

# Proračun navigacijskih elemenata za let preko polarnih kapa

---

Maljković Žemva, Tara

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*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:119:323479>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-24**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

### **PRORAČUN NAVIGACIJSKIH ELEMENATA ZA LET PREKO POLARNIH KAPA**

### **CALCULATION OF NAVIGATION ELEMENTS FOR FLIGHT OVER THE POLAR CAPS**

Mentor: doc. dc. sc. Petar Andrašić

Studentica: Tara Maljković Žemva

JMBAG: 0135260384

Zagreb, srpanj 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
**ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD**

Zagreb, 5. rujna 2023.

Zavod:

Predmet:

**ZAVRŠNI ZADATAK br.**

Pristupnik: Tara Maljković Žemva

Studij: Aeronautika

Smjer: Civilni pilot

**Zadatak: Proračun navigacijskih elemenata za let preko polarnih kapa**

Opis zadatka:

Navesti i opisati projekcije i tipovi karata u zrakoplovstvu. Definirati princip vođenja navigacije putem mreže. Navesti elemente navigacijske rute preko polarnih kapa. Izvesti proračun primjer rute preko polarnih kapa.

Zadatak uručen pristupniku:

Rok za predaju rada:

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:

---

doc. dc. sc. Petar Andrašić

# PRORAČUN NAVIGACIJSKIH ELEMENATA ZA LET PREKO POLARNIH KAPA

## Sažetak

Temelji zrakoplovne navigacije leže na razvitku kartografskih projekcija. Ovisno o svojim svojstvima, različite projekcije zadovoljavaju raznolike korisničke potrebe. Danas su navigacijski sustavi znatno napredovali, ali ih i dalje sačinjavaju iste osnove. Zrakoplovstvo ima svoj set zahtjeva koji je nužan za točnu i preciznu navigaciju oko Zemlje. Ti se zahtjevi mijenjaju bliže polovima, gdje pouzdanost navigacijskih alata i modernih sustava kreće opadati, i navigacija postaje sve zahtjevnija te se javlja potreba za mitigiranjem problema karakterističnih za ta područja. Navigacija putem mreže sistem je smanjivanja pogrešaka i odstupanja pri polarnoj navigaciji na praktično prihvatljivu razinu. Kroz primjer izračunate polarne rute pokazano je o čemu ovise navigacijski elementi i kako se mijenjaju te kako se nadilaze problemi specifični za tu rutu.

Ključne riječi: *zrakoplovna navigacija; kartografska projekcija; navigacija putem mreže; polarna ruta*

## Summary

The foundations of aviation navigation lie on the development of cartographic projections. Depending on their properties, different projections meet diverse user needs. Today, navigation systems have advanced considerably, but are still constituted of the same basics. Aviation has its own set of requirements that are necessary for accurate and precise navigation around the Earth. These requirements change closer to the poles, where the reliability of navigation tools and modern systems begins to decline, and navigation becomes more and more demanding thus creating a need to mitigate the problems characteristic of these areas. Grid navigation is a system of reducing errors and deviations in polar navigation to a virtually acceptable level. Through the example of the calculated polar route, it is shown what the navigational elements depend on and how they change and how problems specific to that route are overcome.

Key words: *aviation navigation; map projection; grid navigation; polar route*

## SADRŽAJ

1.	Uvod.....	1
2.	Projekcije i tipovi karata u zrakoplovstvu .....	2
2.1.	Karte .....	3
2.2.	Kartografske projekcije .....	4
2.2.1.	Lambertova konformna konusna projekcija .....	6
2.2.2.	Mercatorova uspravna konformna cilindrična projekcija .....	7
2.2.3.	Gauss-Krügerova poprečna projekcija.....	9
2.2.4.	Mercatorova kosa projekcija.....	11
3.	Vođenje navigacije putem mreže (engl. <i>grid navigation</i> ).....	13
3.1.	Varijacija, konvergencija mreže i grivacija .....	16
3.2.	Proračun rute .....	18
3.3.	Polarne rute danas .....	24
4.	Zaključak.....	28
	Popis literature .....	29

# 1. Uvod

Navigacija u zrakoplovstvu je složen proces koji uključuje pažljivo planiranje, modernu tehnologiju i upravljanje zrakoplovom od jedne do druge točke na siguran i učinkovit način. Piloti se oslanjaju na razne alate, poput projekcija, karata i navigacije putem mreže, kako bi osigurali precizno i točno praćenje putanje leta. Različite vrste karata i kartografskih projekcija olakšavaju taj posao. Unatoč danas dobro utabanim putevima generalne, računske i satelitske navigacije, pouzdanost tih metoda opada s povećanjem geografske širine. Kako su se granice zrakoplovstva rapidno širile, javila se potreba za razvitkom tehnike koja bi ostala pouzdana i iznad šezdesete paralele. Prvi polarni letovi sredinom prošlog stoljeća postavili su temelje za navigaciju putem mreže koja je do dan danas ostala relativno nepromijenjena. Navigacija putem mreže trebala je riješiti nekoliko problema karakterističnih za područja u blizini polova, poput konvergencije meridijana i kuta inklinacije. Da bi se ta tehnika pobliže objasnila kroz primjer, odabrana je ruta potrebnih karakteristika. Vrijednosti potrebne za proračune vađene su s javno dostupnih alata specijaliziranih za geografske podatke ili su ručno nacrtane te izmjerene s karte. Načini računanja uzeti su iz objavljenih priručnika za zrakoplovnu navigaciju i postepeno razrađeni kroz ovaj rad. Time je cilj završnog rada objasniti karakteristike različitih kartografskih projekcija, njihovu svrhu i značaj, obraditi osnove zrakoplovne navigacije te na teoretskoj i praktičnoj razini pokazati specifičnosti koncepta polarne navigacije. Kroz drugo poglavlje ovog rada navedene su osnove o kartama i kartografskim projekcijama te su opisane one relevantne za zrakoplovstvo, dok su u trećem poglavlju predstavljeni teorijski temelji navigacije putem mreže na kojima se gradi praktični primjer koji pokazuje prepreke i prednosti takve navigacije.

## 2. Projekcije i tipovi karata u zrakoplovstvu

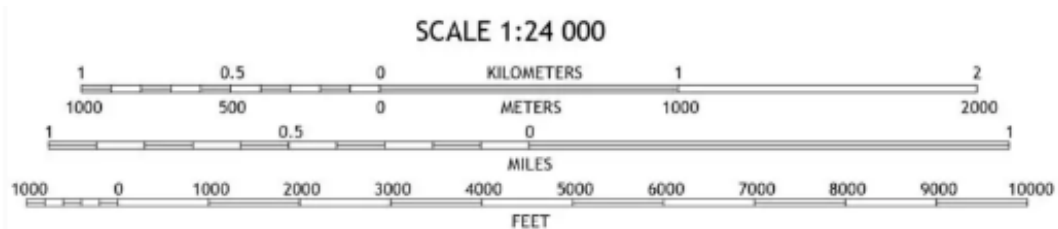
Razvitak zrakoplovne kartografije prati se od njezinih početaka krajem 19. stoljeća. U ranim danima zrakoplovstva piloti su se služili vizualnim orijentirima kako bi pronašli put, no s razvitkom tehnologije, navigacija je postala vrlo složen proces. Topografske karte, koje su se koristile za vizualnu navigaciju, brzo su istisnute specijalnim kartama za navigaciju i vođenje prometa s tla. Prema funkciji, mjerilu i načinu prikazivanja klasificiraju se različite vrste karata. Nakon 1919. razvoj međunarodnog zrakoplovstva nametnuo je potrebu za međunarodnom suradnjom i u kartografiji, u čemu je ICAO (*International Civil Aviation Agency*) odigrao veliku ulogu. Veliki napredak tijekom i nakon Drugog svjetskog rata zahtijevao je preispitivanje postojećih vrsta karata u svrhu prilagodbe i usavršavanja te preispitivanje odnosa između serije svjetskih karata i serije drugih geografskih karata [1]. Danas, moderno zrakoplovstvo se oslanja na kombinaciju radio-navigacijskih sredstava, satelitskih sustava (kao što je *Global positioning system* - GPS) i inercijskih navigacijskih sustava (INS) za određivanje položaja zrakoplova i usmjeravanje duž željene rute.

Kartografija se tako može definirati kao djelatnost koja se bavi prikupljanjem, obradom, pohranjivanjem i upotrebom informacija o prostoru, te posebno njihovim vizualnim i kartografskim prikazom, tj. disciplina koja se bavi zasnivanjem, izradom, promidžbom i proučavanjem karata. Kao ogranak kartografije, teorija kartografskih projekcija proučava načine preslikavanja zakrivljene površine Zemlje (i ostalih nebeskih tijela) na ravninu. Cilj izučavanja kartografskih projekcija je razvijanje matematičke osnove za izradu samih karata i rješavanje teorijskih i praktičnih izazova kartografije, geodezije, geografije, astronomije, navigacije i ostalih srodnih grana znanosti. Matematička osnova karte zasniva se na izabranoj projekciji mreže meridijana i paralela (ili drugih koordinatnih crta), i služi kao osnovna podloga za unošenje ostalog sadržaja[2].

## 2.1. Karte

Karta je prikaz Zemljine površine koji je prilagođen umanjivanjem, generalizacijom, uvjetnim deformiranjem i čiji način prikaza mora biti objašnjen. Geografskom stvarnošću se manipula tako da konačan rezultat prikazuje željene objekte ili svojstva. Prema definiciji *International Cartographic Association (ICA)*, karta je *znakovni model geografske stvarnosti, koja prikazuje odabrane objekte ili svojstva, nastaje stvaralačkim autorskim izborom, a upotrebljava se onda kad su prostorni odnosi od prvorazredne važnosti*[2].

U zrakoplovnoj navigaciji karte imaju veliko značenje i nužne su za pripremu leta, navigacijske proračune i orijentaciju tijekom leta te se danas koriste pretežito u digitalnom obliku. Svaka se karta sastoji od četiri osnovna elementa: mjerilo, projekcija, sadržaj i geografski nazivi. Mjerilo karte je omjer dvaju brojeva koji karakterizira veličine na karti u odnosu na veličine u stvarnosti (*slika 1*). Može se izraziti grafički, razlomkom (1/200 000) ili odnosom (1:200 000), gdje prvi broj označava udaljenost na karti, a drugi broj vrijednost te udaljenosti u prirodi, u ovom slučaju 1 cm = 2 km.



**Slika 1:** Mjerilo karte u grafičkom i brojčanom prikazu, [3]

Zahtjevi koje bi trebala ispuniti zrakoplovna karta jesu: ucrtani svi geografski objekti koji mogu poslužiti u navigaciji, svi objekti jasno naznačeni, mjerilo karte isto u svim njenim dijelovima, svi kutovi na karti točni i jednaki kutovima na Zemlji te da su ortodroma i loksodroma ravne ili približno ravne crte[2]. Takva idealna karta ne postoji jer je preslikavanjem sferne površine na plohu nemoguće postići projekciju koja udovoljava svakom od zahtjeva. Tako su razvijene različite kartografske projekcije da bi svakom neki od kriterija bio zadovoljen, ovisno o tome što korisniku treba.



## 2.2. Kartografske projekcije

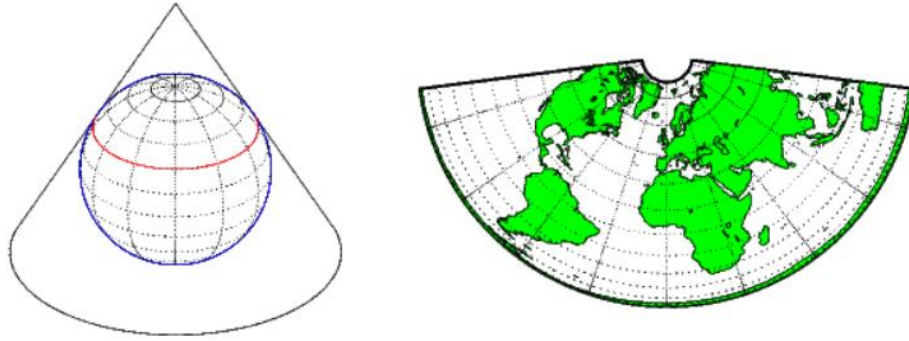
Kartografska projekcija je tehnika prikazivanja trodimenzionalne, zakrivljene površine Zemlje na dvodimenzionalnoj ravnini, poput papira ili ekrana[4]. Budući da Zemlja nije ravna, kartografske projekcije neizbježno unose greške i iskrivljenja u kutove, površine i udaljenosti. Niti jedna projekcija ne može ispuniti sva tri zahtjeva: konformnost (vjernost kutova), ekvivalentnost (vjernost površina) te ekvidistantnost (vjernost udaljenosti). Zato su razvijene različite projekcije koje pojedinačno zadovoljavaju neki od zahtjeva, a odstupanja se u drugim područjima toleriraju te tako ispunjavaju različite korisničke potrebe. Najčešći tipovi kartografskih projekcija jesu cilindrična, konusna i horizontska (azimutna)[5].

Cilindrična projekcija (*slika 2*) podrazumijeva omatanje valjka oko Zemlje (tako da valjak ili tangira Zemljinu površinu ili ju siječe u dvije kružnice), projiciranje mreže meridijana i paralela zajedno sa značajnim točkama sa sfere (Zemlje) te razvlačenje plašta valjka u dvodimenzionalnu ravninu na kojoj meridijani i paralele tvore mrežu paralelnih ravnih linija koje se međusobno sijeku pod pravim kutom. Najpoznatiji primjer cilindrične projekcije jest Mercatorova projekcija.



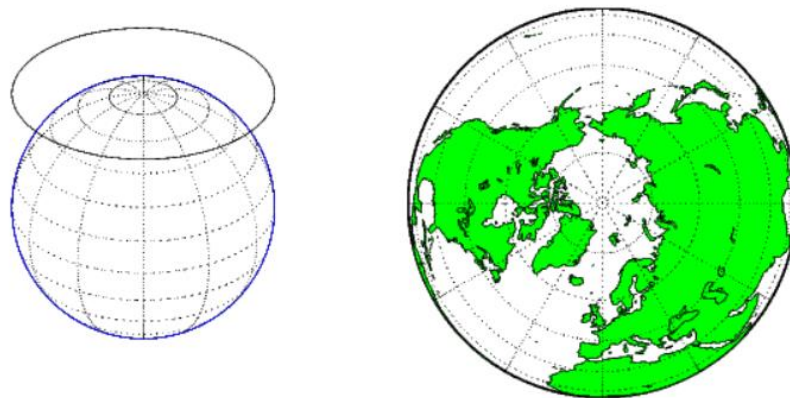
**Slika 2:** Položaj plašta cilindra u odnosu na sferu (*lijevo*) i konačan izgled projekcije (*desno*), [6]

Kod konusne projekcije (*slika 3*), stožac se omotava oko Zemljine površine iznad sjevernog ili južnog pola kao tangenta ili sekanta. Mreža se zatim projicira na plašt stošca koji kada se razvije izgleda kao na slici. Meridijani su ravne linije koji se pod pravim kutom sijeku sa paralelama prikazanim isječcima koncentričnih kružnica. Lambertova konformna konusna projekcija je najpoznatiji primjer konusne projekcije.



**Slika 3:** Položaj plašta stošca u odnosu na sferu (*lijevo*) i konačan izgled projekcije (*desno*), [6]

Horizontske projekcije (*slika 4*) su rezultat projiciranja točaka sa Zemljine sfere na ravnu plohu koja Zemljinu površinu dodiruje u jednoj točki. Ovisno o poziciji te točke horizontska projekcija može biti polarna, meridijan ili kosa projekcija, dok se prema perspektivi točke promatranja razlikuju ortografska, stereografska i centralna projekcija[2].

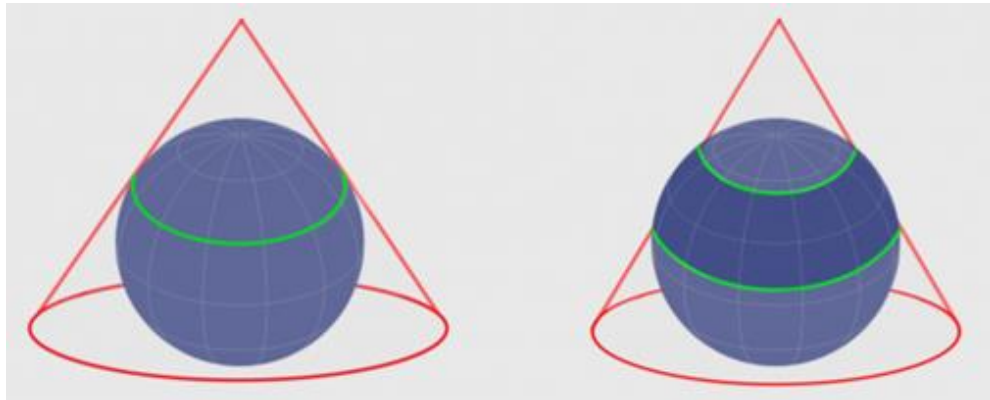


**Slika 4:** Položaj plohe u odnosu na sferu (*lijevo*) i konačan izgled projekcije (*desno*), [6]

U Republici Hrvatskoj se od 1924. za potrebe službene kartografije koriste Gauss-Krügerova (oblik Mercatorove projekcije) i Lambertova konformna konusna projekcija[7].

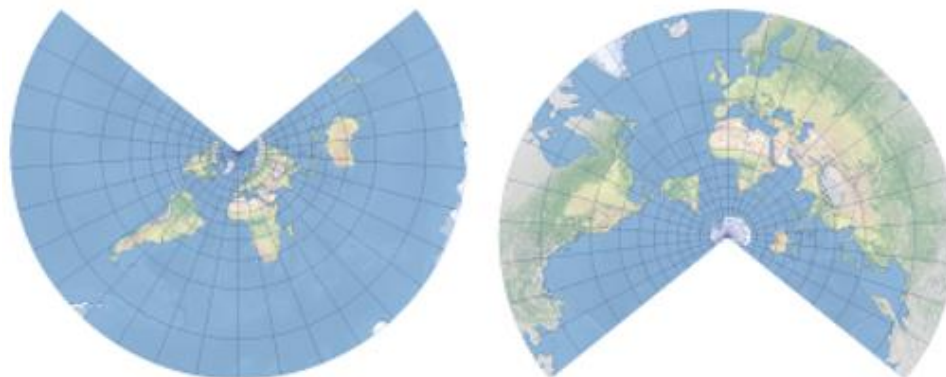
## 2.2.1. Lambertova konformna konusna projekcija

Projekciju je razvio Johann H. Lambert 1772., a u širu uporabu je ušla poslije Prvog svjetskog rata. To je konusna projekcija, što znači da se temelji na prijenosu karakteristika površine Zemlje na plašt stošca, koji Zemljinu sferu može sjeći u jednoj ili dvije kružnice, a vrh mu je najčešće pozicioniran iznad jednog od polova (*slika 5*). Najprikladnija je za konformno prikazivanje kopnenih masa u smjeru pružanja istok – zapad u umjerenim geografskim širinama (SAD, Europa, Australija). Najčešće se uzimaju dvije standardne paralele (stožac siječe sferu u dvije kružnice), ali se također može koristiti jedna standardna paralela s definiranim faktorom koji opisuje promjenu mjerila duž projekcije[8].



**Slika 5:** Pozicija plašta stošca kod Lambertove projekcije kao tangenta (*lijevo*) i sekanta (*desno*), [9]

Lambertova konformna konusna projekcija (*slika 6*) među najprikladnijima je u zrakoplovstvu. Meridijani su jednako razmaknute, ravne crte koje konvergiraju u zajedničku točku izvan gabarita karte (pol bliži standardnoj paraleli) te se s paralelama, koje su prikazane kao nejednako razmaknuti lukovi koncentričnih kružnica, sijeku pod pravim kutom. Udaljenosti, površine i mjerilo su točni duž standardne paralele te se s odmicanjem javljaju sve veća iskrivljenja (ali jednaka po pojedinačnim paralelama). Vjernost kutova je zadržana osim na polovima. Loksodroma je zakrivljena crta konkavna prema polu, a ortodroma je na ishodišnoj paraleli (engl. *parallel of origin*) ravna crta dok je na drugim geografskim širinama konkavna prema ishodišnoj paraleli.



**Slika 6:** Lambertova konformna konusna projekcija sa vrhom stošca iznad sjevernog (*lijevo*) i južnog pola (*desno*), [8]

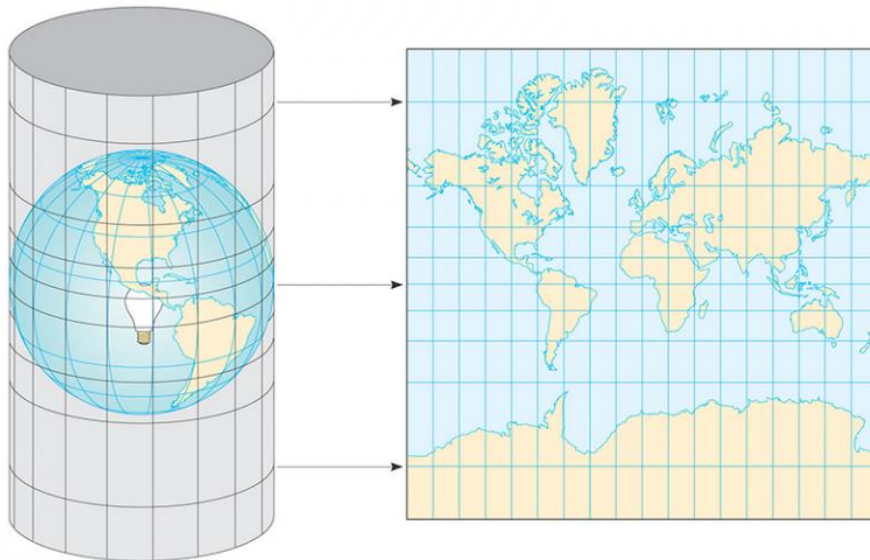
Uz konformnu konusnu, često se koristi i Lambertova azimutna ekvivalentna projekcija, koja zadržava vrijednost površina. Osim za aeronautičke karte, koriste se za regionalne i topografske karte te za geološka i geofizička izučavanja. Lambertove projekcije imaju široku uporabu jer mogu balansirati između različitih svojstava, ovisno je li za neki prikaz potrebna konformnost ili pak ekvivalentnost i sl.

### 2.2.2. Mercatorova uspravna konformna cilindrična projekcija

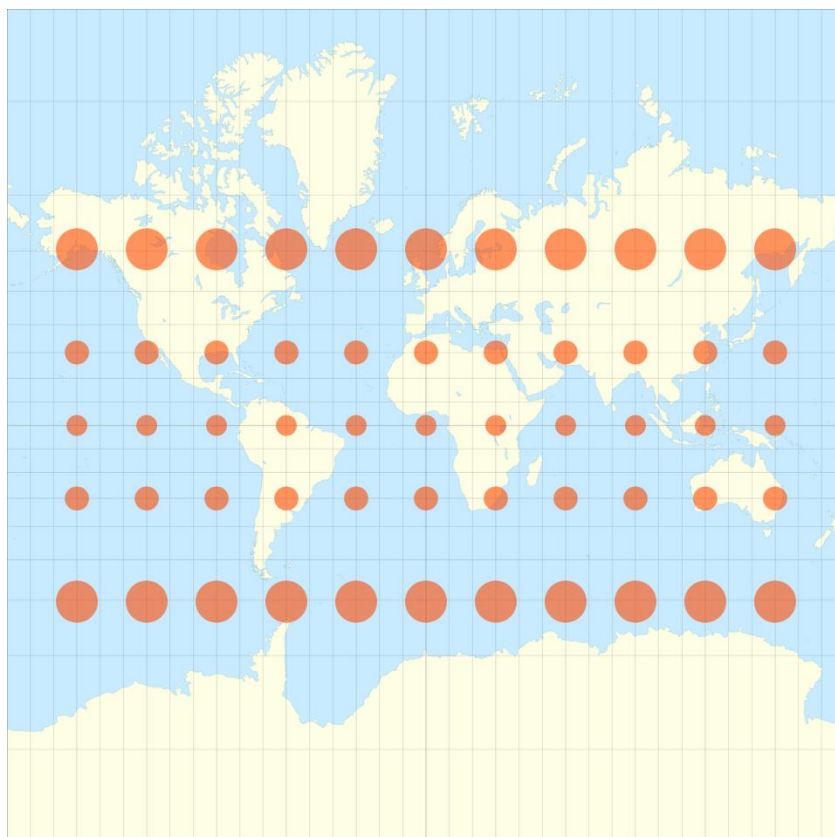
Gerardus Mercator, nizozemski kartograf, razvio je ovu projekciju 1569. godine. Projekcija je neperspektivna, tj. ne zasniva se na izravnom preslikavanju, već na matematičkim modelima i transformacijama poput logaritama, računске matematike i diferencijalne geometrije. Cilj je bio očuvati odnose između kutova, što ovu projekciju čini konformnom[10]. To znači da oblici malih područja na karti ostaju točni, što je čini korisnom za navigaciju. Projekciju karakteriziraju ravne i paralelne linije zemljopisne širine i dužine, što rezultira pravokutnom kartom na kojoj ekvatorijalna područja izgledaju manje iskrivljena u usporedbi s polarnim područjima. Međutim, to dovodi do značajnog izobličenja prema polovima, gdje se značajke čine neproporcionalno uvećanima. Mercatorova projekcija stekla je popularnost zbog svoje korisnosti za pomorsku navigaciju, budući da ravne linije na karti odgovaraju stalnim smjerovima kompasa, pomažući mornarima u održavanju dosljednih smjerova[11]. Unatoč prednostima za navigaciju, svojstva izobličenja projekcije ograničavaju njezinu upotrebu za točan prikaz globalnih podataka, posebno u odnosu na veličinu i područje.

Mercatorova se projekcija dobiva omatanjem plašta valjka oko površine Zemlje te se za standardnu paralelu najčešće uzima ekvator (*slika 7*). Uspravna projekcija znači da se os pomoćne plohe podudara s rotacijskom osi sfere. Razvlačenjem, dobivena karta je pravokutnog oblika, a

mrežu čine jednako razmaknuti meridijani koji su ravne i međusobno paralelne crte te paralele, nejednoliko razmaknute ravne paralelne crte, koje meridijane sijeku pod pravim kutom (*slika 7*). Devedesete paralele na projekciji ne postoje što znači da se polovi ne mogu prikazati. Projekcija je konformna, mjerilo se jednoliko mijenja te je konstantno duž svake paralele i simetričnog trenda promjene s obzirom na ekvator i centralni meridijan tako zadržavajući vjernost kutova. Dodatnim razvlačenjem u smjeru sjever-jug vjernost oblika zadržava se unutar tolerancije. Udaljenosti (tako i površine) su točne samo na ekvatoru. Na slici se vidi da Grenland izgleda veće od Južne Amerike[12]. Na *slici 8* detaljnije se vide posljedice razvlačenja u obliku distorzija. Narančasti krugovi uz ekvator predstavljaju odabranu površinu takvih dimenzija i u stvarnosti ("okruglo jezero") dok krugovi udaljeniji od ekvatora demonstriraju iskrivljenja na toj površini proporcionalna povećanju geografske širine. Ovaj se način prikazivanja iskrivljenja zove Tissotova indikatrisa[14].



**Slika 7:** Položaj plašta valjka u odnosu na Zemlju (*lijevo*) i konačan izgled Mercatorove projekcije (*desno*), [13]

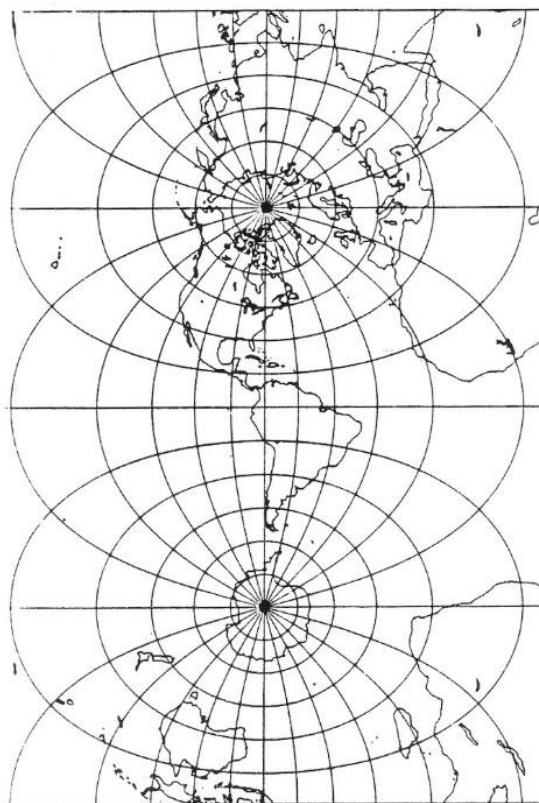


**Slika 8:** Distorzije kod Mercatorove projekcije prikazane pomoću Tissotove indikatriše, [14]

Loksodroma je ravna crta, dok je ortodroma zakrivljena crta konkavna prema ekvatoru. Zbog svojstva da je loksodroma ravna crta, ova se projekcija preporučuje za standardne pomorske navigacijske karte te osim toga za prikazivanje velikih područja u blizini ekvatora.

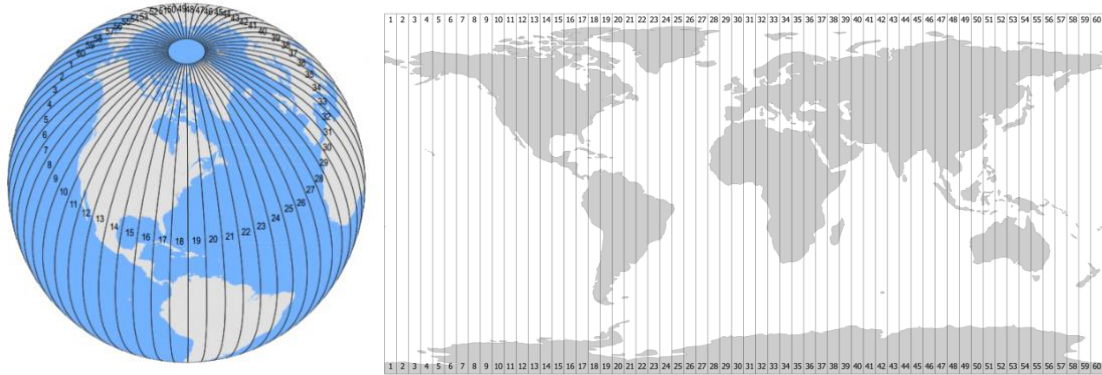
### 2.2.3. Gauss-Krügerova poprečna projekcija

Kao inačica poprečne Mercatorove projekcije (*Transverse Mercator - TM*), Gauss-Krügerova projekcija (*slika 10*) dobiva se dvostrukim preslikavanjem, konformnim preslikavanjem elipsoida na sferu te konformnim preslikavanjem sfere u ravninu[16]. Na toj projekciji središnji meridijan i ekvator su ravne linije s konstantnim faktorom mjerila duž središnjeg meridijana, dok su svi ostali meridijani i paralele složene krivulje[17]. Najčešće se koristi za područja koja nisu pokrivena klasičnom Mercatorovom projekcijom, područja sa izraženim prostiranjem u smjeru sjever-jug, ali kako loksodroma i ortodroma nisu ravne linije za ucrtavanje rute leta nije prikladna[2].



**Slika 10:** Gauss-Krügerova poprečna projekcija, [18]

UTM kvadratna vojna mreža karata (engl. *Universal Transverse Mercator*) kao bazu koristi Mercatorovu poprečnu projekciju. Sačinjava ju 60 zona koje nastanu kada se valjak se rotira oko sfere 60 puta te se tako dobije 60 isječaka poprečne projekcije od kojih svaki ima svoj vlastiti centralni meridijan (*slika 11*). Tako svaka zona ima širinu od  $6^\circ$  i označena je sa brojem od 1 do 60, počevši od  $180^\circ$  geografske dužine[19]. Projekcija ne pokriva područje sjevernije od  $84^\circ\text{N}$  i južnije od  $80^\circ\text{S}$ . Njezina je uporaba danas raširena, a najviše se koristi za izradu vojnih topografskih karta[2].

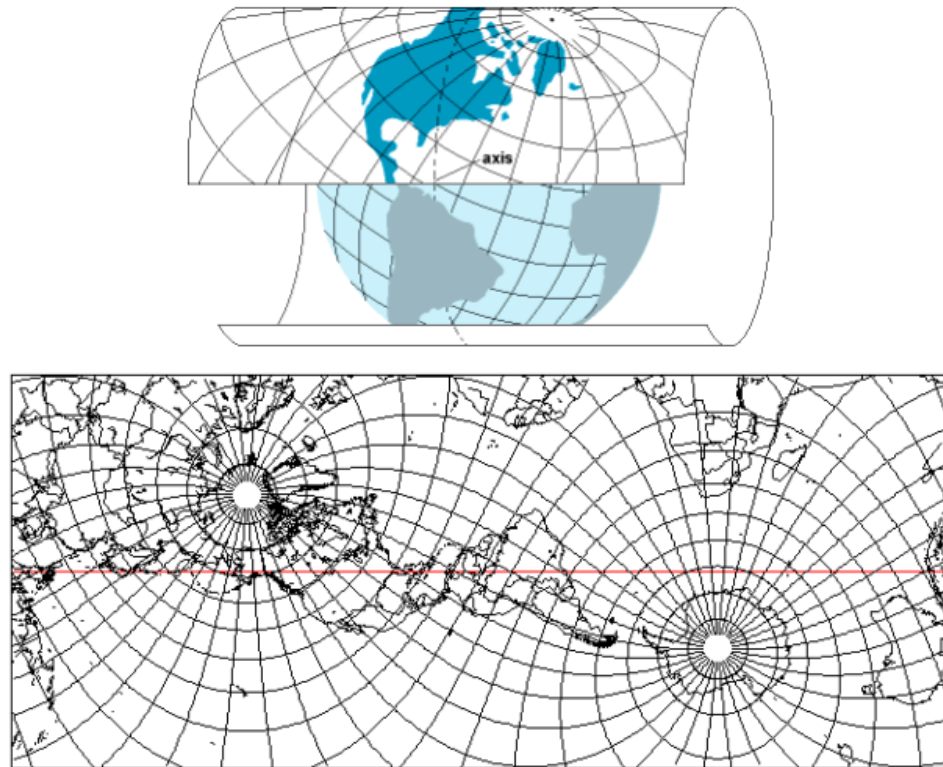


**Slika 11:** Izgled zona (*lijevo*) i izgled projekcije (*desno*), [19]

## 2.2.4. Mercatorova kosa projekcija

Razlika između kose Mercatorove projekcije i one uspravne je u odabiru velike kružnice. Plašt cilindra više ne dodiruje sferu Zemlje u ekvatoru već u proizvoljno odabranoj velikoj kružnici, koja se ne preklapa s mrežom meridijana ili ekvatorom. Općenito, meridijani i paralele projiciraju se kao složene krivulje. Samo dva meridijana, međusobno udaljena točno 180 stupnjeva, mogu se projicirati kao ravne linije koje sijeku polove, dok su oba pola prikazana kao točke unutar projekcije (*slika 9*) [15]. Projekcija se koristi za prikaz područja uzduž izabrane velike kružnice koja npr. spaja dvije točke što se nalaze na većoj udaljenosti. Na uspravnoj Mercatorovoj projekciji crta ortodrome (najkraća udaljenost između dviju točaka) bila bi krivulja koja je konveksna u odnosu na najbliži geografski pol. Primjenom kose projekcije ta crta postaje ravna. Uz to, na kartama konvencionalne Mercatorove projekcije, mjerilo se mijenja s promjenom geografske širine, što na ovoj projekciji nije slučaj, odnosno promjena mjerila po osi x je zanemariva [2]. Izobličenja površina, udaljenosti i mjerila povećavaju se s udaljavanjem od centralne velike kružnice. Dok je ortodroma ravna crta, loksodroma je zakrivljena kompleksna crta, kao i meridijani i paralele, što nije pogodno za korištenje u navigacijske svrhe (osim u pojasu u blizini ortodrome). Karta nije prikladna za radionavigaciju jer se radiovalovi rasprostiru pravocrtno (loksodroma). Kosa Mercatorova projekcija prikladna je za prikazivanje velikih područja ili manjih područja s kosom orijentacijom koja ne slijede pretežito sjever-jug ili istok-zapad.





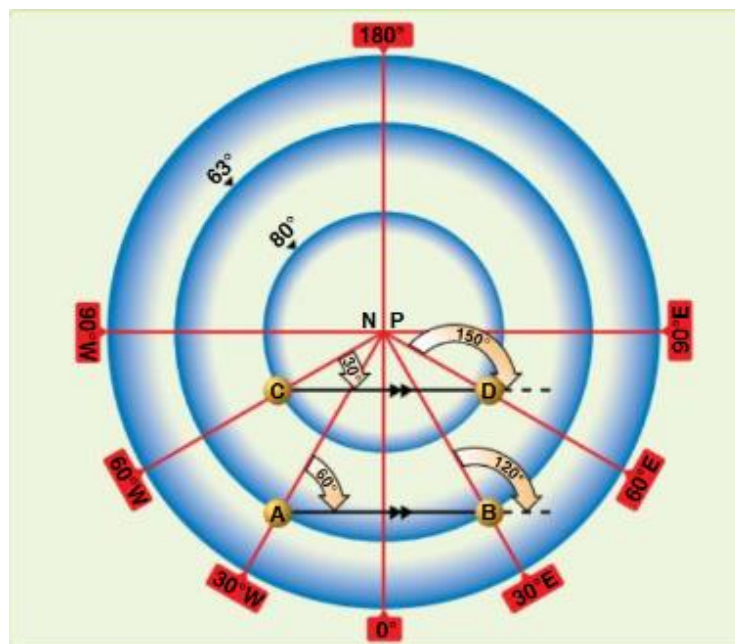
**Slika 9:** Prikaz načina omatanja plašta valjka oko sfere (*gore*) i konačan izgled projekcije (*dolje*), [2]

### 3. Vođenje navigacije putem mreže (engl. *grid navigation*)

Prije pojave Sustava za upravljanje letom (FMS) i pouzdanih sustava za prostornu navigaciju kao što je *Global Positioning System* (GPS), navigacija u polarnim regijama i unutar područja nepouzdanosti magnetskog kompasa bila je komplicirana iz tri glavna razloga:

- a) Konvergencija meridijana – praćenje bilo koje putanje leta (*engl. track*) osim samog sjevera ( $360^\circ$ ) i juga ( $180^\circ$ ) zahtijeva stalnu promjenu pravog pravca leta (*engl. true heading*).

Obilježje konvencionalnog geografskog koordinatnog sustava jest da svi meridijani konvergiraju prema polovima. Svaki pojedini meridijan predstavlja  $1^\circ$  geografske dužine te je poravnan s pravim ili geografskim sjeverom i jugom. Na polarnim kartama,  $1^\circ$  promjene pravog kursa znači jedan prijeđen meridijan te što je zrakoplov bliži polu brže prelazi meridijane. Čak i u pravocrtnom letu duž velike kružnice pravi kurs se može promijeniti nekoliko stupnjeva u kratkom vremenskom periodu te bi trebalo stalno podešavati magnetski pravac leta što za preciznu navigaciju nije prihvatljivo rješenje. Na slici 12 se vidi promjena kursa od  $60^\circ$  između točaka A i B, udaljenijih od pola, te promjena kursa od  $120^\circ$  između točaka C i D, koje su bliže polu[20].



Slika 12: Promjena kursa u ovisnosti o blizini polu, [20]

- b) Kut inklinacije – blizina magnetskih polova znači nagle i velike promjene u varijaciji što magnetske kompase čini nepouzdanima i na kraćim relacijama.

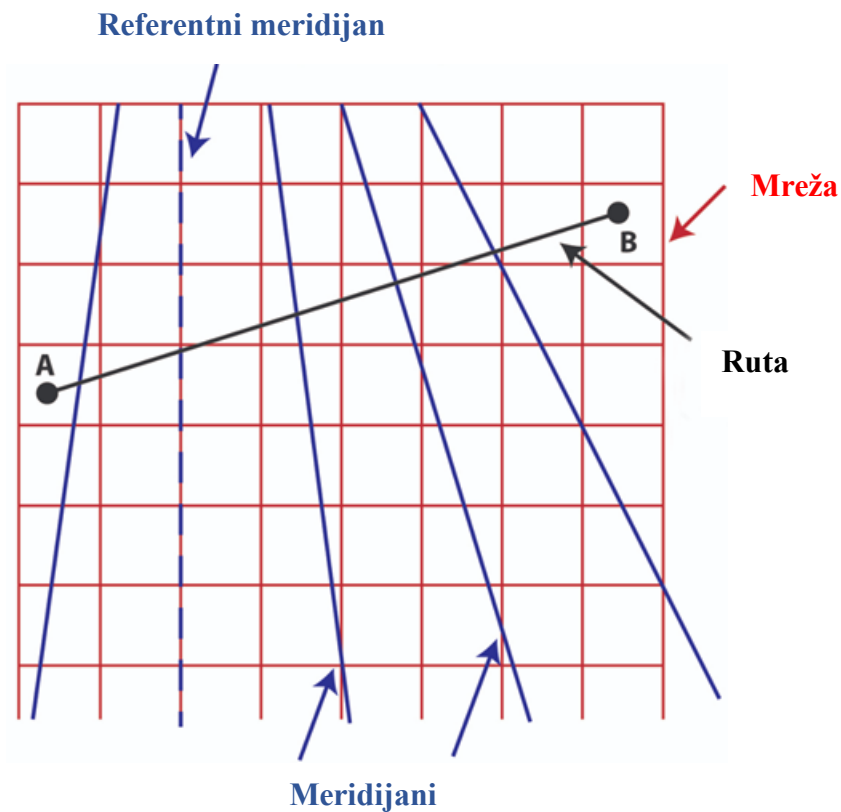
Održavanje točnog pravca leta na velikim geografskim visinama je teško kada se koristi magnetski kompas. Osmišljen tako da se poravnava sa vodoravnom komponentom

Zemljinog magnetskog polja, kompas postaje neuporabljiv bliže polovima zbog svoje reakcije na sve jaču vertikalnu komponentu magnetskog polja (povećan kut inklinacije). Horizontalna komponenta postaje preslaba da bi dala pouzdanu indikaciju smjera, a na to pridodaju česte magnetske oluje koje pomiču silnice polja. Čak i bez ovih uvjeta, sama blizina magnetskom polu bi znatno narušila učinkovitost kompasa. Iako zrakoplov leti stalnim pravcem leta, magnetna se igla opetovano njiše i pokazuje prema polu koji prolazi s desne ili lijeve strane. Ti se nedostaci kompenziraju žiroskopom[20].

c) Zemaljska radionavigacijska sredstva su malobrojna i međusobno daleko razmaknuta.

Kako bi se te prepreke nadišle, navigacija putem mreže razvijena je 1940-ih te je ostala u uporabi sve do kasnog 20. stoljeća. Projekcije koje se najčešće koriste za polarna područja jesu poprečna Mercatorova, stereografska i polarna gnomska te Lambertova konformna za subpolarna područja[20].

Ovaj tip navigacije temelji se na korištenju mreže, najčešće usmjerene paralelno s određenim meridijanom, koja se postavlja na odgovarajuću projekciju željenog područja. Žiroskopski kompas zrakoplova je usklađen s ovom mrežom, bilo na zemlji ili tijekom leta, i prema potrebi se korigira za promjenu zemljopisne dužine i žiroskopske precesije. Iako se može koristiti bilo koja linija geografske dužine, početni (ili nulti) meridijan najčešće se koristi kao referentni (ili datumski) meridijan. Ta pravokutna mreža se sastoji od međusobno paralelnih i okomitih linija te iako su njezini meridijani poravnati sa *grid north* (GN) oni ne konvergiraju prema njemu, što rješava problem konvergencije meridijana. Na slici 13 plave strelice indiciraju meridijane, dok isprekidana plava linija predstavlja referentni meridijan. Crvena strelica pokazuje mrežu te crna zamišljenu rutu koja leži na velikoj kružnici. Na slici se vidi da ruta od A do B svaki meridijan siječe pod drugim kutom. Međutim, taj isječak ortodrome siječe svaku liniju mreže (*grid meridijane*) pod istim kutom što znači da je, ako je žiroskopski kompas usklađen sa mrežom i *grid north*, pravac leta za održavanje željene putanje leta konstantan (u uvjetima bez vjetra)[21].



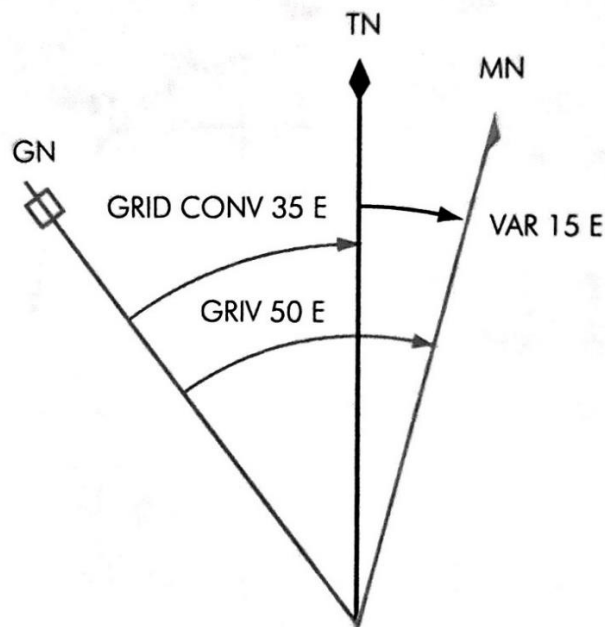
**Slika 13:** Položaj mreže (*crvena*) u odnosu na meridijane (*plava*) i prikaz isječka velike kružnice (*crna*)

Izvor: [21]

Mrežna navigacija je također korištena na srednjim geografskim širinama i opet je omogućila da se leti velikom kružnicom u stalnom smjeru. Na srednjim geografskim širinama, rešetka bi bila usmjerena onako kako najbolje odgovara projekciji karte (najčešće Lambertova konformna) i orijentaciji planirane rute. U ovom slučaju, mreža nije nužno bila poravnata s bilo kojim određenim meridijanom.

### 3.1. Varijacija, konvergencija mreže i grivacija

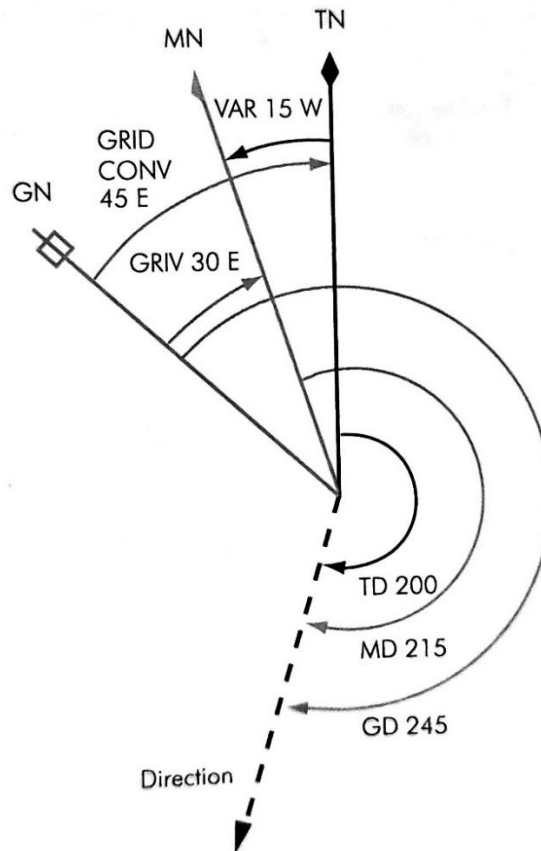
Sa varijacijom (V), konvergencijom mreže (C) i grivacijom (G) se opisuju odnosi između pravog ili geografskog sjevera (TN), sjevera mreže (GN) i magnetskog sjevera (MN). Varijacija je vrijednost koja označava kut između pravog i magnetskog sjevera, gdje se zapadna varijacija zapisuje s pozitivnim predznakom (magnetski sjever zapadno od pravog), a istočna s negativnim (magnetski leži istočno od pravog sjevera). Konvergencija mreže je kut između sjevera mreže i pravog sjevera, odnosno leži li pravi sjever istočno ili zapadno u odnosi na sjever mreže. Istočna se konvergencija zapisuje s pozitivnim predznakom, a zapadna s negativnim. Grivacija označava razliku između sjevera mreže i magnetskog sjevera, odnosno zbroj varijacije i konvergencije, te opisuje za koliko stupnjeva istočno ili zapadno magnetski sjever leži od sjevera mreže. Istočna se grivacija zapisuje kao pozitivna, a zapadna kao negativna. Vrijednosti ovih veličina ovise o geografskom položaju i mreži, a primjer njihovih međuodnosa vidi se na slici 14[22]. U primjeru sa slike dana je istočna konvergencija od 35° te istočna varijacija od 15°. S tim danim podacima grivacija se izračuna jednostavno kao zbroj te dvije vrijednosti, jer obje vrijednosti imaju isti otklon, te uz rezultat 50° stoji oznaka za istok jer su i konvergencija i varijacija istočne.



$$\begin{aligned} \text{GRIV} &= \text{VAR} + \text{GRID CONV} \\ \text{GRIV} &= +15^\circ + 35^\circ = +50^\circ \\ \text{GRIV} &= 50 \text{ E} \end{aligned}$$

Slika 14: Primjer istočne varijacije, konvergencije mreže i grivacije, [22]

Ovisno koji se smjer sjevera odabere kao referentan, to diktira vrijednost smjera. Pravi se smjer (TD) mjeri u odnosu na pravi sjever, magnetski (MD) u odnosu na magnetski te mrežni smjer (GD) u odnosu na sjever mreže. Sve se veličine mjere u smjeru kazaljke na satu. Vrijednost nekog odabranog smjera u ovisnosti o referentnom sjeveru vidi se na *slici 15*. U primjeru je odabran pravi smjer od  $200^\circ$  (isprekidana crta) i dano je  $45^\circ$  istočne konvergencije te  $15^\circ$  zapadne varijacije. Izračunata kao u prethodnom primjeru, grivacija je  $30^\circ\text{E}$ . Kada su te vrijednosti definirane, pojedini smjerovi se računaju u odnos na odgovarajući sjever, Jednake korekcije koje se primjenjuju na sjevere, primjenjuju se i na smjerove: razlika između pravog smjera i magnetskog smjera jest varijacija što daje MD od  $215^\circ$ , dok je razlika između magnetskog i mrežnog sjevera grivacija, dajući GD od  $245^\circ$ .



**Slika 15:** Pravi, magnetski i mrežni smjer, [22]

### 3.2. Proračun rute

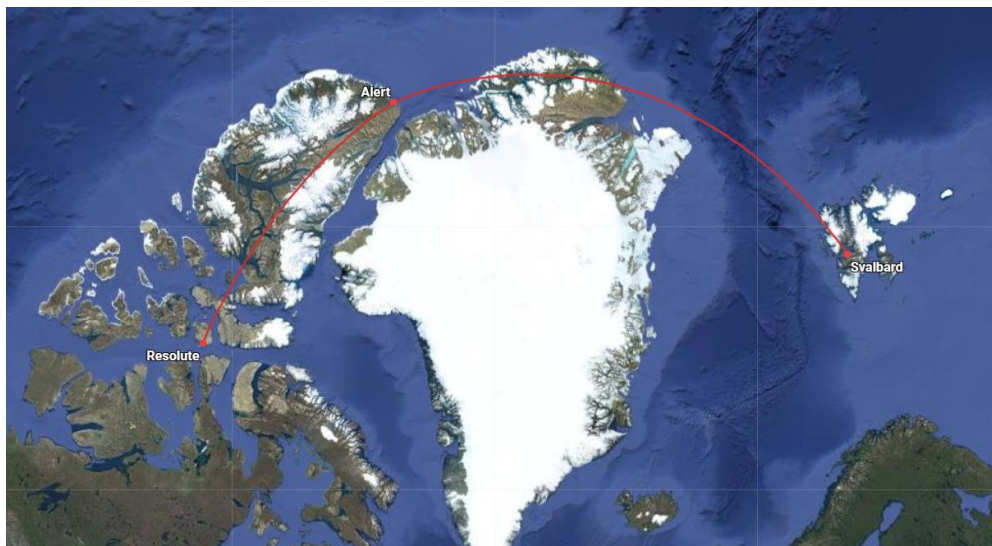
Odabrana je ruta u dvije etape. Prva etapa započinje na svalbardskom aerodromu (ENSB) smještenom na  $78.246^{\circ}\text{N}$  i  $015.466^{\circ}\text{E}$  te završava na aerodromu Alert (CYLT) smještenom na  $82.518^{\circ}\text{N}$  i  $062.281^{\circ}\text{W}$ . Druga etapa nastavlja s aerodroma Alert te završava u Resolute Bayju (CYRB) smještenom na  $74.717^{\circ}\text{N}$  i  $094.969^{\circ}\text{W}$ [23]. Svaki od aerodroma je iznad 70. paralele te su tako odabrani iz demonstrativnih razloga kako bi se naglasila obilježja polarne navigacije. Dvije etape rute su određene da bi se oslikala promjena smjera duž rute, ali i iz potencijalnih praktičnih razloga poput ponovnog točenja goriva. Na *slici 16* ruta je prikazana na globusu.



**Slika 16:** Svalbard-Alert-Resolute prikaz na globusu

Izvor: [24]

Na *slici 17* je prikaz rute na Mercatorovoj projekciji. Također se vidi da je ortodroma u stvarnosti ravna crta, dok je na Mercatorovoj projekciji zakrivljena te se ne čini kao najkraći put između dvije točke.



**Slika 17:** Svalbard-Alert-Resolute prikaz na Mercatorovoj projekciji

Izvor: [24]

Ruta je ucrtana na Lambertovu azimutnu projekciju te je preko projekcije doctana zamišljena mreža s označenim smjerom sjevera mreže (GN) te nultim meridijanom kao referentnim meridijanom (*slika 18*). Gustoća iscrtanih linija mreže je demonstrativna i prilagođena potrebama računanja. Početne i krajnje točke rute označene su crvenim kružićima, putanja leta tamnoplavom crtom, smjer sjevera mreže crnim crtama te smjer pravog sjevera (TN) isprekidanim zelenim crtama. Prvu etapu na osam jednakih dijelova dijeli sedam kontrolnih točaka označenih crvenim točkama, a druga je na jednake dijelove podijeljena s tri kontrolne točke. Za odabir putnih točaka se predlaže podjela svakih  $5^{\circ}$  do  $10^{\circ}$  geografske dužine ili međusobna udaljenost manja od udaljenosti koja se prođe za sat vremena putovanja[25]. Razlika u geografskoj širini između odabranih točaka varira između  $5^{\circ}$  i  $13^{\circ}$  dok je udaljenost između točaka prve etape 93 NM, a druge 147 NM što je znatno ispod sat vremena putovanja na brzini krstarenja za prosječni komercijalni zrakoplov. Također, gušći raspored točaka znači veću preciznost u izračunu.

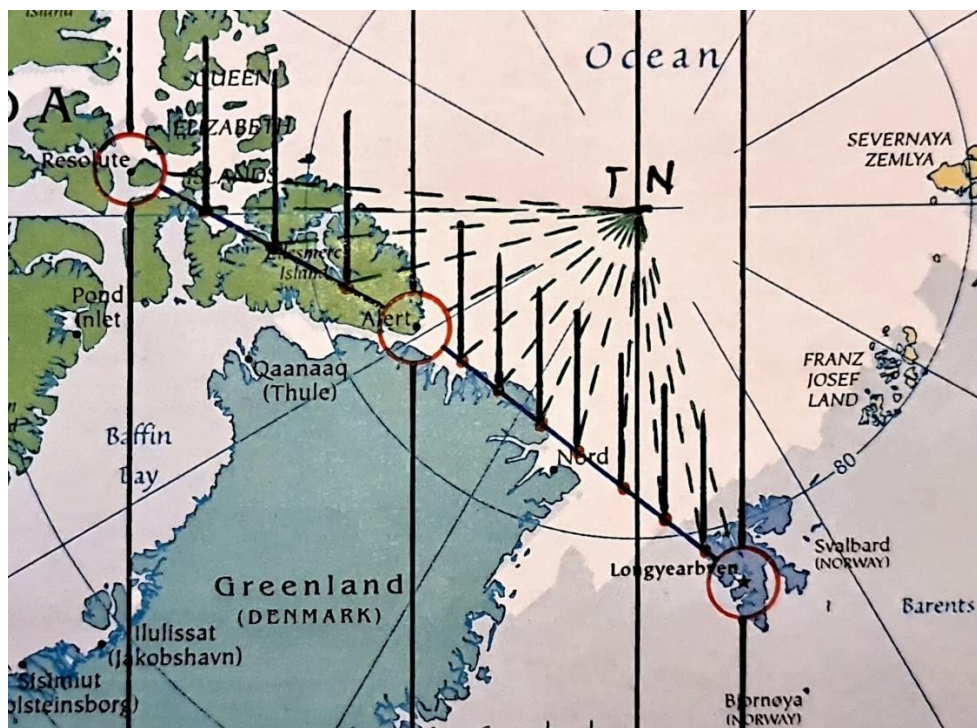




Slika 18: Planirana ruta ENSB-CYLT-CYRB na karti s ucrtanom mrežom

Izvor: [26]

Na slici 19 poblize se vidi ruta s kontrolnim točkama. Iz polazišnih i odredišnih točaka te iz svake kontrolne točke povučene su crte u smjeru sjevera mreže (kontinuirane, crne) i crte u smjeru pravog sjevera (isprekidane, zelene). Kontrolne točke prve etape rute označene su slovima od A do G, a druge etape od H do J.



Slika 19: Točke rute ENSB-CYLT-CYRB u odnosu na sjever mreže i pravi sjever

Izvor: [26]

Prvo je izmjeren kut koji zatvaraju GN i TN u svakoj točki – konvergencija mreže (C). Zatim je u svakoj točki mjeran pravi smjer (TD), kut koji smjer pravog sjevera zatvara s planiranom putanjom leta mjeran u smjeru kazaljke na satu, te su sve izmjerene vrijednosti upisane u *tablicu 1*. Za aerodrom Resolute smjerovi nisu upisani jer je krajnja točka cijele rute.

Tablica 1: Konvergencija, varijacija, grivacija i smjerovi na putnim točkama

	C	V	G	TD	GD	MD
<b>SVALBARD</b>	16W	10E	6W	323	307	313
<b>A</b>	11W	7E	4W	318	307	311
<b>B</b>	5W	2E	3W	312	307	310
<b>C</b>	4E	4W	0	305	309	309
<b>D</b>	14E	11W	3E	293	307	304
<b>E</b>	25E	20W	5E	283	308	303
<b>F</b>	38E	28W	10E	271	309	299
<b>G</b>	50E	39W	11E	260	310	299
<b>ALERT</b>	63E	46W	17E	236	299	282
<b>H</b>	75E	50W	25E	222	297	272
<b>I</b>	85E	46W	39E	214	299	260
<b>J</b>	91E	34W	57E	208	299	242
<b>RESOLUTE</b>	95E	20W	75E	/	/	/

Grivacija (G) se računa zbrajanjem konvergencije (C) i varijacije (V) po formuli (1):

$$\mathbf{G = +/- C +/- V} \quad (1)$$

Mrežni se smjer (GD) dobiva dodavanjem konvergencije (C) na pravi smjer (TD) po formuli (2):

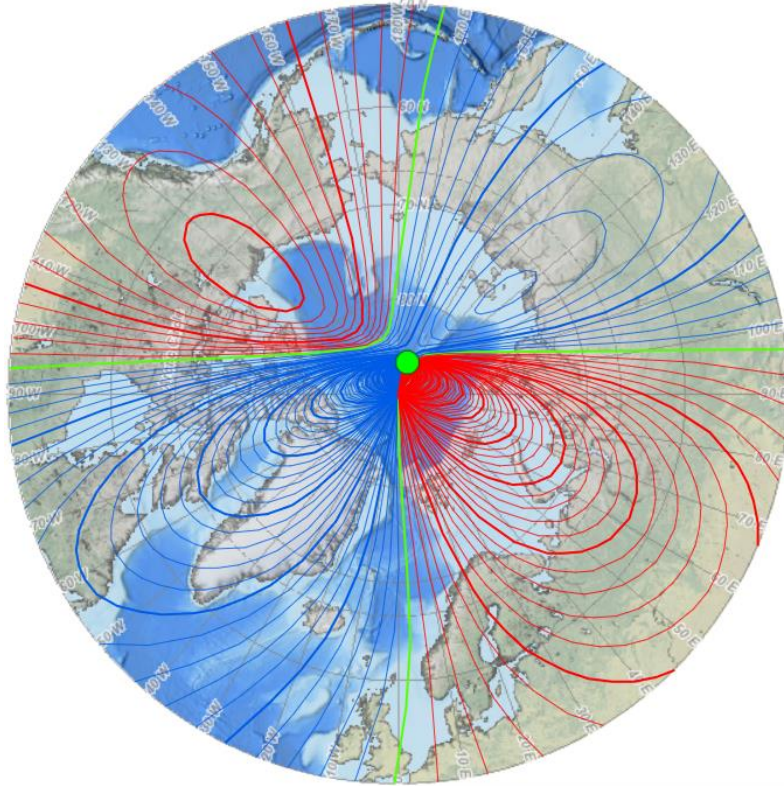
$$\mathbf{GD = TD +/- C} \quad (2)$$

Magnetski smjer se može dobiti dodavanjem varijacije (V) na pravi smjer (TD) (3) ili dodavanjem grivacije (G) na mrežni smjer (GD) (4):

$$\mathbf{MD = TD +/- V} \quad (3)$$

$$\mathbf{MD = GD +/- G} \quad (4)$$

Podatci o varijaciji preuzeti su s karte s ucrtanim linijama jednake magnetske varijacije (izogone) za polarno područje (*slika 19*)[27]. Izogone sa istočnom varijacijom prikazane su crvenom bojom, a one sa zapadnom plavom bojom. Zelenom crtom prikazane su agone, crte koje povezuju mjesta na kojima je varijacija nula.



**Slika 19:** Izogone i agone na sjevernoj polutki, [27]

Iz *tablice 1* se vidi da su vrijednosti konvergencije, varijacije i grivacije manje što je točka bliža nultom (datumskom) meridijanu. Udaljavanjem od datumskog meridijana konvergencija nastavlja rasti dok se varijacija ponovno kreće smanjivati što je točka bliža idućoj agoni. Takav međuodnos znači da i vrijednost grivacije raste s udaljavanjem od datumskog meridijana, unatoč blagoj stagnaciji u povećanju pri maksimalnim vrijednostima varijacije. Također je evidentno da su idealne putanje one koje se pružaju u smjeru sjever-jug ili obrnuto jer konvergencija postaje nula, mrežni i pravi sjever se izjednačavaju te grivacija postaje jednaka varijaciji, a magnetski smjer je jedina vrijednost koja se treba izračunati. Kod pravog smjera primjećuje se razlika od  $63^\circ$  između početnog smjera od  $323^\circ$  i završnog od  $260^\circ$  za prvu etapu te razlika od  $28^\circ$  za drugu što je vrlo nepraktično za navigaciju. U stupcu magnetskog smjera vidi se da on najviše ovisi o varijaciji. U području manje varijacije (prva etapa), oscilacije u magnetskom smjeru su znatno manje nego one u području veće varijacije (druga etapa). Unatoč velikim promjenama u vrijednostima konvergencije, varijacije i grivacije, izračunati mrežni smjer ostaje približno isti uz manja odstupanja radi mjerenja. Sa izračunatim GB, uprosječene vrijednosti nam daju smjer leta  $308^\circ$  za prvu etapu i  $299^\circ$  za drugu s kompasom poravnatim na sjever mreže.

### 3.3. Polarne rute danas

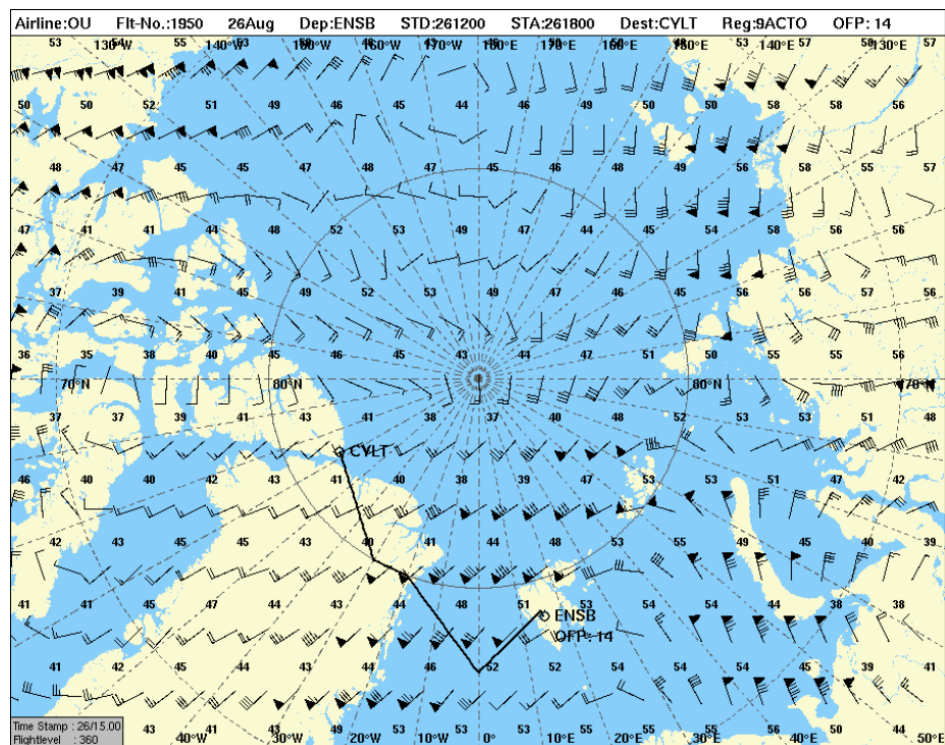
Plan leta svojevrsni je "ugovor" između kontrole leta i posade te predstavlja najvažniji dokument u planiranju letenja. Mora sadržavati sve bitne pojedinosti o letu, poput aerodroma polaska i dolaska, vremena, planirane putne točke, visinu, brzinu i podatke o zrakoplovu koji vrši let, od tipa i registracije do navigacijske opreme, te dodatne napomene. Za obje etape rute Svalbard-Alert-Resolute dan je primjer plana leta popraćen sa prikazom etape na karti radi vizualizacije. Parametri leta koji se pobliže proučavaju su putne točke te brzina i visina leta, kako bi se iz uobičajenih karakteristika istaknule one specifične za polarne rute i prikazali izazovi modernog planiranja letenja.

Za let u konkretnom primjeru odabran je zrakoplov Airbus A320 iz flote Croatia Airlinesa (CA). A320 putnički je mlazni zrakoplov koji ima dolet 3300 NM, brzinu krstarenja od Ma 0.78 te maksimalnu visinu leta 39000 ft[28]. Na *slici 20* je plan leta za let od Svalbarda (ENSB) do Alerta (CYLT).

```
FF EUCHZMFP EUCBZMFP
EDDFCTNX
AD BIRDZPZZ BGGLYIYR CZEGZQZX CZNBZZZX
(FPL-CTN1950-IS
-A320/M-SDE2FGIJ1RWY/LB1
-ENSB1200
-M080F320 GOLOL1B GOLOL DCT EXITA/M080F360 DCT 80N020W 80N030W DCT
-CYLT0218
-PBN/B2B3B4B5D1S2 DOF/230826 REG/9ACTO EET/SB4200001 GOLOL0005
BGGL0041 80N020W0124 80N030W0138 CODE/501C25 OPR/CTN PER/C RVR/075
RMK/24 HOUR CONTACT +385 1 6164 522)
```

**Slika 20:** Plan leta za A320 za let ENSB-CYLT, [29]

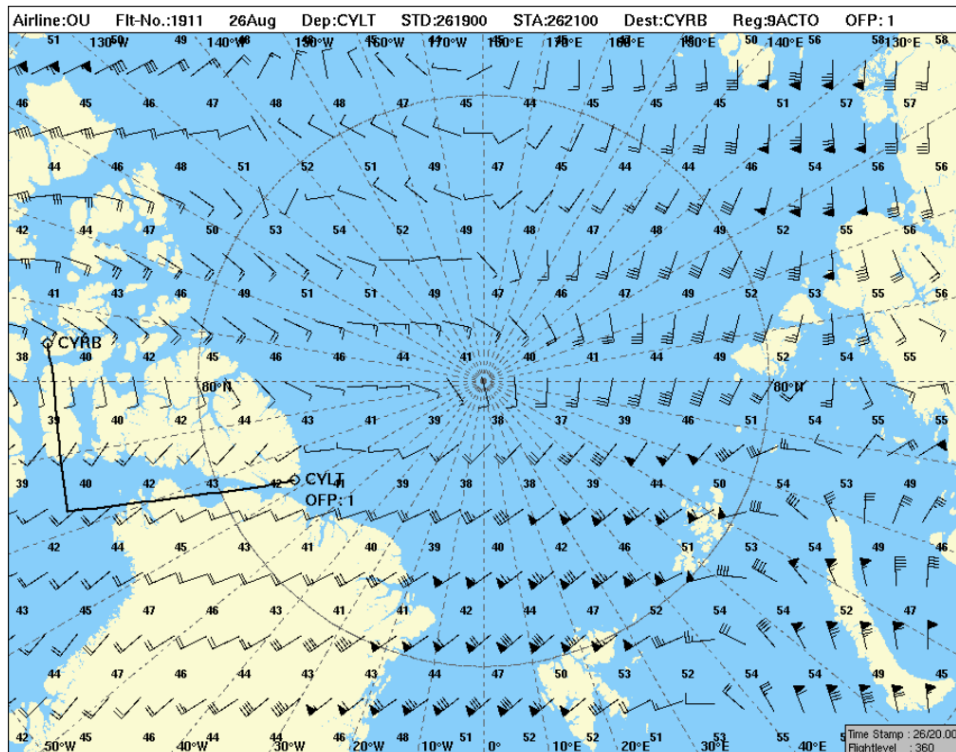
U planu leta su navedene putne točke na ruti, visina i brzina leta, vidljive pod trećom natuknicom naznačenom znakom "-". Zrakoplov će letjeti brzinom Ma 0.8 (M080) na inicijalnoj visini od 32000 ft (FL320) te zatim na visini od 36000 ft (FL360) i to u trajanju od 2 sata i 18 minuta, što je naznačeno sa četiri znamenke zapisane pored kratice odredišnog aerodroma. Razlika od uobičajenog komercijalnog leta vidi se u putnim točkama. Ruta započinje procedurom odlaska (GOLOL1B), kao i svaka druga, te zatim prati nekoliko definiranih poznatih putnih točaka (GOLOL, EXITA). Nakon zadnje poznate točke, daljnje se putne točke definiraju koordinatama (80N020W). Također, zbog nedostatka zračnih puteva u tom području, niti jedan nije mogao biti korišten za rutu te su odnosi između točaka opisani funkcijom engl. *direct* (DCT). Ruta je prikazana na karti s označenim vjetrom na FL360 (*slika 20*).



Slika 21: ENSB-CYLT na karti s vjetrom, [29]

Ono što u prvom redu diktira ovakav neizravan izgled rute jest manjak putnih točaka i definiranih zračnih puteva te potreba za praćenjem procedura za odlazak i dolazak. Nadalje, problem u polarnim područjima predstavlja pokrivenost satelitima i područje kontrole zračne plovidbe (ATC)[30]. U zrakoplovu i dalje postoje sustav za izbjegavanje sudara (*Traffic Collision Avoidance System* - TCAS) i radar, ali budno oko zračne kontrole ima nezamjenjivu ulogu. Malobrojni sateliti pokrivaju polarno područje te zato učinkovitost GPS-a kreće opadati sve bliže polu. Osim toga, u obzir treba uzeti dostupnost alternativnih aerodroma duž rute, ali i na odredištu, koji mogu imati slabije opremljenu infrastrukturu te eventualnu potrebu za dodatnom opremom. Ti faktori zajedno otežavaju planiranje direktnih i sigurnih ruta za jednog komercijalnog avioprijevoznika poput CA.

Druga etapa rute od Alerta (CYLT) do Resolute Bayja (CYRB) također je prikazana na karti s ucrtanom jačinom i smjerom vjetera na FL360 (slika 22). Iz istih razloga, poput nedostatka procedura i točaka, i ovaj dio rute nije direktan.



Slika 22: CYLT-CYRB na karti s vjetrom, [31]

Plan leta za drugu etapu vidljiv je na *slici 23*. Parametri su navedeni pod trećom natuknicom te se iz plana može uočiti da u ovom slučaju, osim zračnih puteva, nisu bile dostupne ni procedure odlaska i dolaska. Ruta je sazdana direktnim povezivanjem poznatih točaka (APSIN, GELBO) i točaka definiranih koordinatama (75N080W). Početna brzina leta je Ma 0.8 (M080), a visina 36000 ft (FL360) dok se u drugom dijelu leta brzina definira kao 476 kt (N0476). Krstarenje tijekom cijelog leta odvija se na istoj visini, a sam let traje 1 sat i 51 minutu, ponovno naznačeno sa četiri znamenke kraj kratice odredišnog aerodroma.

```

FF
      EDDFCTNX
(FPL-CTN1911-IS
-A320/M-SDE2FGIJ1RWY/LB1
-CYLT1900
-M080F360 DCT APSIN DCT GELBO/N0476F360 DCT 75N080W DCT 75N090W DCT
YRB DCT
-CYRB0151
-PBN/B2B3B4B5D1S2 DOF/230826 REG/9ACTO EET/BGGL0017 CZEG0107
GELBO0107 CODE/501C25 OPR/CTN PER/C RVR/075 RMK/24 HOUR CONTACT
+385 1 6164 522)

```

Slika 23: CYRB-CYLT na karti s vjetrom, [31]

Osim horizontalni profil, razni čimbenici određuju i vertikalni profil leta. Posebnost polarnih ruta u ovom kontekstu je količina slobodnog prostora. Nema prenapučenosti zračnog prostora (kao iznad Europe) te iz tog razloga posada ima veću slobodu biranja visine na kojoj će letjeti. Jedino što ostaje kao glavni određujući faktor jest potrošnja goriva i vjetar po visini[30]. Vjetrovi sa porastom visine postaju stalniji i snažniji te tako znatno mogu utjecati na trajanje leta, a potrošnja goriva je jedna od glavnih odrednica indeksa troška, vrijednosti koju kompanije uvijek žele svesti na minimum. Visina na kojoj je potrošnja goriva minimalna se proračunava zajedno sa brzinom te se traži najbolji kompromis između te visine i visine s najpovoljnijim vjetrom.

Nadalje, vrlo niske temperature karakteristične za polarna područja znače bolje performanse u polijetanju, tijekom leta i u slijetanju. Bolje performanse znače bolji rad motora, veći dolet, manju potrošnju, mirniji let itd. Iz tih razloga polarne rute danas nisu samo "divan pogled" već brža, bolja i ugodnija veza između nasuprotnih dijelova svijeta.



## 4. Zaključak

Kroz povijest razvijene su različite tehnike prikazivanja trodimenzionalne sferne površine na plohu sa ciljem što točnijeg prikazivanja geografske stvarnosti. Idealna karta trebala bi očuvati svojstva konformnosti, ekvivalentnosti i ekvidistantnosti, no niti jedna kartografska projekcija ne može osigurati postojanost sva tri svojstva istovremeno. Kompromisna rješenja našla su svoju uporabu i u zrakoplovnoj navigaciji. Na dodatne izazove nailazi se pri pokušaju navigacije polarnim krajevima. Konvergencija meridijana, kut inklinacije i manjak zemaljskih radionavigacijskih sredstava znatno otežavaju praćenje željene putanje leta. Kao odgovor na to, demonstriran je koncept navigacije putem mreže, zamišljenom mrežom paralelnih meridijana i zamišljenim sjeverom te mreže dobiva se fiksna struktura koja pruža novu konstantnu i stacionarnu referencu tijekom leta te na taj način omogućava jednostavniju navigaciju.

Unatoč preprekama koje sa sobom vuče let preko polarnih kapa, poput zahtjevne navigacije, potrebne dodatne opreme, nedostatka alternativnih aerodroma, slabije opremljenih aerodroma te lošije pokrivenosti satelitima i radarom, ipak donosi i značajne prednosti u usporedbi s klasičnim rutama na manjim geografskim širinama. Prostranstva praznog prostora pružaju veću slobodu odabira visine i putanje leta, konstantne i niske temperature osiguravaju bolje performanse, a napretkom tehnologije spajaju se udaljeniji krajevi svijeta sve kraćim vremenom leta.

## Popis literature

- [1] Meine, K. H. *Aviation Cartography*. Taylor&Francis Online, 2013. Preuzeto s: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/caj.1966.3.1.31> [Pristupljeno: 25. srpnja 2023.]
- [2] Novak, D. *Zrakoplovna računska navigacija*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, 2012. Preuzeto s: [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4926868/mod\\_resource/content/0/Zrakoplovna%20ra%C4%8Dunsk a%20navigacija\\_ud%C5%BEbenik.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4926868/mod_resource/content/0/Zrakoplovna%20ra%C4%8Dunsk a%20navigacija_ud%C5%BEbenik.pdf) [Pristupljeno: 25. srpnja 2023.]
- [3] Mavrou, S. *What Are the Three Types of Large Scale Maps?* MapServe, 2022. Preuzeto s: <https://www.mapserve.co.uk/blog/what-are-the-three-types-of-large-scale-maps> [Pristupljeno: 25. srpnja 2023.]
- [4] Borneman, E. *Types of Map Projections*. GEOGRAPHYREALM, 2023. Preuzeto s: <https://www.geographyrealm.com/types-map-projections/> [Pristupljeno: 27. srpnja 2023.]
- [5] ICA, *MAP PROJECTIONS*. Preuzeto s: <http://ica-proj.kartografija.hr/map-projections.en.html> [Pristupljeno: 27. srpnja 2023.]
- [6] MathWorks, *The Three Main Families of Map Projections*. Preuzeto s: <https://www.mathworks.com/help/map/the-three-main-families-of-map-projections.html> [Pristupljeno: 27. srpnja 2023.]
- [7] Tutić, D. *Konformne projekcije za Hrvatsku s najmanjim apsolutnim linearnim deformacijama*. Zagreb: Geod. List, 2010. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/file/94222> [Pristupljeno: 29. srpnja 2023.]
- [8] ArcGis Pro *Lambert conformal conic*. Esri. Preuzeto s: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/properties/lambert-conformal-conic.htm> [Pristupljeno: 31. srpnja 2023.]
- [9] GISGeography, *Conic projection: Lambert, Albers and Polyconic*. 2023. Preuzeto s: <https://gisgeography.com/conic-projection-lambert-albers-polyconic/> [Pristupljeno: 31. srpnja 2023.]
- [10] *The Conformal Mercator Projection*. Sail Away, 2002. Preuzeto s: <http://www.siranah.de/html/sail022d.htm> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]
- [11] Fletcher, S. J. *Mercator Projection*. ScienceDirect, 2023. Preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/mercator-projection> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]
- [12] ArcGis Pro, *Mercator*. Esri. Preuzeto s: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/properties/mercator.htm> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]
- [13] *Chart Projections*. Crawford Nautical School, 2020. Preuzeto s: <https://www.crawfordnautical.com/2018/09/16/chart-projections/> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]

- [14] Harris, J. *All maps are wrong. I cut open a globe to show why*. Vox, 2016. Preuzeto s: <https://www.vox.com/world/2016/12/2/13817712/map-projection-mercator-globe> [Pristupljeno: 2. kolovoza 2023.]
- [15] ArcGis Pro, *Hotine oblique Mercator*. Esri. Preuzeto s: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/properties/hotine-oblique-mercator.htm> [Pristupljeno: 3. kolovoza 2023.]
- [16] Lapaine, M. *Gauss-Krügerova projekcija kao dvostruko preslikavanje*. Geod. list, 2021. Preuzeto s: <https://hrcak.srce.hr/file/379904> [Pristupljeno 3. kolovoza 2023.]
- [17] Deakin, R. E., Hunter, M. N., Karney, C. F. F. *THE GAUSS-KRUEGER PROJECTION*. Melbourne, Maribyrnong, Princeton. Preuzeto s: [https://icaci.org/files/documents/ICC\\_proceedings/ICC2011/Oral%20Presentations%20PDF/D1-Map%20projection/CO-300.pdf](https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2011/Oral%20Presentations%20PDF/D1-Map%20projection/CO-300.pdf) [Pristupljeno: 3. kolovoza 2023.]
- [18] Landsat Short Course Lecture *TRANSVERSE MERCATOR PROJECTION*. NASA, 1983. Preuzeto s: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/transverse-mercator-projection/> [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
- [19] GISGeography, *How Universal Transverse Mercator (UTM) Works*. 2023. Preuzeto s: <https://gisgeography.com/utm-universal-transverse-mercator-projection/> [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
- [20] U.S. Department of Transportation, *Flight Navigator Handbook*. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2011. Preuzeto s: [Flight Navigator Handbook by eflyacademy - Issuu](#) [Pristupljeno: 10. kolovoza 2023.]
- [21] *Grid Navigation*. SKYbrary. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/grid-navigation> [Pristupljeno: 15. kolovoza 2023.]
- [22] *General Navigation*, 4. izd. Nordian, 2007.
- [23] Windy. Preuzeto s: <https://www.windy.com/?45.913,15.782,5> [Pristupljeno: 23. kolovoza 2023.]
- [24] Englund, M. Great Circle Map. 2017.-2023. Preuzeto s: <https://www.greatcirclemap.com/?routes=LYR-YLT-YRB> [Pristupljeno: 24. kolovoza 2023.]
- [25] Hsieh, H. T., Meng, Q., Han, B., Wang, S., Wu, X. *Optimization of Waypoints on the Great Circle Route Based on Genetic Algorithm and Fuzzy Logic*. Shanghai, 2023. Preuzeto s: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/2/358> [Pristupljeno: 25. kolovoza 2023.]
- [26] Perry-Castaneda Library Map Collection, *Arctic Region (Political) 2012*. University of Texas Libraries. Preuzeto s: <https://maps.lib.utexas.edu/maps/polar.html> [Pristupljeno: 26. kolovoza 2023.]
- [27] *Historical Magnetic Declination*. NOAA, 2023. Preuzeto s: [https://www.ncei.noaa.gov/maps/historical\\_declination/](https://www.ncei.noaa.gov/maps/historical_declination/) [Pristupljeno: 29. kolovoza 2023.]

- [28] *A320 Specs Table*. MODERN AIRLINERS. Preuzeto s:  
<https://www.modernairliners.com/airbus-a320> [Pristupljeno: 30. kolovoza 2023.]
- [29] [OU1950 - ENSB - CYLT \(005\).pdf](#)
- [30] Intervju s Josipom Muslimom, Operativni Kontrolor Prometa, Croatia Airlines
- [31] [OU1911 - CYLT - CYRB \(003\).pdf](#)

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad  
(vrsta rada)

isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da 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 završnog/diplomskog rada pod naslovom Proračun navigacijskih elemenata za let preko polarnih kopa, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 5. rujna 2023.

Tara Matijević Zemva

(ime i prezime, potpis)