

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



Visokošolski strokovni študij
geodezije, Geodezija v inženirstvu

Kandidat:

Zoran Gregorn

Vpliv meteoroloških parametrov na vrednost merjene dolžine

Diplomska naloga št.: 311

Mentor:

izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič

Somentor:

doc. dr. Simona Savšek

Ljubljana, 2010

ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **Zoran Gregorn** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: »**VPLIV METEOROLOŠKIH PARAMETROV NA MERJENO DOLŽINO**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 4. 3. 2010

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali profesorji geodetske smeri:

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.021:551.5(043.2)
Avtor:	Zoran Gregorn
Mentor, somentor:	izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič, doc. dr. Simona Savšek
Naslov:	Vpliv meteoroloških parametrov na merjeno dolžino
Obseg in oprema:	62 str., 14 pregl., 13 sl., 20 graf., 30 en.
Ključne besede:	merjenje dolžin, ultra lahko letalo, merjenje meteoroloških parametrov vzdolž vizure, primerjava reduciranih dolžin

Izveček:

Namen merjenja meteoroloških parametrov je ugotovitev gostote zraka, skozi katerega se širi elektromagnetno valovanje. V praksi najpogosteje merimo meteorološke parametre na krajišjih merjene dolžine, kar pri dolgih razdaljah lahko predstavlja preveliko poenostavitev. Osnovna ideja diplomske naloge je tako bila, da izmerimo meteorološke parametre na poti merskega žarka v zraku. Na ta način želimo pridobiti natančnejše podatke o dejanskih pogojih v atmosferi. Pričakujemo, da lahko pridobljeni podatki, ki odražajo dejanske razmere v atmosferi, značilno vplivajo na daljše merjene dolžine. Za merjenje meteoroloških parametrov v zraku smo uporabili ultra lahko letalo, ki omogoča letenje pri malih hitrostih. Opravili smo tri lete v različnih stanjih atmosfere (pregreto popoldansko in večerno ozračje ter sveže jutranje ozračje). V okviru enega leta smo izvedli dve neodvisni meritvi dveh merjenih dolžin.

V diplomski nalogi želimo odgovoriti na postavljeno hipotezo: Ali lahko različni načini upoštevanja meteoroloških parametrov značilno vplivajo na izračun dejanske atmosfere in s tem na redukcijo merjene dolžine? Z analizo želimo kritično oceniti obstoječe načine izračuna dostopne v literaturi, in pridobiti optimalni način upoštevanja meteoroloških parametrov za izračun dejanske atmosfere pri merjenju daljših dolžin v težavnejših merskih pogojih.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 528.021:551.5(043.2)
Author: Zoran Gregorn
Supervisor, cosupervisor: Assoc. Prof. Tomaž Ambrožič, Ph.D., Assist. Prof. Simona Savšek, Ph.D.
Title: The influence of meteorological parameters on the measured distance
Notes: 62 pp., 14 tab., 13 fig., 20 graph., 30 eq.
Key words: measuring distances, ultra-light aircraft, measuring meteorological parameters along line of sight, comparison of reduced distances

Abstract

The aim of measuring meteorological parameters is defining the air density, through which the electromagnetic wave spreads. In practice, most commonly measured meteorological parameters are measured at the endpoint of the measured distance, which, at long distances, may cause an unreasonable simplification. The basic idea of the thesis was thus to measure the meteorological parameters on the path of the measured beam in the air. In this way we obtain more precise information on the actual conditions in the atmosphere. We expect that the resulting data that reflect the actual conditions in the atmosphere, affect the long-distance measurements significantly. For measuring meteorological parameters in the air, we used an ultra-light aircraft which allows flying at low speed. We carried out three flights in three different atmosphere conditions (a hot afternoon and evening atmosphere, respectively, and a fresh morning atmosphere). Within one year we performed two independent measurements of the two distances measured.

The thesis intends to answer the hypothesis formed: Can different consideration of the meteorological parameters significantly influence the calculation of the real atmosphere and thus affect the measured distance reduction? The analysis wants to critically evaluate the existing calculation methods, available in the literature and acquire optimum method of considering the meteorological parameters when calculating the actual atmosphere in measuring long-distant distances in difficult measurement conditions.

ZAHVALA

Na tem mestu se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Tomažu Ambrožiču in somentorici doc. dr. Simoni Savšek za vso strokovno pomoč, nasvete ter neizmerno osebno pomoč pri izvedbi naloge.

Posebna zahvala pa velja vsem mojim sodelavcem in prijateljem, ki so pomagali pri terenskih meritvah, lastniku letala gospodu Janku Gračnerju in pilotu Petru Vidmarju.

Hvala!

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	REDUKCIJA MERJENE DOLŽINE NA DOLŽINO KAMEN - KAMEN	3
2.1	Elektromagnetno valovanje in grupni lomni količnik N_G	3
2.2	Grupni lomni količnik pri dejanskih atmosferskih pogojih n_D	3
2.3	Izračun dolžine z upoštevanjem multiplikacijske in adicijske konstante	4
2.4	Popravek merjene dolžine - prvi popravek hitrosti	4
2.5	Drugi popravek hitrosti	5
2.6	Geometrični popravki – popravek zaradi ukrivljenosti merskega žarka	6
2.7	Izračun poševne dolžine med točkama na nivoju terena	7
2.8	Vpliv natančnosti posameznih količin na dejanski lomni količnik n_D	8
2.8.1	Izračun parcialnih odvodov	9
2.8.2	Izračun vrednosti parcialnih odvodov za izbrane meteorološke pogoje in izbrane konstante.	11
3	MERSKA OPREMA	14
3.1	Elektronski tahimeter Leica Geosystems AG TCRP1201 R300 (Nr. 216821)	14
3.2	Prizme, žepni trakovi	15
3.3	Meteo Station HM30	16
3.4	Barometri	18
3.5	Psihrometri	19
3.6	Komparacija (ur, barometrov, psihrometrov)	19
4	NAČRTOVANJE IZMERE METEOROLOŠKIH PARAMETROV	21
4.1	Opis letala	21
4.2	Načrtovanje letov	24
4.3	Načrtovanje izmere meteoroloških parametrov Lubela, Jerič, Skorno, Jezero, Šoštanj	25
5	IZMERA METEOROLOŠKIH PARAMETROV	27
5.1	Opis izmere	27
5.2	Ureditev terenskih zapisnikov	28
5.3	Izračun koordinat točk (x_0, y_0) v smeri vizure	29
5.4	Izračun zračnega tlaka in višin z linearno porazdelitvijo	34

5.5	Prikaz izmerjenih vrednosti (različni grafikonii).....	35
6	IZRAČUN DOLŽIN	39
6.1	Izračun n_D ... S_k iz podatkov na stojišču	39
6.2	Izračun n_D ... S_k iz podatkov na stojišču in vizirani točki	41
6.3	Izračun n_D ... S_k iz podatkov na stojišču, vizirani točki in sredini merjeni v zraku	
6.4	Izračun n_D ... S_k iz srednje/povprečne temperature na celotnem letu	48
6.5	Izračun n_D ... S_k iz posameznih temperatur	51
6.6	Primerjava izračunanih dolžin	54
7	ZAKLJUČEK.....	59
VIRI		
PRILOGE.....		62

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Pregled izračunov vplivov meteoroloških parametrov na dejanski lomni količnik.	12
Preglednica 2: Podatki uporabljenega razdaljemera.....	14
Preglednica 3: Podatki meteorološke postaje HM30.....	18
Preglednica 4: Tehnične lastnosti letala.	22
Preglednica 5: Omejitve hitrosti.	22
Preglednica 6: Podatki o lastnostih motorja.	23
Preglednica 7: Primer zapisa položaja letala.	29
Preglednica 8: Primer zapisa meteorološke postaje.	29
Preglednica 9: Preglednica letov za lažjo časovno predstavo in povezavo $t[^\circ]$ in $p[\%]$	35
Preglednica 10: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih samo na stojšču instrumenta (mokra temperatura je upoštevana).....	39
Preglednica 11: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih na stojšču instrumenta in vizirani točki (mokra temperatura je upoštevana).	42
Preglednica 12: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih na stojšču instrumenta in vizirani točki in vmesni točki med njima (mokra temperatura je upoštevana).	46
Preglednica 13: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih na stojšču instrumenta in vizirani točki in iz srednje/povprečne temperature na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).	49
Preglednica 14: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih na stojšču instrumenta in vizirani točki in iz posameznih temperatur na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).	52

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Prikaz razpršenosti točk vzdolž stranice Jerič – Lubela.	30
Grafikon 2: Prikaz razpršenosti točk vzdolž stranice Skorno – Lubela	30
Grafikon 3: Prikaz izmerjenih vrednosti suhe temperature na stranici Jerič – Lubela.....	36
Grafikon 4: Prikaz izmerjenih vrednosti suhe temperature na stranici Skorno – Lubela.....	36
Grafikon 5: Prikaz izmerjenih vrednosti relativne vlažnosti na stranici Jerič – Lubela.....	37
Grafikon 6: Prikaz izmerjenih vrednosti relativne vlažnosti na stranici Skorno – Lubela.....	37
Grafikon 7: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih samo na stojišču instrumenta (mokra temperatura je upoštevana).	40
Grafikon 8: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih samo na stojišču instrumenta (mokra temperatura je upoštevana).	41
Grafikon 9: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta in hkrati na vizirani točki (mokra temperatura je upoštevana).	43
Grafikon 10: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta in hkrati na vizirani točki (mokra temperatura je upoštevana).	44
Grafikon 11: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta , na vizirani točki in na sredini merjeno v zraku (mokra temperatura je upoštevana).	47
Grafikon 12: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta , na vizirani točki in na sredini merjeno v zraku (mokra temperatura je upoštevana).	48
Grafikon 13: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta , na vizirani točki in iz srednje/povprečne temperature na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).....	50
Grafikon 14: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta , na vizirani točki in iz	

srednje/povprečne temperature na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).....	51
Grafikon 15: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta , na vizirani točki in iz posameznih temperatur na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).	53
Grafikon 16: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta , na vizirani točki in iz posameznih temperatur na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).	54
Grafikon 17: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki vpliv upoštevan v celoti.	55
Grafikon 18: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki vpliv upoštevan v celoti.	56
Grafikon 19: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, pri kateri je vpliv meteoroloških podatkov upoštevan v različnih kombinacijah.	57
Grafikon 20: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, pri kateri je vpliv meteoroloških podatkov upoštevan v različnih kombinacijah.	57

KAZALO SLIK

Slika 1: Redukcija na prostorsko tetivo.....	7
Slika 2: Redukcija na nivo točk.....	8
Slika 3: Precizna prizma GPH1P.....	15
Slika 4: Meteorološka postaja HM30.....	16
Slika 5: Uporabljeni barometri.....	18
Slika 6: Uporabljena psihrometra.....	19
Slika 7: Komparacija termometrov, psihrometrov.....	20
Slika 8: Letalo Firefox in namestitev sonde meteorološke postaje.....	21
Slika 9: Položaj točk in merjeni dolžini.....	25
Slika 10: Namestitev meteorološke postaje HM30 na letalu.....	28
Slika 11: Matematični koordinatni sistem.....	31
Slika 12: geodetski koordinatni sistem.....	31
Slika 13: Izračun višine H_0	34

1 UVOD

Šaleško dolino zaznamuje vpliv rudarjenja na tem prostoru, zato je opazovanje premikov zemeljskega površja prisotno toliko časa, kot obstaja rudarjenje v tej dolini. V ta namen so po okoliških hribih postavljene opazovalne točke male geodinamične mreže Premogovnika Velenje. Vizure med temi točkami pogosto potekajo preko jezer, ki so nastala kot posledica ugreznin ob izkopavanju premoga pod zemljo, ki jih je zalila voda. V diplomski nalogi smo želeli raziskati atmosferski vpliv na merjeno dolžino med dvema stranicama male geodinamične mreže Premogovnika Velenje, katerih vizuri potekata preko velikega jezera oziroma ob robu velikega jezera. Vrednost merjenih dolžin znaša približno 4,3 km in 7,5 km, kar zahteva uporabo primerne instrumenta, ki zagotavlja ustrezen merski domet. Izbran je bil instrument, ki omogoča merjenje razdalj z laserjem vidne rdeče svetlobe t.i. *Long Range Distance Measurement (LO)* in omogoča merjenje razdalj do 12 km.

V geodeziji poleg merjenja dolžin sočasno merimo tudi meteorološke parametre. Namen merjenja meteoroloških parametrov je ugotovitev gostote zraka, skozi katerega se širi elektromagnetno valovanje. Atmosfero v prizemnih plasteh sestavljajo različni plini. Gostota teh plinov je odvisna predvsem od temperature zraka, zračnega tlaka, količine vodne pare v zraku in vsebnosti trdnih delcev. Meteorološki parametri, ki jih določamo so: temperatura zraka, zračni tlak in delni tlak vodne pare oz. relativna vlažnost, ki je razmerje delnega tlaka in nasičenega tlaka vodne pare (Kogoj, 2005).

V praksi najpogosteje merimo meteorološke parametre na krajiščih merjene dolžine, kar pri tako dolgih razdaljah lahko predstavlja preveliko poenostavitev. Osnovna ideja diplomske naloge je tako bila, da izmerimo meteorološke parametre na poti merskega žarka v zraku. Na ta način želimo pridobiti natančnejše podatke o dejanskih pogojih v atmosferi. Pričakujemo, da lahko pridobljeni podatki, ki odražajo dejanske razmere v atmosferi, značilno vplivajo na daljše merjene dolžine. Za merjenje meteoroloških parametrov v zraku smo uporabili ultra lahko letalo, ki omogoča letenje pri malih hitrostih. Opravili smo tri lete v različnih stanjih atmosfere (pregreto popoldansko in večerno ozračje ter sveže jutranje ozračje). V okviru enega leta smo izvedli dve neodvisni meritvi dveh merjenih dolžin.

V novejšem času se merjenje dolžin v geodeziji izvaja izključno z elektrooptičnimi razdaljemerji, pri katerih je merski žarek elektromagnetno valovanje, ki se na svoji poti razširja skozi zemeljsko atmosfero. Vpliv zemeljske atmosfere na merjeno dolžino lahko zapišemo v dveh točkah in sicer:

- vpliv lomnega količnika na hitrost širjenja valovanja in posredno na modulacijsko valovno dolžino, večji kot je lomni količnik, manjša je hitrost širjenja valovanja;
- vpliv refrakcije na geometrično obliko poti žarka; elektromagnetno valovanje potuje v sredstvu tako, da je optična pot najkrajša (Kogoj, 2005).

Refrakcija je optični pojav krivljenja svetlobnega žarka pri prehodu skozi različno goste zračne mase. Zemeljska refrakcija je podoben pojav in posledica tega je, da so hribi videti višji, kot v resnici so. To velja še posebej takrat, ko je zelo mrzlo in je gostota zraka pri tleh zelo velika. Pri nas je to opaziti po prehodu hladne fronte, vidnost se zelo izboljša in občutek imamo, da so hribi precej bližje (Rakovec, Vrhovec, 2000). Krivljenje žarka praviloma poteka navzdol, razen v primeru, ko je zrak pri tleh zelo pregret in se žarek rahlo ukrivi navzgor, kar pripelje do pojava zrcaljenja. To lahko opazimo na dolgih odsekih ravne ceste, ki daje občutek, da je mokra, v resnici pa gre za t.i. spodnje zrcaljenje.

V diplomski nalogi smo želeli preučiti različne načine upoštevanja meteoroloških parametrov pri izračunu dejanskega lomnega količnika n_D , ki smo jih našli v dostopni literaturi. Zanimal nas je vpliv meteoroloških parametrov na izračun dejanskega lomnega količnika. V diplomski nalogi želimo odgovoriti na postavljeno hipotezo: Ali lahko različni načini upoštevanja meteoroloških parametrov značilno vplivajo na izračun dejanske atmosfere in s tem na redukcijo merjene dolžine? Z analizo želimo kritično oceniti obstoječe načine izračuna dostopne v literaturi in pridobiti optimalni način upoštevanja meteoroloških parametrov za izračun dejanske atmosfere pri merjenju daljših dolžin v težavnejših merskih pogojih.

2 REDUKCIJA MERJENE DOLŽINE NA DOLŽINO KAMEN - KAMEN

2.1 Elektromagnetno valovanje in grupni lomni količnik N_G

Elektromagnetno valovanje je valovanje električnega in magnetnega polja, ki sta med seboj pravokotna. V praznem prostoru se elektromagnetno valovanje širi s svetlobno hitrostjo. Glede na valovno dolžino delimo elektromagnetne valove na radijske, mikro, infrardeče, vidno svetlobo, ultravijolične žarke, rentgenske žarke in gama žarke. Vidna svetloba so elektromagnetni valovi valovne dolžine med 380 in 760 nm.

Vsako v elektrooptičnih razdaljemerih uporabljeno valovanje (tudi laserska svetloba) vsebuje ozko območje valovanj različnih valovnih dolžin. Vsa ta harmonična valovanja se prekrivajo in tvorijo tako imenovane valovne skupine ali grupe. Energija se pri tem širi z maksimalno intenziteto te valovne skupine. Grupni lomni količnik je po *Cauchyju* opisan z interpolacijsko enačbo (Kogoj, 2005):

$$n_G - 1 \cdot 10^6 = N_G = A + 3 \frac{B}{\lambda_{Neff}^2} + 5 \frac{C}{\lambda_{Neff}^4}. \quad \dots(1)$$

kjer pomenijo:

A , B in C ... konstante, ki so bile določene empirično v laboratorijskih pogojih,

λ_{Neff} ... efektivna valovna dolžina predstavlja težišče valovnih dolžin glede na intenziteto v [μm].

2.2 Grupni lomni količnik pri dejanskih atmosferskih pogojih n_D

Dolžine v splošnem ne merimo v neki normalni atmosferi, ampak v trenutnih razmerah oziroma trenutnih atmosferskih pogojih, zato moramo reducirati normalno atmosfero v dejanske atmosferske pogoje po enačbi *Barell-Sears*, ki jo je preuredil *Kohlrausch* (Kogoj, 2005):

$$n_D = 1 + \frac{n_G - 1}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot \frac{p}{760} - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot e, \quad \dots(2)$$

kjer pomenijo:

n_D ... grupni lomni količnik svetlobe pri dejanskih razmerah t , p , e ,

p ... zračni tlak v [torr],

t ... temperatura suhega termometra v [°C],

e ... delni tlak vodne pare v [torr],

α_z ... razteznostni koeficient zraka $\alpha_z = 1/273,16 = 0,00366$ v [°C⁻¹].

2.3 Izračun dolžine z upoštevanjem multiplikacijske in adicijske konstante

Merjeno dolžino moramo najprej popraviti za multiplikacijsko in adicijsko konstanto razdaljemera ter adicijsko konstanto reflektorja.

$$D_a = D' \cdot k_M + k_a \quad \dots(3)$$

kjer pomenijo:

D_a ... reducirana dolžina za multiplikacijsko in adicijsko konstanto v [m],

D' ... merjena dolžina v [m],

k_M ... multiplikacijska konstanta razdaljemera ali konstanta merila razdaljemera,

k_a ... adicijska konstanta razdaljemera in reflektorja v [m].

2.4 Popravek merjene dolžine - prvi popravek hitrosti

Dolžine, merjene z elektronskim razdaljemerom, so praviloma poševne in zaradi meteoroloških vplivov tudi ukrivljene. Da bi dobili dolžino, uporabno za nadaljnja računanja, jo moramo reducirati – popraviti za izračunane vrednosti popravkov. Prvi popravek hitrosti upošteva vpliv dejanskih meteoroloških pogojev glede na referenčne.

$$D = D_a + k_n,$$

$$k_n = D - D_a = D_a \frac{n_0 - n_D}{n_D}.$$

Če predpostavimo, da je $n_D \approx 1$, sledi (Kogoj, 2005)

$$k_n = D_a (n_0 - n_D) \quad \dots(4)$$

kjer pomenijo:

D ... reducirana dolžina za prvi popravek hitrosti v [m],

D_a ... reducirana dolžina za multiplikacijsko in adicijsko konstanto v [m],

k_n ... prvi popravek hitrosti v [m] ,

n_0 ... referenčni lomni količnik, ki je različen za različne tipe instrumentov in se nanaša na referenčne meteorološke pogoje,

n_D ... dejanski lomni količnik na osnovi t , p , e .

2.5 Drugi popravek hitrosti

Drugi popravek hitrosti upošteva ukrivljenost merskega žarka zaradi spremembe meteoroloških pogojev oziroma spremembe lomnega količnika.

$$k_{\Delta n} = - \left(-k^2 \right) \frac{D_a^3}{12 \cdot R^2} \quad \dots(5)$$

kjer pomenijo:

$k_{\Delta n}$... drugi popravek hitrosti v [m],

k ... refrakcijski koeficient ($k = R/r$),

D_a ... reducirana dolžina za multiplikacijsko in adicijsko konstanto v [m],

R ... polmer Zemlje v [m],

r ... polmer refrakcijske krivulje poti elektromagnetnega valovanja ($r = 8R$).

Zapišimo enačbo za redukcijo dolžine, ki upošteva prvi in drugi popravek hitrosti:

$$D = D_a + k_n + k_{\Delta n}. \quad \dots(6)$$

Če upoštevamo izraza za izračun popravkov (4) in (5) in jih vstavimo v enačbo (6), dobimo dolžino D , ki predstavlja dolžino opravljene poti merskega žarka. Merski žarek je zaradi refrakcije potoval po t.i. prostorski – refrakcijski krivulji. Enačbo zapišemo na naslednji način:

$$D = D_a \left(1 + n_0 - n_D - (k - k^2) \frac{D_a^2}{12R^2} \right) \quad \dots(7)$$

kjer pomenijo:

D_a ... reducirana dolžina za multiplikacijsko in adicijsko konstanto v [m],

k ... refrakcijski koeficient ($k = R/r$),

R ... polmer Zemlje v [m],

n_0 ... referenčni lomni količnik, ki je različen za različne tipe instrumentov,

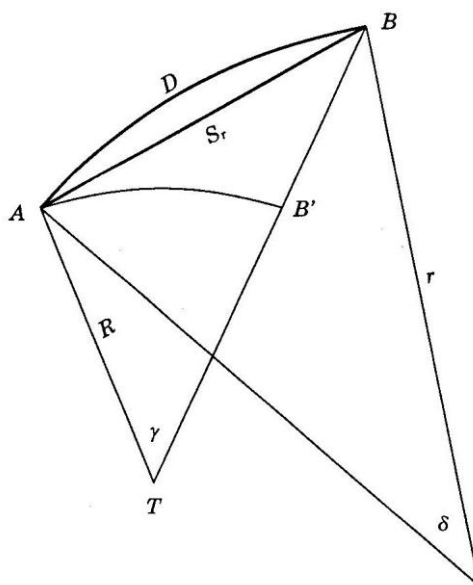
n_D ... dejanski lomni količnik na osnovi t , p , e .

Po navedbah literature doseže vpliv drugega popravka hitrosti vrednost 1 ppm šele pri dolžinah daljših od 50 km (mikrovalovni razdaljemer) in pri dolžinah daljših od 65 km (elektrooptični razdaljemer).

V našem primeru sta dolžini med 4,3 km in 7,5 km, zato lahko drugi popravek hitrosti zanemarimo.

2.6 Geometrični popravki – popravek zaradi ukrivljenosti merskega žarka

Določiti moramo razliko med dolžino refrakcijske krivulje in pripadajočo tetivo.



Slika 1: Redukcija na prostorsko tetivo.

$$S_r = D + k_r \quad \dots(8)$$

$$k_r = -k^2 \cdot \frac{D^3}{24 \cdot R^2} \quad \dots(9)$$

kjer pomenijo:

S_r ... prostorska tetiva v [m],

D ... reducirana dolžina za prvi in drugi popravek hitrosti v [m],

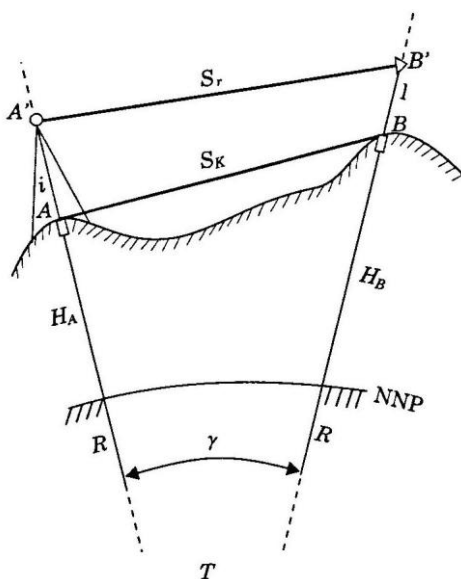
k_r ... popravek dolžine zaradi ukrivljenosti merskega žarka v [m],

k ... refrakcijski koeficient ($k = R/r$),

R ... polmer Zemlje v [m].

2.7 Izračun poševne dolžine med točkama na nivoju terena

Prostorsko tetivo moramo reducirati na nivo terena, izračunati moramo tako imenovano dolžino kamen-kamen. Uporabimo enačbo za izračun te dolžine, če je podana višinska razlika med točkama.



Slika 2: Redukcija na nivo točk.

$$S_K = S_r + \Delta S \quad \dots(10)$$

$$\Delta S = \frac{(-l) \cdot (H_B - H_A)}{S_r} - \frac{(-l)^2}{2 \cdot S_r} - \frac{(+l)}{2 \cdot R} \cdot S_r \quad \dots(11)$$

kjer pomenijo:

S_K ... poševna dolžina na nivoju točk na terenu, dolžina kamen-kamen v [m],

ΔS ... popravek dolžine pri prehodu iz S_r na S_K v [m],

i ... višina instrumenta v [m],

l ... višina signala v [m].

H_A, H_B ... nadmorski višini točk v [m],

R ... polmer zemlje v [m].

2.8 Vpliv natančnosti posameznih količin na dejanski lomni količnik n_D

Zanima nas vpliv meteoroloških parametrov na dejanski lomni količnik n_D .

2.8.1 Izračun parcialnih odvodov

Pri izračunu parcialnih odvodov smo uporabili naslednje odvode elementarnih funkcij in pravila za odvajanje (Bronštejn, Semendjajev 1984):

C ... konstanta

$$(C)' = 0$$

$$(Cx)' = C$$

$$(a^x)' = a^x \ln a$$

$$\text{Verižno pravilo: } f(u(x))' = f'(u) \cdot u'(x) = \frac{df}{du} \cdot \frac{du}{dx}$$

$$\text{Odvod kvocienta: } \left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{v \cdot u' - u \cdot v'}{v^2}$$

$$\text{in izpeljanka iz odvoda kvocienta: } \left(\frac{C}{v}\right)' = -\frac{Cv'}{v^2}$$

Izhajamo iz enačb (1) in (2) ter dodatno iz naslednjih enačb (12) in (13) (Kogoj 2005):

$$e = E_m - \left(1 - \frac{K}{755}\right) p \quad \dots(12)$$

$$E_m = 10^{\left(\frac{\alpha t_m + \gamma}{\beta + t_m}\right)} \quad \dots(13)$$

kjer pomenijo:

e ... delni tlak vodne pare v [torr],

t ... temperatura suhega termometra v [°C],

t_m ... temperatura mokrega termometra v [°C],

p ... zračni tlak v [torr],

E_m ... nasičen tlak vodne pare, izračunan s temperaturo mokrega termometra v [torr],

K, α, β, γ ... empirično določene konstante.

Nasičeni tlak vodne pare E_m , kakor tudi konstanta K sta odvisna od tega, ali merimo mokro temperaturo t_m z mokrim ali z zaledenelim termometrom (Kogoj, 2005).

Združimo enačbe (2), (12), in (13) in dobimo:

$$n_D = 1 + \frac{n_G - 1}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot \frac{p}{760} - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \left[10^{\left(\frac{\alpha \cdot t_m + \gamma}{\beta + t_m}\right)} - \left(-t_m\right) \cdot \frac{K}{755} \cdot p \right]$$

$$n_D = 1 + \frac{n_G - 1}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot \frac{p}{760} - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot 10^{\left(\frac{\alpha \cdot t_m + \gamma}{\beta + t_m}\right)} + \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot t \cdot \frac{K}{755} \cdot p - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot t_m \cdot \frac{K}{755} \cdot p \dots (14)$$

Vpliv meteoroloških parametrov na dejanski lomni količnik n_D dobimo, če izračunamo totalni diferencial enačbe za izračun lomnega količnika po vseh meteoroloških parametrih:

$$dn_D = \frac{\partial n_D}{\partial p} \cdot dp + \frac{\partial n_D}{\partial t} \cdot dt + \frac{\partial n_D}{\partial t_m} \cdot dt_m \quad \dots (15)$$

Izračunamo posamezne parcialne odvode:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_D}{\partial p} &= \frac{n_G - 1}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot \frac{1}{760} + \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot t \cdot \frac{K}{755} - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot t_m \cdot \frac{K}{755} = \\ &= \frac{n_G - 1}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot \frac{1}{760} + \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot \left(-t_m\right) \cdot \frac{K}{755} \end{aligned} \quad \dots (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_D}{\partial t} &= - \frac{(n_G - 1) \cdot p \cdot \alpha_z \cdot 760}{(1 + \alpha_z \cdot t)^2} + \frac{5,5 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{\left(\frac{\alpha \cdot t_m + \gamma}{\beta + t_m}\right)} \cdot \alpha_z}{(1 + \alpha_z \cdot t)^2} + \\ &+ \frac{(1 + \alpha_z \cdot t) \cdot 755 \cdot 5,5 \cdot 10^{-8} \cdot K \cdot p - 5,5 \cdot 10^{-8} \cdot t \cdot K \cdot p \cdot \alpha_z \cdot 755}{(1 + \alpha_z \cdot t)^2} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{5,5 \cdot 10^{-8} t_m \cdot K \cdot p \cdot \alpha_z \cdot 755}{1 + \alpha_z \cdot t} = \\
& = - \frac{(G-1) \cdot p \cdot \alpha_z}{1 + \alpha_z \cdot t} + \frac{5,5 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{\left(\frac{\alpha t_m + \gamma}{\beta + t_m}\right)} \cdot \alpha_z}{1 + \alpha_z \cdot t} + \\
& + \frac{5,5 \cdot 10^{-8} \cdot K \cdot p \cdot (1 + \alpha_z \cdot t) \cdot \alpha_z + t_m \cdot \alpha_z}{1 + \alpha_z \cdot t} = \\
& = - \frac{(G-1) \cdot p \cdot \alpha_z}{1 + \alpha_z \cdot t} + \frac{5,5 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{\left(\frac{\alpha t_m + \gamma}{\beta + t_m}\right)} \cdot \alpha_z}{1 + \alpha_z \cdot t} + \frac{5,5 \cdot 10^{-8} \cdot K \cdot p \cdot (1 + t_m \cdot \alpha_z)}{1 + \alpha_z \cdot t} \quad \dots(17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial n_D}{\partial t_m} & = - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot 10^{\left(\frac{\alpha t_m + \gamma}{\beta + t_m}\right)} \cdot \ln 10 \cdot \frac{\beta + t_m}{\beta + t_m} \cdot \alpha - \alpha \cdot t_m \cdot 1 - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot \frac{K}{755} \cdot p = \\
& = - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot 10^{\left(\frac{\alpha t_m + \gamma}{\beta + t_m}\right)} \cdot \ln 10 \cdot \frac{\beta \cdot \alpha}{\beta + t_m} - \frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \cdot \frac{K}{755} \cdot p \quad \dots(18)
\end{aligned}$$

2.8.2 Izračun vrednosti parcialnih odvodov za izbrane meteorološke pogoje in izbrane konstante.

Za izbrane meteorološke pogoje:

$$t = 17 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_m = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p = 750 \text{ torr}$$

in izbrane konstante, ki nastopajo v enačbah (1), (2), (12) in (13)

$$A = 287,6155$$

$$B = 1,62887$$

$$C = 0,0136$$

$$\lambda_{Neff} = 0,67 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$\alpha_z = \frac{1}{273,16} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$$

$$K = 0,5$$

$$\alpha = 7,5$$

$$\beta = 237,5$$

$$\gamma = 0,66077$$

dobimo naslednje vrednosti parcialnih odvodov:

$$\frac{\partial n_D}{\partial p} = 0,370 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\partial n_D}{\partial t} = -0,930 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\partial n_D}{\partial t_m} = -0,062 \cdot 10^{-6}$$

V literaturi smo našli nekaj izračunov vplivov meteoroloških parametrov na dejanski lomni količnik n_D , ki jih navajamo v naslednji preglednici. Vplivi so poračunani s povprečnimi parametri v naših izmerah.

Preglednica 1: Pregled izračunov vplivov meteoroloških parametrov na dejanski lomni količnik.

	Kahmen, Faig (1988); Möser (2000)	Schofield (1998)	Kogoj (2005)	Kontić, Mrkić (1987)
<i>A</i>	287,604	287,604	287,583	287,604
<i>B</i>	1,6288	1,6288	1,6134	1,6288

C		0,0136	0,0136	0,0144	0,0136
λ_{Neff} [μm]		0,60	0,882	0,9	0,56
α_z [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]		0,00366086	0,00366086	0,00366086	0,00366086
K		0,5	0,5	0,5	0,5
α		7,5	7,5	7,5	7,5
β		237,3	237,3	237,5	237,5
γ		0,7857	0,7857	0,66077	0,66077
T [$^{\circ}\text{C}$]		15	15	17	20
t_m [$^{\circ}\text{C}$]		11	10,7	12	14,8
p [torr]		750	760	750	750
$\frac{\partial n_D}{\partial p}$ [$\cdot 10^{-6}$]	v literaturi	0,28	0,33	0,38	0,4
	naš izračun	0,50	0,49	0,36	0,37
$\frac{\partial n_D}{\partial t}$ [$\cdot 10^{-6}$]	v literaturi	1	1	0,98	1
	naš izračun	0,95	0,94	0,91	0,93
$\frac{\partial n_D}{\partial t_m}$ [$\cdot 10^{-6}$]	v literaturi	/		0,06	
	naš izračun	0,07		0,06	
$\frac{\partial n_D}{\partial e}$ [$\cdot 10^{-6}$]	v literaturi		0,03	0,05	0,053
	naš izračun		0,07	0,05	0,051

V preglednici izračunan vpliv delnega tlaka vodne pare na dejanski lomni količnik n_D dobimo, če izračunamo parcialni odvod enačbe (2) po tem meteorološkem parametru:

$$\frac{\partial n_D}{\partial e} = -\frac{5,5 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha_z \cdot t} \quad \dots(19)$$

Iz preglednice vidimo, da je izračun vplivov meteoroloških parametrov na dejanski lomni količnik, podan v literaturi, približen.

3 MERSKA OPREMA

3.1 Elektronski tahimeter *Leica Geosystems AG TCRP1201 R300 (Nr. 216821)*

Instrument *Leica Geosystems AG TCRP1201 R300* izhaja iz družine instrumentov TPS1200 in je namenjen za merjenje kotov in razdalj tudi do 12 km. V našem primeru sta razdalji med 4,3 in 7,5 km, zato so lahko meteorološki pogoji tudi nekoliko slabši od idealnih. V tehničnih podatkih instrumenta lahko preberemo, da instrument uporablja fazni način merjenja razdalje. Pri običajnem merjenju (IR) instrument uporablja nosilni merski val dolžine 780 nm. Referenčni lomni količnik proizvajalca je za celo družino instrumentov enak ter znaša $n_0 = 1,0002859$. Maksimalni doseg merjenja na eno standardno prizmo (GPR1) je v tem primeru 3500 m, kar pa ni zadoščalo za naše potrebe. Dodatna možnost instrumenta je merjenje razdalj z laserjem vidne rdeče svetlobe na odbojne prizme imenovan *Long Range distance measurement (LO)*. V tem načinu je dolžina nosilnega merskega vala 670 nm in maksimalna merjena razdalja na eno standardno prizmo (GPR1) v dobrih vremenskih pogojih do 12000 m.

Preglednica 2: Podatki uporabljenega razdaljemera.

<i>Razdaljemer</i>	
Način merjenja	fazni način merjenja
Nosilno valovanje	670 nm
Merska frekvenca	100 - 150 MHz / 1,5 m
Doseg (srednja vidljivost do 20 km)-LO način	7,5 km / 1 prizma
Doseg (dobra vidljivost do 40 km)	12 km / 1 prizma
Natančnost (ISO 17123-4): σ_s : a[mm]; b[ppm]	5 mm; 2 ppm

3.2 Prizme, žepni trakovi

Prizma je glavni element reflektorja, ki odbije merski žarek nazaj proti sprejemni optiki po praktično isti poti kot je prispel do prizme. Prizma zagotavlja odboj merskega žarka vzporedno s smerjo prispelega žarka. Pripravo, ki vsebuje eno ali več prizem in je namenjena natančnemu odboju svetlobnega žarka imenujemo reflektor. V našem primeru sta bila uporabljena dva precizna reflektorja proizvajalca *Wild* oznake GPH1P z enojno prizmo.



Slika 3: Precizna prizma GPH1P.

Sestavni deli reflektorja so še nosilec prizme, libela, vizirna tarča, trinožni podstavek enak podstavku tahimetra in optično grezilo, s katerim centriramo reflektor na točko (Kogoj, 2005). Pomemben podatek precizne prizme je adicijska konstanta, ki jo je potrebno pred najnatančnejšimi meritvami določiti za vsak reflektor posebej. Adicijski konstanti naših reflektorjev sta bil izmerjeni v laboratoriju FGG imenovanem tudi *zimske vaje* in pri obeh reflektorjih znaša 0,00000 m. Vrednost je bila pričakovana, saj prizmi obeh uporabljenih reflektorjev uvrščamo v družino preciznih prizem z deklarirano adicijsko konstanto nič. Za izmero višine reflektorja in višine instrumenta smo uporabili ročne merske trakove na katerih smo višine odčitali na milimeter natančno.

3.3 Meteo Station HM30

Merjenje temperature, zračnega tlaka in relativne zračne vlage smo opravili z ročno meteorološko postajo HM30 švicarskega proizvajalca REVUE THOMMEN AG, CH-4437 Waldenburg, poznanega predvsem kot proizvajalca letalskih instrumentov, ki ima v svojem industrijskem programu tovrstne naprave. Kot proizvajalci najsodobnejših elektronskih instrumentov v tehnologiji merjenja tlaka in kalibracije se ponašajo z zelo dobro izdelanim sistemom zagotavljanja kvalitete, kar dokazuje standard ISO 9001 in vrsta drugih tehničnih in tehnoloških certifikatov.



Slika 4: Meteorološka postaja HM30.

Thommen Meteo Station HM30 je multifunkcijski instrument za merjenje zračnega tlaka, relativne vlage in temperature. Lahko ga uporabljamo tudi kot barometrični višinomer. Glede na velikost in možnost prilagoditve ima širok spekter uporabe.

Merilni senzorji:

- temperaturni kombinirani senzor 1 – za zrak,
- temperaturni kontaktni senzor 2 – za vodo in mehke materiale iz nerjavečega jekla V4A.

V naši nalogi smo uporabili kombinirani senzor 1, saj smo merili meteorološke pogoje zraka.

Enote za merjenje, ki jih omogoča meteorološka postaja HM30:

- zračni tlak: mbar, hPa, mmHg, inHg, inH20, psia,
- relativna vlaga: %rF, %rH,

- temperatura: °C, °F,
- višina: m, ft,
- interval: .../h, .../min.

Temperaturna kalibracija: -20°C...+60°C

Delovna temperatura: -20°C...+60°C

Relativna vlaga: 0 do 95 %rH, nekondenzirana

Merski interval ob uporabi osebnega računalnika: 25 odčitkov / sekundo

Poraba : brez senzorjev < 12mA

Temperaturni kontaktni senzor: 1 mA

Temperaturni kombinirani senzor: 4 mA

Napajanje: 9 V baterija (IEC 6LR61), akumulatorska baterija ali transformator

Delovanje baterije: 48 ur neprekinjeno delovanje

Avtomatski izklop po 1, 10, 30, 60 minutah ali neprekinjeno delovanje

Pomnilniški interval: nastavimo ročno od 1 sekunde do 24 ur (15 možnih nastavitev)

Pomnilnik: največ 908 meritev

Velikost: 152 x 83 x 34/29 mm

Teža z baterijami: 275 g (brez senzorjev)

Teža senzorjev: 185 g

Preglednica 3: Podatki meteorološke postaje HM30.

Parametri	Območje merjenja	Resolucija	Standardni odklon
Zračni tlak	225...1125 hPa abs	0,1 hPa	± 1 hPa
Relativna vlažnost	0...100% rH	0,1 rH	$\pm 1,5$ %rH
Temperaturni kombinirani senzor 1	-40...+60°C	0,1 °C	$\pm 0,3$ °C
Temperaturni kontaktni senzor 2	-50...+200°C	0,1 °C	$\pm 0,3$ °C
Višina		1 m	± 10 m ± 2 m (<500 m)

3.4 Barometri

Pri izvedbi smo uporabili tri različne barometre, vsi pa so zadostovali oz. presegali zahteve o natančnosti odčitane podatka o zračnem tlaku:

- najnatančnejši je bil digitalni barometer Paroscientific model št. 760-16B,
- naslednji je BARO, precizni barometer in
- najenostavnejši Thommen, classic barometer.



Slika 5: Uporabljeni barometri.

3.5 Psihrometri

Psihrometer sestavljata dva precizna termometra in ventilator, ki zagotavlja pretok zraka ob bučkah termometrov. Ventilator lahko poganja motorček (slika 6, desno) ali pa napeta vzmet (slika 6, levo). Prvi termometer meri tako imenovano suho temperaturo zraka. Drugi termometer ima bučko ovito v krpo, ki je namočena z destilirano vodo in meri tako imenovano mokro temperaturo. Na podlagi razlik odčitanih temperatur določimo parcialni tlak vodne pare v zraku – glej enačbe (12) in (13).



Slika 6: Uporabljena psihrometra.

3.6 Komparacija (ur, barometrov, psihrometrov)

Prvo komparacijo ur zapisovalnika leta GPS, meteorološke postaje HM30, vseh ročnih ur operaterjev, smo opravili pred začetkom meritev, drugo pa na koncu meritev. Kot referenčno uro smo izbrali uro zapisovalnika leta GPS, ki uporablja t.i. čas UTC in je bila v našem primeru tudi najnatančnejša.

Komparacijo barometrov smo izvedli takoj po končanih meritvah in sicer tako, da smo v skupnem prostoru pustili barometre nekaj več kot pol ure, nato smo primerjali odčitke posameznega barometra glede na precizni barometer Paroscientific model št. 760-16B.

Termometre pa smo komparirali tako, da smo v večjo posodo nalili destilirano vodo in vanjo potopili vse termometre. Po približno pol ure smo odčitali vrednosti in za primerjalni termometer izbrali t.i. suhi termometer psihrometra št. 2.



Slika 7: Komparacija termometrov, psihrometrov.

4 NAČRTOVANJE IZMERE METEOROLOŠKIH PARAMETROV

Posebnost naše naloge je v tem, da smo želeli izmeriti meteorološke parametre na poti merskega žarka v zraku in klasično na točkah na zemlji, kot je to običajno v praksi. Z meritvami meteoroloških parametrov na poti merskega žarka v zraku želimo pridobiti natančnejše podatke o dejanskih pogojih v atmosferi. Pričakujemo, da lahko pridobljeni podatki, ki so čim bližje dejanskim razmeram v atmosferi, značilno vplivajo na daljše merjene dolžine. Za merjenje meteoroloških parametrov v zraku smo predvideli ročno meteorološko postajo z avtomatsko registracijo podatkov. Njena sonda je bila pritrjena na opornici letala (glej sliko 8). Za izmero meteoroloških parametrov na zemlji pa smo uporabili za ta namen primerne barometre in psihrometre.

4.1 Opis letala

Za izvedbo meritev v zraku smo izbrali letalo italijanskega proizvajalca Eurofly s.r.l. iz Milana, tip Firefox z motorjem Rotax 503 64 KS (47 kW). Letalo spada v skupino ultralahkih letal, pri katerih maksimalna poletna teža ne sme presegati 450 kg. Tip tega letala je bil izbran zaradi za naše potrebe zelo ugodne konstrukcije in možnosti letenja pri malih hitrostih. Motor je na letalu nameščen zadaj. Takšna namestitev je omogočala, da so izpušni plini in toplota motorja ostajali za merilno sondo in niso vplivali na zrak okoli merilne sonde.



Slika 8: Letalo Firefox in namestitev sonde meteorološke postaje

			odklonov krmil.
VRA	Največja hitrost v nemirnem ozračju	120	Ne prekorači te hitrosti, razen v mirnem ozračju in še takrat s previdnostjo.
VA	Manevrska hitrost	100	Ne uporabljaj grobih ali polnih odklonov krmil nad to hitrostjo.
VFE	Največja hitrost s spuščeniimi flaperoni	100	Ne prekorači te hitrosti s spuščeniimi flaperoni.

Preglednica 6: Podatki o lastnostih motorja.

(vir: ROTAX GmbH, Operator's Manual for engine type ROTAX 582 UL DCDI model 99, 1999)

Motor	Rotax 582
Propeler	Gt propeler, 3kraka elisa
Razmerje mešanice	1:50
Temp. hladilne tekočine	min: / max: 120 °
Pritisk olja	min: / max: 7 bar
Obrati motorja	min: 1800 min ⁻¹ max: 6300 min ⁻¹
Preizkus magnetov	obrti: 3000 min ⁻¹ max padec obratov: 200 min ⁻¹
Vrsta goriva	Nbm 95 okt ali avgas 100LL z oljem 1:50
Vrsta olja	2 t sintetic boljše kakovosti

4.2 Načrtovanje letov

V letalstvu velja pravilo, da ura letenja zahteva vsaj dve uri zemeljskih priprav in tako je bilo tudi v našem primeru. Letenje samo po sebi zahteva maksimalno zbranost pilota in kopilota, ki je v tem primeru imel nalogo operaterja pri zbiranju in zapisovanju meteoroloških podatkov. Ker smo v zraku omejeni z velikostjo prostora v letalu, zalogo goriva, drugim letalskim prometom in še veliko drugimi faktorji, si ne moremo privoščiti velikih sprememb načrta letenja, zato je načrtovanje na zemlji ključnega pomena za uspeh izvedbe zadane naloge.

Podrobno načrtovanje letenja je obsegalo spremljanje napovedi vremena, predvsem smeri in jakosti vetrov, časovna uskladitev z operaterji na zemlji in uskladitev s podatki o predvidenem zračnem prometu nad izbranim območjem. V nadaljevanju so se določili operaterji in način komunikacije na zemlji, ter dogovorili ukazi zemeljskega usmerjevalca. Usmerjanje letala v smer med dvema točkama je potekalo po radijski vezi z natančno dogovorjenimi ukazi za premik letala po višini in premik po smeri.

Pomlad prinaša hitre vremenske spremembe in pogosto močne lokalne vetrove. Predhodni poskusi letenja v smeri med dvema točkama so pokazali, da malo močnejši bočni veter zelo ovira natančno letenje, kot je bilo v našem načrtu, zato smo čakali na ugoden trenutek in primerno vreme ujeli šele v tretjem poskusu. Ponovno poudarjamo, da smo želeli leteti čim počasneje, da smo dlje časa merili meteorološke parametre in dobili več meritev stanja atmosfere v smeri vizure.

Letenje za potrebe meritev smo načrtovali prvi dan v popoldanskem času in sicer prvi let med 15. in 16. uro ter drugi let med 18. in 19. uro. Z namenom, da bi dobili še več meteoroloških podatkov v drugačnih vremenskih razmerah, smo načrtovali še en let naslednji dan v jutranjem času med 7.30 in 8.30 uro. Prvi dan je bil pregret popoldanski zrak, drugi dan pa svež jutranji zrak in jakost vetra minimalna.

Komunikacijo med letalom in zemeljsko ekipo na Lubeli smo načrtovali in kasneje tudi vzdrževali z letalsko radijsko postajo na frekvenci 122,50 Mhz, ki je hkrati tudi frekvenca

letališča Šoštanj. Na tej frekvenci smo poslušali tudi letalski promet v okolici letališča. Komunikacija med ekipami na terenu pa je bila vzdrževana z ročnimi geodetskimi radijskimi postajami, ki delujejo na gradbenih frekvencah. V našem primeru smo uporabili prosti kanal 12. Za malo daljše pogovore in prenos navodil pa smo uporabili mobilno telefonijo.

4.3 Načrtovanje izmere meteoroloških parametrov Lubela, Jerič, Skorno, Jezero, Šoštanj

Za izmero meteoroloških parametrov na zemlji smo predvideli dva psihrometra Fakultete za geodezijo in gradbeništvo in tri psihrometre, izposojene v jamomerski službi Premogovnika Velenje. Merjenje tlaka smo predvideli samo na krajnih točkah, kot je to običajno v praksi, kadar merimo dolžino med dvema točkama z elektrooptičnim razdaljemerom. Predpostavili smo namreč, da se zračni tlak spreminja samo zaradi spremembe višine točke:



Slika 9: Položaj točk in merjeni dolžini.

Za merjenje tlaka smo predvideli in kasneje uporabili tri različne barometre, ki so nam bili na razpolago. Na Lubeli smo postavili digitalni barometer Paroscientific, model št. 760-16B, na Jeriču BARO precizni barometer in v Skornem Thommen classic barometer.

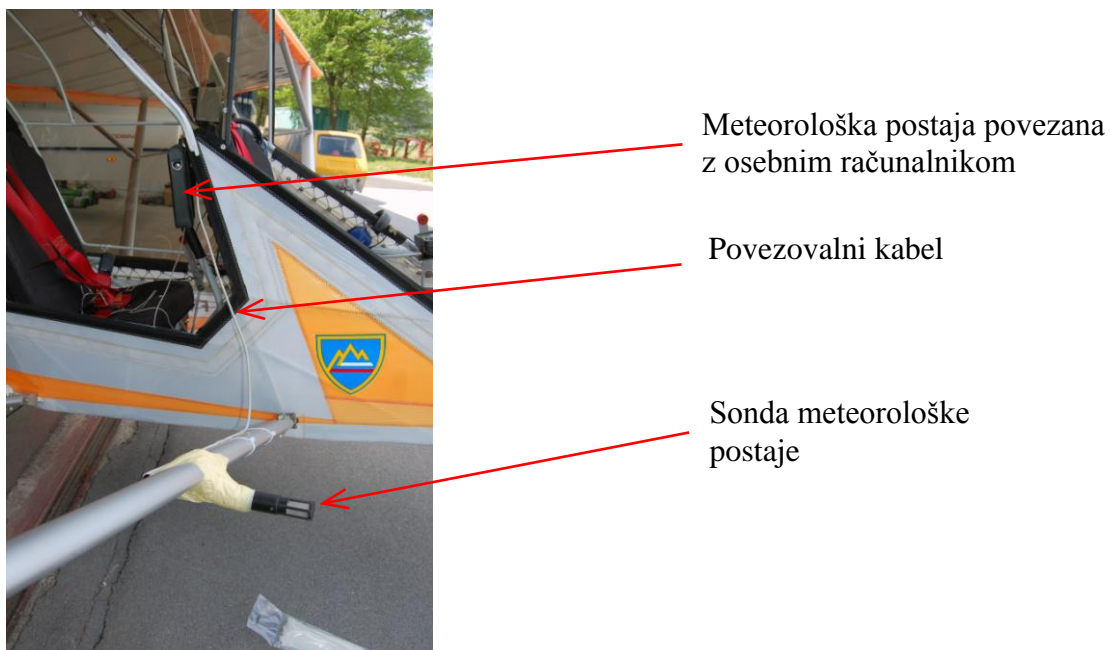
5 IZMERA METEOROLOŠKIH PARAMETROV

5.1 Opis izmere

Naša naloga obsega merjenje dolžin in meteoroloških parametrov dveh stranic mikromreže Premogovnika Velenje s skupno točko na Lubeli (slika 9). Poleg treh krajnih točk, ki so stabilizirane z betonskimi stebri, smo na vsaki stranici določili po eno vmesno točko, ki smo jo na terenu označili s količkom in nad katero smo v trenutku preleta letala zapisali meteorološke podatke. Zaradi uskladitve in možnosti kasnejše primerjave merjenih podatkov s podatki, ki jih je zapisovala meteorološka postaja, nameščena na letalu, smo na vsaki točki zapisovali trenutni čas.

Operater na točki je torej v trenutku preleta letala zapisal temperaturo suhega termometra, temperaturo mokrega termometra in čas z ure, ki je bila predhodno primerjana s časom sprejemnika GPS letalske navigacije, ki kaže t.i. čas UTC. Vsako stranico smo v posameznem letu preleteli dvakrat v samo nekajminutni razliki in tako dobili dve meritvi meteoroloških parametrov na posamezni točki.

Sondo meteorološke postaje HM 30 smo namestili na opornici krila letala tako, da nanjo niso vplivali izpušni plini in toplota motorja. V prostor zadnjega sedeža letala ob instrumentalni plošči kopilota smo pritrdili meteorološko postajo in jo povezali s prenosnim računalnikom. Sondo meteorološke postaje pa smo namestili na opornici krila in jo s kablom povezali z meteorološko postajo. Podatki meteorološke postaje so se vsaki dve sekundi zapisovali v datoteko na računalniku. Ob vsakem podatku se je zapisal tudi trenutni čas ure meteorološke postaje, ki smo jo ravno tako primerjali z uro navigacijskega sistema letala.



Slika 10: Namestitev meteorološke postaje HM30 na letalu.

5.2 Ureditev terenskih zapisnikov

Po končanih meritvah smo se lotili urejanja terenskih zapisnikov in zbiranja podatkov v ustrezne tabele. Najprej smo uskladili vse zapisane čase na posameznih merilnih točkah glede na referenčni čas GPS zapisovalnika poti. Sledilo je urejanje podatkov o temperaturah na merilnih točkah glede na referenčni termometer. Pri komparaciji termometrov smo za referenčni termometer izbrali suhi termometer psihrometra št. 2. Tako v prvem primeru kot v drugem primeru smo ustrezne popravke prišteli k zapisanim vrednostim in tako dobili usklajene terenske podatke.

Sledilo je še povezovanje s podatki o položaju, temperaturi in času, ki jih je zapisala meteorološka postaja, nameščena na letalu. S tem pa smo dobili enotno datoteko vseh merjenih podatkov, primerno za uporabo v računskem delu naloge.

Preglednica 7: Primer zapisa položaja letala.

Št. točke	Datum in ura	Višina	Navigacijski podatki o preleteni stranici				
141	8.5.2008 15:04	1688 ft	0.225 mi	0:00:11	74 mph	24° true	N46 21.913 E15 04.962
142	8.5.2008 15:04	1691 ft	858 ft	0:00:09	65 mph	25° true	N46 22.091 E15 05.079
143	8.5.2008 15:04	1715 ft	994 ft	0:00:11	62 mph	26° true	N46 22.218 E15 05.166

Preglednica 8: Primer zapisa meteorološke postaje.

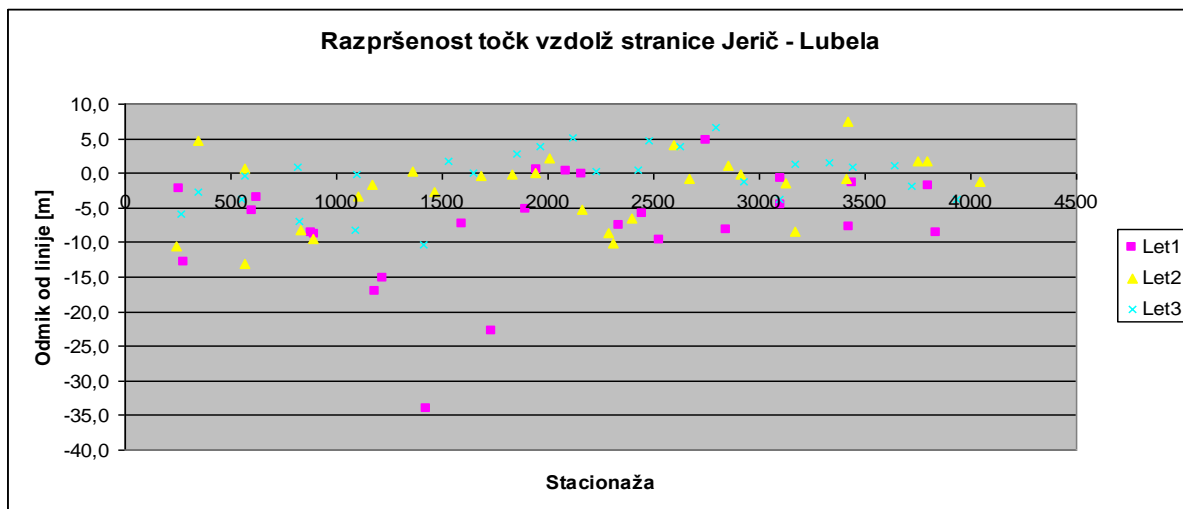
"THOMMEN HM30", 1.0,701,8.5.2008,2 sec,							
Datum	Ura	BARO[mbar]	QNH[mbar]	ALTI[m]	HUMI[%rF]	Temp1[°C]	Temp2[°C]
8.5.2008	15:06:15	957,6	1018	513	35,9	18,4	24,2
8.5.2008	15:06:17	957,9	1018	510	35,7	18,5	24,2
8.5.2008	15:06:19	957,6	1018	513	35,5	18,5	24,2
8.5.2008	15:06:21	957,5	1018	514	35,7	18,5	24,2
8.5.2008	15:06:23	957,2	1018	516	35,7	18,5	24,2
8.5.2008	15:06:25	957,2	1018	516	35,3	18,5	24,2
8.5.2008	15:06:27	956,9	1018	519	35,0	18,4	24,2
8.5.2008	15:06:29	956,7	1018	521	34,7	18,4	24,2
8.5.2008	15:06:31	956,3	1018	524	34,6	18,4	24,2
8.5.2008	15:06:33	956,1	1018	526	34,4	18,4	24,2
8.5.2008	15:06:35	956,2	1018	525	34,3	18,4	24,2

Podatke obeh datotek smo med seboj povezali preko usklajenega časa in tako dobili točko v zraku, povezano z meteorološkimi podatki na tej točki. Da pa smo vse skupaj lahko primerjali še z linijo, po kateri je potoval merski žarek razdaljemera v tem trenutku, smo preračunali geografske koordinate položaja merilne sonde v pravokotne koordinate položaja izhodiščnih točk Jerič, Skorno in Lubela.

5.3 Izračun koordinat točk (x_0, y_0) v smeri vizure

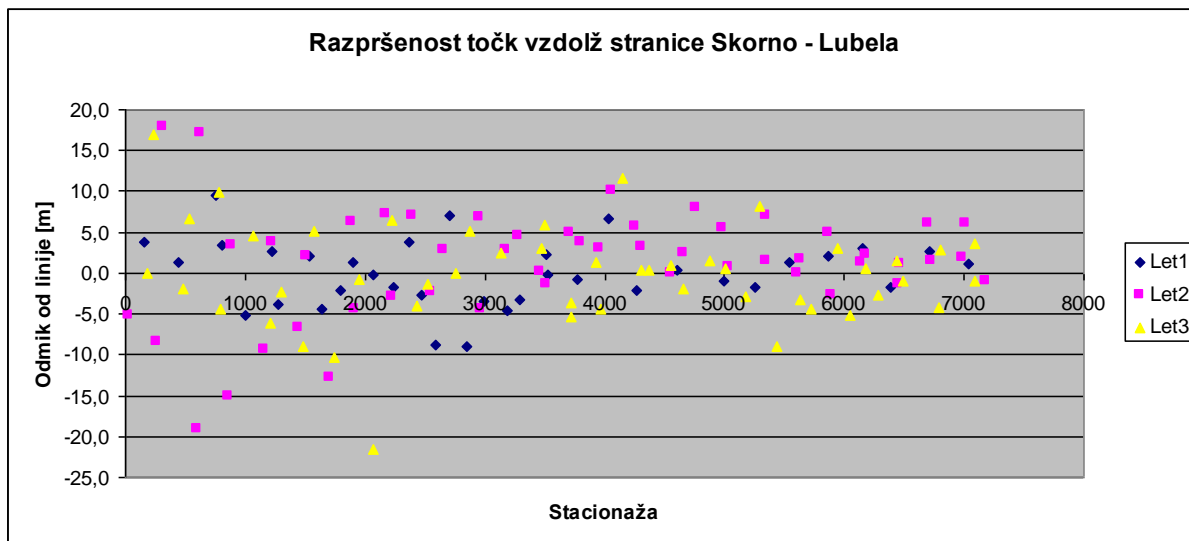
Kljub temu, da smo s pomočjo teodolita in radijskih postaj usmerjali letalo in z njim povezano merilno sondo v linijo, po kateri je potoval merski žarek, so točke, v katerih smo uspeli izmeriti meteorološke parametre, razpršene levo in desno od linije, po kateri je potoval merski žarek.

Grafikon 1: Prikaz razpršenosti točk vzdolž stranice Jerič – Lubela.



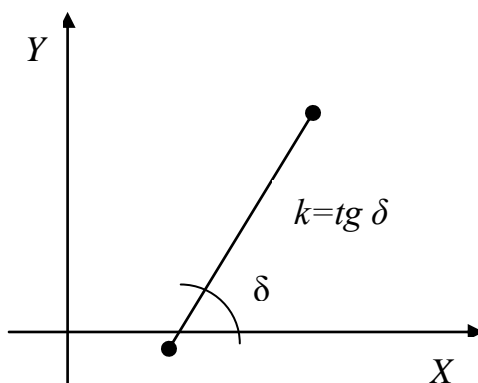
Iz grafikona 1 lahko razberemo, da je večina točk, v katerih smo izmerili temperaturo in relativno zračno vlago s pomočjo sonde, nameščene na letalu, razporejena v pasu 10 metrov levo in desno od linije, po kateri je potoval merski žarek med točkama Jerič in Lubela.

Grafikon 2: Prikaz razpršenosti točk vzdolž stranice Skorno – Lubela.

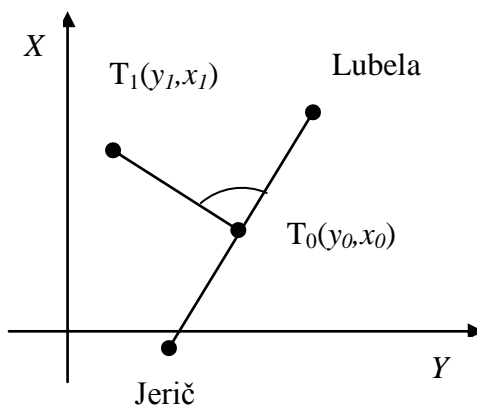


Ravno tako lahko iz grafikona 2 razberemo, da je velika večina točk, v katerih nam je uspelo izmeriti temperaturo in relativno zračno vlago na poti merskega žarka med točkama Skorno in Lubela, razporejenih v pasu 10 metrov levo in desno od linije.

Za natančen izračun dolžine med danima točkama, ki nastane kot vsota delno merjenih dolžin, smo preračunali točko T_1 , v kateri so bili izmerjeni meteorološki parametri, pravokotno na linijo, po kateri je potoval merski žarek in tako dobili koordinate točke T_0 (y_0, x_0).



Slika 11: Matematični koordinatni sistem.



Slika 12: Geodetski koordinatni sistem.

Splošna oblika enačbe premice (Bronštejn, Semendjajev , 1984):

$$y - y_1 = k \cdot (x - x_1); Ax + By + C = 0 \quad \dots(20)$$

Smerni koeficient danih točk Jerič – Lubela v matematičnem koordinatnem sistemu je

$$k_{JL} = \frac{\Delta y}{\Delta x}, \text{ ker pa sta pozitivna kraka geodetskega koordinatnega sistema označena nasprotno,}$$

je smerni koeficient v geodetskem koordinatnem sistemu $k_{JL} = \frac{\Delta x}{\Delta y}$.

Premici $T_{\text{Jerič}}-T_{\text{Lubela}}$ in T_1-T_0 sta med seboj pravokotni, zato je smerni koeficient $k_{10} = -\frac{1}{k_{JL}}$

oz. v geodetskem koordinatnem sistemu $k_{10} = -\frac{\Delta y}{\Delta x}$.

Enačba premice T_1-T_0 (glej splošno obliko enačbe premice) v matematičnem koordinatnem sistemu:

$$y - y_1 = k_{10} \cdot (x - x_1)$$

$$y - y_1 - k_{10}x + k_{10}x_1 = 0$$

$$\underbrace{-k_{10}x + 1}_{A_1} \cdot \underbrace{y - y_1 + k_{10}x_1}_{B_1} = 0 \quad \dots(21)$$

Enačba premice $T_{\text{Jerič}} - T_{\text{Lubela}}$:

$$y - y_J = k_{JL} \cdot (x - x_J)$$

$$y - y_J - k_{JL}x + k_{JL}x_J = 0$$

$$\underbrace{-k_{JL}x + 1}_{A_2} \cdot \underbrace{y - y_J + k_{JL}x_J}_{B_2} = 0 \quad \dots(22)$$

S presečiščem obeh premic $T_{\text{Jerič}} - T_{\text{Lubela}}$ in $T_1 - T_0$ bomo pridobili meteorološke parametre v točkah preme linije med danima točkama $T_{\text{Jerič}} - T_{\text{Lubela}}$, po kateri je potoval merski žarek.

Presečišče obeh premic je:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= \frac{\begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_2 & C_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}} = \frac{B_1 C_2 - B_2 C_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1} = \\
 &= \frac{1 \cdot \overbrace{(y_J + k_{JL} x_J)} - 1 \cdot \overbrace{(y_1 + k_{10} x_1)}}{-k_{10} \cdot 1 - \overbrace{(k_{JL})} \cdot 1} = \\
 &= \frac{y_1 - y_J + k_{JL} x_J - k_{10} x_1}{k_{JL} - k_{10}} \quad \dots(23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_0 &= \frac{\begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ C_2 & A_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}} = \frac{C_1 A_2 - C_2 A_1}{A_1 B_2 - A_2 B_1} = \\
 &= \frac{\overbrace{(y_1 + k_{10} x_1)} \overbrace{(k_{JL})} - \overbrace{(y_J + k_{JL} x_J)} \overbrace{(k_{10})}}{-k_{10} \cdot 1 - \overbrace{(k_{JL})} \cdot 1} = \\
 &= \frac{-k_{10} x_1 k_{JL} + k_{JL} x_J k_{10} - k_{10} y_J + k_{JL} y_1}{k_{JL} - k_{10}} = \\
 &= \frac{-\left(-\frac{1}{k_{JL}}\right) x_1 k_{JL} + k_{JL} x_J \left(-\frac{1}{k_{JL}}\right) - k_{10} y_J + k_{JL} y_1}{k_{JL} - k_{10}} = \\
 &= \frac{x_1 - x_J - k_{10} y_J + k_{JL} y_1}{k_{JL} - k_{10}} \quad \dots(24)
 \end{aligned}$$

Da dobimo enačbe direktno uporabne za izračun koordinat točk v geodetskem koordinatnem sistemu, pretvorimo pravkar izpeljane enačbe in dobimo:

$$y_0 = \frac{x_1 - x_J + k_{JL} y_J - k_{10} y_1}{k_{JL} - k_{10}} =$$

$$= \frac{x_1 - x_J + k_{JL} y_J + \frac{y_1}{k_{JL}}}{k_{JL} + \frac{1}{k_{JL}}}. \quad \dots(25)$$

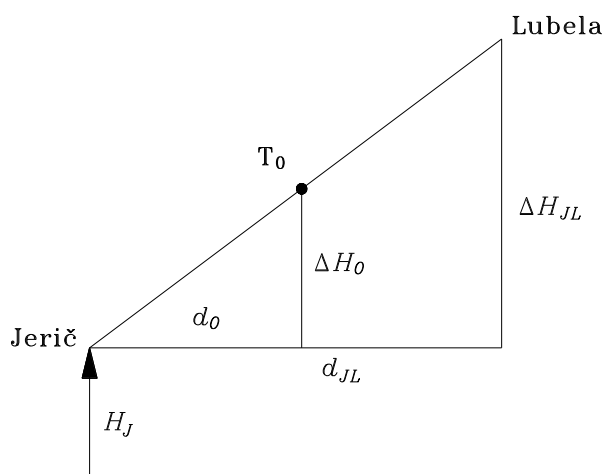
in

$$x_0 = \frac{y_1 - y_J - k_{10} x_J + k_{JL} x_1}{k_{JL} - k_{10}} =$$

$$= \frac{y_1 - y_J + \frac{x_J}{k_{JL}} + k_{JL} x_1}{k_{JL} + \frac{1}{k_{JL}}}. \quad \dots(26)$$

5.4 Izračun zračnega tlaka in višin z linearno porazdelitvijo

Meteorološka postaja je sicer zapisovala zračni tlak in tudi višine, izračunane na podlagi spremembe zračnega tlaka, vendar smo se odločili, da teh podatkov ne bomo uporabili iz zapisov, ker odstopajo za vrednosti nenatančnega letenja v smeri vizure. Zato smo se odločili, da višine in zračni tlak v točkah, v katerih smo merili temperaturo, izračunamo linearno glede na višine stabiliziranih točk in glede na merjeni tlak, izmerjen na stabiliziranih točkah.



Slika 13: Izračun višine H_0 .

Iz podobnih trikotnikov (slika 13) sledi:

$$\frac{\Delta H_0}{d_0} = \frac{\Delta H_{JL}}{d_{JL}}$$
$$H_0 = H_J + \frac{\Delta H_{JL}}{d_{JL}} d_0 \quad \dots(27)$$

Analogno izvedemo še izračun zračnega tlaka p_0 v točki T_0 .

$$\frac{\Delta p_0}{d_0} = \frac{\Delta p_{JL}}{d_{JL}}$$
$$p_0 = p_J + \frac{\Delta p_{JL}}{d_{JL}} d_0 \quad \dots(28)$$

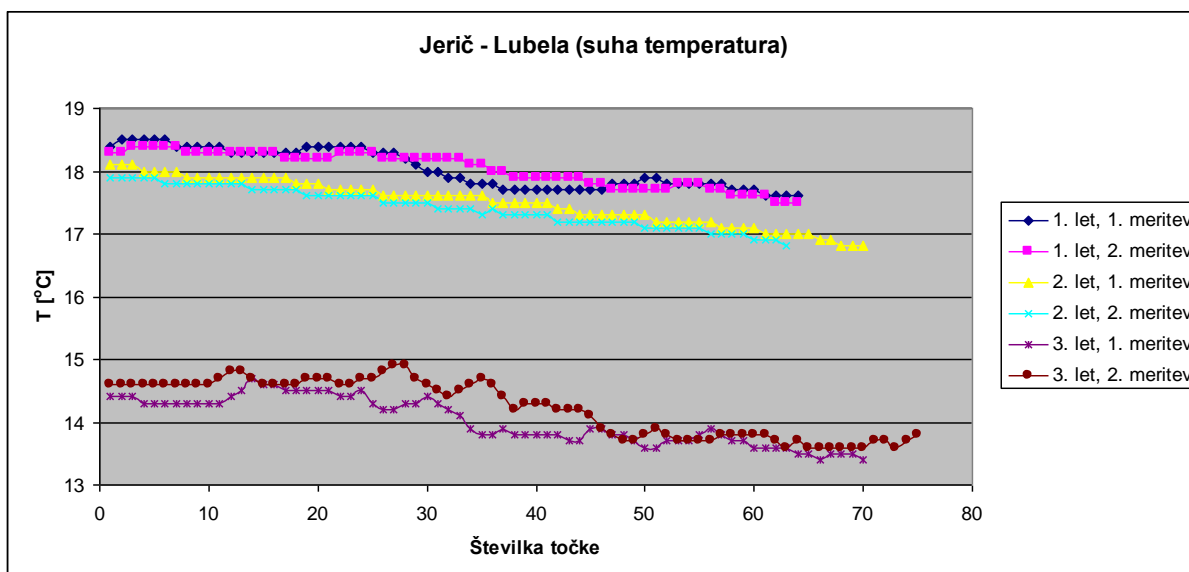
5.5 Prikaz izmerjenih vrednosti (različni grafikoni)

Meritve na terenu in v zraku smo izvajali dva dni. V en sklop smo povezali vse meritve, ki smo jih opravili v času tako imenovanega *enega leta* letala. V en let letala spada polet letala z letališča Šoštanj do prve merjene stranice med točkama male geodinamične mreže Premogovnika Velenje Jerič – Lubela, ki smo jo preleteli dvakrat, nato se nadaljuje do druge merjene stranice med točkama Skorno – Lubela, ki smo jo ravno tako preleteli dvakrat in do povratka nazaj na letališče v Šoštanju. V času ene ure, kolikor je približno trajal en let letala, smo na vsaki stranici izvedli po dve meritvi, ki smo jih v nadaljevanju tudi v tem vrstnem redu označili.

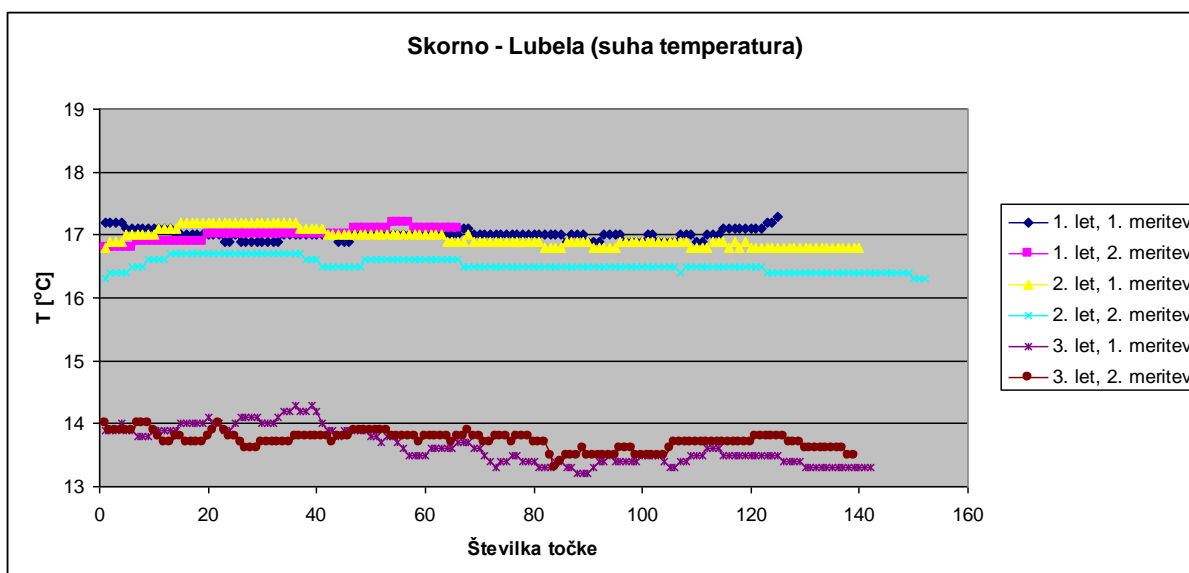
Preglednica 9: Preglednica letov za lažjo časovno predstavitev in povezavo $t[^\circ]$ in $p[\%]$.

Dan	Številka leta	Čas leta
1 (8.5.2008)	1	15:00 - 16:00
1 (8.5.2008)	2	18:00 - 19:00
2 (9.5.2008)	3	7:30 - 8:30

Grafikon 3: Prikaz izmerjenih vrednosti suhe temperature na stranici Jerič – Lubela.

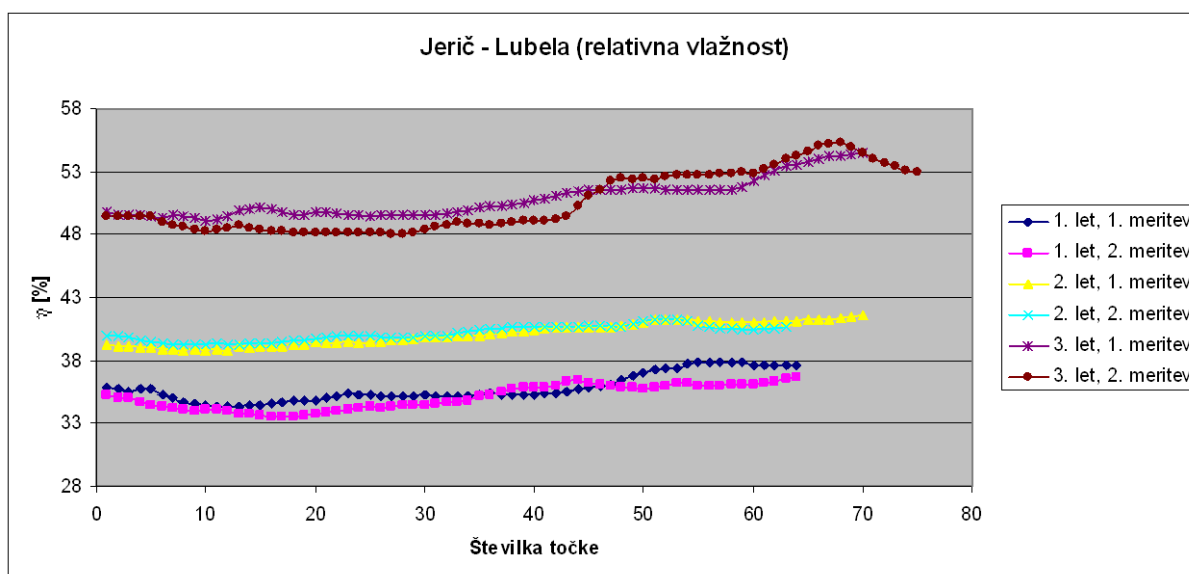


Grafikon 4: Prikaz izmerjenih vrednosti suhe temperature na stranici Skorno – Lubela.



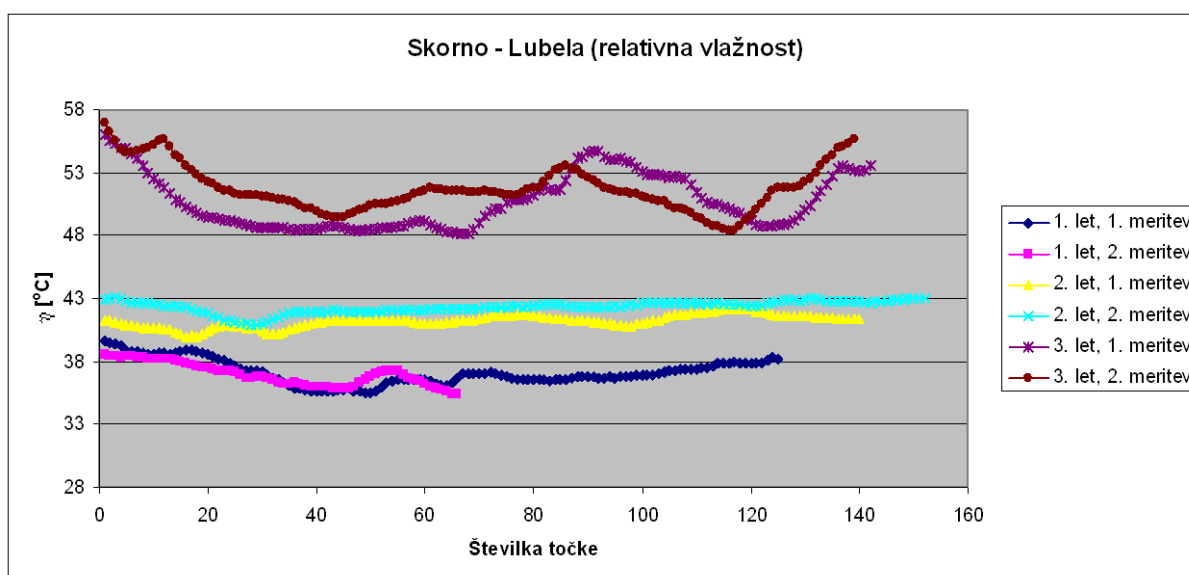
Iz grafikonov 3 in 4 je razvidna odvisnost temperature zraka od časa letov. Prvi in drugi letala sta se izvajala v pregretem popoldanskem ozračju z visokimi temperaturami, tretji let pa v svežem jutranjem zraku, ko so bili meteorološki pogoji bližje normalnim pogojem.

Grafikon 5: Prikaz izmerjenih vrednosti relativne vlažnosti na stranici Jerič – Lubela.



Iz grafikonov 5 in 6 so razvidne izmerjene relativne vlažnosti v času letov. V zgodnjem popoldnevu, ko je bilo ozračje najbolj pregreto, grafikona izkazujeta najnižjo stopnjo relativne vlažnosti, obratno pa v jutranjih urah, ko se je izvajal tretji let, ozračje izkazuje visoko stopnjo relativne vlažnosti.

Grafikon 6: Prikaz izmerjenih vrednosti relativne vlažnosti na stranici Skorno – Lubela.



Iz grafikonov 5 in 6 lahko zaključimo, da je ob visokih temperaturah v popoldanskem času relativna vlažnost zraka praviloma nižja kot v jutranjih urah, ko je ob nekoliko nižjih temperaturah relativna vlažnost zraka praviloma višja.

6 IZRAČUN DOLŽIN

Enako pomembno, kot je samo merjenje dolžin, je tudi skrbno merjenje dejanske atmosfere v času meritev. Meteorološki parametri morajo v čim večji meri odražati dejansko atmosfero na poti merskega žarka. Obravnavali bomo različne načine izračuna n_D , kar lahko značilno vpliva na S_k .

6.1 Izračun n_D ... S_k iz podatkov na stojišču

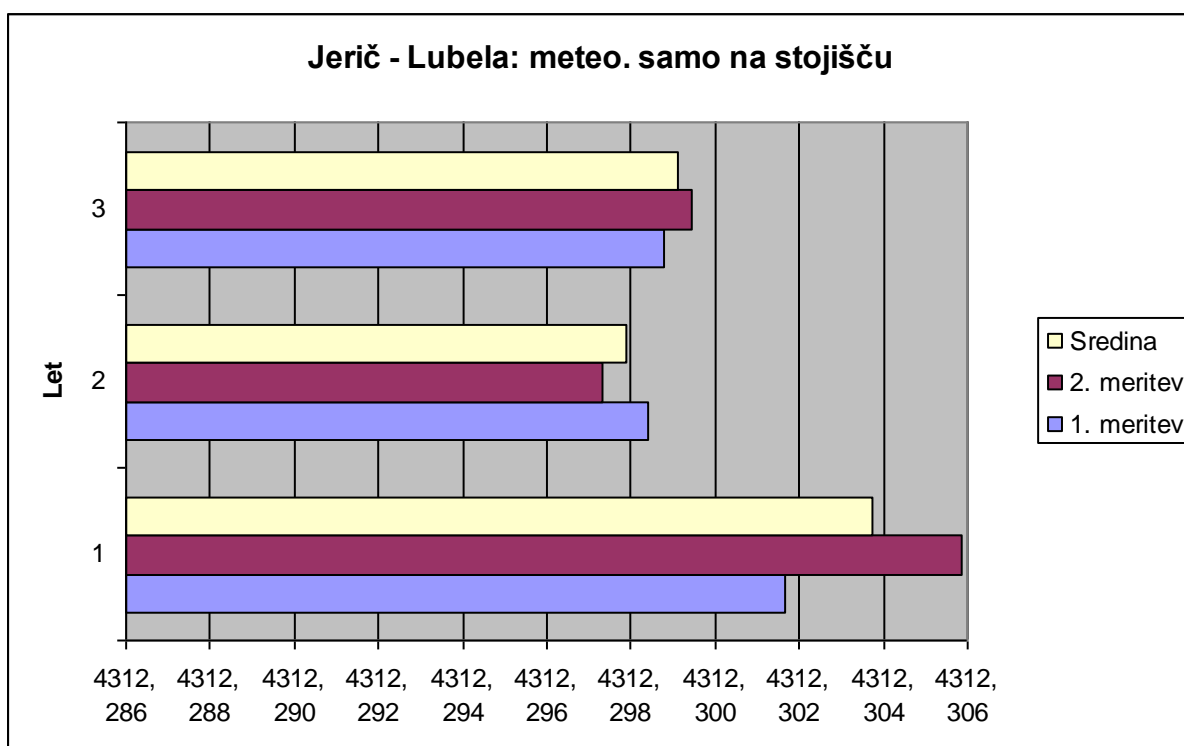
Praviloma se merjenje temperature in zračnega tlaka izvaja na obeh krajnih točkah merjene dolžine in upošteva pri izračunu reducirane dolžine. V poglavju 6.2 smo na ta način izračunali reducirane dolžine in jih kasneje uporabili kot primerjalno ali referenčno vrednost vsem ostalim izračunom reduciranih dolžin. V tem poglavju pa smo reducirano dolžino izračunali samo z uporabo podatkov o temperaturi in zračnem tlaku na stojišču in na ta način izračunali vrednosti dejanskega lomnega količnika n_D ter reducirane dolžine S_k . Pri izračunu dejanskega lomnega količnika, enačba (2), smo tako uporabili vrednost mokrega termometra za izračun delnega tlaka vodne pare e .

Preglednica 10: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih samo na stojišču instrumenta (mokra temperatura je upoštevana).

Stojišče instrumenta od	Vizirana točka do	Temperatura		e	DOLŽINA	Dejanski	DOLŽINA	DOLŽINA sredina	DOLŽINA sredina
		mokra	suha		merjena	lomni kol.	S_k		
		[°C]	[°C]		[m]	n_D	[m]		
Lubela	Jerič	10,7	18,3	6,1	4312,1898	1,000259944	4312,3017	4312,3037	4312,3002
Lubela	Jerič	11,9	19,3	7,0	4312,1900	1,000259001	4312,3058		
Lubela	Skorno	12,1	19,9	6,9	7437,2275	1,000258467	7437,4313	7437,4303	7437,4191
Lubela	Skorno	12,0	19,6	6,9	7437,2272	1,000258697	7437,4293		
Lubela	Skorno	11,0	17,6	6,7	7437,2267	1,000260478	7437,4156	7437,4128	
Lubela	Jerič	10,7	17,1	6,7	4312,1909	1,000260944	4312,2984	4312,2979	
Lubela	Jerič	10,6	16,8	6,6	4312,1909	1,000261180	4312,2973		
Lubela	Skorno	10,2	16,2	6,5	7437,2305	1,000261736	7437,4100		
Lubela	Skorno	9,2	13,0	7,0	7437,2573	1,000264912	7437,4132	7437,4141	
Lubela	Jerič	9,3	13,1	7,0	4312,2081	1,000264834	4312,2988	4312,2991	
Lubela	Jerič	9,4	13,3	7,0	4312,2080	1,000264657	4312,2994		
Lubela	Skorno	9,4	13,5	7,0	7437,2556	1,000264453	7437,4150		

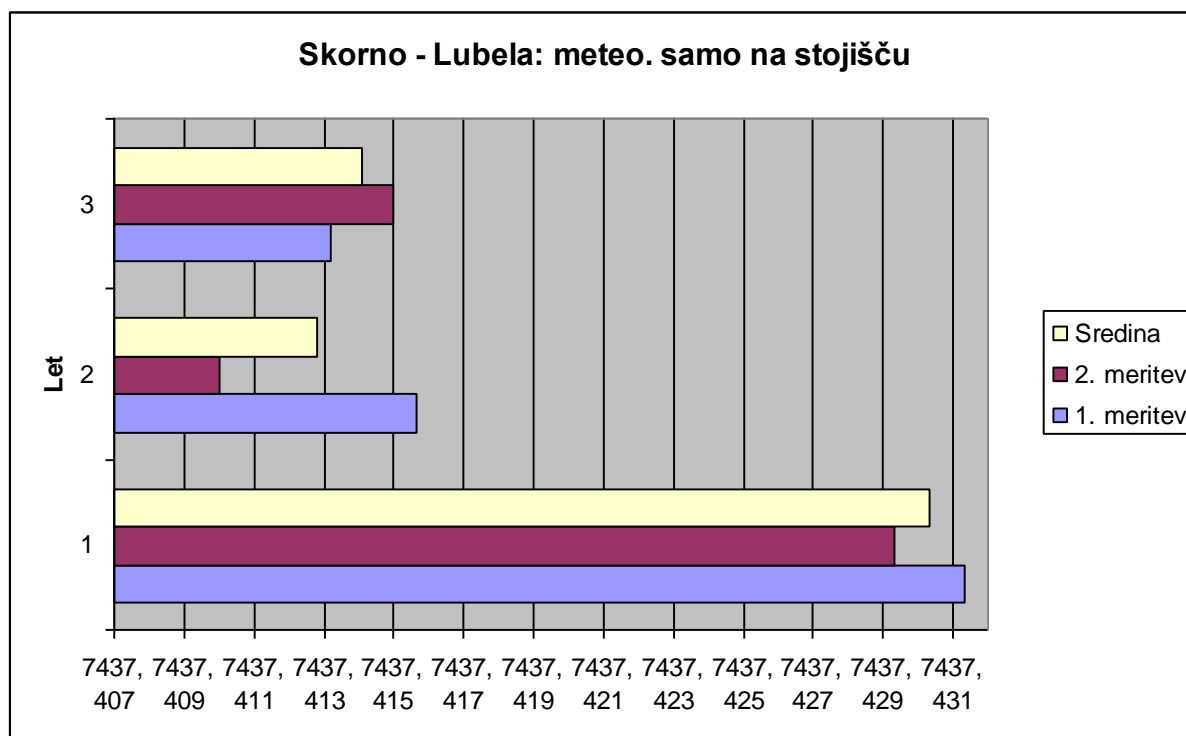
V vseh treh letih smo izvedli dve ponovitvi meritev dolžin med danima točkama Lubela – Jerič in Lubela – Skorno. Izračunani reducirani dolžini sta rezultat sredin meritev v posameznih letih, nato pa še sredin treh letov ob dejanskem upoštevanju meteoroloških podatkov na stojišču.

Grafikon 7: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih samo na stojišču instrumenta (mokra temperatura je upoštevana).



Iz grafikona 7 je razvidno, da do največjih odstopanj med reducirano dolžino Jerič – Lubela pride v primeru prvega leta, ko je razlika v izmerjeni mokri temperaturi med obema meritvama večja od ene stopinje Celzija. Razlika med reduciranimi dolžinama med obema meritvama doseže 4 mm, kar ni zanemarljivo. V primeru drugega in tretjega leta so te razlike manjše, ker so tudi izmerjene mokre temperature med obema meritvama znotraj enega leta skoraj identične.

Grafikon 8: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih samo na stojišču instrumenta (mokra temperatura je upoštevana).



V primeru merjenje dolžine med točkama Skorno – Lubela lahko iz grafikona 8 razberemo največje odstopanje v drugem letu, ko je razlika v izmerjeni mokri temperaturi med izmerama preko ene stopinje Celzija. Ker je dolžina precej daljša (cca 7437 m), razlika med reduciranimi dolžinama med dvema meritvama doseže kar 6 mm. Iz preglednice 9 je razvidno, da že najmanjša odstopanja velikosti desetink stopinje pri merjenju mokre temperature pri tako dolgi dolžini, povzročijo razlike v reducirani dolžini preko 2 mm. Iz tega lahko zaključimo, kako pomembno je skrbno merjenje meteoroloških parametrov na stojišču.

6.2 Izračun n_D ... S_k iz podatkov na stojišču in vizirani točki

Merjenje temperature in zračnega tlaka na stojišču in hkrati na vizirani točki nam omogoča izračun reducirane dolžine, pri kateri je po sedanjih izkušnjah optimalno upoštevan meteorološki vpliv na merjeno dolžino. Dejanski lomni količnik smo v tem primeru

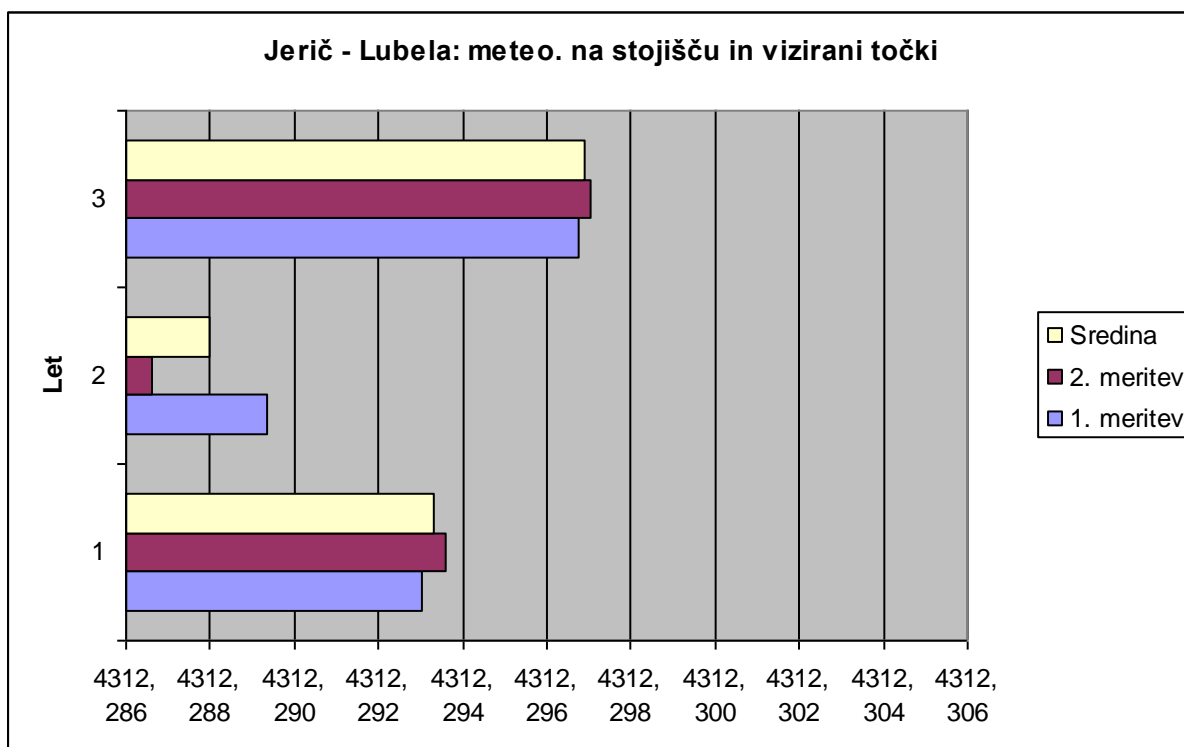
izračunali na dva načina in sicer prvič iz srednjih vrednosti temperatur in zračnih tlakov na stojišču in vizirani točki ter drugič iz srednjih vrednosti lomnih količnikov na stojišču in vizirani točki. V izračunu reducirane dolžine pa smo uporabili povprečno vrednost predhodno izračunanih lomnih količnikov.

Preglednica 11: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih na stojišču instrumenta in vizirani točki (mokra temperatura je upoštevana).

Stojišče instrumenta od	Vizirana točka do	Stojišče		Viz. točka		e [torr]	Dejanski lomni kol. n_D	DOLŽINA S_k [m]	DOLŽINA sredina	DOLŽINA sredina sredin
		mokra	suha	mokra	suha					
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]					
Lubela	Jerič	10,7	18,3	13,0	20,6	6,8	1,000261943	4312,2930	4312,2933	4312,2927
Lubela	Jerič	11,9	19,3	12,5	19,8	7,2	1,000261838	4312,2936		
Lubela	Skorno	12,1	19,9	11,3	17,1	7,1	1,000259198	7437,4259	7437,4250	7437,4202
Lubela	Skorno	12,0	19,6	11,3	16,6	7,2	1,000259393	7437,4242		
Lubela	Skorno	11,0	17,6	11,3	16,6	7,1	1,000260840	7437,4129	7437,4103	
Lubela	Jerič	10,7	17,1	11,8	19,0	6,8	1,000263046	4312,2893	4312,2880	
Lubela	Jerič	10,6	16,8	11,2	17,9	6,7	1,000263671	4312,2866		
Lubela	Skorno	10,2	16,2	10,8	15,6	7,0	1,000262064	7437,4076		
Lubela	Skorno	9,2	13,0	12,3	15,1	8,2	1,000263270	7437,4254	7437,4254	
Lubela	Jerič	9,3	13,1	13,2	18,5	7,9	1,000265308	4312,2968	4312,2969	
Lubela	Jerič	9,4	13,3	13,4	18,5	8,0	1,000265213	4312,2970		
Lubela	Skorno	9,4	13,5	11,8	15,1	7,9	1,000263056	7437,4253		

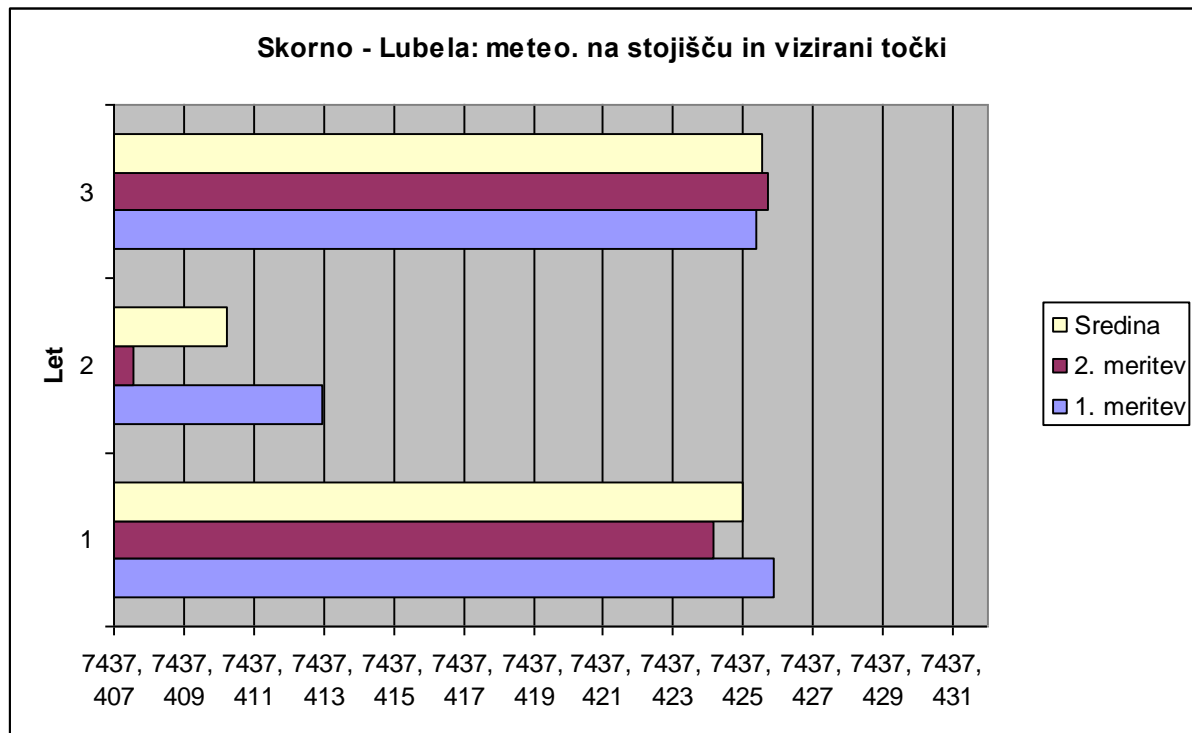
Iz preglednice 11 lahko razberemo precejšnje razlike med reduciranimi dolžinami med posameznimi leti. Največja razlika v reducirani dolžini Jerič-Lubela je ugotovljena med drugim in tretjim letom in znaša kar 9 mm. Podobno je ugotovljena tudi velika razlika v reducirani dolžini Skorno-Lubela med drugim in tretjim letom, ki preseže 15 mm.

Grafikon 9: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta in hkrati na vizirani točki (mokra temperatura je upoštevana).



Iz grafikona 9 je razvidno, da do največjih razlik v reduciranih dolžinah med meritvami pride v drugem letu. Razlika med izmerjenimi vrednostmi mokre temperature med meritvami je precej manjša od ene stopinje Celzija, razlika med reduciranimi dolžinami pa doseže 3 mm. V prvem in tretjem letu so razlike reduciranih dolžin med meritvama minimalne.

Grafikon 10: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta in hkrati na vizirani točki (mokra temperatura je upoštevana).



Tudi grafikon 10 prikazuje največjo razliko med reduciranimi dolžinami v drugem letu čeprav so razlike v izmerjeni mokri temperaturi do ene polovice stopinje Celzija, razlika med reduciranimi dolžinami pa doseže 6 mm. V prvem in tretjem letu pa so razlike med reduciranimi dolžinami minimalne.

6.3 Izračun n_D ... S_k iz podatkov na stojišču, vizirani točki in sredini merjeni v zraku

Meteorološka postaja, nameščena v letalu, je zapisovala datum in čas, suho temperaturo, zračni tlak ter relativno vlago, na poti vizure med opazovanima točkama vsaki dve sekundi, zato smo na celotni poti med opazovanimi točkami zbrali relativno veliko podatkov. Za izračun delnega tlaka vodne pare smo uporabili enačbo, ki omogoča izračun delnega tlaka vodne pare na osnovi merjene suhe temperature:

$$e = 6,1094^{\frac{17,625t}{t+243,04}} \quad \dots(29)$$

(vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_thermodynamics#cite_note-3)

kjer pomenijo:

e ... delni tlak vodne pare na osnovi merjene suhe temperature v [hPa],

t ... merjena suha temperatura v [°C].

Prvo selekcijo meteoroloških podatkov zajetih z letenjem v smeri vizure med opazovanimi točkami smo izvedli tako, da smo izbrali zapisan podatek najbližji sredinski točki med točkama in iz tega podatka izračunali lomni količnik svetlobe na tem mestu. Izračunani lomni količnik smo v izračun dejanskega lomnega količnika vpeljali po naslednji enačbi:

$$n_D = \frac{1}{6}(n_A + 4n_{sr} + n_B), \quad \dots(30)$$

(vir: http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/automatyka/c_elektroniczna_tech_n_pomiarowa/ew13.htm)

kjer pomenijo

n_D ... dejanski lomni količnik svetlobe pri dejanskih razmerah t , p , e ,

n_A ... lomni količnik svetlobe pri dejanskih razmerah t , p , e na stojišču,

n_B ... lomni količnik svetlobe pri dejanskih razmerah t , p , e na vizirani točki,

n_{sr} ... lomni količnik svetlobe pri dejanskih razmerah t , p , e na sredini med A in B .

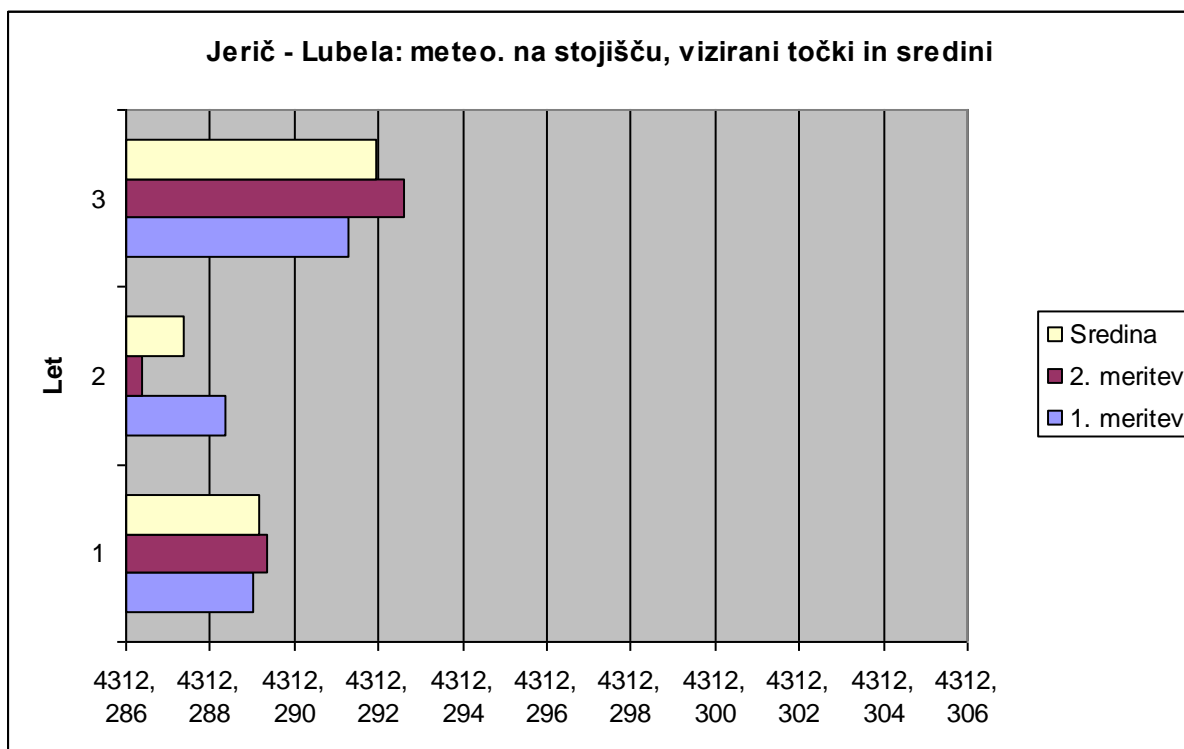
Pri izračunu reducirane dolžine je tako upoštevana merjena mokra temperatura na krajnih točkah merjene stranice in merjena relativna vlažnost na sredini stranice.

Preglednica 12: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih na stojišču instrumenta in vizirani točki in vmesni točki med njima (mokra temperatura je upoštevana).

Stojišče instrumenta od	Vizirana točka do	Stojišče		Viz. Točka		V zraku		DOLŽINA	DOLŽINA	DOLŽINA
		mokra	suha	mokra	suha	suha			sredina	sredina
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	e [torr]	S _k [m]		sredina
Lubela	Jerič	10,7	18,3	13,0	20,6	17,7	5,4	4312,2890	4312,2892	4312,2895
Lubela	Jerič	11,9	19,3	12,5	19,8	18,0	5,5	4312,2893		
Lubela	Skorno	12,1	19,9	11,3	17,1	17,0	5,2	7437,4187	7437,4190	7437,4174
Lubela	Skorno	12,0	19,6	11,3	16,6	17,1	5,4	7437,4193		
Lubela	Skorno	11,0	17,6	11,3	16,6	16,9	6,0	7437,4119	7437,4109	
Lubela	Jerič	10,7	17,1	11,8	19,0	17,5	6,0	4312,2884	4312,2874	
Lubela	Jerič	10,6	16,8	11,2	17,9	17,3	6,0	4312,2864		
Lubela	Skorno	10,2	16,2	10,8	15,6	16,5	6,0	7437,4100		
Lubela	Skorno	9,2	13,0	12,3	15,1	13,4	5,8	7437,4219	7437,4223	
Lubela	Jerič	9,3	13,1	13,2	18,5	13,9	5,9	4312,2913	4312,2919	
Lubela	Jerič	9,4	13,3	13,4	18,5	14,2	6,0	4312,2926		
Lubela	Skorno	9,4	13,5	11,8	15,1	13,8	6,1	7437,4227		

Iz preglednice 12 ponovno razberemo precej velike razlike v reduciranih dolžinah med drugim in tretjim letom. V primeru merjene dolžine Jerič-Lubela ta razlika doseže 5 mm, v primeru dolžine Skorno-Lubela pa kar 11 mm.

Grafikon 11: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta , na vizirani točki in na sredini merjeno v zraku (mokra temperatura je upoštevana).



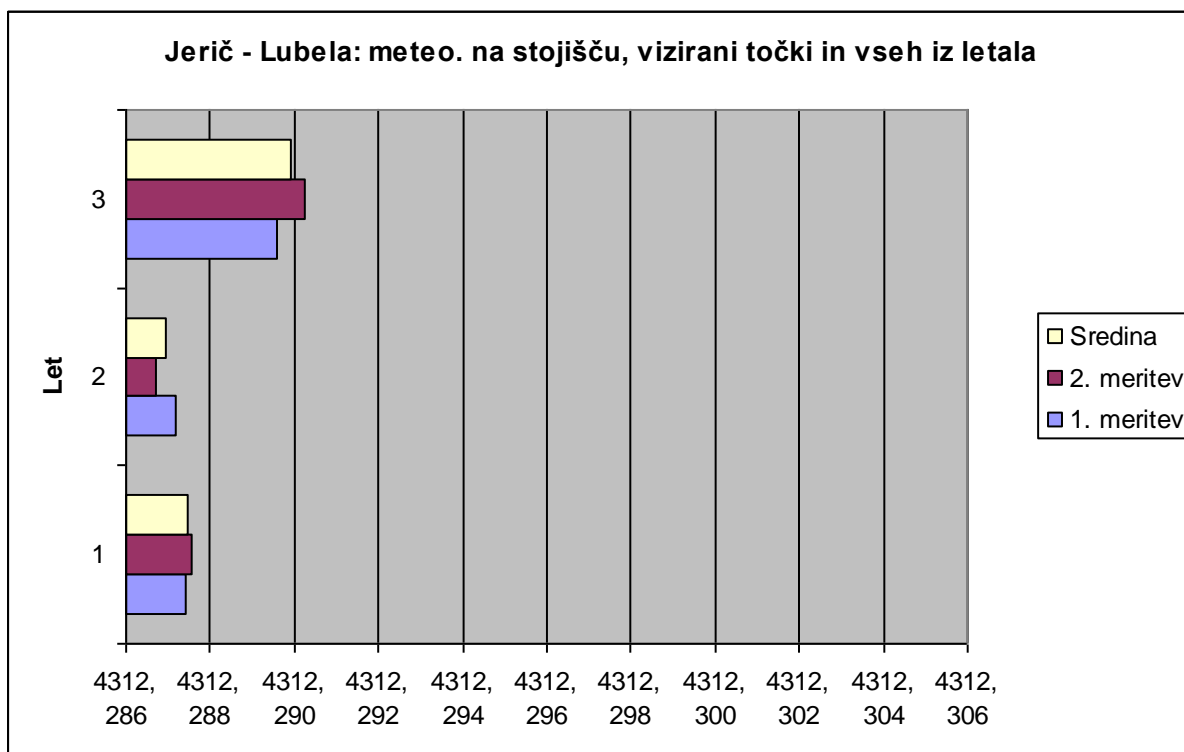
Iz grafikona 11 je razvidno, da do največjih odstopanj med reduciranimi dolžinami pride v drugem letu. Razlika znaša 2 mm. Zanimivo, da je v prvem letu, kljub razliki v izmerjeni vrednosti mokre temperature preko ene stopinje Celzija, razlika v reducirani dolžini zanemarljivo majhna.

Preglednica 13: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih na stojišču instrumenta in vizirani točki in iz srednje/povprečne temperature na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).

Stojišče instrumenta od	Vizirana točka do	Stojišče		Viz. točka		V zraku-		DOLŽINA	DOLŽINA	DOLŽINA
		mokra	suha	mokra	suha	povp. suha	e			
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[torr]	S _k [m]	sredina	sredina sredin
Lubela	Jerič	10,7	18,3	13,0	20,6	18,1	5,7	4312,2874	4312,2875	4312,2881
Lubela	Jerič	11,9	19,3	12,5	19,8	18,1	5,7	4312,2875		
Lubela	Skorno	12,1	19,9	11,3	17,1	17,0	5,5	7437,4155	7437,4159	7437,4163
Lubela	Skorno	12,0	19,6	11,3	16,6	17,0	5,6	7437,4163		
Lubela	Skorno	11,0	17,6	11,3	16,6	17,0	6,0	7437,4117	7437,4115	
Lubela	Jerič	10,7	17,1	11,8	19,0	17,5	6,1	4312,2872	4312,2869	
Lubela	Jerič	10,6	16,8	11,2	17,9	17,4	6,1	4312,2867		
Lubela	Skorno	10,2	16,2	10,8	15,6	16,5	6,0	7437,4113		
Lubela	Skorno	9,2	13,0	12,3	15,1	13,6	6,1	7437,4220	7437,4215	
Lubela	Jerič	9,3	13,1	13,2	18,5	14,1	6,4	4312,2896	4312,2899	
Lubela	Jerič	9,4	13,3	13,4	18,5	14,3	6,4	4312,2903		
Lubela	Skorno	9,4	13,5	11,8	15,1	13,7	6,2	7437,4209		

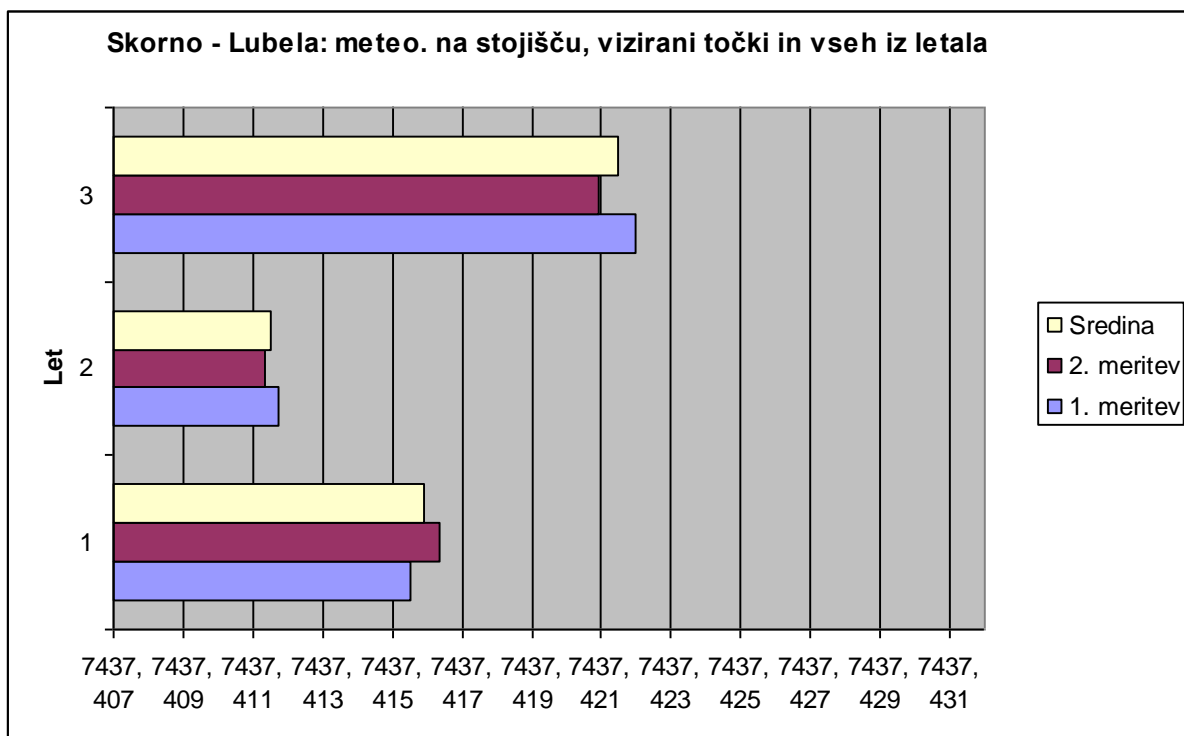
Iz preglednice 13 razberemo, da so razlike v reduciranih dolžinah med meritvami v posameznih letih zanemarljivo majhne. Ponovno pa ugotavljamo večjo razliko v reduciranih dolžinah med drugim in tretjim letom, ki v primeru dolžine Skorno- Lubela doseže centimeter.

Grafikon 13: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojišču instrumenta , na vizirani točki in iz srednje/povprečne temperature na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana)



Iz grafikona 13, je razvidno, da so razlike v reduciranih dolžinah v posameznih letih ob upoštevanju srednje temperature na celotni dolžini stranice, zelo majhne. Razlika reduciranih dolžin med drugim in tretjim letom znaša 3 mm.

Grafikon 14: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojšču instrumenta , na vizirani točki in iz srednje/povprečne temperature na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).



Iz grafikona 14 je razvidno, da so tudi v primeru daljše merjene dolžine, razlike v reduciranih dolžinah v posameznih letih, ob upoštevanju srednje temperature na celotni dolžini stranice, zelo majhne. Ugotavljamo večjo razliko med drugim in tretjim letom, ki znaša en centimeter.

6.5 Izračun $n_D \dots S_k$ iz posameznih temperatur

V tem primeru smo dolžino izračunali kot vsoto malih dolžin, kjer je bil vpliv meteoroloških parametrov upoštevan za vsako dolžino posebej.

Prvo malo dolžino smo dobili tako, da smo jo izračunali od stojšču (na primer Jerič) do prve točke T_0 (glej poglavje 5.3), ki smo jo izračunali glede na prvo točko T_1 , kjer smo v letalu izmerili meteorološke parametre. To dolžino smo reducirali z meteorološkimi parametri, izmerjenimi na stojšču in v letalu v točki 1 (po enakem principu opisanem v poglavju 6.2).

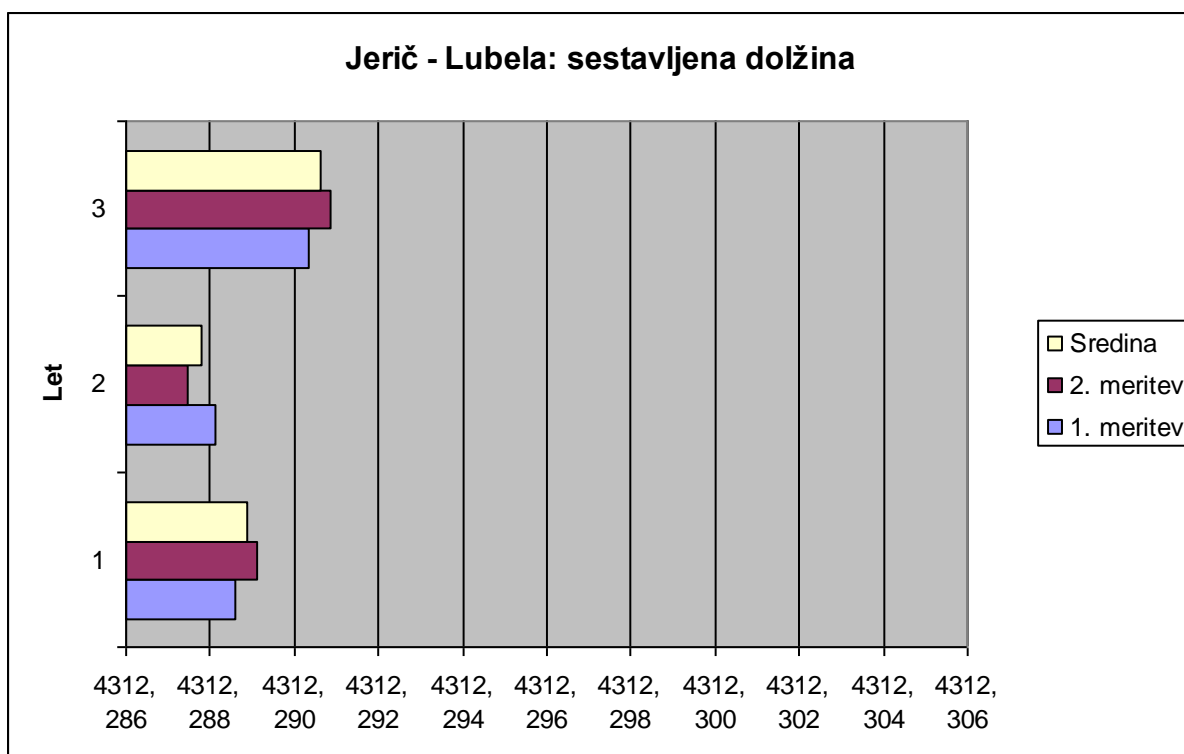
Drugo posamezno malo dolžino smo dobili tako, da smo jo izračunali od prve točke T_0 do druge točke T_0 , ki smo ju izračunali glede na prvo in drugo točko, kjer smo v letalu izmerili meteorološke parametre. Na opisan način smo tako dobili vse male dolžine, ki smo jih na koncu sešteli in dobili sestavljeno dolžino med stojiščema za posamezni let.

Preglednica 14: Izračun reducirane dolžine iz meteoroloških podatkov, merjenih na stojišču instrumenta in vizirani točki in iz posameznih temperatur na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).

Stojišče instrumenta od	Vizirana točka do	DOLŽINA				
		DOLŽINA meteo. popr.	DOLŽINA	DOLŽINA	DOLŽINA sredina	DOLŽINA sredina sredin
		D [m] Vsota malih dolžin	S_r [m]	S_k [m]		
Lubela	Jerič	4312,2886	4312,2886	4312,2886	4312,2889	4312,2891
Lubela	Jerič	4312,2891	4312,2891	4312,2891		
Lubela	Skorno	7437,4166	7437,4166	7437,4166	7437,4205	7437,4178
Lubela	Skorno	7437,4244	7437,4244	7437,4244		
Lubela	Skorno	7437,4121	7437,4121	7437,4121	7437,4118	
Lubela	Jerič	4312,2881	4312,2881	4312,2881	4312,2878	
Lubela	Jerič	4312,2875	4312,2875	4312,2875		
Lubela	Skorno	7437,4115	7437,4115	7437,4115		
Lubela	Skorno	7437,4216	7437,4216	7437,4216	7437,4212	
Lubela	Jerič	4312,2904	4312,2904	4312,2904	4312,2906	
Lubela	Jerič	4312,2909	4312,2909	4312,2909		
Lubela	Skorno	7437,4208	7437,4208	7437,4208		

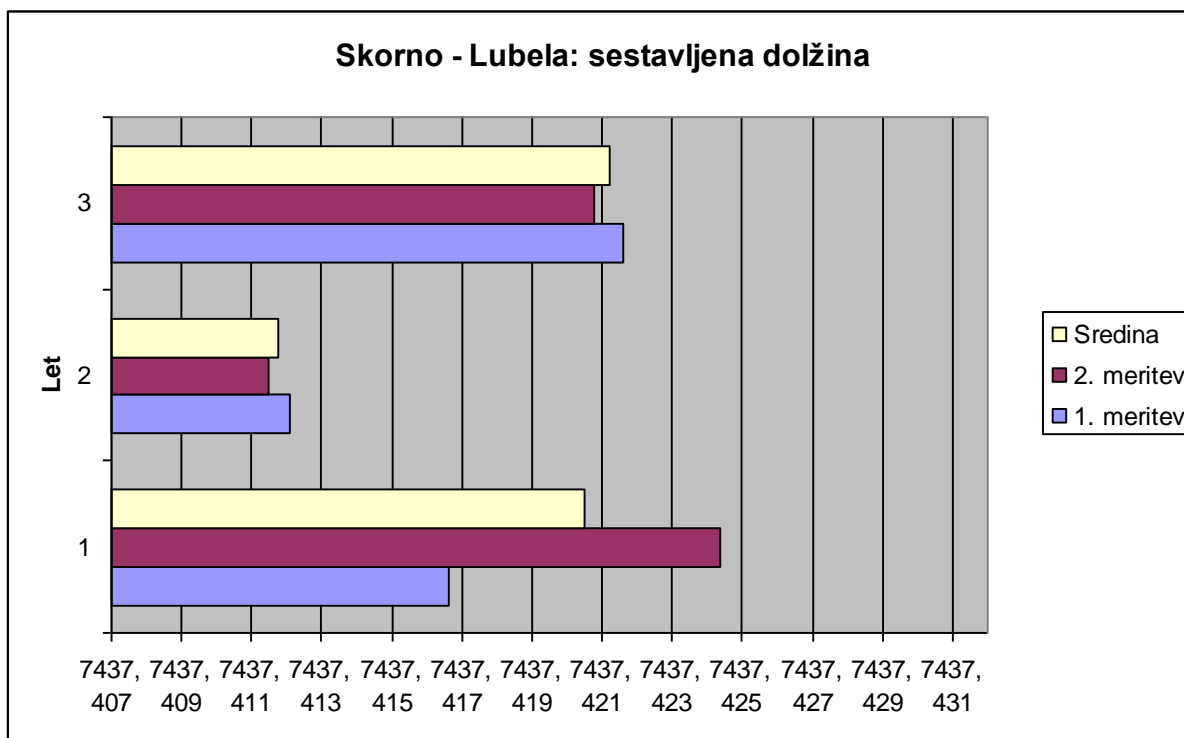
Iz preglednice 14 zaznamo določene razlike v reduciranih dolžinah predvsem med drugim in tretjim letom. Razlika v reduciranih dolžinah Jerič-Lubela znaša 3 mm, razlika v reducirani dolžini Skorno-Lubela pa doseže centimeter.

Grafikon 15: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojšču instrumenta , na vizirani točki in iz posameznih temperatur na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).



Iz grafikona 15 je razvidno, da se razlike v reduciranih dolžinah med meritvami v posameznih letih, le malo razlikujejo. Hkrati lahko zaključimo, da se zmanjšujejo tudi razlike med reduciranimi dolžinami med posameznimi leti, ki znašajo največ 3 mm. Zaključimo lahko, da upoštevanje meteoroloških podatkov na krajših odsekih merjene dolžine, lahko vodi do bolj homogenih rezultatov.

Grafikon 16: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki popravek izračunan iz podatkov merjenih na stojšču instrumenta , na vizirani točki in iz posameznih temperatur na celotni dolžini stranice (mokra temperatura je upoštevana).



Iz grafikona 16 lahko vidimo, da so razlike v reduciranih dolžinah v posameznem letu ob upoštevanju meteoroloških popravkov na krajših odsekih merjene dolžine sicer majhne, razlika med drugim in tretjim letom pa še vedno znaša okoli enega centimetra.

6.6 Primerjava izračunanih dolžin

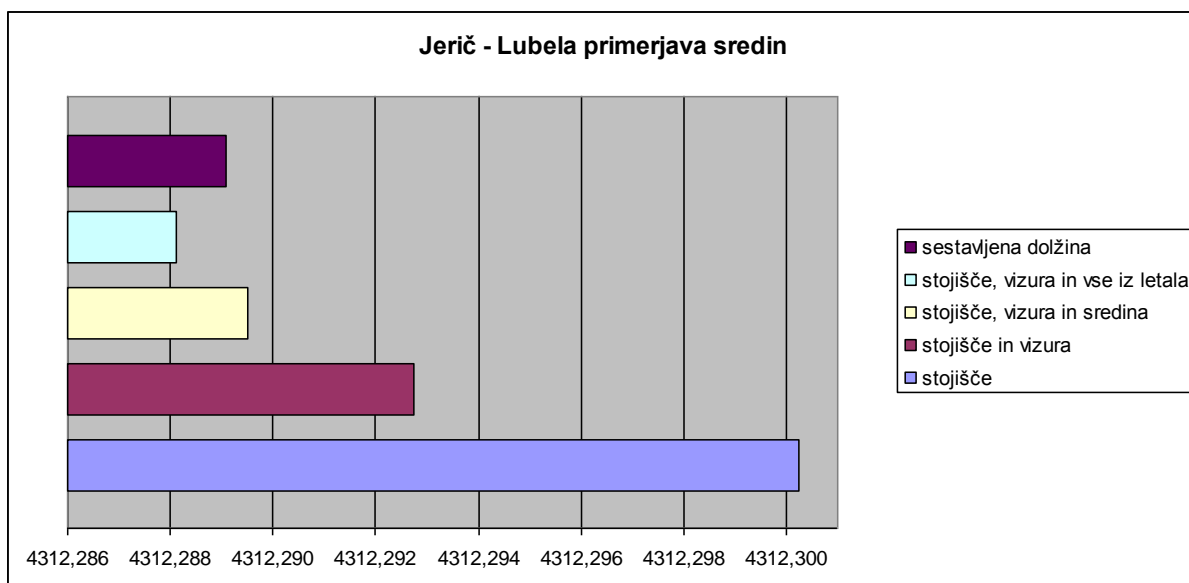
Na naslednjem grafikonu prikazujemo izračune dolžin dveh stranic male geodinamične mreže Premogovnika Velenje, pri katerih je vpliv meteoroloških parametrov upoštevan na pet različnih načinov:

1. meteorološki parametri upoštevani le na stojšču,
2. meteorološki parametri upoštevani na stojšču in vizirani točki,

3. meteorološki parametri upoštevani na stojišču, vizirani točki in sredini, merjeni v zraku,
4. meteorološki parametri upoštevani na stojišču, vizirani točki in iz merjene srednje/povprečne temperature na celotni dolžini stranice,
5. meteorološki parametri upoštevani na krajših odsekih, merjenih v zraku.

V vseh primerih je pri izračunu dejanskega lomnega količnika svetlobe upoštevan tudi delni tlak vodne pare.

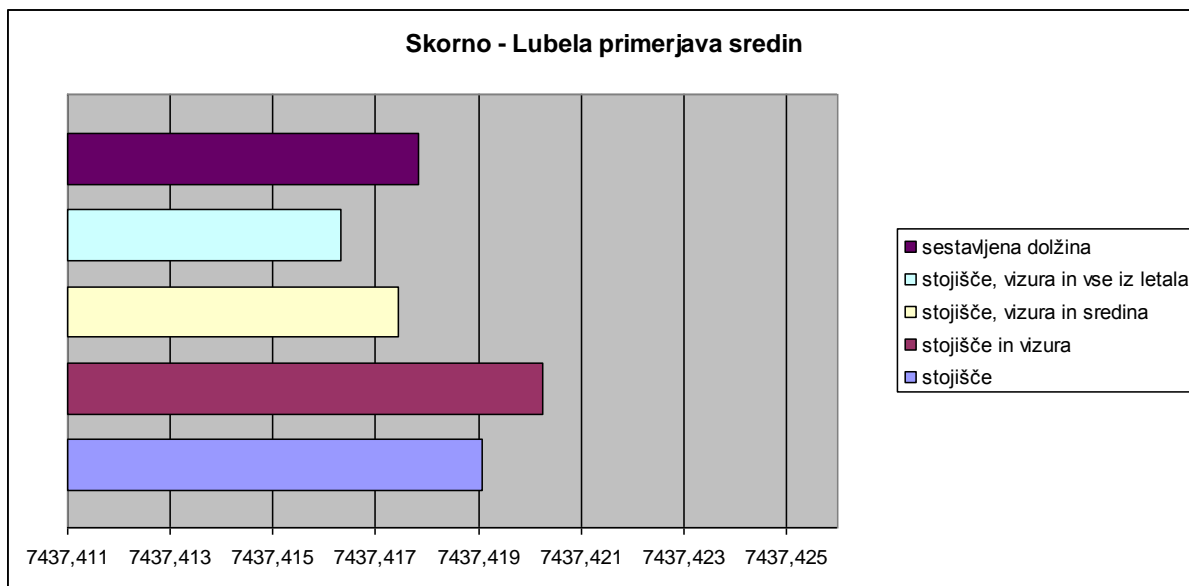
Grafikon 17: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, meteorološki vpliv upoštevan v celoti.



Iz grafikona 17 lahko razberemo, da so med seboj primerljive reducirane dolžine, ki jih izračunamo na osnovi merjenih meteoroloških parametrov z letalom (na poti merskega žarka v zraku). Dolžine se med seboj le malo razlikujejo. Če kot referenčno dolžino privzamemo dolžino, reducirano na osnovi meteoroloških parametrov na stojišču in vizirani točki (2. način), kar je v praksi najpogostejši primer, ugotovimo, da so reducirane dolžine z upoštevanjem vmesnih meteoroloških parametrov (3., 4. in 5. način) v povprečju krajše za nekaj milimetrov. V praksi praviloma ne razpolagamo z meteorološkimi podatki na poti merskega žarka. Iz grafikona je tudi razvidno, da pri tako dolgi merjeni dolžini nikakor ne

smemo upoštevati meteoroloških parametrov le na stojišču (1. način), saj je tako izračunana dolžina predolga in se od referenčne razlikuje kar za 7 milimetrov.

Grafikon 18: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, meteorološki vpliv upoštevan v celoti.

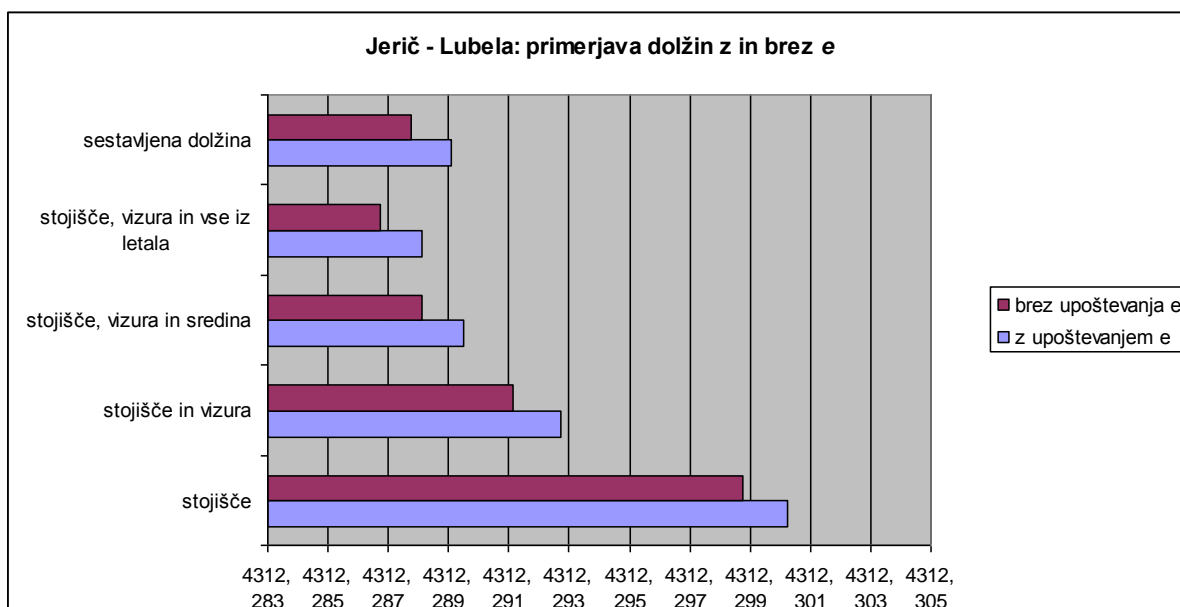


Tudi iz grafikona 18 lahko razberemo, da so dolžine, ki so reducirane na osnovi meteoroloških parametrov, izmerjenih na poti merskega žarka v zraku, med seboj primerljive in praviloma krajše od referenčne dolžine, ki jo izračunamo na osnovi upoštevanja meteoroloških parametrov na stojišču in vizirani točki.

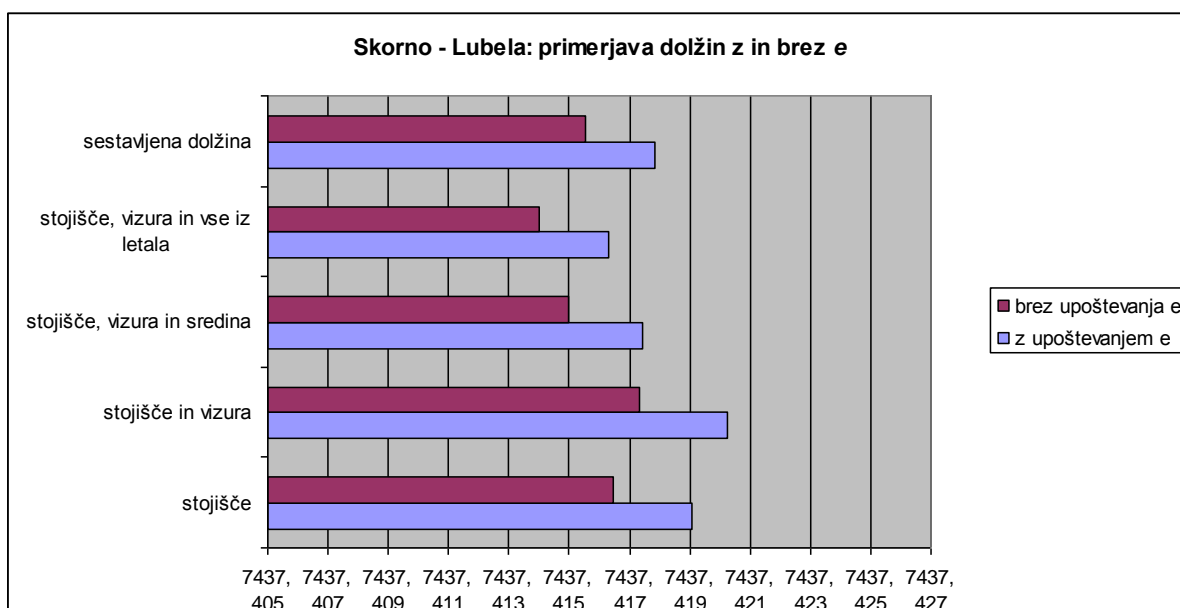
Ugotavljamo, da v primeru merjene dolžine Skorno-Lubela razlike v reduciranih dolžinah po različnih načinih niso tako velike kot v primeru merjene dolžine Jerič-Lubela. Domnevamo, da na to dodatno vpliva atmosfera, ki v primeru merjene dolžine Jerič-Lubela poteka preko jezera.

Naslednja dva grafikona prikazujeta vrednosti izračunanih dolžin stranic, pri katerih pa v izračunu dejanskega lomnega količnika, delni tlak vodne pare e ni upoštevan.

Grafikon 19: Prikaz reducirane dolžine Jerič – Lubela, pri kateri je vpliv meteoroloških podatkov upoštevan v različnih kombinacijah.



Grafikon 20: Prikaz reducirane dolžine Skorno – Lubela, pri kateri je vpliv meteoroloških podatkov upoštevan v različnih kombinacijah.



Iz grafikonov 19 in 20 je razvidno, da neupoštevanje delnega tlaka vodne pare e vodi k reducirani dolžini, ki je krajša od dejanske vrednosti, ne glede na to, na kakšen način so upoštevani meteorološki podatki. Dolžina je od dejanske vrednosti krajša skoraj za konstantno vrednost. Pri daljši dolžini je neupoštevanje vpliva mokre temperature še večji. To je seveda pričakovan rezultat, saj po enačbi (19) izračunamo enako zmanjšanje dolžine, če delnega tlaka vodne pare e ne upoštevamo.

7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo želeli raziskati atmosferski vpliv na merjeno dolžino med dvema stranicama male geodinamične mreže Premogovnika Velenje. Izmerili smo dve dolžini Jerič-Lubela (4,3 km), katere vizura poteka preko Velenjskega jezera in Skorno-Lubela (7,5 km), katere vizura poteka nad zemljiščem. Ker v praksi praviloma dolžine reduciramo tako, da upoštevamo meteorološke parametre na stojišču in vizirani točki, nas je zanimalo, ali lahko dodatno izmerjeni meteorološki parametri na poti merskega žarka v zraku značilno vplivajo na vrednost reducirane dolžine.

Atmosfera v prizemnih plasteh je sestavljena iz različnih plinov, katerih gostota je odvisna predvsem od temperature zraka, zračnega tlaka in količine vodne pare v zraku. Naša naloga je bila izmeriti meteorološke parametre na poti merskega žarka med dvema točkama, ki sta med seboj oddaljeni več kilometrov in na ta način čim bolj natančno določiti gostoto zraka in s tem povezani dejanski lomni količnik n_D . Iz poznavanja ozračja vemo, da ni stalne porazdelitve temperature, tlaka in količine vodne pare v zraku, zato je tem bolj pomembno merjenje meteoroloških parametrov, da bi lahko upoštevali njihove spremembe in vpliv na merjeno dolžino. Dobre rezultate lahko dobimo s skrbno izbranimi in kalibriranimi instrumenti za merjenje ter dobro izurjenimi operaterji. Zajem meteoroloških parametrov na zemlji in v zraku smo opravili z nam dostopno najboljšo opremo. Meteorološke parametre smo merili na stojišču in vizirani točki kot je v praksi običaj ter kot posebnost te naloge tudi na poti merskega žarka v zraku, kar smo izvedli z ultra lahkim letalom, ki omogoča letenje pri nizkih hitrostih. Opravili smo tri lete v različnih stanjih atmosfere, v okviru enega leta smo izvedli dve neodvisni meritvi dveh merjenih dolžin.

Rezultati naših meritev so potrdili raznolikosti v ozračju in tudi pomembnost natančnega merjenja meteoroloških parametrov. Odgovor na postavljeno hipotezo, ali lahko različni načini upoštevanja meteoroloških parametrov značilno vplivajo na izračun dejanske atmosfere in s tem na redukcijo merjene dolžine, je pritrdilen. Opravili smo analizo redukcij merjenih dolžin na pet različnih načinov. Vključevanje različnega števila izmerjenih meteoroloških parametrov v izračun reducirane dolžine nam kaže, da se z večanjem

vklučenih meteoroloških podatkov bližamo »pravi« vrednosti reducirane dolžine. Če kot referenčno vrednost privzamemo dolžino, reducirano na osnovi upoštevanih meteoroloških podatkov na stojišču in vizirani točki, kar je v praksi običaj, lahko ugotovimo, da so dolžine, reducirane na osnovi upoštevanja meteoroloških parametrov na poti merskega žarka v zraku, praviloma krajše od referenčne za nekaj milimetrov. Hkrati potrjujemo znano dejstvo, da upoštevanje meteoroloških parametrov izključno na stojišču, nikakor ne zagotavlja »prave« vrednosti reducirane dolžine, ki je od referenčne dolžine praviloma daljša.

Analiza vpliva delnega tlaka vodne pare v izračunu reducirane dolžine pa nam pokaže, da je pri vseh načinih redukcije dolžin vpliv konstanten, kar pomeni, da se popravek reducirane dolžine konstantno veča z večanjem merjene dolžine. V primeru neupoštevanja delnega tlaka vodne pare, so reducirane dolžine krajše od »prave« vrednosti. Poudariti velja, da je v literaturi kar nekaj podatkov o vplivu meteoroloških parametrov na izračun dejanskega lomnega količnika, vendar so izračuni parcialnih odvodov po posameznih neznankah le približni, kar smo prikazali v preglednici 1.

Z gotovostjo lahko trdimo, da poznavanje dejanske atmosfere na poti merskega žarka v zraku, značilno vpliva na izračun prave vrednosti reducirane dolžine. Rezultati so nam pokazali razlike v reduciranih dolžinah zaradi različno upoštevanih meteoroloških parametrov od nekaj milimetrov do deset milimetrov. Za zagotovitev visoke natančnosti položajev točk je merjenje vmesnih meteoroloških parametrov v smeri vizure zelo zaželeno. Zavedamo se, da je takšno merjenje lahko povezano tudi z visokimi stroški, zato je potrebno pravilno oceniti naročnikove zahteve in težavnost izvedbe meritev.

VIRI

Bronštejn, I. N., Semendjajev, K. A. 1984. Matematični priročnik za inženirje in slušatelje tehniških visokih šol. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 699 str.

Elektroniczne Techniki Pomiarowe – Notatki w internetcie, Lecture 3: str 4.

http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/automatyka/c_elektroniczna_tehn_pomiarowa/ew13.htm (11.5.2006)

Kahmen, H., Faig, W. 1988. Surveying. Berlin, New York, Walter de Gruyter: 578 str.

Kogoj, D. 2005. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljmeri. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 159 str.

Kontić, S., Mrkić, R. 1987. Elektronsko merenje dužina. Beograd, Naučna knjiga: 218 str.

Möser, M. 2000. Handbuch Ingenieurgeodäsie. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag: 642 str.

Operator's Manual for engine type ROTAX 582 UL DCDI model 99. 1999. Gunskirchen, BRP-Rotax GmbH & Co.KG: 66 str.

Rakovec, J., Vrhovec, T. 2000. Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike, 2. popravljena izdaja. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije: ??? str.

Schofield, W. 1998. Engineering Surveying, Theory and Examination Problems for Students. Oxford, Butterworth-Heinemann: 554 str.

Wikimedia Foundation, Inc., Atmospheric thermodynamics - Wikipedia, the free encyclopedia, 9. november 2009: str 4.

http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_thermodynamics#cite_note-3 (3.3.2010)

PRILOGE