

Tallinna Reaalkool

# Atmosfääri mudeldamine ja katseandmete põhjal täpseima mudeli leidmine

Uurimistöö

Jarl Patrick Paide

11.a

Juhendaja: õp Mart Kuurme

Tallinn 2019

# Sisukord

Sissejuhatus . . . . .	3
1 Teooria . . . . .	4
1.1 Ideaalne gaas . . . . .	5
1.1.1 Isotermiline atmosfäär . . . . .	6
1.1.2 Adiabaatiline atmosfäär . . . . .	6
1.1.3 Mitteadiabaatiline atmosfäär . . . . .	8
1.2 Wan der Waalsi gaasi mudel . . . . .	8
1.2.1 Adiabaatiline atmosfäär . . . . .	8
2 Katse ülesehitus . . . . .	9
2.1 Katsemetoodika valik . . . . .	9
2.2 Katse planeerimine . . . . .	10
2.2.1 Lend . . . . .	11
2.3 varasemad katse analüüs . . . . .	12
2.3.1 Kõrguse sõltuvus lennuajast . . . . .	12
2.3.2 Rõhu sõltuvus kõrgusest . . . . .	12
2.3.3 Välistemperatuuri sõltuvus kõrgusest . . . . .	12
3 Katseandmete analüüs . . . . .	14
3.1 Lennu asukohaline ülevaade . . . . .	14
3.2 Temperatuuri muutus kõrgusega . . . . .	14
3.2.1 temperatuuri muutus kõrgusega pilvedes sees ja allpool . . . . .	16
3.2.2 temperatuuri muutus kõrgusega pilvedest kõrgemal . . . . .	17
Kasutatud materjalid . . . . .	19
Kinnitusleht . . . . .	20

## Sissejuhatus

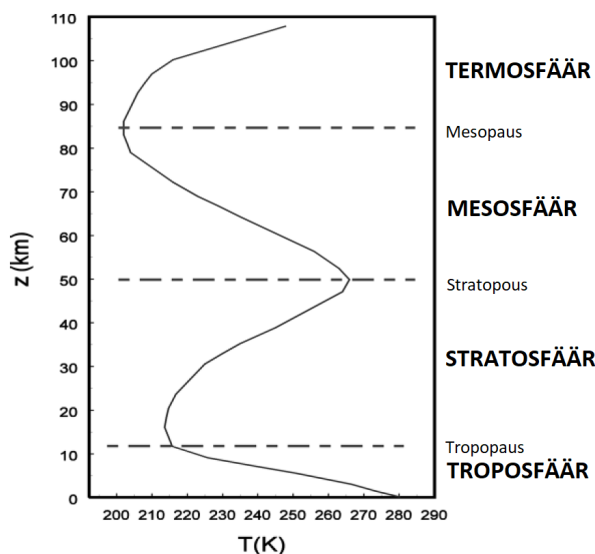
Globaliseeruv ja ülerahvastatud maailmas on atmosfääri reostatus üks kõige olulisemaid probleeme. Atmosfääri reostusega kaasneb kasvuhooneefekt - kliima soojenemine, mis omakorda viib maailmamere tõusule. Atmosfääri mudeldamine aitab mõista atmosfääris toimuvaid protsesse ja leida lahendusi atmosfääri seisundi arendamiseks. Mudeli andmeid saab kasutada globaalse atmosfääri mudeli arendamisel.

Uurimistöö eesmärk on leida vaatlusandmete alusel võimalikult täpne mudel, mis kirjeldaks atmosfääri temperatuuri ja rõhu seoseid vastavalt kõrgusele maapinnast. Uurimisküsimus on "Millised seosed on atmosfääris mõõdetavate parameetrite vahel - temperatuur, rõhk ja kõrgus maapinnast?".

Uurimistöö alguses leitakse erinevate eeldustega erinevad seosed temperatuuri ja rõhu sõltuvusest kõrgusest. Praktilises osas tehakse mõõtmisi heeliumõhupalli külge kinnitatud mõõteriistaga, mis lennutatakse stratosfäärini ja pärast kontrollitakse katseandmete põhjal teoreetilises osas saadud seoste kehtivust.

# 1 Teooria

Teooria osas proovitakse leida erinevaid täpseid viise, kuidas kirjeldada rõhu ja temperatuuri sõltuvust kõrgusest.



Joonis 1. Temperatuuri sõltuvus kõrgusest

Joonisel 1 on näha, kuidas temperatuur muutub kõrguse kasvades. Troposfääris temperatuur langeb ja stratosfääris temperatuur tõuseb. Kõrguse kasvades rõhk väheneb, sest kõrguse kasvades väheneb ülevalpool oleva õhu mass, mis surub õhku kokku tekitades rõhku. Kuna rõhk väheneb, siis temperatuur langeb. See seletab temperatuuri langust troposfääris. Peale troposfääri tuleb osoonikiht, mis asub stratosfääris. Osoon neelab päikeselt tulevat kiirgust muutes selle soojuseks. Mida kõrgemal, seda vähem kiirgust on neelatud päikese poolt ja seda soojem. Eelkirjeldatud atmosfääri kihtides on kogutud käesoleva uurimistöö katseandmed.

Selles peatükis on avaldatud temperatuuri ja rõhu sõltuvused kõrgusest erinevate meetoditega, otsides kõige täpsemat seost.

Termodünaamika esimene seadus on avaldatud alljärgnevalt

$$dU = dQ - dA \quad (1)$$

kus  $dU$  on gaasi siseenergia muutus,  $dQ$  on soojushulga muutus ja  $dA$  on töö muutus.

Gaasi siseenergia  $U$  avaldub vabadusastmete  $i$  kaudu järgneva seose abil

$$U = \frac{i}{2}\nu RT \quad (2)$$

Konstantse ruumala puhul tööd ei tehta, seega kogu soojus läheb siseenergia suurendamiseks. Saame soojusmahutavuse, võttes siseenergia muudust tulelise temperatuuri järgi.

$$C_V = \frac{dQ}{dT} = \frac{i}{2}\nu R \quad (3)$$

Molaarset soojusmahutavust saab avaldada valemiga  $c_V = \frac{C_V}{\nu}$  saades molaarseks soojusmahutavuseks

$$c_V = \frac{i}{2}R \quad (4)$$

Kui aga vaadata isobaarilist protsessi, siis vaadates olekuvõrrandit tuleneb  $p dV = \nu R dT$ , ning gaas teeb tööd  $dA = p dV = \nu R dT$ . Avaldades need valemisse 1 saame

$$dQ = dU + dA = \frac{i+2}{2}\nu R dT$$

millest järeldub

$$c_p = \frac{i+2}{2}R$$

Samuti saab näidata  $c_V$  ja  $c_p$  vahelist seost

$$c_p = c_V + R \quad (5)$$

Vaatame õhukest õhuriba laiusega  $dz$  kõrgusel  $z$ . Rõhu muutust kõrguste  $z$  ja  $z + dz$  vahel saab kirjeldada valemiga

$$dp = -\rho(z)g dz \quad (6)$$

Kui seda integreerida, siis saab kätte rõhu muutuse sõltuvalt kõrgusest. Aga kuna tihedus ei ole konstantne, siis on vaja kõigepealt leida kuidas tihedus muutub kõrguse muutumisega.

## 1.1 Ideaalne gaas

Selles alampeatükis teeme eelduse, et atmosfäär koosneb ideaalsest gaasist. Sellisel juhul saame kasutada ideaalse gaasi olekuvõrrandit

$$PV = \nu RT \quad (7)$$

### 1.1.1 Isotermiline atmosfäär

Oletame, et atmosfääris on kõikjal ühtlane temperatuur. Sellisel juhul on atmosfäär isotermiline ja me saame asendada valemi 7 valemise 6 saades järgmise seose

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\mu g}{RT} dz \quad (8)$$

Kuna temperatuur on konstantne, siis on ka  $\frac{\mu g}{RT}$  konstantne ning seda integreerides saame järgneva

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = \int_0^z -\frac{\mu g}{RT} dz$$
$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{\mu g}{RT} z$$

Kus  $T$  on atmosfääri konstantne temperatuur,  $z$  on kõrgus maapinnalt,  $p_0$  on kõrgus maapinnalt ja  $p$  on rõhk kõrgusel  $z$  maapinnast ja  $p$  sõltub kõrgusest järgnevalt

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g}{RT} z}$$

Kuid see valem ei kehti, sest atmosfääris pole ühtlane temperatuur.

### 1.1.2 Adiabaatiline atmosfäär

Adiabaatiline protsess on termodünaamiline protsess, mille käigus ei toimu soojusvahetust väliskeskkonnaga.

Harilikult on õhumassid atmosfääris tugevas liikumises, nii et nad liiguvad pidevalt üles-alla. Kuna kõrgemal on rõhk väiksem kui all, siis jahtub gaas üles liikudes adiabaatilise paisumise tõttu (õhumasside suurte mõõtmete tõttu on soojusjuhtivus hästi aeglane).

Kuna adiabaatilises protsessis soojusvahetust ei toimu, siis valemis 1  $dQ = 0$ . Gaasi poolt tehtud töö on  $dA = pdV$  ja gaasi siseenergia muut on  $dU = \nu c_V dT$ . Sellest järeldub

$$\nu c_V dT = -pdV \quad (9)$$

Ideaalse gaasi olekuvõrrandist 7 saame tuletist võttes ja avaldades järgneva

$$dT = \frac{pdV + Vdp}{\nu R} \quad (10)$$

Asendades 10 valemi valemisse 9 saame uue seose

$$pdV(c_V + R) + c_V Vdp = 0 \quad (11)$$

Asendame siia sisse valemi 5 ja adiabaadi näitaja

$$\gamma \equiv \frac{c_p}{c_v}$$

Nüüd eelmisi seoseid kasutades ja ümber paigutades saame võrrandi

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0$$

Seda integreerides saame

$$\int \gamma \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = \gamma \ln(V) + \ln(p) = \text{Const.}$$

Sellest saame järeldada

$$pV^\gamma = \text{Const.}$$

Samuti kasutades ideaalse gaasi olekuvõrrandid saame tuletada veel 2 seost

$$p^{1-\gamma} T^\gamma = \text{Const.} \quad (12)$$

$$V^{\gamma-1} T = \text{Const.}$$

Valemist 12 saame

$$d \ln(p^{1-\gamma} T^\gamma) = 0$$

Millest saame

$$\frac{dp}{p} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{dT}{T} \quad (13)$$

Võttes nüüd valemi 8 ja valemi 13

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\mu g}{R}$$

Seda integreerides saame

$$\begin{aligned} \int_{T_0}^T dT &= \int_0^z -\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\mu g}{R} dz \\ T - T_0 &= -\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\mu g}{R} z \end{aligned}$$

Kus  $T_0$  on temperatuur maapinnal ja  $T$  on temperatuur kõrgusel  $z$ , mille saab avaldada sõltuvusena

$$T = T_0 \left( 1 - \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\mu g}{RT_0} z \right)$$

Kasutades nuud seost 12 saame seose

$$p = p_0 \left( 1 - \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{z}{z_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

### 1.1.3 Mitteadiabaatiline atmosfäär

## 1.2 Wan der Waalsi gaasi mudel

Wan der Waals esitas ideaalse gaasi olekuvõrrandist täpsema mudeli gaasi olekuvõrrandi jaoks.

$$\nu RT = \left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b) \quad (14)$$

Kus  $a$  ja  $b$  on igale gaasile empiiriliselt määratud parameetrid. Siseenergia on antud kujul

$$U = \nu c_V T - \frac{\nu^2 a}{V} \quad (15)$$

### 1.2.1 Adiabaatiline atmosfäär

Siseenergia muutu saab avaldada valemist 15

$$dU = \nu c_V dT + \frac{\nu^2 a}{V^2} dV$$

Adiabaatilise protsessi deffiniitsiooni kohaselt ei anta gaasile siseenergiat juurde, ehk  $dQ = 0$ . Seega saame kirja panna

$$0 = dU + p dV = \nu c_V dT + \left( \frac{\nu^2 a}{V^2} + p \right) dV$$

Asendades siia sisse valemi 14 saame

$$0 = c_V dT + \frac{RT}{V - \nu b} dV$$

$$\int -\frac{c_V}{T} dT = \int \frac{R}{V - \nu b} dV$$

$$c_V \ln(T) + R \ln(V - \nu b) = \text{Const.}$$

$$(V - \nu b)^R T^{c_V} = \text{Const.}$$

$$(V - \nu b)^{R+c_V} \left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right)^{c_V} = \text{Const.}$$

$$\left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b)^\gamma = \text{Const.}$$



## 2 Katse ülesehitus

Katse käigus mõõdeti atmosfääris, troposfääris ja stratosfääri madalametes kihtides, rõhku, temperatuuti ja õhuniiskust. Selle jaoks kasutati heeliumõhupalli külge kinnitatud sondi, mis tegi mõõtmisi.

Andmeid kogutakse heeliumiga täidetud õhupalliga kaasa saadetud sondiga, mis mõõdab erinevaid andmeid. Põhilisteks andmeteks on kõrgus, asukoht, aeg, välistemperatuur ja rõhk. Sondi pardal on Raspberry Pi arvuti. Õhupall kerkib atmosfääri kõrgemadesse kihtidesse, sest üleslükkejõud ületab kerge gaasi ja sondi massi. Kõrgemale tõustes rõhk väheneb. Et õhupalli siserõhk oleks tasakaalus välisrõhuga, suureneb õhupalli ruumala, kuni õhupall lõhkeb ülepingest. Peale seda kukkub sond alla ja leitakse GPS'ga üles.

### 2.1 Katsemetoodika valik

Selles uurimistöös tehtud katsed on tehtud koostöös Eesti kosmosekoolide võrgustikuga.

Eesti kosmosekoolide võrgustik oli enne selle uurimistööga tehtud lendu teinud kaks lendu. Esimene lend mis tehti 29. märtsil kestis umbes kaks tundi, kus kõrgeim punkt milleni jõuti oli 26474 m. Selleks läks aega poolteist tundi. Kokku tehti 220 mõõtmist. Mõõtmise alla kuulusid kellaaeg, laiuskraad, pikkuskraad, kõrgus, kapsli sisetemperatuur, välistemperatuur ja rõhk. Teine lend tehti 11. mail ning seekord kestis lend peaaegu neli tundi, jõudes kolme ja poole tunniga kõrgusele 32608 m. Katse tegijad muutsid õhupallis heeliumi kogust, mille tõttu oli tõusmise kiirus väiksem, aga õhupall plahvatas hiljem ja jõuti kõrgemale. Seekord tehti 4300 mõõtmist ja mõõdeti samu parameetreid.

Katse korraldamiseks ja läbiviimiseks vajalikud oskused saadi Eesti kosmosekoolide võrgustiku poolt korraldatavast koolitusest ja sealt on pärit vastav metootika.

Selle uurimistöö käigus tehti katse milleks oli heeliumõhupalliga andmete kogumine kogu lennu vältel. Heeliumõhupalli külge kinnitati sond, mis mõõtis õhurõhku, temperatuuri, õhuniiskust ja asukohta. Lend korraldati 10. veebruaril 2019.

## 2.2 Katse planeerimine

Alguses oli plaanis lend teha väätsa staadionilt, aga kasutades <http://predict.habhub.org/> lehel olevat kalkulaatorit oli ennustusest näha, et sond oleks kukkunud jõhvi lähedale. Kuna eksimusruum võib olla suur ning Venemaa piir ja meri pole kukkumise kohast kaugel otsustatti lennu start teha võimalikult edelast, nii et edela tuultega kalduks sond Kesk-Eestisse. Rihtides lõppsihtkohta Paide peale otsustatti start teha Varblast, Pärnumaalt.

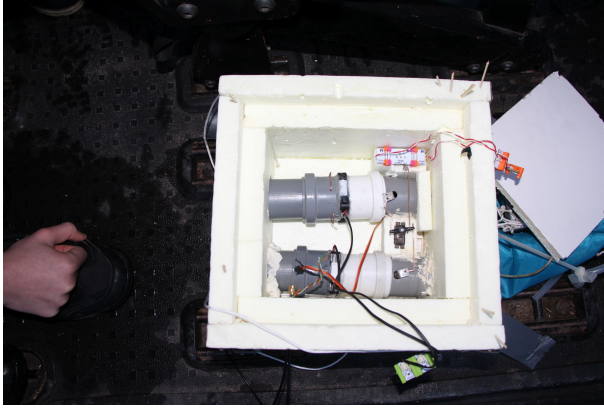
Lennu jaoks oli vajalik saada lennuametilt kooskõlastus.

Sondi ehitamise eest vastutasid Tallinna Reaalkooli põhikooli õpilaste robotikameeskond Viirus. Sondi põhiehitusmaterjaliks oli penoplast ja puidust tikkud. Sond pidi hoidma sisetemperatuuri madalate välistemperatuuri eesti, et sisemuses olev elektroonika töötaks. Sammuti peab korpus vastu pidama kukkumisele, ning kõige juures peab olema korpus võimalikult kerge. Selle tõttu valiti korpuse materjaliks penoplast ja tikkud. Kuna ühe lennuga saab üles saata mitu katset siis otsustasid põhikooli õpilaste meeskond Viirus koguda atmosföörist tolmu tõmmates õhku läbi filtri.

Sondi sees olev ruum oli jaotatud kaheks. Alumises olid kaks toru mis olid parralleelsed ja läbisid sondi kere. Nenede sees olid klappid, ventilaator ja filtrid. Selle eesmärgiks oli koguda tolmu ja muud, mis jääb filtrisse kinni kõrgemal kui 20km. Teatud kõrguse saavutamisel pöörab raspberry Pi mootori 90 päripäeva avades nii klappid ja sulgedes lüliti. mille tõttu hakkavad ventilaatorid tööle. Kui võrgus on vähenenud soovitud kõrgusest siis pöörab raspberry Pi mootori algasendisse. Sulgedes sellega klappid ja ühendades ventilaatorid vooluringist lahti. Tolmu kogumine ei käi selle uurimistöö juurde.

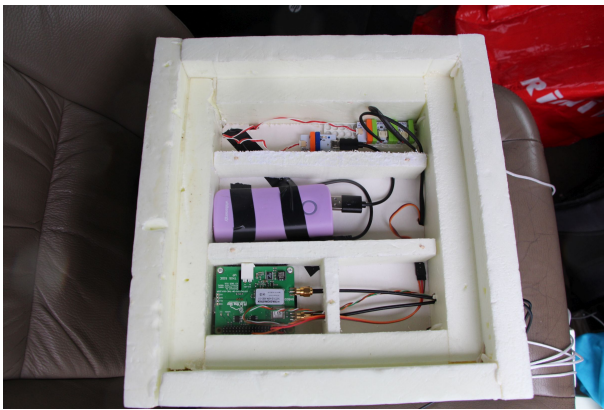
Ülemises osas oli kogu tehnika. Mõõtmisi tegi ja klappe avas Raspberry Pi arvuti. Voolu andis nii ventilaatoritele kui ka Raspberry Pi'le akkupank. Raspberry Pi külge oli kinnitatud raadio antenn, Gps antenn mootor klappide jaoks ja andur BME280 mis mõõtis väljas olevat rõhku, temperatuuri ja õhuniiskust.

Sondi mass oli 1375g. Sondi korpus oli ehitatud kasutades penoplasti ja puit tikke. Sondist tuli välja nii raadio kui ka GPS antenn, ning ka andur BME280. Sondi peale oli kinnitatud langevari. Eraldi korpuses asus GPS tracker GL370?? mida kasutati pärast sondi leidmisel. Lennuks kasutati Hwoyee 600g õhupalli.



**Joonis 2. Pilt sondist**

Allikas: [http://pildid.real.edu.ee/main.php?g2\\_itemId=84949](http://pildid.real.edu.ee/main.php?g2_itemId=84949)



**Joonis 3. Pilt sondist**

Allikas: [http://pildid.real.edu.ee/main.php?g2\\_itemId=84949](http://pildid.real.edu.ee/main.php?g2_itemId=84949)

### 2.2.1 Lend

Lennu start oli kell 11:51. Algul saadi andmeid kätte raadio teel saadetud signaalist. Raadioside töötas umbes 20 min. Peale seda polnud võimalik puhast signaali kätte saada. Siis kadus GPS trackeri ühendus mobiilisideme teenusepakkuja kõrguse pärast. Peale maandumist ühendas GPS Tracker ennast uuesti teenusepakkuja võrku ja saadi teada sondi kukkumise asukoht. Sond maandus Paide lähedal paarkümmend meetrit Tallinn-Tartu maanteest. Lend lõppes kell 14:06. Siis saime sondi kätta ja lugesime Raspberry Pi poolt tehtud logiandmed maha.



**Joonis 4. Pilt sondist**

Allikas: [http://pildid.real.edu.ee/main.php?g2\\_itemId=84949](http://pildid.real.edu.ee/main.php?g2_itemId=84949)

## **2.3 varasemad katse analüüs**

### **2.3.1 Kõrguse sõltuvus lennuajast**

Joonisel () on näha õhupalli kõrgust lennu jooksul muutuvana ajast. Kuna mõõtmised on tehtud kindlate ajavahemike tagant on näha, kuidas peale õhupalli lõhkemist langeb sond kiiremini ja hakkab peale seda aeglustama.

### **2.3.2 Rõhu sõltuvus kõrgusest**

Joonisel () on näha rõhu sõltuvust kõrgusest. Graafikult tuleb ilusasti välja sõltuvus, välja arvatud umbes 10 km kõrgusel, kus jookseb kaks joont. Erinevus tekib, sest üks joon näitab andmeid tõusmisel ja teine langemisel.

### **2.3.3 Välistemperatuuri sõltuvus kõrgusest**

Joonisel () on näha välistemperatuuri sõltuvus kõrgusest. Nagu joonisel () on ka siin näha kahte joont, mis tuleb tõusmisest ja langemisest. Tõusmisel on andmepunktid väga laiali valgunud, mis tuleb sondi pöörlemisest. Vahepeal on temperatuuri andur päikesepoole, mille tõttu temperatuur on suurem ja vahepeal on andur päikesest eemal, mis juhul mõõdetakse tegelikku temperatuuri. Langemisel on pöörlemist vähem ja siis on punktid rohkem ühe joone peal. Et enda katses vältida andmete laialivalgumit, on vaja lahendada päikesest tulenevat temperatuuriväärastamise probleemi.

On näha, et temperatuur ei lange pidevalt atmosfääris tõustes. Troposfääris temperatuur langeb, kuid stratosfääri jõudes hakkab temperatuur tõusma. Kõige külmem piirkond

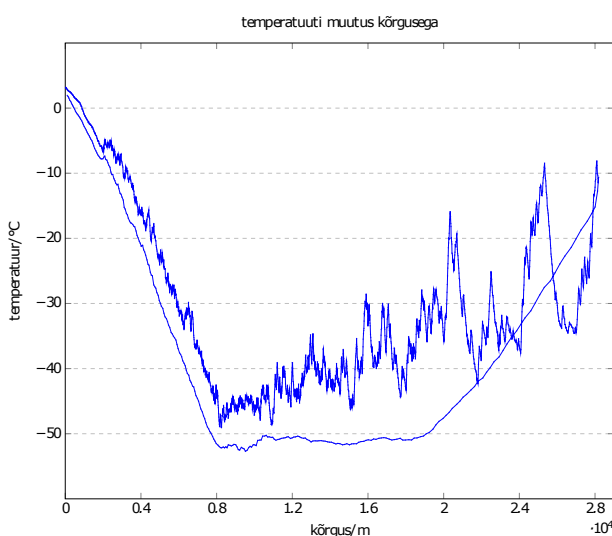
umbes 10 km kõrgusel.

### 3 Katseandmete analüüs

Andmete analüüsimiseks kasutan enda poolt kirjutatud c++/Python programmi. Programmi abil saab joonistada graafikuid andmete põhjal ja kontrollida erinevaid seoseid.

#### 3.1 Lennu asukohaline ülevaade

#### 3.2 Temperatuuri muutus kõrgusega



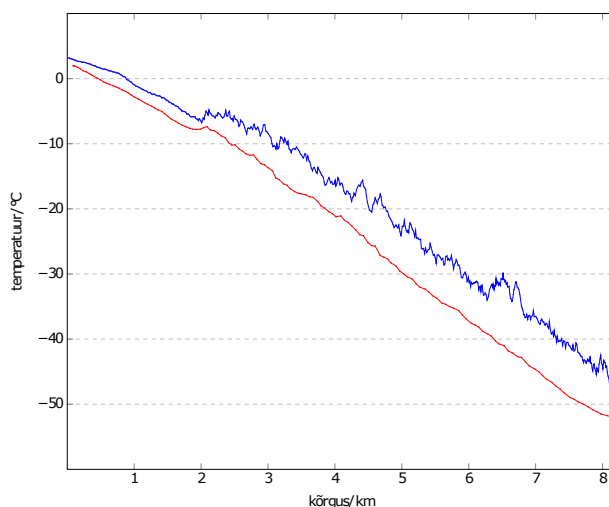
**Joonis 5. Temperatuuri sõltuvus kõrgusest**

Joonisel 5 on näha temperatuuri muutust kõrgusega. Joonisel on kaks joont, sest andmeid mõõdeti igalt kõrguselt kaks korda, sondi tõusmisel ja sondi laskumisel. Lennu stardi ajal oli kõrgem temperatuur kui lennu lõppemise ajal.

Joonisel on näha kuidas temperatuur kõigub, mitte ei muutu ühtlaselt. See on tingitud päikese valgusest. Kui sensor on päikese poole soojendab päike sensorit. Kui sensor on sondi varjus siis peale maha jahtumist mõõdab sensor jälle tegelikku õhutemperatuuri. Sensor ei mõõda kunagi madalamat temperatuuri tegelikust õhu temperatuurist. Kõrguse kasvades muutub temperatuuri kõikumine amplituud kõrgemaks. See on tingitud madalst rõhust. Kuna õhk hõreneb hakkab sondi temperatuuri rohkem mõjutama päike kui õhk ise.

Kukkumine hakkab sel hetkel kui sensor on ülesse soojenenud. Seega sensor kukkumise ajal jahtub, kuid kuna nende kõrguste juures kõrguse langemisel langeb ka temperatuur, ei saavuta sensor välisemperatuuri, varem kui 20 km kõrgusel maast. Sel ajal on näha sujuvat temperatuuri muutust. Sensori mitte üles soojenemist kukkumisel võib põhjendada mittut moodi. Sond võis kukkumisel hakkata tugevalt pöörlema (MIS SIIS???). Kogu lennu vältel oli sond külgtuultega samas kiiruse taustsüsteemis. Seega sondile mõjustid tuuled mis tulevad üles liikumisest ja alla kukkumisest. Kuna kuni 20 km'ni kukkus sond keskmise kiirusega 70 m/s siis jahutas tuul sensorit.

Kuna selles uurimistöös uuritakse täpsemalt tropsfääri osa siis võib algul välja jätta kõik muu peale esimese umbes 8 km. Täpseks kõrguseks valiti 8154 m. Sellel kõrgusel tehti viimane mõõtmine mis oli temperatuurigraafiku viimane lokaalne miinimum peale mida hakkas temperatuur jälle tõusma. Kuna graafik on ebatasane vastab lokaalne miinimum kõige paremini tegelikkule temperatuurile. Sama kõrgus valiti ka kukkumisel. Tõusmisel on selles vahemikus 578 andmepunkti ja laskumisel on selles vahemikus 144 andmepunkti.

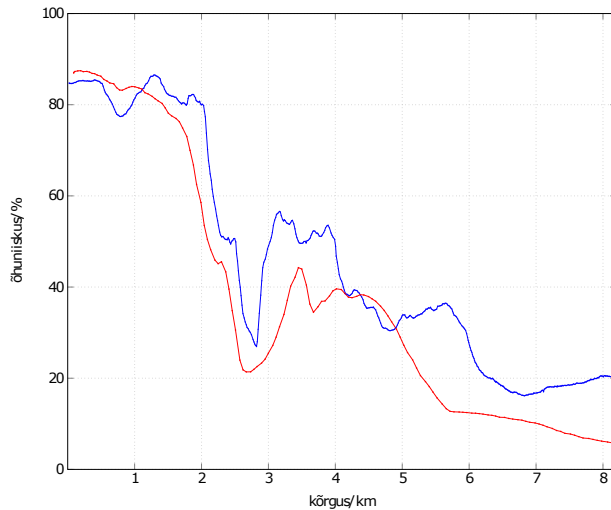


**Joonis 6. Temperatuuri sõltuvus kõrgusest alla 8 km**

Allikas: Autori erakogu

Jooniselt 6 märgati anomaaliat. Umbes 2 km kõrgusel on nii laskumisel kui ka tõusmisel näha kõrguse tõusmisega väikest temperatuuri muutust. Kuna see toimub nii tõusmisel kui ka kukkumisel siis on see suure tõenäelsusega tegelik temperatuuri muutus ja mitte sensori viga või muud sellist.

Vaadates joonist 7 on näha, et kuni 2 km kõrguseni on õhuniiskus ühtlalt kõrge. Kuid



**Joonis 7. õhuniiskuse sõltuvus kõrgusest alla 8 km**

Allikas: Autori erakogu

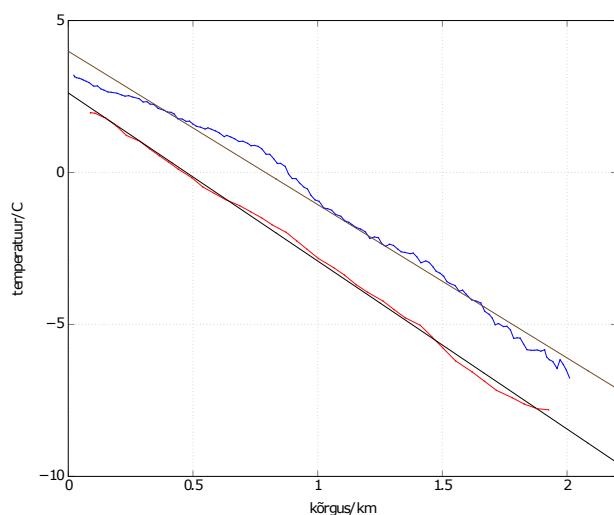
peale 2 km on näha, et õhuniiskus langeb tugevalt. Õhuniiskus langes, kuna sond väljus pilvedest, ning temperatuur tõusis. Pilvedest väljumist saab ka tõestada temperatuuri kõikumise algusega. Kuni 2 km'ni temperatuur ei kõikunud, kuna päikest ei paistnud sondile peale. Pilvedest väljudes hakkas aga päike mõjutama sensori lugemist. Kuna osa mõõtmisi tehti pilvede sees ja osa pilvedest väljas otsustatti vaadelda temperatuuri muutumist eraldi pilvede sees ja pilvedest väljas.

### 3.2.1 temperatuuri muutus kõrgusega pilvedes sees ja allpool

Pilvede sees vaadati temperatuure tõustes kuni 2010 m meetrini. Sellel kõrgusel tehti viimane mõõtmine peale mida temperatuur tõusis pilvedest väljumise tagajärjel. Samal põhjusel valiti laskumisel viimaseks andmepunktiks 1926 m kõrgusel mõõdetud andmepunkt. Sellel kõrgusvahemikul tehti tõustes 133 mõõtmist ja langedes 41 mõõtmist.

Joonisel 8 on graafikutele sobitatud võimalikult täpne lineaarne seos kõrguse ja temperatuuri vahel. Parima seose puhul tõusmisel muutub temperatuur  $-5.04572^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ja algtemperatuur kõrgusel 0 m merepinnast on  $3.98954^{\circ}\text{C}$   $r = -0.9929$ . Laskumisel muutub temperatuur  $-5.53009^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ja algtemperatuur kõrgusel 0 m merepinnast on  $2.61829^{\circ}\text{C}$   $r = -0.999$ .





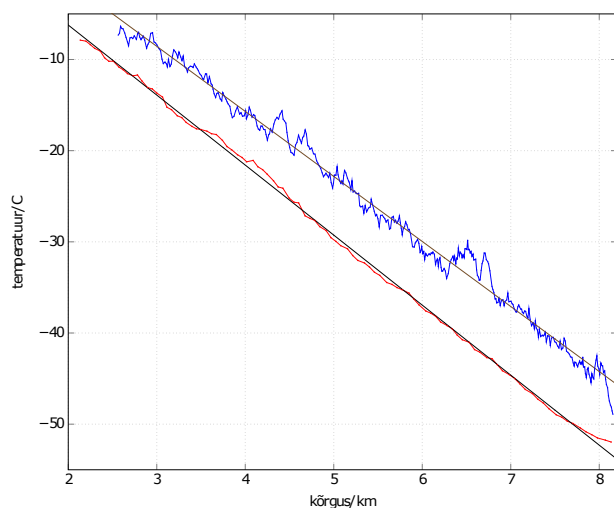
**Joonis 8. temperatuuri sõltuvus kõrgusest alla 2 km**

Allikas: Autori erakogu

### 3.2.2 temperatuuri muutus kõrgusega pilvedest kõrgemal

Tõusmisel valiti algpunktiks 2565 m kõrgusel mõõdetud andmepunkt. See on esimene andmepunkt, alates 2010 m kõrgusel asuvast andmepunktist, kus on madalam temperatuur kui 2010 m kõrgusel mõõdetud temperatuur.

Laskumisel valiti algpunktiks 2136 m kõrgusel mõõdetud andmepunkt. See on esimene andmepunkt, alates 1926 m kõrgusel mõõdetud andmepunktist, kus on madalam temperatuur kui 1926 m kõrgusel mõõdetud temperatuur.



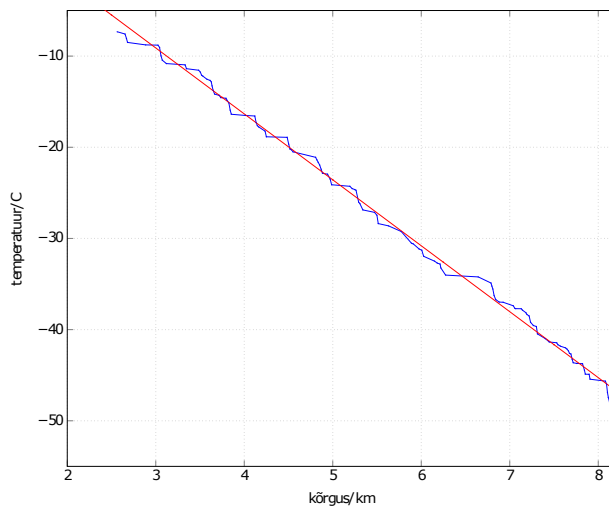
**Joonis 9. temperatuuri sõltuvus kõrgusest üle 2 km**

Allikas: Autori erakogu

Joonisel 9 on graafikutele sobitatud võimalikult täpne lineaarne seos kõrguse ja tem-

peratuuri vahel. Parima seose puhul tõusmisel muutub temperatuur  $-7.13398^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ja algtemperatuur kõrgusel 0 m merepinnast on  $12.8454^{\circ}\text{C}$   $r = -0.9951$ . Laskumisel muutub temperatuur  $-7.67992^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ja algtemperatuur kõrgusel 0 m merepinnast on  $9.13797^{\circ}\text{C}$   $r = -0.9994$ .

Tõusmise graafik on kõikuv mille on põhjustanud päike. Kuna päike soojendas siis sensor mõõtis tegelikust kõrgemat temperatuuri. Kui sensor jahtus siis mõõtis sensor tegelikku temperatuuri. Kindlasti ei mõõtnud sensor tegelikkust madalamat temperatuuri. Kasutades seda asjaolu võib eemaldada kõik hüpplavad kohad. Andmeid hakkati madalama kõrgusega alates vaatama nii, et temperatuur pidevalt langeks. Kui kõrguse tõusetes temperatuur tõuseb eemaltatti järjest kõik andmepunktid kuni jõuti andmepunktini mis oli madalam viimasest võrdluspunktist.



**Joonis 10. temperatuuri sõltuvus kõrgusest üle 2 km**

Allikas: Autori erakogu

Joonisel 10 on graafikutele sobitatud võimalikult täpne lineaarne seos kõrguse ja temperatuuri vahel. Parima seose puhul tõusmisel muutub temperatuur  $-7.23193^{\circ}\text{C}/\text{km}$  ja algtemperatuur kõrgusel 0 m merepinnast on  $12.5889^{\circ}\text{C}$   $r = -0.998$ .

## **Kasutatud materjalid**

Hobbs, P. V., Wallace, J. M. (2006) Atmospheric Science: An Introductory Survey. Amsterdam: Elsevier

Ahrens, C. D., Henson, R. (2018) Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment. Boston: Cengage Learning

# Kinnitusleht

Kinnitan, et

- koostas in uurimistöö iseseisvalt. Kõigile töös kasutatud teiste autorite töödele ja andmeallikatele on viidatud;
- olen teadlik, et uurimistööd ei edastata teistele tulu teenimise eesmärgil ega jagata teadlikult plagieerimiseks.

.....  
kuupäev / nimi / allkiri

Tunnistan uurimistöö kaitsmisvalmiks.

Juhendajad

.....  
kuupäev / nimi / allkiri

.....  
kuupäev / nimi / allkiri