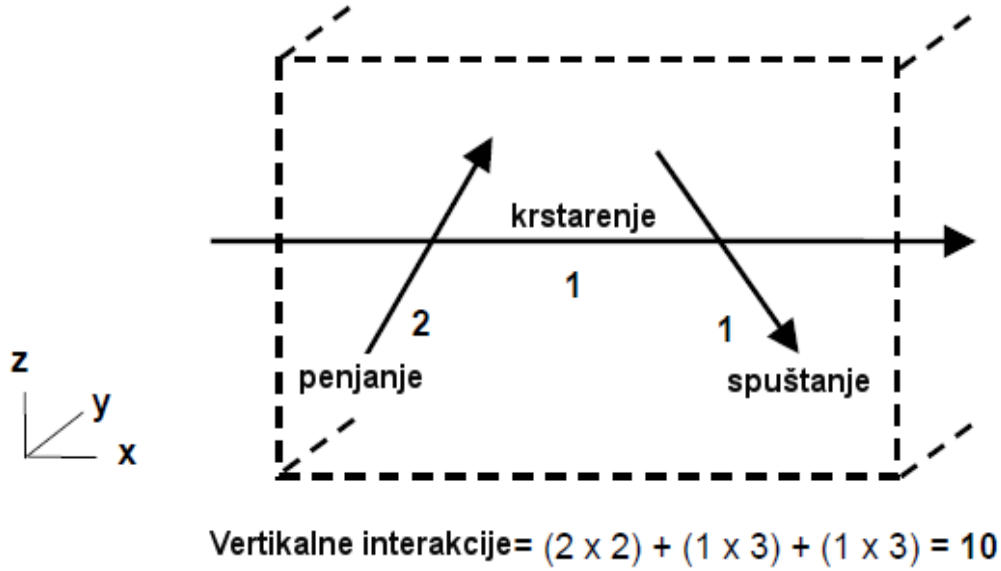
Slika 24: Izračun prilagođene gustoće [18]

Prema ovom primjeru vidljivo je da prilagođena gustoća izražava gustoću promatranu sa strane pojedinog zrakoplova, jer makar je količina zrakoplova između dva centra različita prilagođena gustoća za svaki zrakoplov je ista. [18]

6.2.4. Vertikalne interakcije

Smatra se da su dva zrakoplova u vertikalnoj interakciji ako se nalaze unutra iste ćelije i nalaze se u različitim fazama leta (penjanje, spuštanje ili krstarenje). Faza leta zrakoplova se određuje u trenutku kada uđe u ćeliju. Smatra se da je zrakoplov u krstarenju ako je brzina penjanja ili spuštanja manja od 500 ft po minuti. [18]

Primjer vertikalnih interakcija zrakoplova unutar jedne ćelije je prikazan na slici 25. Unutar ćelije se nalazi 4 zrakoplova 2 u penjanju 1 u krstarenju i 1 u spuštanju. Svaki od zrakoplova u penjanju je u interakciji sa ostala 2 zrakoplova, ali nije u interakciji s drugim zrakoplovom u penjanju. Zrakoplov u krstarenju je u interakciji sa 3 zrakoplova, 2 zrakoplova u penjanju i jednim u spuštanju. Zrakoplov u spuštanju je u interakciji s 3 zrakoplova, 2 u penjanju i 1 u krstarenju. Ne postoje interakcije između zrakoplova koji se nalaze u istoj fazi leta. [18]



Slika 25: Izračun vertikalnih interakcija [18]

Prema zadanom primjeru potencijalni broj vertikalnih interakcija unutar ćelije je 10. Ove interakcije su samo potencijalno jer su zrakoplovi mogli biti prisutni unutar ćelije u različitim vremenima. Ako smatramo da je svaki zrakoplov bio unutar ćelije 2 minute ($\frac{1}{30}$ sata) onda će potencijalno vrijeme vertikalnih interakcija iznositi: $10\left(\frac{1}{30} * \frac{1}{30}\right) = \frac{1}{90}\ h$ [18]

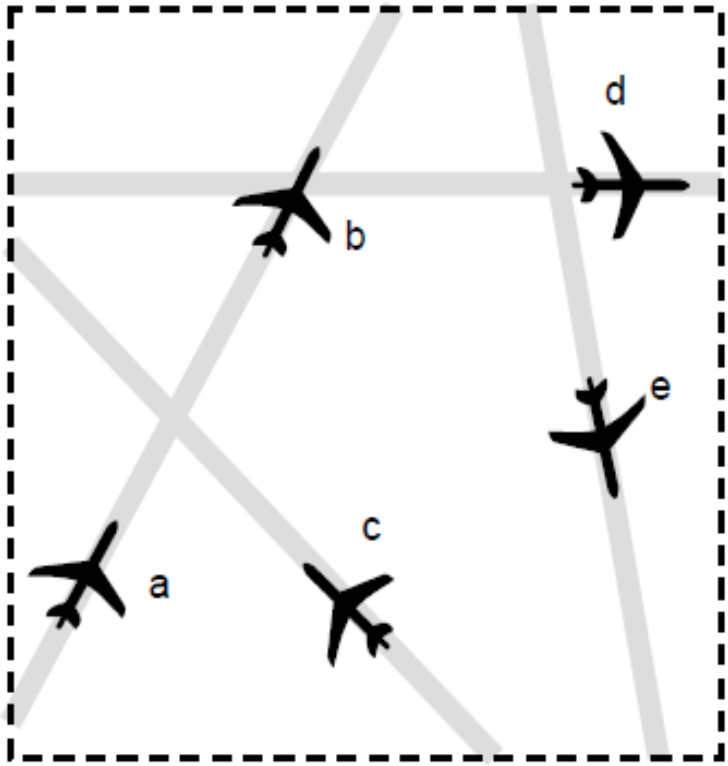
Indikator vertikalnih interakcija (VDIF) se računa zbrajanjem potencijalnog trajanja vertikalnih interakcija u svim ćelijama koje su pod nadležnosti određenog pružatelja usluga. Ovaj zbroj se onda dijeli s ukupnim broje sati leta unutar područja nadležnosti pružatelja usluga. [18]

$$VDIF = \frac{Sati\ vertikalnih\ interakcija}{Sati\ leta} \tag{6.2}$$

6.2.5. Horizontalne interakcije

Smatra se da su dva zrakoplova u horizontalnoj interakciji ako se nalaze unutar iste ćelije i imaju različit pravac leta. Pravac leta koji se koristi pri računanju je pravac koji je zrakoplov imao kad je ulazio u ćeliju. Da bi se smatralo da su zrakoplovi u horizontalno interakciji razlika u pravcu leta mora biti veća od 20°. [18]

Primjer potencijalnih horizontalnih interakcija zrakoplova prikazan je na slici 26. Da bi se odredio broj potencijalnih horizontalnih interakcija promatra se da li je kut između ruta svakog para zrakoplova manji ili veći od 20°. Visine leta i faze leta zrakoplova se ne uzimaju u obzir pri ovom izračunu.[18]



Slika 26: Horizontalne interakcije [18]

Ako se promatra zrakoplova a, kut između njegove rute i rute zrakoplova b je manji od 20° i smatra se da ne postoji horizontalna interakcija između ova dva zrakoplova. Kut između ruta zrakoplova a i c je veći od 20° i smatra se da postoji potencijalna horizontalna interakcija između ova dva zrakoplova. Također se smatra da postoji potencijalna horizontalna interakcija između zrakoplova a i d i između zrakoplova a i e. U tablici 8 prikazane su potencijalne horizontalne interakcije svih zrakoplova. [18]

Zrakoplov	Broj potencijalnih interakcija
a	3
b	3
c	4
d	4
e	4
Ukupno	18

Tablica 8: Broj potencijalnih horizontalnih interakcija

Indikator horizontalnih interakcija (HDIF) se računa na slični način kao i indikator vertikalnih interakcija. Broj sati horizontalnih interakcija u području nadležnosti pružatelja usluga se zbraja i dijeli sa brojem sati leta. [18]

$$HDIF = \frac{Sati\ horizontalnih\ interakcija}{Sati\ leta} \tag{6.3}$$

6.2.6. Interakcije brzine

Smatra se da postoji interakcija brzine između dva zrakoplova ako je razlika između njihovih brzina veća od 35 kts. Brzina koja se koristi pri ovom izračunu je vrijednost dobivena iz BADA tablice performansi određenog tipa zrakoplova pri razini leta središta ćelije u kojoj se zrakoplov nalazi. [18]

Indikator interakcija brzine (SDIF) se računa zbrajanjem ukupnog broja sati interakcija brzine u području nadležnosti pružatelja usluga, taj se broj dijeli s ukupnim brojem sati leta. [18]

$$SDIF = \frac{Sati\ interakcija\ brzine}{Sati\ leta} \tag{6.4}$$

6.3. Rezultat kompleksnosti

Rezultat ukupne kompleksnosti moguće je prikazati jednim brojem, ali radi lakšeg razumijevanja potrebno je također uzeti u obzir individualne indikatore kompleksnosti. Na primjer dva pružatelja usluga zračne plovidbe sa veoma sličnim ukupnim rezultatom kompleksnosti mogu imati sasvim različit udio utjecaja strukture prometnih tokova (DIF indikatori) i prometnog volumena (prilagođena gustoća). [18]

DIF indikatori su blisko povezani sa prilagođenom gustoćom, jer su vertikalne, horizontalne i interakcije brzine podskup prilagođene gustoće koja uključuje sve interakcije. Moguće je ukloniti povezanost koristeći relativne indikatore (r_VDIF, r_HDIF, r_SDIF) , koji se računaju dijeljenjem indikatora interakcija sa prilagođenom gustoćom za svakog pružatelja usluga. [18]

6.4. Strukturalni indeks

Postoje dva aspekta koji utječu na ukupnu kompleksnost određenog pružatelja usluga, struktura zračnih tokova i prometni volumen. Korištenjem relativnih indikatora omogućeno je razdvajanje ovih komponenti. Prilagođena gustoća prikazuje prometni volumen dok strukturalni indeks prikazuje strukturu prometnih tokova: [18]

$$Strukturalni\ indeks = r_{VDIF} + r_{HDIF} + r_SDIF \tag{6.5}$$

Prilagođena gustoća i strukturalni indeks imaju utjecaj na ukupnu kompleksnost i pomoću njih moguće je odrediti vrijednost ukupne kompleksnosti koristeći sljedeću formulu: [18]

$$Ukupna\ kompleksnost = Prilagođena\ gustoća * Strukturalni\ indeks \tag{6.6}$$

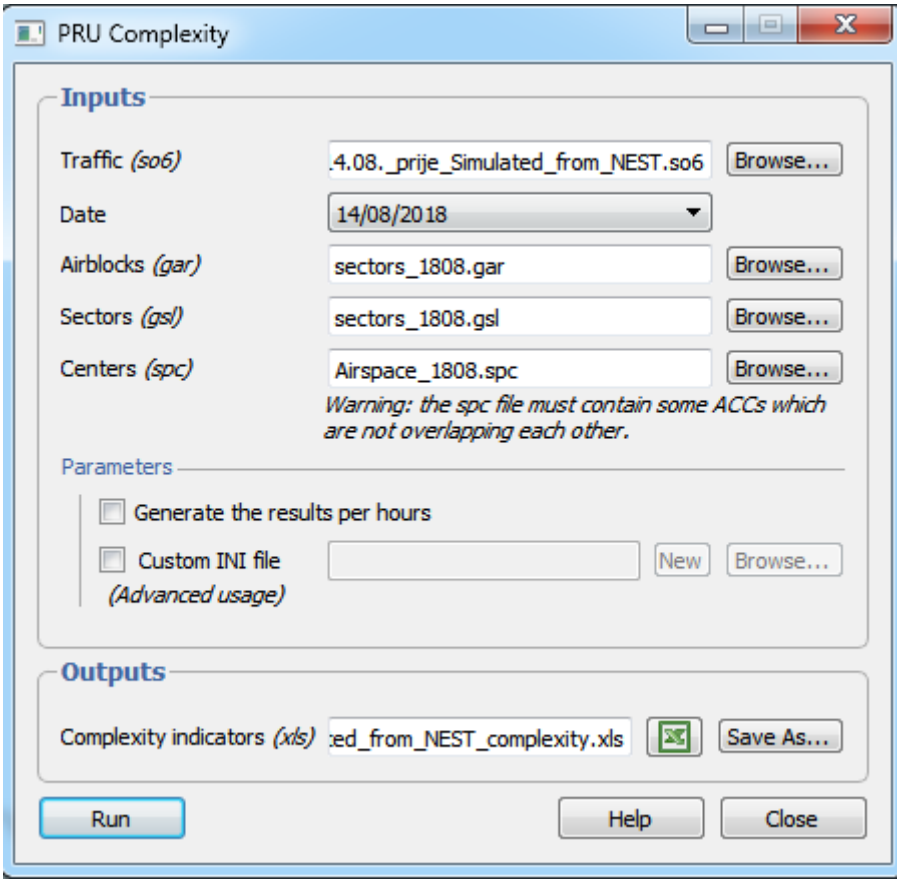
Bilo bi moguće dobiti relevantnije rezultate dodavanjem težinskih faktora indikatorima kompleksnosti ovisno o njihovim važnostima. Ovo ipak nije provedeno jer nije moguće napraviti set težinskih faktora koji bi obuhvatio sve zračne prostore. Također je provedeno nekoliko testiranja koristeći težinske faktore i rezultati su bili veoma slični rezultatima koji nisu koristili težinske faktore. [18]

Također je razmatrana ideja normaliziranja indikatora. Glavna prednost normalizacije svakog indikatora je olakšavanje provođenja usporedba između različitih pružatelja usluga zračne plovidbe. Glavna mana ovog sustava je da se dobiveni

rezultati ne mogu uspoređivati iz godine u godinu osim ako se ne koristi isti sustav normalizacije indikatora svake godine. [18]

6.5. Kompleksnost unutar programskog alata NEST

Unutar programskog alata NEST moguće je generirati vrijednosti kompleksnosti za određeni ACC, sektor ili volumen prometa pomoću funkcije *PRU Complexity.* Izbornik parametara za izračun PRU kompleksnosti je prikazan na slici 27.



Slika 27: Izbornik izračuna PRU kompleksnosti

Indikatori koji se promatraju unutar programskog alata NEST su sljedeći: [19]

- Prosječna udaljenost preleta po letu
- Prosječno vrijeme preleta po letu
- Prosječan broj promjene visine
- Postotak letova u penjanju/krstarenju/spuštanju
- Postotak lakih/srednjih/teških zrakoplova
- Prosječan broj ulazaka po satu [19]

Vrijeme promatranja iznosi 24 sata, ako se radi o statistici vezanoj za kompleksnost, moguće je promijeniti vrijeme promatranja koristeći opcije *Start* i *End*. [19]

Nakon provedbe izračuna za određeno razdoblje rezultati se spremaju unutar .xls datoteke grupirani prema razinama leta i ACC-ovima. Indikatori pojedinog ACC-a su dostupni u koracima od 10 razina leta počevši od srednje razine leta prve ćelije unutar koje je došlo do interakcije letova (najčešće FL100). [19]

Stupci unutar datoteke su sljedeći:

- UNIT_CODE – identifikacija zrakoplova
- FL – razina leta
- TIME – vrijeme dana
- FT – broj sati leta
- FD – prijeđena horizontalna udaljenost unutar ćelije
- DH – prijeđena vertikalna udaljenost unutar ćelije
- TX – broj sati interakcija
- TXH – broj sati horizontalnih interakcija
- TXV – broj sati vertikalnih interakcija
- TXS – broj sati brzinskih interakcija
- N – broj letova
- NCELL – ukupni broj aktivnih ćelija podijeljen s ukupnim brojem pomaknute mreže. [19]

Ukupni rezultati kompleksnosti nisu izračunati pomoću algoritma i potrebno ih je ručno izračunati. Ovo omogućuje korisniku odabir informacija koje smatra relevantnima. Formule koje se koriste za izračun indikatora kompleksnosti su: [19]

$$Prilagođena\ gustoća = \frac{\sum TX}{\sum FT} \tag{6.7}$$

$$RVdif = \frac{\sum TXV}{\sum TX} \tag{6.8}$$

$$RHdif = \frac{\sum TXH}{\sum TX} \tag{6.9}$$

$$RSdif = \frac{\sum TXS}{\sum TX} \tag{6.10}$$

$$Strukturalni\ indeks = \frac{\sum TXS + \sum TXH + \sum TXV}{\sum TX} \quad (6.11)$$

$$Kompleksnost = \frac{\sum TXS + \sum TXH + \sum TXV}{\sum FT} \quad (6.12)$$

Vrijednost kompleksnosti izračunat pomoću gore navedene formule izražena je u satima interakcija po kompleksnom satu leta. Službena PRU jedinica pri promatranju rezultata kompleksnosti je minuta po kompleksnom satu leta, stoga je potrebno pomnožiti rezultat kompleksnosti s 60 da bi se dobio konačni rezultat kompleksnosti [19].

$$Konačni\ rezultat\ kompleksnosti = Kompleksnost * 60 \quad (6.13)$$

6.6. Izračun kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Maastrichta pomoću programskog alata NEST

Za prikaz provođenja izračuna kompleksnosti odabran je datum 25.07. Da bi bilo moguće napraviti usporedbu potrebno je prvotno napraviti simulacije putanja zrakoplova prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija slobodnih ruta, ovi procesi su opisani unutar poglavlja 4. Nakon toga moguće je provesti izračun PRU kompleksnosti.

Parametri potrebni za izračun PRU kompleksnosti prikazani su unutar tablice 9:

Prostor	FT	FD	DH	TX	TXH	TXV	TXS
Prije							
Belgija	6936.9	3116686	2013189	3032.52	1159.76	705.91	279.79
Nizozemska	5643-73	2548035	736571.5	1777.37	974.43	128.71	128.41
Njemačka	444.75	2011431	37425.77	185.87	101.26	5.36	14.74
MUAC	13025.3	5865863	2787187	4995.76	2235.45	839.98	422.94
Nakon							
UNIT_CODE	FT	FD	DH	TX	TXH	TXV	TXS
Belgija	6501.89	2921324	1850296	2372,7	1012,84	512,84	216,55
Nizozemska	6016.13	2715505	918885.6	1314,65	898,97	140,55	107,84
Njemačka	334.46	150356.5	56072.31	87,03	61,6	6,58	7,52
MUAC	12852.48	5787186	2825254	3774,45	1973,44	659,97	331.91

Tablica 9: Parametri za izračun PRU kompleksnosti

Sa poznatim parametrima moguće je izračunati indikatore kompleksnosti uvrštavanjem u prethodno spomenute formule. Indikatori kompleksnosti za odabrani datum prikazani su u tablici 10:

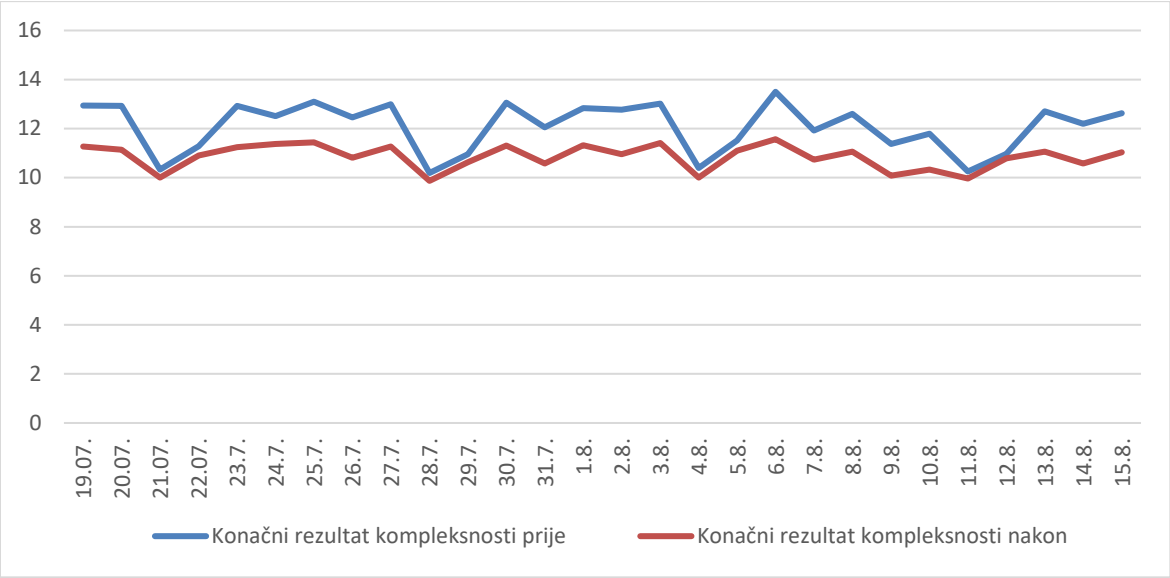
Indikatori kompleksnosti	Prije	Belgija	Nizozemska	Njemačka	MUAC	Nakon	Belgija	Nizozemska	Njemačka	MUAC
Prilagođena gustoća		0.437158	0.314928	0.41792	0.38354		0.364935	0.218521	0.26021	0.293675
HDIF		0.167187	0.172657	0.227678	0.171623		0.155781	0.149427	0.184177	0.153546
VDIF		0.101762	0.022806	0.012052	0.064488		0.078876	0.023362	0.019674	0.05135
SDIF		0.040333	0.022753	0.033142	0.03247		0.033306	0.017925	0.022484	0.025825
r_HDIF		0.382441	0.548243	0.544789	0.447469		0.426872	0.68381	0.707802	0.522842
r_VDIF		0.23278	0.072416	0.028837	0.168139		0.216136	0.106911	0.075606	0.174852
r_SDIF		0.092263	0.072247	0.079303	0.08466		0.091265	0.082029	0.086407	0.087936
Strukturalni indeks		0.707484	0.692906	0.652929	0.700268		0.734273	0.872749	0.869815	0.78563
Rezultat kompleksnosti		0.309282	0.218216	0.272872	0.268581		0.267962	0.190714	0.226335	0.23072
Konačni rezultat kompleksnosti		18.557	13.093	16.372	16.114		16.078	11.443	13.581	13.843

Tablica 10: Indikatori kompleksnosti

Iz rezultata prikazanih u tablici vidljivo je da je uvođenje prostora slobodnih dovelo do smanjenja konačnog rezultata kompleksnosti za sve gornje zračne prostore. Također je došlo do smanjenja svih indikatora kompleksnosti osim indikatora vertikalnih interakcija za prostor Nizozemske i sjeveroistočne Njemačke, ali ovo povećanje nije dovoljno veliko da bi značajno utjecalo na konačni rezultat kompleksnosti. Ovaj postupak izračuna indikatora kompleksnosti je ponovljen za sve datume unutar AIRAC ciklusa.

6.6.1. Indikatori kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Nizozemske

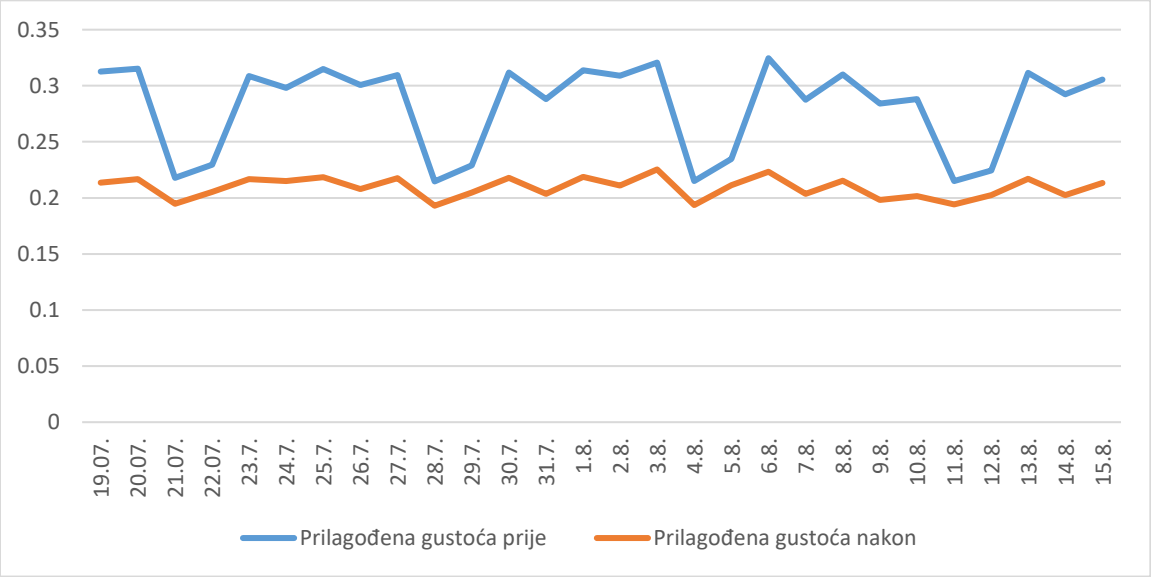
Konačni rezultati kompleksnosti unutar AIRAC ciklusa za gornji zračni prostor Nizozemske su prikazani u grafu 5.



Graf 5: Konačni rezultati kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Nizozemske

Unutar ovog grafa dodijeljena je jedna vrijednost ukupnoj kompleksnosti prostora, uvođenje prostora slobodnih ruta doprinijelo je smanjenju kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Nizozemske unutar ovog AIRAC ciklusa. Također je potrebno proučiti pojedine indikatore kompleksnosti da bi imali potpuni uvid u kompleksnost ovog zračnog prostora.

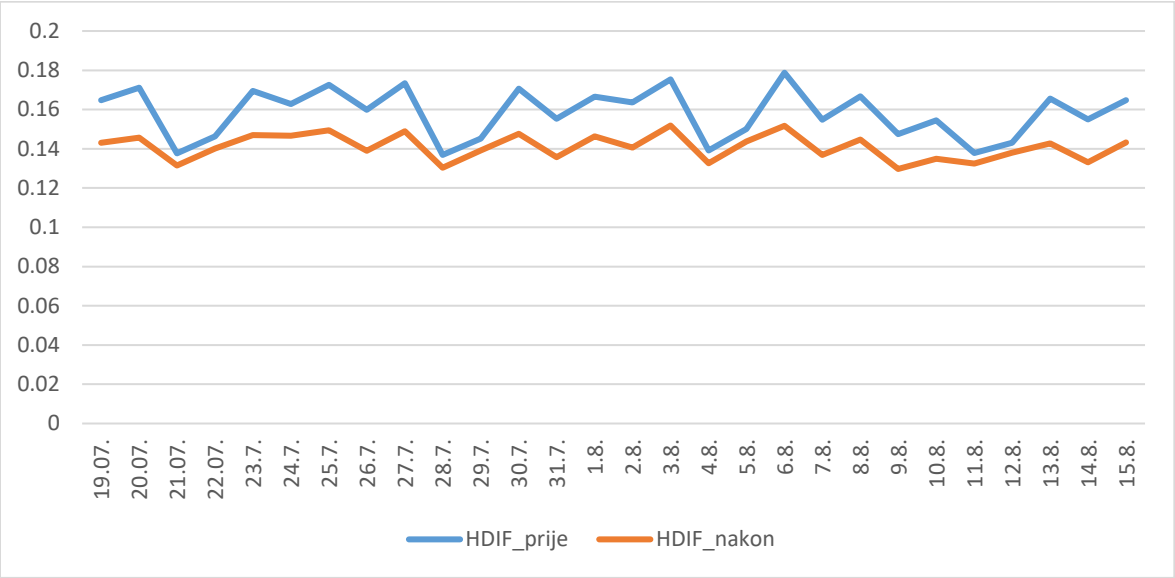
Na ukupnu kompleksnost prostora utječu prilagođena gustoća i strukturalni indeks. Na grafu 6 prikazana je prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora Nizozemske.



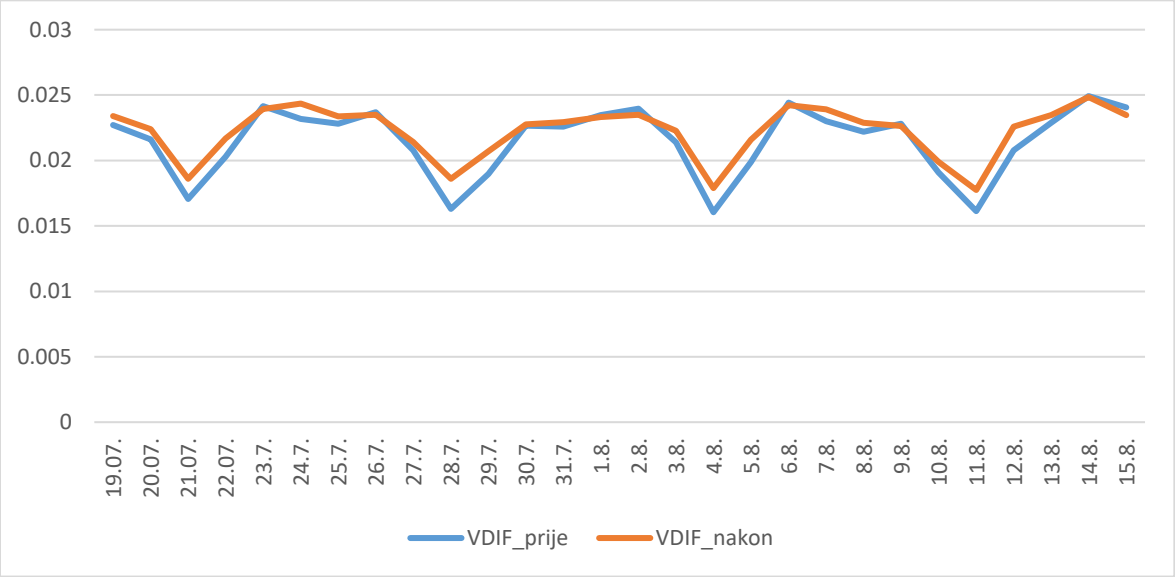
Graf 6: Prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora Nizozemske

Uvođenjem prostora slobodnih ruta došlo je do smanjenja prilagođene gustoće za sve datume unutar AIRAC ciklusa, Vjerojatni uzrok ovog smanjenja je raspršenje prometa unutar volumena prostora koje je uzrokovalo smanjenje broja interakcija zrakoplova, i povećanje broja sati leta uzrokovano povećanjem prometa kroz ovaj prostor.

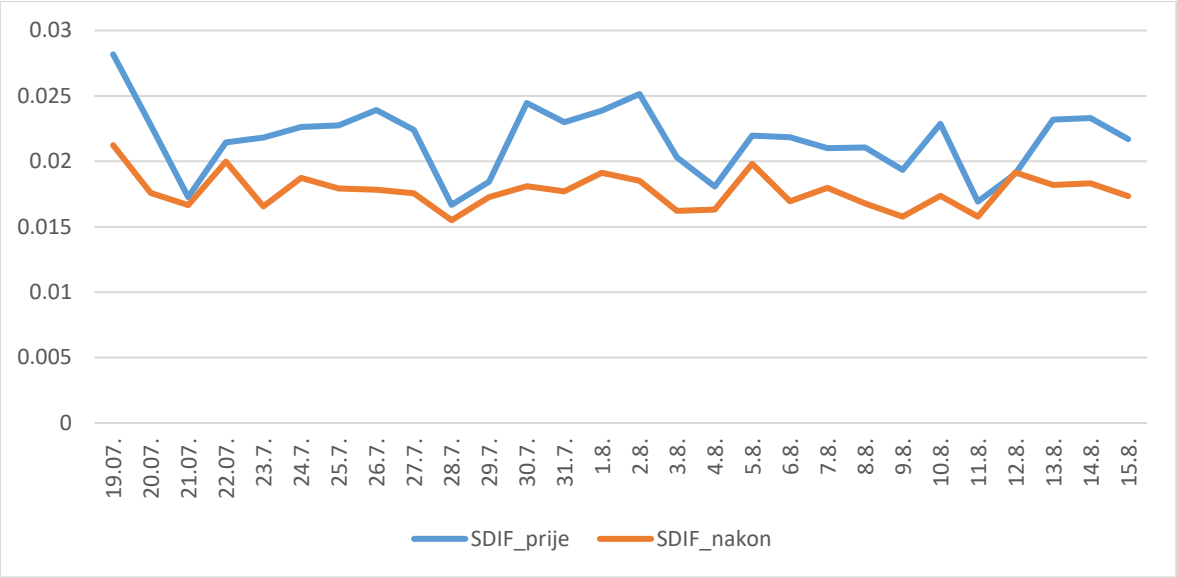
Na grafovima 7, 8 i 9 su prikazani indikatori horizontalnih interakcija, vertikalnih interakcija i interakcija brzine.



Graf 7: Indikator horizontalnih interakcija



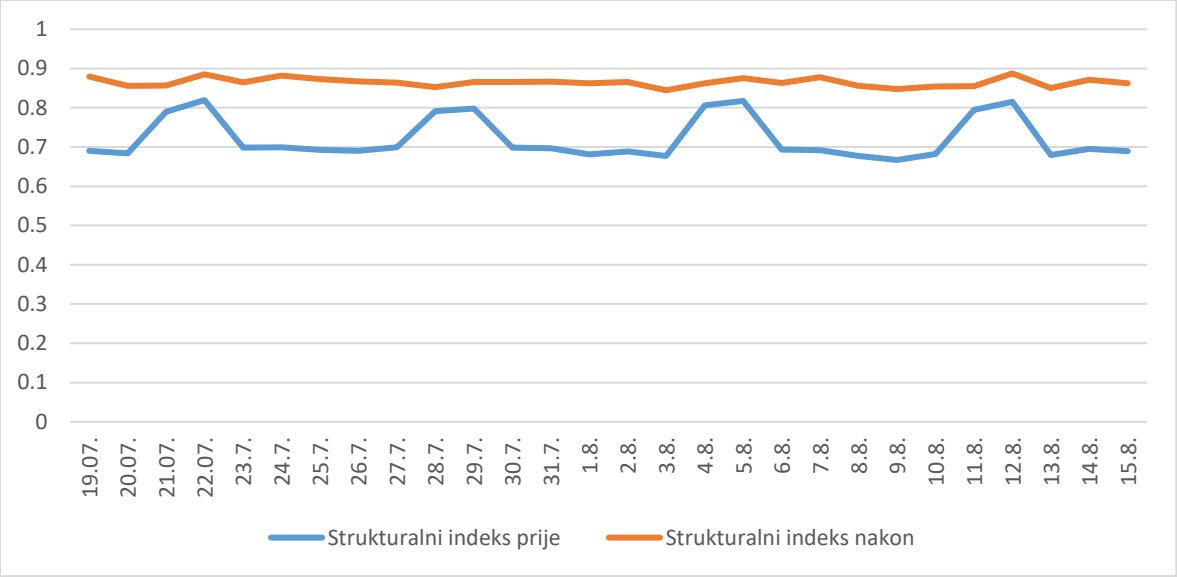
Graf 8: Indikator vertikalnih interakcija



Graf 9:Indikator interakcija brzine

Na grafovima je vidljivo da najveći udio interakcija unutar prostora čine horizontalne interakcije, dok je broj vertikalnih interakcija i interakcija brzine približno jednak. Uvođenjem prostora slobodnih ruta smanjio se broj horizontalnih interakcija i interakcija brzine, a broj vertikalnih interakcija je ostao isti ili se minimalno povećao.

Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora Nizozemske prikazan je u grafu 10.



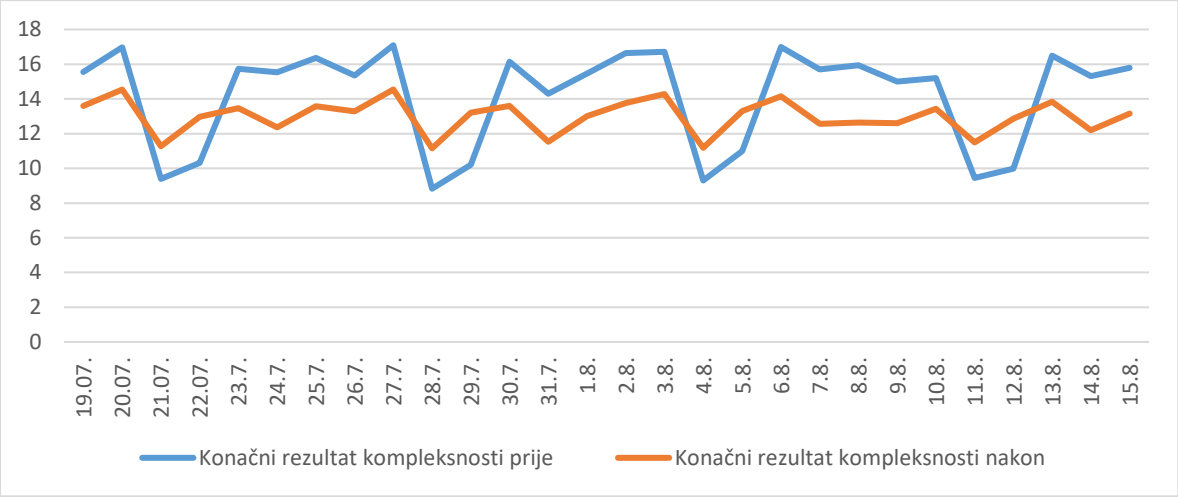
Graf 10: Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora Nizozemske

Uvođenje prostora slobodnih ruta dovelo je do povećanja strukturalnog indeksa gornjeg zračnog prostora Nizozemske. Vjerojatni uzrok ovog povećanja je ukidanje korištenja postojeće mreže ruta koje dovodi do povećanja broja prometnih tokova,

zbog toga dolazi do povećanja strukturalnog indeksa koji predstavlja kompleksnost strukture prometnih tokova. Unatoč ovom povećanju ukupna kompleksnost prostora se smanjila zbog smanjenja prilagođene gustoće.

6.6.2. Indikatori kompleksnosti gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke

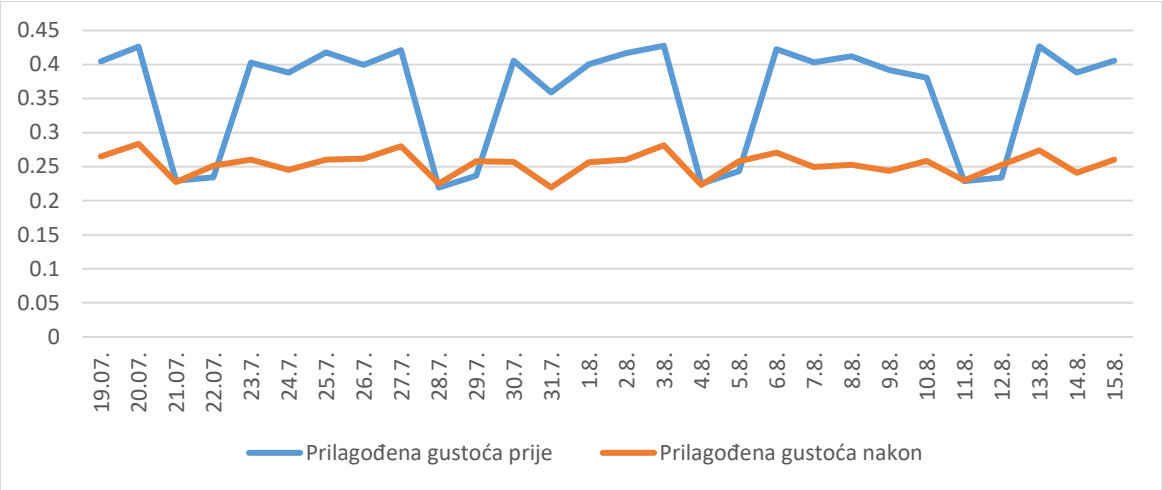
Konačni rezultati kompleksnosti unutar AIRAC ciklusa za gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke su prikazani u grafu 11.



Graf 11: Konačni rezultati kompleksnosti sjeveroistočne Njemačke

Konačni rezultati kompleksnosti gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke imaju veći iznos od gornjeg zračnog prostora Nizozemske. Uvođenje prostora slobodnih ruta dovelo je do općenitog smanjenja konačnih rezultata kompleksnosti. Tijekom vikenda zabilježeno je povećanje konačnih rezultata kompleksnosti. Uzrok ovog povećanja je povećanje strukturalnog indeksa dok je vrijednost prilagođene gustoće tijekom vikenda ostala približno ista.

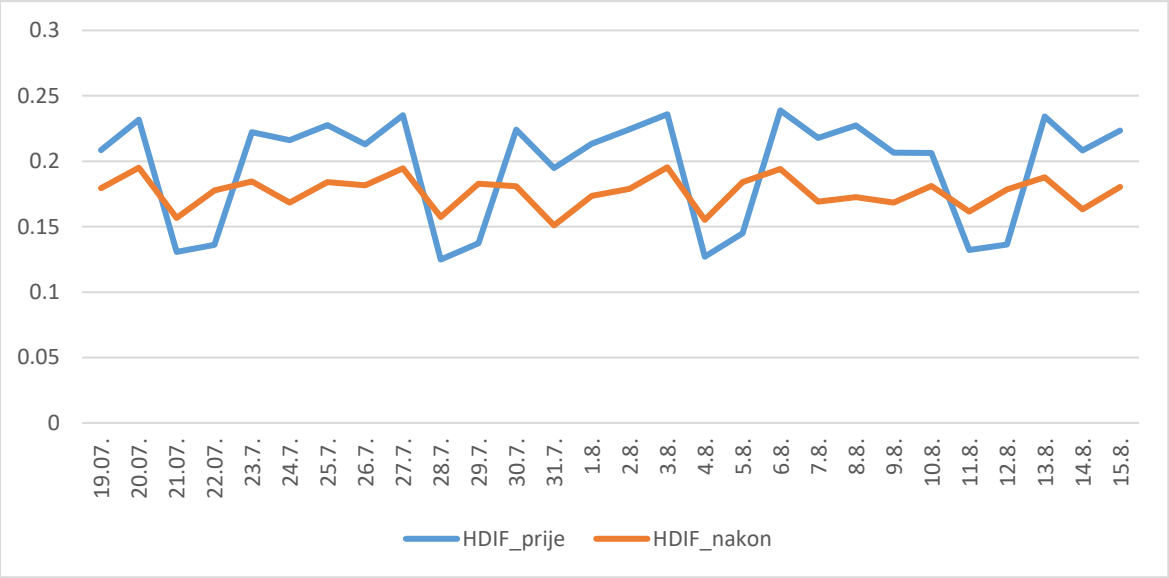
Na grafu 12 prikazana je prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke.



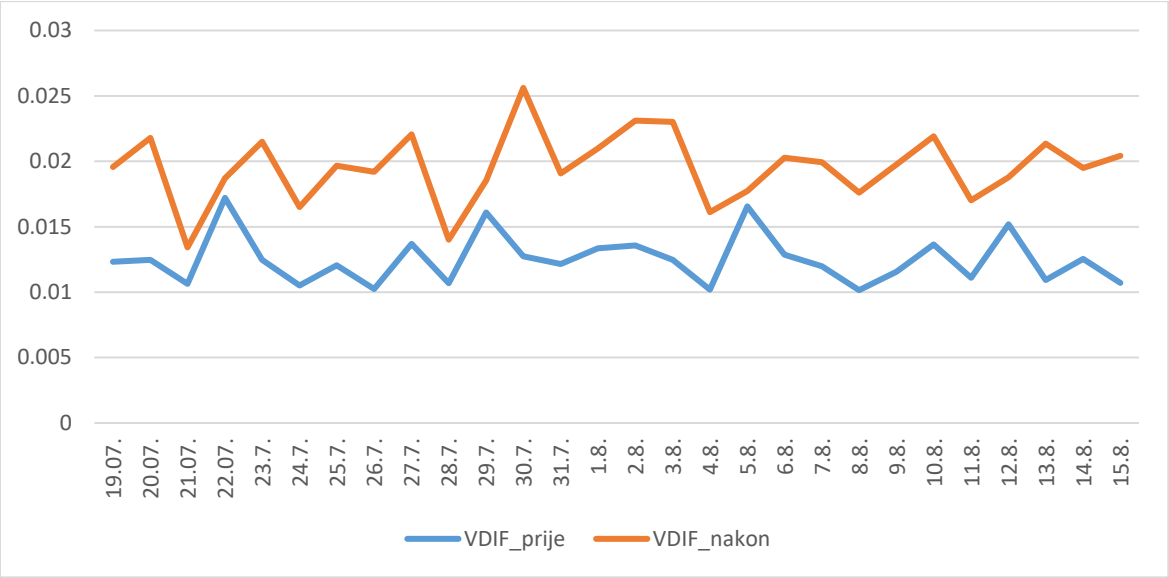
Graf 12: Prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke

Pri promatranju vrijednost prilagođene gustoće vidljiv je isti trend smanjenja uz iznimku vikenda kao i kod konačnih rezultata kompleksnosti. Vjerojatni uzrok ovog smanjenja je raspršenje prometnih tokova unutar volumena prostora, i povećanje broja sati leta kao i kod zračnog prostora Nizozemske.

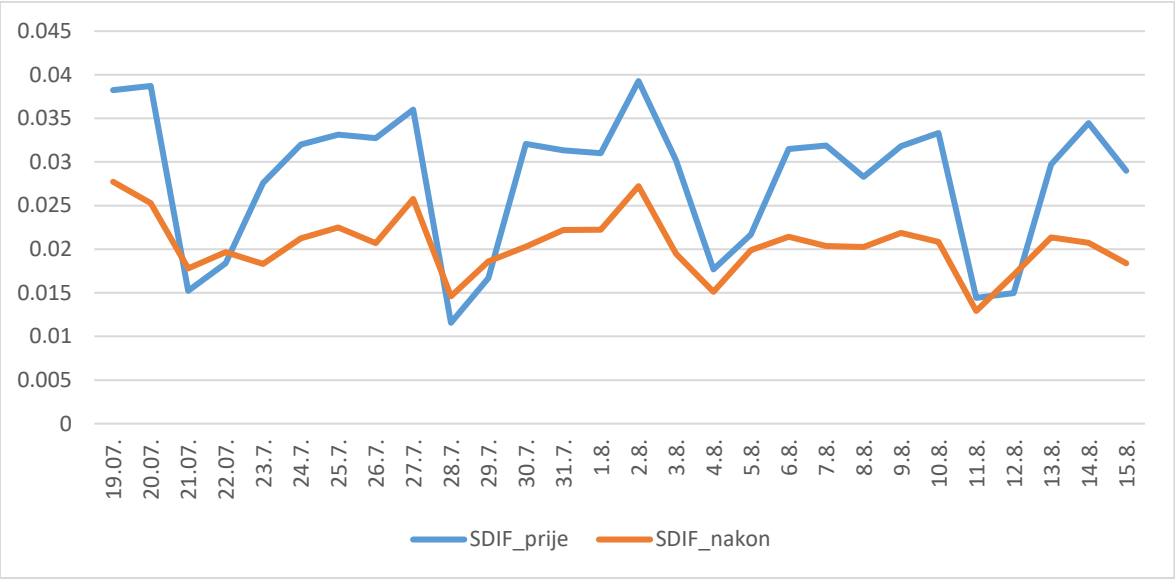
Na grafovima 13. 14 i 15 su prikazani indikatori horizontalnih interakcija, vertikalnih interakcija i interakcija brzine za gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke.



Graf 13: Indikator horizontalnih interakcija za gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke



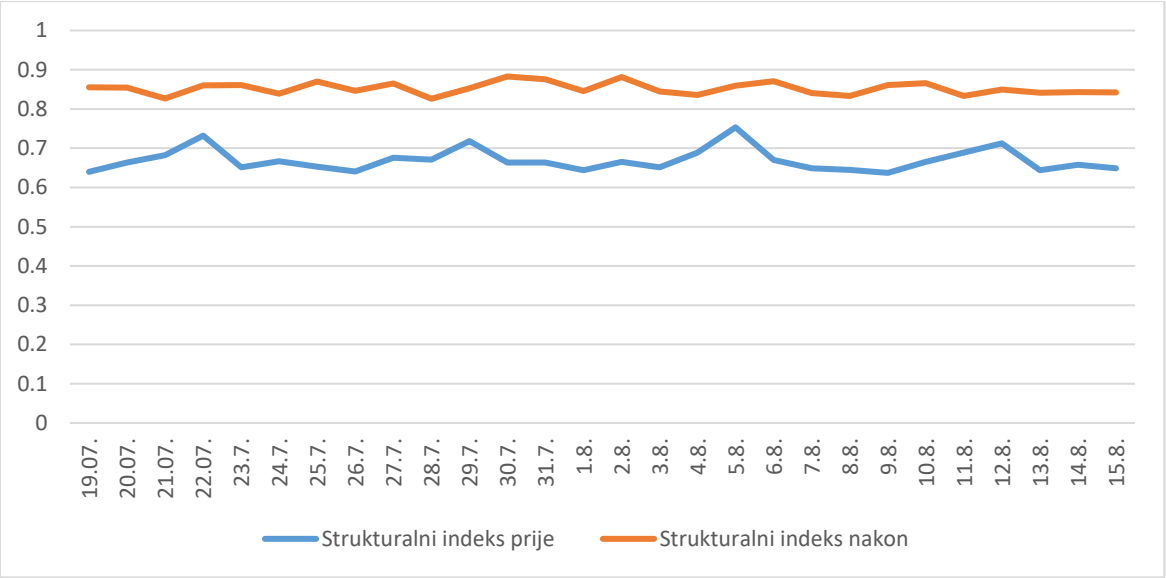
Graf 14: Indikator vertikalnih interakcija za gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke



Graf 15: Indikator interakcija brzine za gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke

Na grafovima je vidljivo da najveći udio interakcija je horizontalnog tipa, manji udio imaju interakcije brzine, a najmanji vertikalne interakcije. Horizontalne interakcije i interakcije brzine, nakon uvođenja prostora slobodnih brzina, imaju trend smanjenja s iznimkom vikenda. Broj vertikalnih interakcije se povećao nakon uvođenja prostora slobodnih ruta.

Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke je prikazan na grafu 16.



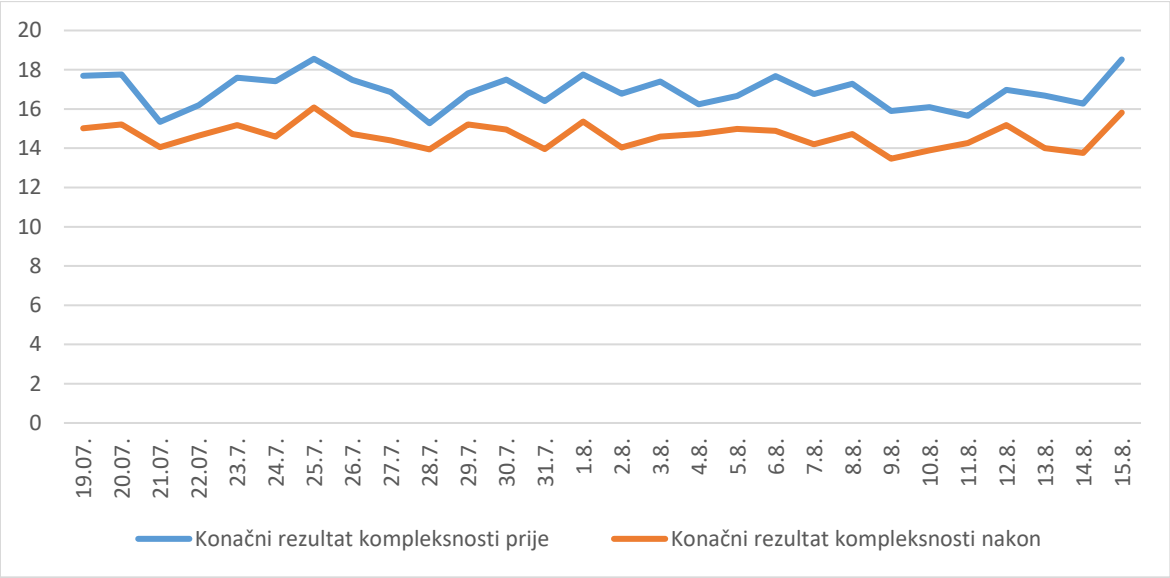
Graf 16: Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke

Uvođenje prostora slobodnih ruta dovelo je do povećanja strukturalnog indeksa gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke. Kao i kod zračnog prostora Nizozemske ovo je uzrokovano povećanjem broja prometnih tokova. Unatoč ovom povećanju ukupna kompleksnost prostora se smanjila zbog smanjenja prilagođene gustoće.

U usporedbi sa gornjim zračnim prostorom Nizozemske vrijednosti strukturalnog indeksa su približno iste. Većem konačnom iznosu kompleksnosti pridonosi veći iznos horizontalnih interakcija i interakcija brzine.

6.6.3. Indikatori kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Belgije

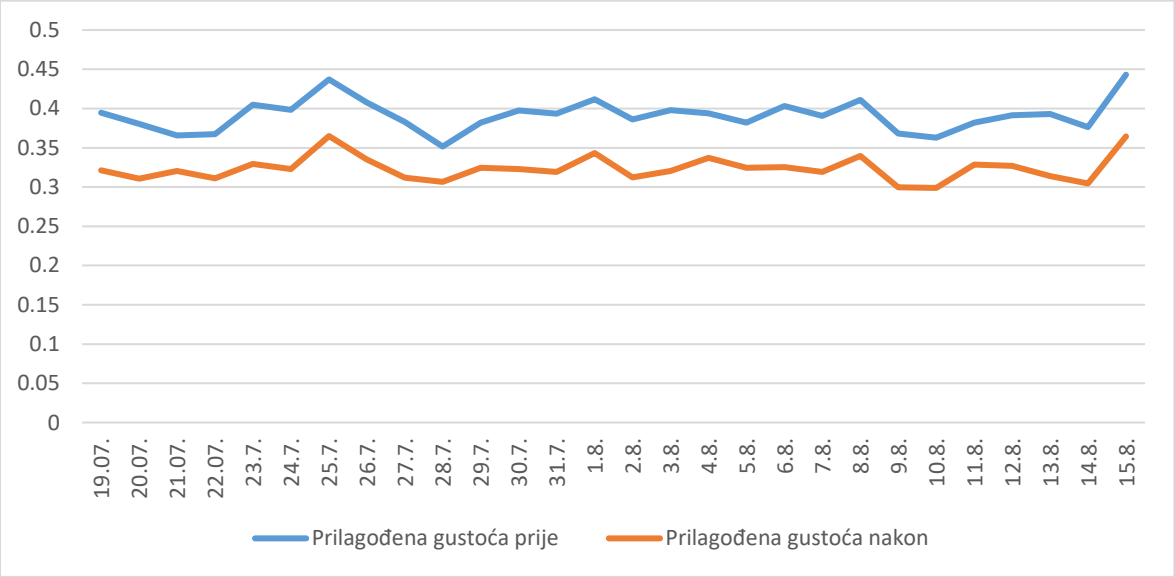
Konačni rezultati kompleksnosti unutar AIRAC ciklusa za gornji zračni prostor Belgije su prikazani u grafu 17.



Graf 17: Konačni rezultati kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Belgije

Konačni rezultati kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Belgije imaju veći iznos od ostala dva zračna prostora. Uvođenje prostora slobodnih ruta dovelo je do općenitog smanjenja konačnih rezultata kompleksnosti.

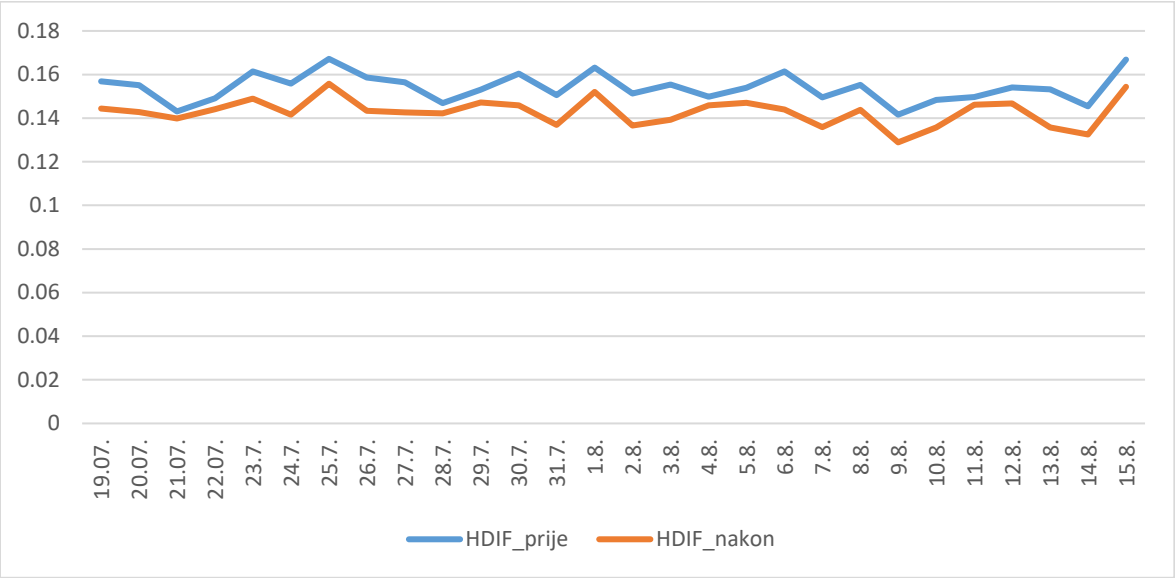
Na grafu 18 prikazana je prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora Belgije.



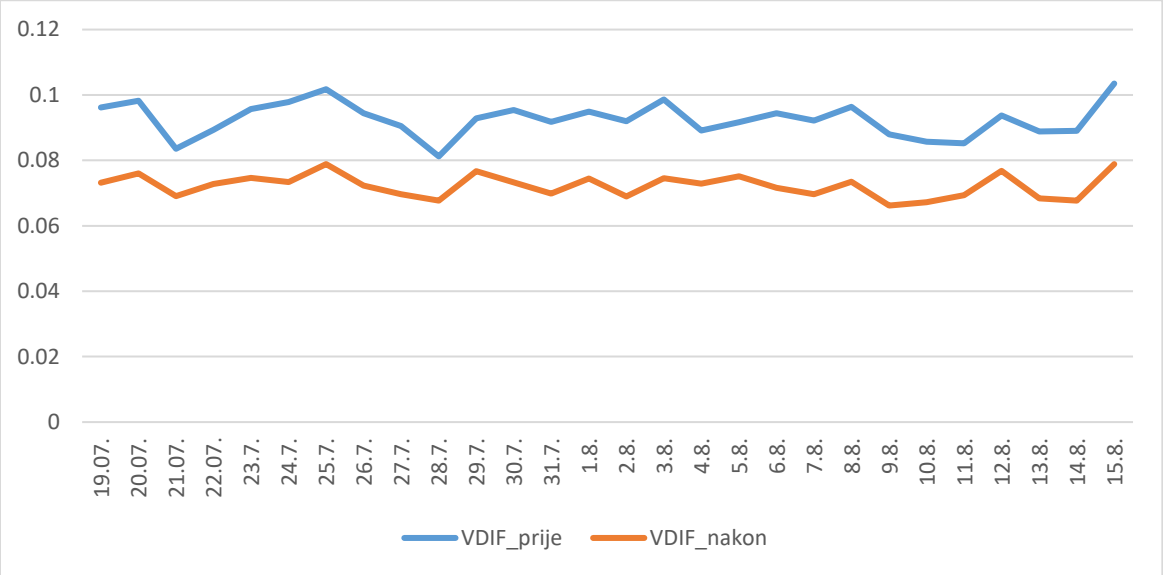
Graf 18: Prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora Belgije

Iz grafa je vidljivo da je došlo do smanjenja vrijednosti prilagođene gustoće svih dana unutar AIRAC ciklusa. Vjerojatni uzrok ovog smanjenja je raspršenje prometa unutar volumena prostora, i povećanje broja sati leta kao i u prijašnjim zračnim prostorima.

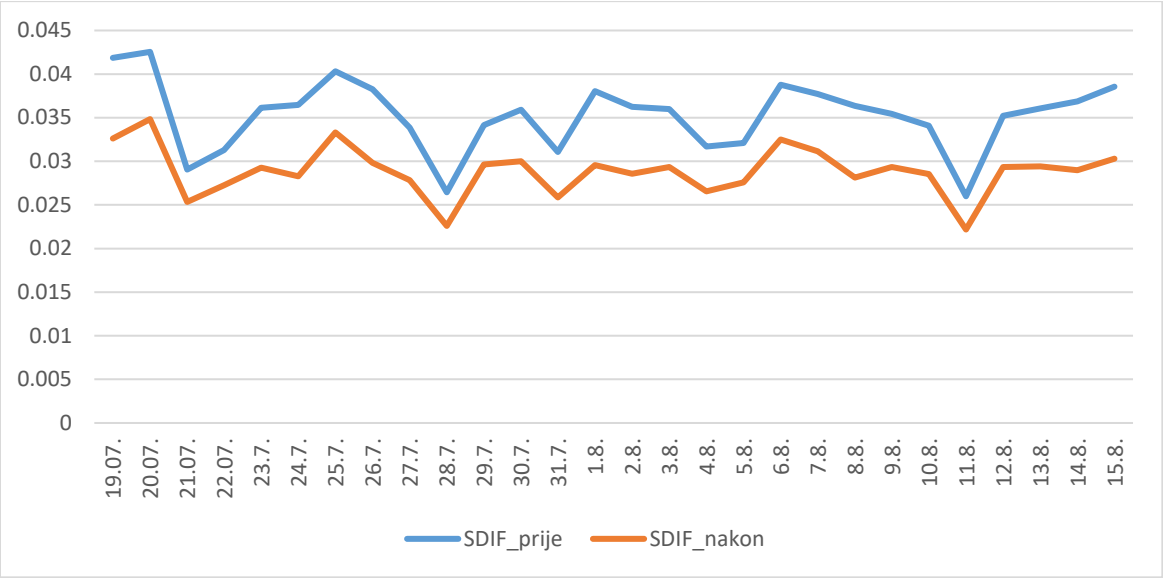
Na grafovima 19. 20 i 21 su prikazani indikatori horizontalnih interakcija, vertikalnih interakcija i interakcija brzine za gornji zračni prostor Belgije.



Graf 19: Indikator horizontalnih interakcija gornjeg zračnog prostora Belgije



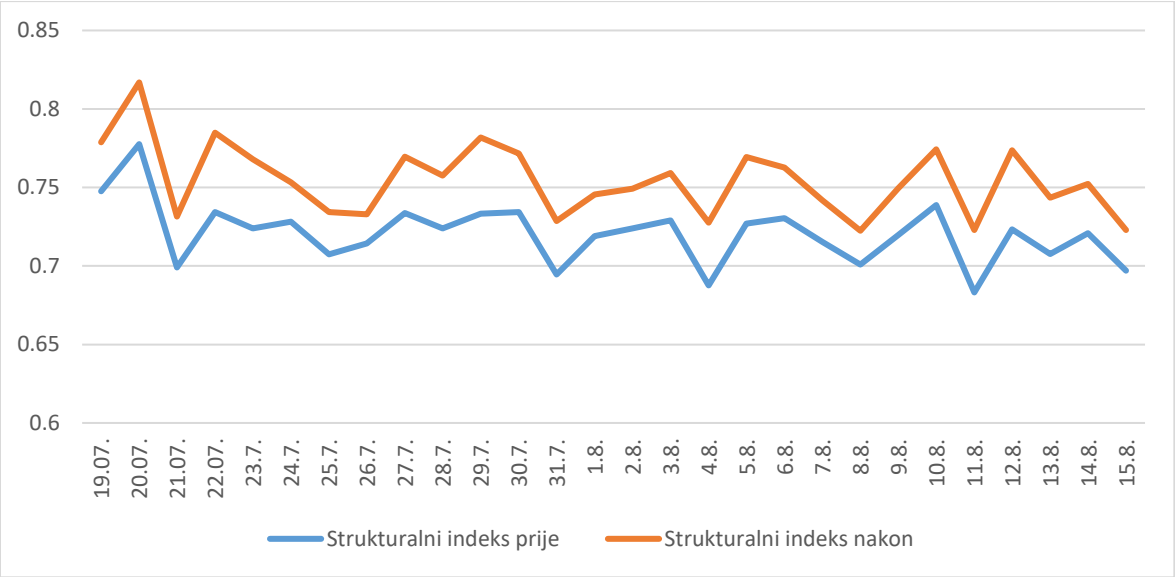
Graf 20: Indikator vertikalnih interakcija gornjeg zračnog prostora Belgije



Graf 21: Indikator interakcija brzine gornjeg zračnog prostora Belgije

U usporedbi sa prijašnjim zračnim prostorima unutar gornjeg zračnog prostora Belgije iznos horizontalnih interakcija je manji, dok je iznos vertikalnih interakcija drastično veći. Najveći utjecaj na prilagođenu gustoću imaju horizontalne i vertikalne interakcije, a najmanji interakcije brzine. Došlo je do općenitog smanjenja svih interakcija nakon uvođenja prostora slobodnih ruta.

Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora Belgije je prikazan na grafu 22.



Graf 22: Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora Belgije

Uvođenjem prostora slobodnih ruta došlo je povećanja strukturalnog indeksa gornjeg zračnog prostora Belgije. Kao i u prijašnjim zračim prostorima ovo je

uzrokovano povećanjem broja prometnih tokova u ovom zračnom prostoru. U usporedbi s prijašnjim prostorima strukturalni indeks ima manji utjecaj na konačni rezultat kompleksnosti.

U konačnici može se zaključiti da je uvođenje prostora slobodnih ruta dovelo do općenitog smanjenja kompleksnosti zračnih prostora.

7. Zaključak

Sve veći i veći porast potražnje zračnog prometa u današnje vrijeme dovodi do zagušenja zračnih prostora, preopterećenja kontrolora zračnog prometa, povećanja kompleksnosti i velikih povećanja kašnjenja zrakoplova. Neki od uzroka pojave zagušenja brojnih zračnih prostora su zastarjele mreže ruta i velika rascjepkanost zračnog prostora. Cilj inicijative jedinstveno europsko nebo je razviti sustave koji će olakšati rješavanje kompleksnih prometnih situacija i povećati produktivnost kontrole zračnog prometa.

Provođenjem simulacija unutar programskog alata NEST uspoređen je promet ljetnog perioda 2018. godine prije uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih sa prostorom nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta. U prosjeku je promet kroz gornji zračni prostor Maastrichta povećan za 0.42% tijekom ovog vremenskog perioda. Uvođenje cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta imalo je pozitivan utjecaj na smanjenje opterećenosti prometnih tokova i zagušenost prometa. Ovom smanjenju doprinosi ukidanje ulazno izlaznih točaka na graničnim područjima unutar prostora, što omogućuje veću raspršenost prometnih tokova.

Uvođenje cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta također je imalo utjecaj na kompleksnost. Pri promatranju kompleksnosti prostora potrebno je uzeti u obzir individualne indikatore. Unutar ove analize promatrani su rezultati kompleksnosti, strukturalni indeks, prilagođena gustoća i interakcije zrakoplova koje mogu biti vertikalne, horizontalne ili interakcije brzine. Rezultati analize pokazuju općenito smanjenje prilagođene gustoće, horizontalnih interakcija i interakcija brzine unutar prostora. Također je zabilježeno povećanje indikatora vertikalnih interakcija i strukturalnog indeksa prostora, međutim ova povećanja nisu dovoljno značajna te je ukupni rezultata kompleksnosti općenito manji od rezultata prije uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta.

Ako strukturalni indeks ne postane ograničavajući faktor gornjeg zračnog prostora Maastrichta, ovo smanjenje ukupnih rezultata kompleksnosti omogućiti će nastavak pružanja efikasnih usluga kontrole zračne plovidbe i uz buduće poraste prometne potražnje. Najveću korist implementacije prostora slobodnih ruta imati će operatori zrakoplova koji će korištenjem direktnih ruta moći bolje planirati rute kroz ovaj prostor, i time smanjiti operativne troškove.

Literatura

[1] European Commission, Directorate-General for Energy and Transport, Single European Sky: Report of the high-level group, 2000

[2] https://www.skybrary.aero/index.php/Single_European_Sky_(SES) (veljača 2020.)

[3]https://www.skybrary.aero/index.php/First_Report_on_the_Implementation_of_Single_Sky_Legislation (veljača 2020.)

[4] https://www.skybrary.aero/index.php/Single_European_Sky_(SES)_II (veljača 2020.)

[5] https://ec.europa.eu/transport/modes/air/single-european-sky/functional-airspace-blocks-fabs_en (veljača 2020.)

[6] https://www.skybrary.aero/index.php/SESAR (veljača 2020.)

[7] https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace (veljača 2020.)

[8] EUROCONTROL, Free Route Airspace developments, For a route.free European network, 2016

[9] Juričić, B.: Upravljanje kapacitetom i protokom zračnog prometa – autorizirana predavanja, 2019

[10] EUROCONTROL, European Network Operations Plan 2019-2024, 2019

[11] https://www.eurocontrol.int/info/about-our-maastricht-upper-area-control-centre (veljača 2020.)

[12] EUROCONTROL, LSSIP 2018 EURO-MAASTRICHT Local Single Sky ImPlementation, Level 1 Implementation Overview, 2018

[13] Aeronautical Information Publication Belgium and Luxembourg, Skeyes, 2019.

[14] https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/lssip2018_l1_belgium_released.pdf (veljača 2020.)

[15] https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/lssip2018_muac_release.pdf (veljača 2020.)

[16] https://www.eurocontrol.int/model/network-strategic-modelling-tool (veljača 2020.)

[17] https://xb.ivao.aero/blog/muac-free-route-airspace (veljača 2020.)

[18] Report commissioned by the Performance Review Commission, Complexity Metrics for ANSP Benchmarking Analysis, Prepared by the ACE Working Group on Complexity, travanj 2006, EUROCONTROL

[19] NEST User Guide, 2017, EUROCONTROL

[20] European ATM Master Plan, 2020, SESAR Joint Undertaking

Popis slika

Slika 1: Europski FAB-ovi [5] 6
Slika 2: Implementacija FRA u Europi do kraja 2019. godine [10] 10
Slika 3: Implementacija FRA u Europi do kraja 2024. godine [10] 11
Slika 4: MUAC gornji zračni prostor [12] 13
Slika 5: Gornji zračni prostor Belgije [14] 15
Slika 6: Godišnji IFR promet gornjeg zračnog prostora Maastrichta [15] 16
Slika 7: Prosječni broj letova i kašnjenja za gornji zračni prosto Masstrichta [15] 17
Slika 8: Faze uvođenja FRA u gornji zračni prostor Maastrichta 18
Slika 9: Gornji zračni prostor slobodnih ruta Maastrichta 20
Slika 10: Određivanje perioda korištenja prostora slobodnih ruta 21
Slika 11: Izrada referentnog prometnog toka 22
Slika 12: Simulacija putanja 23
Slika 13: Izvoz podataka o putanjama zrakoplova 23
Slika 14: Izrada novog referentnog prometnog toka 24
Slika 15: Usporedba prometnih tokova prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta. 26
Slika 16: Usporedba prometnih tokova na području Nizozemske prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta. 27
Slika 17: Segment toka BUKUT-EVELI prije i nakon uvođenja prostora slobodnih ruta 29
Slika 18: Usporedba prometnih tokova na području Belgije prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta 30
Slika 19: Segment toka KONAN-KOK prije i nakon uvođenja prostora slobodnih ruta 32
Slika 20: Usporedba prometnih tokova na području sjeveroistočne Njemačke prije i nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta. 33
Slika 21: Segment toka NORKU-SONSA prije i nakon uvođenja prostora slobodnih ruta 35
Slika 22: Dimenzije ćelije [18] 40
Slika 23: Interakcije [18] 41
Slika 24: Izračun prilagođene gustoće [18] 43
Slika 25: Izračun vertikalnih interakcija [18] 44

Slika 26: Horizontalne interakcije [18] 45
Slika 27: Izbornik izračuna PRU kompleksnosti 48

Popis tablica

Tablica 1: Sektorizacija gornjeg zračnog prostora Belgije [13] 14
Tablica 2: Sektorizacija gornjeg zračnog prostora Nizozemske [15] 15
Tablica 3: Sektorizacija gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke[15] . 16
Tablica 4: Povećanje prometa unutar gornjeg zračnog prostora Nizozemske..... 28
Tablica 5: Usporedba prometa unutar gornjeg zračnog prostora Belgije..... 31
Tablica 6: Usporedba prometa unutar gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke..... 33
Tablica 7: Indikatori kompleksnosti..... 40
Tablica 8: Broj potencijalnih horizontalnih interakcija 45
Tablica 9: Parametri za izračun PRU kompleksnosti..... 50
Tablica 10: Indikatori kompleksnosti..... 51

Popis grafova

Graf 1: Porast prometa nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta 27
Graf 2: Porast prometa na području Nizozemske nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta 28
Graf 3: Porast prometa na području Belgije nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta 31
Graf 4: Porast prometa na području sjeveroistočne Njemačke nakon uvođenja cjelodnevnih operacija prostora slobodnih ruta 34
Graf 5: Konačni rezultati kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Nizozemske .. 52
Graf 6: Prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora Nizozemske 52
Graf 7: Indikator horizontalnih interakcija 53
Graf 9:Indikator interakcija brzine 54
Graf 10: Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora Nizozemske 54
Graf 11: Konačni rezultati kompleksnosti sjeveroistočne Njemačke 55
Graf 12: Prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke 56
Graf 13: Indikator horizontalnih interakcija za gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke 56
Graf 14: Indikator vertikalnih interakcija za gornji zračni prostor sjeveroistočne Njemačke 57
Graf 16: Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora sjeveroistočne Njemačke. 58
Graf 17: Konačni rezultati kompleksnosti gornjeg zračnog prostora Belgije 59
Graf 18: Prilagođena gustoća gornjeg zračnog prostora Belgije 59
Graf 19: Indikator horizontalnih interakcija gornjeg zračnog prostora Belgije 60
Graf 21: Indikator interakcija brzine gornjeg zračnog prostora Belgije 61
Graf 22: Strukturalni indeks gornjeg zračnog prostora Belgije 61

Popis kratica

ACC – Area Control Center
AIRAC - *Aeronautical Information Regulation And Control*
AIS – Aeronautical Information Service
ANSP- *Air Navigation Service Provider*
ATFCM – Air Traffic Flow and Capacity Managment
ATM- *Air Traffic Managment*
ATS – Air Traffic Services
FAB - -Functional Airspace Block
FIR – Flight Information Region
FL – Flight Level
FRA – Free Route Airspace
GAT – General Air Traffic
ICAO – International Civil Aviation Organization
IFR - *Instrument flight rules*
LSSIP - Local Single Sky ImPlementation
MUAC – Maastricht Upper Area Control Centre
NEST – Network Strategic Tool
NEVAC – Network Estimation and Visualization of ACC Capacity
NMOC – Network Manager Operations Centre
NSA – National Supervisory Authority
OAT – Operational Air Traffic
RAD – Route Availability Document
SAAM – System for traffic Assigment and Analysis at a Macroscopic level
SES- *Single European Sky*
SESAR – Single European Sky ATM Research
UTC – Coordinated Universal Time

Prilog 1:

Datum	Promet prije uvođenja cjelodnevnog FRA	Promet nakon uvođenja cjelodnevnog FRA	Povećanje prometa
19.07.	5393	5407	0.26%
20.07.	5421	5470	0.9%
21.07.	4896	4848	-0.98%
22.07.	5124	5104	-0.39%
23.07	5391	5425	0.63%
24.07.	5194	5249	0.63%
25.07.	5355	5411	1.05%
26.07.	5293	5360	1.27%
27.07.	5289	5357	1.29%
28.07.	4819	4801	-0.37%
29.07.	5084	5100	0.31%
30.07.	5308	5356	0.9%
31.07.	5092	5131	0.77%
01.08.	5299	5343	0.83%
02.08.	5265	5311	0.87%
03.08.	5354	5428	0.13%
04.08.	4907	4876	-0.63%
05.08.	5093	5098	0.09%
06.08.	5279	5348	1.31%
07.08.	5050	5081	0.61%
08.08.	5239	5279	0.76%

09.08.	5006	5044	0.76%
10.08.	5096	5109	0.25%
11.08.	4902	4856	-0.94%
12.08.	5096	5073	-0.55%
13.08.	5225	5241	0.31%
14.08.	5064	5036	-0.56%
15.08.	5283	5289	0.11%

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu diplomskog rada pod naslovom **Utjecaj uvođenja cjelodnevnog FRA u gornjem zračnom prostoru oblasne kontrole zračnog prometa Maastricht na kompleksnost zračnog prometa** na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 24.6.2020

(potpis)