

# ATMOSFERSKI VPLIV PRI GEODETSKIH MERJENJIH

dr. Aleš Breznikar

FAGG-Oddelek za geodezijo, Ljubljana

Prispelo za objavo: 14.2.1994

## Izvleček

*Predstavljene so atmosferske spremembe, ki imajo za posledico pojav pogreškov pri geodetskih merjenjih. Podani so vplivi na stabilnost geodetskega instrumentarija in opisane spremembe tistih atmosferskih dejavnikov, ki vplivajo na pojav refrakcije.*

**Ključne besede:** atmosfera, lomni količnik, refrakcija, temperaturni gradient, zračni tlak

## Zusammenfassung

*Atmosphärische Aenderungen, die Fehler bei geodätischen Messungen verursachen, werden dargestellt. Einflüsse auf Stabilität der geodätischen Instrumenten sind angegeben und Aenderungen atmosphärischer Parametern, die Refraktion verursachen, beschrieben.*

**Stichwoerter:** Atmosphaere, Brechungsindex, Luftdruck, Refraktion, Temperatur Gradient

## 1. UVOD

V zadnjem stoletju je natančnost merskih postopkov v geodeziji omejevala predvsem nepopolnost merskega instrumentarija, medtem ko so faktorji okolja imeli relativno minimalni oziroma zanemarljiv vpliv. Razmere pa so se spremenile, ko so v geodezijo začeli uvajati precizne in elektronske instrumente in z njimi povezane nove metode. Ti novi instrumenti in metode so v zadnjih dveh desetletjih bistveno vplivali na geodetske postopke in omogočili doseganje današnje natančnosti.

V zadnjem času so ugotovili, da naložbe v nadaljnji razvoj instrumentarija ne prinašajo več zadovoljivega napredka pri povečanju natančnosti merskih rezultatov. Danes, ko dosegamo natančnost merjenja kotov 0,1 mgon, preciznega niveliranja 0,2 mm/km in elektronskega merjenja dolžin z natančnostjo  $10^{-7}$ , številni avtorji opozarjajo, da je ravno vpliv atmosfere tisti dejavnik, ki postavlja meje natančnosti geodetskih meritev. Pod takšnimi pogoji je veliko bolj smiselno raziskovati vplive okolja, kot pa sam razvoj instrumentarija. S tem je problem vplivov okolja, posebno še refrakcije, dobil poseben pomen, ki je popolnoma drugačen, kot ga je imel v preteklosti. Večino geodetskih del opravljamo na terenu pod zelo različnimi klimatskimi in vremenskimi pogoji. Zaradi tega so geodetska merjenja obremenjena z vplivi okolja, ki povzročajo vrsto različnih pogreškov. Ti se nam v končni fazi seštevajo v rezultatih ter nam kvarijo natančnost merjenja.

Spremembe v okolju lahko glede na učinek pri geodetskih meritvah razdelimo na dve vrsti:

- direktni vpliv na stabilnost merskega instrumentarija in pribora
- vpliv atmosfere na merski žarek ter s tem pojav refrakcije.

## 2. VPLIVI NA STABILNOST MERSKEGA INSTRUMENTARIJA

Vsak merski proces na terenu traja nek določen čas. V času trajanja merskega procesa sta tako instrument kot tudi ostali merski pribor izpostavljena spremembam, ki nastopajo v okolju. Pri tem sta pomembna predvsem dva dejavnika, ki rušita stabilnost merskega instrumentarija v procesu merjenja. To sta: posedanje instrumenta kot posledica reakcije tal zaradi teže instrumenta s stativom ter zvijanje instrumenta s stativom kot posledica neenakomernega segrevanja instrumenta in stativa. Posedanje instrumenta je pojav, ki ga v pretežni meri lahko odpravimo s pazljivim postavljanjem instrumenta. Običajno pri najpreciznejših meritvah kotov in dolžin postavljamo instrument direktno na betonske stebre in se s tem izognemo vplivu posedanja. Pogrešek zaradi posedanja instrumenta je posebno opazen pri preciznem nivelmanu, kjer v celotnem merskem procesu velikokrat postavljamo instrument in običajno začnemo z merjenjem takoj po postavitvi nivelirja. V času takoj po postavitvi instrumenta pa je posedanje stativa največje. Pogrešek lahko zmanjšamo s pazljivim postavljanjem instrumenta, s časovnim zamikom med postavitvijo instrumenta in začetkom merjenja ter z ustrezno metodo merjenja, s katero lahko odpravimo predvsem sistematični vpliv pogreška na merjenje. Pod vplivom direktnih sončnih žarkov se instrument in stativ segrevata in s tem raztezata. Pri tem se stran, ki je obrnjena k soncu, bolj segreva kot pa senčna stran. Posledica tega je neenakomerno raztezanje, ki se pokaže kot zvijanje instrumenta. Ta vpliv lahko eliminiramo s tem, da instrument in stativ zaščitimo pred direktnimi sončnimi žarki s senčnikom in s tem dosežemo, da je segrevanje enakomerno.

## 3. SPREMEMBE OPTIČNIH LASTNOSTI ATMOSFERE

Pri geodetskih merjenjih predstavlja atmosfera optično sredstvo, skozi katerega se širi merski žarek. Atmosfera je sestavljena iz plinov. Nekateri so v stalnem razmerju: dušik (78,08%), kisik (20,95%) in argon (0,93%). Poleg teh so v atmosferi prisotni še ogljikov dioksid, vodna para ter različni delci drugih plinov in prahu, ki tudi vplivajo na optične lastnosti atmosfere.

Lastnosti optičnega sredstva merimo na osnovi hitrosti razširjanja svetlobe v njem. Pri tem govorimo o izotropnem optičnem sredstvu, kadar je hitrost razširjanja svetlobe v vseh smereh enaka, oziroma o homogenem, kadar je hitrost enaka v določeni smeri. Vsako izotropno sredstvo je določeno s konstantno gostoto in lomnim količnikom, ki je za določeno valovno dolžino prav tako konstanta. Sprememba lomnega količnika ima za posledico spremembo hitrosti razširjanja valovanja in s tem pojav loma oziroma refrakcije merskega vala. Ker se gostota atmosfere spreminja, se spreminja tudi lomni količnik zraka, ki je odvisen od naslednjih parametrov:

$$n = f(p, T, e, \lambda) \quad (1)$$

pri čemer je: p: zračni tlak, T: temperatura, e: parcialni tlak vodne pare,  $\lambda$ : valovna dolžina.

Največji vpliv na spremembo lomnega količnika ima sprememba temperature (sprememba temperature za 1K spremeni lomni količnik za  $1 \times 10^{-6}$ ), zato je poznavanje termičnih procesov odločujočega pomena za pravilno oceno lomnega količnika in s tem velikosti refrakcije. Vpliv zračnega tlaka je manjši (sprememba tlaka za 1 mbar spremeni lomni količnik za  $0,4 \times 10^{-6}$ ) in je opazen predvsem v primerih, ko je med merjenima točkama večja višinska razlika in s tem tudi večja razlika zračnega tlaka. Sprememba parcialnega tlaka vodne pare pa praktično nima vpliva na pojav refrakcije.

### 3.1 Temperaturne spremembe v atmosferi

Največji vpliv na spremembo lomnega količnika ima temperatura oziroma njena sprememba, ki jo imenujemo temperaturni gradient. Definiran je z diferencialno spremembo temperature na višino  $dT/dh$ . Praktično pa ga merimo in računamo kot  $T/h$  po vertikali (vertikalni temperaturni gradient) ali po horizontali (horizontalni temperaturni gradient).

#### 3.1.1 Vzroki za pojav temperaturnega gradienta

Ker je atmosfera nehomogen medij, se njene optične lastnosti spreminjajo tako z višino nad tlemi kot tudi časovno v odvisnosti od dnevnega in letnega časa ter meteorološkega stanja vremena. Sonce s svojimi žarki prek dneva segreva Zemljo, ki kot neprozorno telo absorbira določeno količino Sončeve energije. To toploto potem Zemlja ponovno seva v prostor. V odvisnosti od tega periodičnega pojava absorbiranja in sevanja toplote oziroma segrevanja in hlajenja Zemlje se spreminja tudi temperatura prizemnega sloja zraka. S tem se spreminja tudi temperaturni gradient zraka. Prek dneva se Zemlja postopoma segreva in oddaja toploto, s katero segreva okoliški zrak. Pri tem so spodnji zračni sloji toplejši kot zgornji, kar pomeni, da je prirastek temperature z višino negativen. Prek noči je proces obraten. Spodnje plasti so hladnejše kot zgornje in s tem je temperaturni gradient pozitiven. Takšno spreminjanje temperature prizemnega sloja prek dneva ima za posledico tudi spreminjanje njegovih optičnih lastnosti. Na osnovi tega periodičnega pojava lahko zaključimo, da se temperaturni gradient spreminja tako časovno v odvisnosti od dnevnega časa kot tudi prostorsko v odvisnosti od višine nad tlemi.

#### 3.1.2 Segrevanje in ohlajanje zraka

Segrevanje in ohlajanje zraka poteka v glavnem od zemeljske površine. Zaradi tega je sprememba temperature zraka odvisna od temperaturnih sprememb podloge, iznad katere se zrak nahaja. Na segrevanje zraka vplivajo predvsem naslednje lastnosti zraka:

- čist in suh zrak je v nižjih plasteh skoraj popolnoma diatermičen, kar pomeni, da prepušča sončne žarke in se pri tem skoraj nič ne segreva,
- zrak je slab prevodnik toplote, tako da se toplota v zraku s prevajanjem zelo počasi razširja,
- zračni delci se dokaj hitro gibljejo in mešajo ter s tem izenačujejo temperature.

**S**egrevanje zraka z zemljišča poteka na naslednje načine:

- s počasnim molekularnim prevajanjem toplote z zemljišča na posamezne delce zraka. Glede na slabo prevodnost toplote v zraku se ta vpliv občuti le v višini nekaj milimetrov,
- z neposrednim prehodom dolgovalovnega sevanja skozi zrak, ki ga oddaja Zemlja kot toplotne žarke in jih zrak absorbira in se na ta način segreva,
- s konvektivnim gibanjem zračnih mas,
- s turbulentnim gibanjem zračnih mas,
- advektivnim gibanjem zračnih mas,
- izhlapevanjem vode z Zemljine površine.

**K**onvektivno gibanje zraka poteka na naslednji način: v teku dneva, ko insolacija prevlada nad radiacijo, toplota z Zemljine površine prehaja neposredno z molekularnim prevajanjem na sloj zraka, ki leži iznad tal. Kolikor močnejše je segrevanje Zemljine površine, toliko močnejše je segrevanje najnižjega sloja zraka. Z dvigom temperature se manjša tudi specifična gostota tega sloja zraka, ki tako postane lažji od plasti zraka nad njim in se mora dvigovati. Dvigajoč zrak nosi s sabo tudi toploto, dobljeno od Zemeljske površine. Na mesto dvigajočega zraka pa se od zgoraj spušča hladnejši in gostejši zrak, ki se potem spet segreva in dviguje. Zato se oblikujejo konvektivna gibanja zraka, ki prenašajo toploto od Zemljine površine v atmosfero.

**P**oleg zgoraj opisanih vertikalnih gibanj zraka obstajajo še drugi vzroki vertikalnih tokov zraka, ki jih povzročata neenaka sestava in oblika Zemljine površine. Tako se posamezni deli Zemljine površine, ki ležijo drug poleg drugega, različno segrevajo. Tako se peščena obala bolj segreva kot pa vodna površina. Gola zemlja brez vegetacije se hitreje segreva kot pa površina, porasla z vegetacijo. Prav tako se bolj segrevajo prisojni predeli kot pa osojni. Tudi segrevanje cest in ulic je lahko različno od okolice in odvisno od materiala, iz katerega so zgrajeni. Zaradi vsega tega se ustvarjajo slabi dvigajoči tokovi, ki prenašajo toploto od toplejših na hladnejša mesta.

**T**urbulentna gibanja zraka delimo na dinamična in termična. Dinamično turbulentno gibanje zraka nastane, kadar zrak pri horizontalnem gibanju naleti na prepreke (drevesa, zgradbe, bregovi), zaradi katerih je prisiljen, da se dviguje ali spušča. Tedaj se ustvarjajo posebni vrtinci okoli vertikalne ali horizontalne osi, pri katerih se zrak meša in se na ta način toplota izenačuje. Termična turbulentna gibanja pa nastajajo zaradi neenakega segrevanja posameznih zemljišč, ki se nahajajo blizu eden drugemu. Vzrok za takšno neenako segrevanje je v različnem karakterju zemljišča in njegovega reliefa. Tam, kjer je zemljišče bolj segreto, se zrak dviguje in spet spušča k zemlji na območju, ki je manj segreto. Termična turbulenca je posebno izrazita v teku dneva v poletnih mesecih. Advektivna gibanja zračnih mas predstavljajo veter. Pri Zemlji imajo običajno smer od mesta, ki je hladnejše, k mestu, ki je toplejše. Pri tem se zrak meša in se na ta način temperatura izenačuje.

**T**udi izparevanje vode z Zemljine površine vpliva na segrevanje zraka. Pri izparevanju se porablja določena količina toplote, vendar samo navidezno. Ta, tako imenovana latentna toplota, se v enaki vrednosti sprošča pri kondenzaciji ali sublimaciji vodne pare v zraku. Tako se dogaja, da vodna para, ki se dviguje v zrak, nosi s sabo latentno toploto, ki se pri kondenzaciji sprošča in se s tem zrak segreva.

**K**oličina toplotne energije, ki jo Zemlja oddaja z radiacijo, se menja zaradi različnih faktorjev: dolžine dneva in noči, letnega časa, reliefa in karakteristik posameznega območja, geografske širine, nadmorske višine in oblačnosti. Na osnovi tega lahko zaključimo, da temperatura zraka v nižjih slojih iznad Zemlje čez dan pada z višino. Ta padec temperature ali temperaturni gradient je posebno izrazit v poletnih mesecih, kadar je vreme mirno in vedro. Prek dneva je Zemljina površina toplejša od prizemnega sloja zraka, ker je insolacija večja od radiacije. Čez noč pa se Zemljina površina postopoma ohlaja. Takrat so prizemni delci zraka toplejši od tal pod njimi in svojo toploto oddajajo Zemljini površini. Glede na to, da je toplotna prevodnost zraka bistveno manjša od zemljine, se ta vpliv čuti le do višine 3 do 4 m. Poleg prevajanja toplote od prizemne plasti zraka k površini poteka tudi sevanje toplote od prizemnih zračnih delcev proti hladnejši površini. Glede na to, da ima zrak majhno specifično toploto, se le-ta precej ohladi. Površina hladne Zemlje pa se skoraj nič ne segreje, ker so količine toplote, ki jih zrak oddaja, majhne. Zaradi vsega tega se zrak precej ohladi, zračne plasti na večjih višinah pa so toplejše, kar pomeni, da temperatura raste od Zemljine površine glede na višino. Glavni problem temperaturnega gradienta je, da ga je zaradi cele vrste vplivov zelo težko opisati s fizikalnimi metodami in ga tako z zadovoljivo natančnostjo upoštevati pri geodetskih merjenjih.

### 3.2 Spremembe zračnega tlaka

**S**premembe zračnega tlaka lahko veliko lažje opišemo s fizikalnimi metodami kot s spremembe temperature. V splošnem je zračni tlak odvisen od absolutne višine, in sicer zračni tlak pada z višino. Zračni tlak v posamezni točki atmosfere se spreminja tudi zaradi meteorološkega stanja atmosfere. Vendar so te spremembe zračnega tlaka relativno počasne in v splošnem tudi minimalne. Za večino natančnejših geodetskih meritev je treba meriti prevsem absolutno vrednost zračnega tlaka, medtem ko njegove spremembe lahko z zadovoljivo natančnostjo opišemo s fizikalnim modelom sprememb zračnega tlaka z višino.

## 4. ZAKLJUČEK

**S**pravilnim poznavanjem fizikalnih procesov v atmosferi lahko veliko prispevamo k reševanju osnovnega problema natančnosti geodetskih meritev. To je posebej pomembno v današnjem času, ko predstavlja vpliv atmosfere glavni omejitveni faktor za doseganje večje natančnosti geodetskih meritev. Posebno pozornost je treba nameniti spremembam temperature, ki imajo največjo vlogo pri spremembi lomnega količnika in s tem pojavu refrakcije pri merjenjih.

#### Viri:

- Breznikar, A., 1993, *Izbira najprimernejše metode izračuna nivelmanske refrakcije v naših klimatskih razmerah*, Doktorska disertacija, FAGG, Ljubljana.  
Brunner, F.K., 1984, *Geodetic Refraction*, Springer-Verlag, Berlin.  
Huebner, E., 1986, *Teoretische Grundlagen zur Bestimmung der terrestrischen Refraktion aus Schalllaufzeitdifferenzen*, Vermessungstechnik, 1986, 2, 49-52.  
Milosavljević, M., 1990, *Meteorologija*, Naučna knjiga Beograd, Beograd.

Recenzija: Andrej Bilc (v delu)  
Miro Logar