



Royal Netherlands
Meteorological Institute
Ministry of Infrastructure and the
Environment



Fontys Hogeschool
Toegepaste Natuurwetenschappen

KNMI

FONTYS TECHNISCHE NATUURWETENSCHAPPEN

AFSTUDEER RAPPORT

INTERNE REVISIE

Model verticale windsnelheid

Auteur:
Martijn HOOGENDIJK

Begeleiding:
Dr. J. DE KLOE
Dr. H. VAN HALEWIJN

22 januari 2014

Modelleren van de stijgsnelheid van een weerballon

Analyseren van een fysisch model.

De implementatie van mogelijke verbeteringen en de resultaten hiervan.

Handtekening goedkeuring instituutmentor

KNMI

Utrechtseweg 297
3731 GA De Bilt
<http://www.knmi.nl/>

Fontys Technische Natuurwetenschappen

Rachelsmolen 1
5612 MA Eindhoven
<http://www.fontys.nl/>

Betrokkenen

Auteur	MARTIJN HOOGENDIJK
Instituutsmmentor	JOS DE KLOE
Opdrachtgever	AD STOFFELEN
Stagemmentor	HELGER VAN HALEWIJN

Voorwoord

Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI)¹ is het nationale kennis- en adviesorgaan voor weer, klimaat en seismologie. De publiekelijke taak omschrijving bevat het waarschuwen voor gevaarlijke weersomstandigheden, klimaat monitoring en het voorspellen van het weer aan de hand van weermodellen. Internationaal is het aangesloten bij het *ECMWF*² en bij onder andere het *WMO*³ en *IPCC*⁴.

Afdeling Weer-Onderzoek binnen het KNMI heeft onder andere als doel een bijdrage te leveren aan het optimaliseren en verbeteren van huidige weermodellen zodat deze een nauwkeurige weersverwachting kunnen maken. De afdeling biedt ook stageplaatsen voor studenten aan. Dit verslag is een afstudeer stage bij deze afdeling. Voor een complete organogram van de hiërarchie binnen het KNMI kan bijlage A geraadpleegd worden.

Alvorens te beginnen wil ik een aantal personen bedanken die het mij mogelijk hebben gemaakt tot het uitvoeren van deze opdracht:

- Jos de Kloe, die mij van gereedschap en inzicht heeft voorzien waar ik de rest van mijn carrière gebruik van zal maken.
- Richard Rothe, Peter Westerbrink en Marc Allaart, voor het demonstreren en informeren over praktische zaken omtrent de oplating en vlucht van een weerballon
- Ad Stoffelen, voor het beantwoorden van mijn initiële vraag het KNMI als afstudeer plek te mogen hebben.

¹Agentschap van het ministerie van infrastructuur en milieu

²European Centre for Medium-Range Weather Forecast: <http://ecmwf.int/>

³World Meteorological Organization

⁴Intergovernmental Panel on Climate Change

Samenvatting

In navolging op een onderzoek van twee voorgaande stagiair(e)s is er in deze afstudeerperiode een verdere poging ondernomen een profiel van de verticale windsnelheid langs de hoogte te bepalen. Door een theoretisch model te vergelijken met een meting van een radiosonde oplating zou een resulterend product de "verticale wind" zijn. Allereerst is er een correlatiemethode bedacht om uitkomsten van het huidige model te toetsen zodat de juiste conclusie uit later aangebrachte wijzigingen kan worden getrokken. De gekozen statistische methode is een χ^2 *correlatiecoëfficiënt* welke de uitkomst vergelijkt met een vaste, enigszins voorspelbare, verwachtingswaarde. Hierna zijn er wijzigingen aangebracht in het oorspronkelijke model. Er is een grote set data voor handen met 21000 ballon oplatingen vanaf 1993.

Een eerste poging tot verbeteringen in het model betrof het selecteren van enigszins voorspelbare gevallen. De veronderstelling dat nachten met hoge gronddruk de best voorspelbare resultaten zouden geven komt overeen met correlatiescores. Het lijkt dat de atmosfeer stabiel is deze gevallen. Per oplating is de voorspelling echter soms zeer afwijkend.

Succeeding two previous interns, this graduating period an additional attempt is made to derive a vertical profile of vertical wind-speeds. This is done by comparing a theoretical model against the actual ascent data gathered by a radiosonde lifted by a sounding balloon. From this, an estimate of the vertical wind can be derived. Prior to the research a correlation method is used to interpret the results from the model and upcoming changes. Using χ^2 *correlation coefficient* the results of the model are compared to a fixed, predictable expectation. While using the correlation score as a guide, 21000 sounding balloon ascents since 1993 were used as dataset.

A first attempt at improving the model concerned the selection of more or less predictable cases. The assumption that ascents during the night when there was a high ground-pressure affected the modelscore positively. It seems the atmosphere is slightly more stable in these cases. Per ascent however, the prediction is in some cases very different.

The second attempt was related to the usage of relative humidity when calculating the density and viscosity of air, but these model improvements have a negligible effect on the ascend speed. In addition, an alternative way to adapt the initial helium amount was tested, but this did not improve the model aswell.

De volgende poging betrof het gebruik van relatieve luchtvochtigheid in het model door de luchtdichtheid en viscositeit te herberekenen, maar deze modelaanpassingen blijken een gering effect te hebben op de stijgsnelheid. En ook een alternatieve methode om de intiële heliumvulling aan te passen bleek geen verbetering op te leveren.

In verder onderzoek naar verbanden tussen stijgsnelheid van de ballon en andere gemeten grootheden is er gepoogd een relatie te vinden met horizontale verplaatsing, temperatuur, vochtigheid, seizoenen en luchtdruk. Hiermee bleek echter op geen enkele manier een relatie te bestaan.

Tot slot is een functie aan het model toegevoegd welke de binnenwaartse rek (hyperelastisch) op het latex van de ballon beschrijft en als correctiefunctie op de straal en lift fungeert. Vanwege praktische redenen is hierbij de thermische diffusie binnen de ballon uitgeschakeld. De hyperelastische functie blijkt in resultaat goed vergelijkbaar met het effect van het diffusiemodel, maar heeft wel een hogere reactiesnelheid op de verandering van de omgeving. Er is een lichte stijging in score van het model waar te nemen, en ook per profiel ligt de uitkomst dicht bij de verwachtingswaarde. Net als bij het diffusie model is rond de tropopauze, en na tien kilometer de nauwkeurigheid lager. Mogelijk is hier sprake van verticale wind. Het ligt nu voor de hand om in de toekomst de hyperelastische functie en het thermische diffusiemodel te combineren in het model van de stijgsnelheid van de weerballon.

In a further study to find relations between the ascent velocity and other physical quantities the correlation between humidity, seasons, horizontal wind and temperature was scored. There was no significant relation found.

Finally, instead of using thermal diffusion as an important factor in the model, a hyperelastics model was used as main calculation. The back pressure caused by strain corrects the radius and lift development while the balloon rises. The results are comparable to the diffusion model but it responds more dynamic to the measured data. The modelscore increased slightly using this method. Like the diffusion model, the elastic model miscalculates the region around the tropopauze and after 10 kilometers of ascent. This may be caused by vertical wind. An obvious continuation would be to combine the thermal diffusion model with the hyperelastic function to model the ascentspeed.

Inhoudsopgave

Voorwoord	ii
Samenvatting	iv
Inhoudsopgave	vii
1 Inleiding	1
2 Methodiek	3
3 Theorie	5
3.1 Verticale wind	5
3.2 Gemeten stijgsnelheid	6
3.3 Fysisch model	7
3.3.1 Globale vergelijking	8
3.3.2 De dragcoëfficiënt	9
3.3.3 Thermodynamische volumebepaling	9
3.3.4 Volledig aanvangsmodel	10
3.4 Verbeteringen	11
3.4.1 Vochtimplementatie	11
3.4.2 Hyperelastisiteit	14
3.4.3 Lift afname	17
3.5 Verificatie	17
3.5.1 Vergelijkingswaarde	18
3.5.2 Statistische toetsing	21
4 Uitvoering	23
4.1 Data selectie	23
4.2 Vochtimplementatie	23
4.3 Hyperelastische methode	24
4.4 Performance indicatie	25
4.5 Simulatie	27
4.6 Experimenteer omgeving	30
5 Resultaten	33
5.1 Aanvangsmodel	33
5.2 Data selectie	35
5.3 Fysische verbanden	36
5.4 Vocht implementatie	43
5.5 Hyperelastisch model	45
6 Conclusie	53

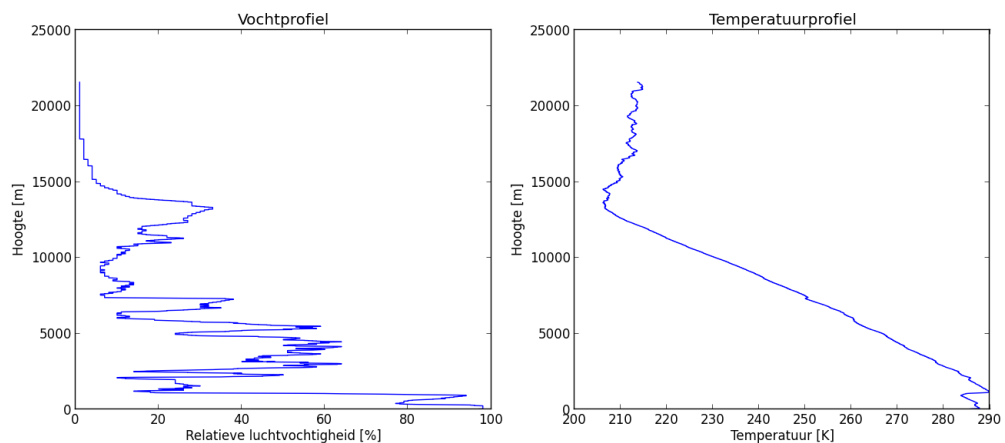
7	Discussie	55
A	KNMI Organogram	57
B	Gebruikte grootheden en constanten	59
C	Dataformat radiosonde	61
D	Dataformat calculatie	63
E	COMSOL model	65
	Overzicht van figuren	66
	Overzicht van tabellen	69
	Bibliografie	71

Hoofdstuk 1

Inleiding

Kort voor middernacht, en tot voor kort ook elke middag, wordt er vanuit De Bilt een weerballon opgelaten met hieraan een radiosonde. Uit de gegevens die deze sonde, elke twee seconden, terugstuurt kan er een nauwkeurig verticaal profiel van de atmosfeer tot ongeveer 25 kilometer gemaakt worden welk gebruikt wordt voor het maken van de weersverwachting en klimatologie. De sonde meet drie meteorologisch relevante grootheden: temperatuur, luchtdruk en vochtigheid. Door de aanwezigheid van een GPS-module in de sonde is de locatie van de meting nauwkeurig bekend. Uit deze profielen, *temps* genaamd, zijn onder andere de wolkenhoogte en verzadiging te herleiden en is er een beeld te vormen van de horizontale wind en het verticaal temperatuurverloop. Voorbeelden van *temps* zijn te zien in afbeelding 1.1 op pagina 1.

In dit rapport is verslag gedaan van een afstudeeronderzoek naar het verifiëren en verbeteren van een model voor de verticale windsnelheid aan de hand van data uit de radiosonde opelingen. De verticale windsnelheid zou het verschil tussen *meting* en *verwachting* moeten zijn. Voor de *meting* kan simpelweg de afgeleide van de hoogte-druk relatie worden gebruikt, voor de *verwachting* echter, wordt een fysisch model gebruikt. De *input* van het fysische model



FIGUUR 1.1: Relatieve luchtvochtigheid en temperatuur ten opzichte van hoogte. Datum van deze opeling: 04-11-2013

zijn de gemeten grootheden uit de radiosonde doorberekend met fysische verbanden die de stijgsnelheid beïnvloeden. Wanneer er een nauwkeurige, fysisch kloppende en realistische uitkomst uit de verwachting komt, kan dit profiel van de meting worden afgetrokken. Het resultaat is de verticale windsnelheid, een snelheid waar tot dusver weinig concrete informatie over bekend is.

De aanleiding voor dit onderzoek is het voorbereiden op de aanstaande *Aeolus* missie van ESA¹ die in 2015 zal worden gelanceerd. Een laser Doppler wind lidar² welke, vanuit een baan om de aarde, de onderste 30 kilometer van de atmosfeer zal bekijken door middel van een analyse van *backscatter*³ van een laser bundel op luchtmoleculen, stofdeeltjes, waterdruppels en ijskristallen om hieruit een nauwkeurig windprofiel te schetsen [1]. Wanneer de satelliet eenmaal operationeel is zullen de gegevens geverifiëerd moeten worden aan de hand van bekende en verwachte gegevens. Aangezien de laser een invalshoek heeft van 35 graden telt de verticale windcomponent mee in de meting. Deze verticale wind zal vaak verwaarloosbaar zijn, maar het is noodzakelijk condities te herkennen waarin dit niet het geval is. Een nauwkeurige uitkomst van een verticaal windprofiel aan de hand van een radiosonde oplating zou hiervoor een uitkomst kunnen bieden.

De hoofdvraag en probleemstelling van het onderzoek luidt als volgt: *Hoe ziet het profiel van de verticale windsnelheid eruit wanneer een radiosonde oplating wordt vergeleken met een fysisch model, en hoe kan de uitkomst verbeterd en getoetst worden.*

Deze vraag zal in delen worden beantwoord, beginnende bij de gebruikte *methodiek* als inleiding gevolgd door een kern waarin de *theoretische ondersteuning* en praktische *uitvoering* worden beschreven. Het hoofdstuk *resultaten* laat de uitkomsten van verschillende rekenseries en de opvolgende *conclusie* en *discussie* bespreekt deze.

Binnen dit verslag kan gerefereerd worden aan grootheden of software. De tabellen in bijlage B tonen hier een overzicht van.

¹European Space Agency: <http://www.esa.int>

²ALADIN: Atmospheric laser Doppler instrument

³Uit de reflectie van een laserbundel met een golflengte van 350 nm wordt de intensiteit bepaald om zo het veroorzakende materiaal te identificeren.

Hoofdstuk 2

Methodiek

De primaire taak aan de start van dit onderzoek is het begrijpen van het bestaande systeem en de basis van de daarbij behorende programmeertaal. Dit is een vervolgonderzoek op twee voorgaande stages. Hoewel er getracht wordt dit artikel voor de lezer zonder kennis van voorgaande artikelen op te stellen, is voor de volledige tijdslijn en beeldvorming van de ontwikkeling van het model aan te raden de documenten van Rouws [2] en Thewessem [3] te lezen. De aanbevelingen uit deze rapporten zijn dan ook gebruikt als richtlijn voor dit onderzoek, en een deel daarvan is daadwerkelijk uitgevoerd. Waar onderzoek nog een relatief onbekend terrein is, is de werkwijze mee ontwikkeld met de vorderingen in programmeervaardigheid en met het begrip van de bijbehorende fysica. Om de onderzoeksvraag te beantwoorden zijn dan ook een aantal eerste gedachten op papier gezet om het model te toetsen en te verbeteren.

- Hoe kan de prestatie van het model worden gemeten en uitgedrukt in een enkel *score* *getal* of andere overzichtelijke weergaven, en waarmee moet de uitkomst van het model vergeleken worden. De score wordt gebruikt om vast te stellen of een verandering in het model ook een verbetering is.
- De radiosonde meet een waarde voor relatieve luchtvochtigheid welke nog niet in het model wordt meegenomen. Er zijn in ieder geval twee tussen berekeningen afhankelijk van het percentage aanwezige vocht in de lucht, namelijk de dichtheid van lucht en de viscositeit.
- Er is flinke variatie in de gemeten stijgsnelheid van de ballon welke samen zou kunnen hangen met één of meerdere van de gemeten grootheden. Het in kaart brengen van deze correlaties kan leiden tot de ontdekking van een invloed waarna het fysisch model aangepast of uitgebreid worden om de invloed ervan op de score te toetsen.
- De verandering van straal door convectie van helium in de ballon wanneer deze door de zon wordt beschenen kan met behulp van COMSOL MULTIPHYSICS worden onderzocht.
- Een verdere literatuurstudie naar de bevindingen van soortgelijke onderzoeken met alternatieve methoden zou tot nieuwe voorstellen ter verbetering van het model zou kunnen leiden.

Hoofdstuk 3

Theorie

Dit hoofdstuk begint met een beschrijving van enkele begrippen die het probleem duidelijker maken, gevolgd door een simpele krachten- en thermodynamische vergelijking. Hierna zal de toepassing hiervan op het fysische model beschreven worden en de theoretische veranderingen als gevolg van de aangebrachte wijzigingen. Ten behoeve van de onderbouwing van de verificatie is er ook een sectie waarin de verwachte waarden en statistische toets hieraan is uitgelegd.

3.1 Verticale wind

Hoewel wind een bekend en veel gebruikt begrip is wordt er vaak alleen de horizontale component van wind bedoeld. In veel situatie, zowel in de praktijk als in weermodellen, is de horizontale variant veel relevanter voor de kerntaken van het KNMI. Er is in het dagelijks leven immers weinig belang in de windsnelheid omhoog of omlaag, en nog minder in een verticaal verloop van deze windcomponent. Toch is de relevantie duidelijker wanneer er rekening wordt gehouden met metingen vanuit de ruimte. De toekomstige lidar ¹ ALADIN zal de wind vanuit de ruimte meten als aanvulling op grondgebaseerde lasar radar systemen om zo de kennis van weer, klimaat en chemische samenstelling van de atmosfeer uit te breiden. Om de afstand tot een object te meten, tussen bijvoorbeeld een waterdruppel en de lidar, wordt het tijdverschil tussen verzending en ontvangst van een laserbundel gemeten. Vervolgens verhoud zich dit tot afstand d volgens $d = \frac{c \cdot \Delta t}{2 \cdot n}$, waarbij n de refractieindex is en c de lichtsnelheid. Het gereflecteerde licht heeft door het Dopplereffect een minuscule frequentieverandering opgelopen welke afhangt van de wind langs de kijkrichting van de laser. In veel gevallen wordt de verticale component verwaarloosbaar en wordt deze geconverteerd naar de horizontale component, maar wanneer de convectie groot is, is deze aanname niet geldig. Omdat ALADIN onder een invalshoek van 35 graden kijkt kan er bij de zijkant van een convectiecel hinder worden ondervonden aan de verticale verplaatsing. Voor de toekomstige performance van ALADIN is het belangrijk een realistisch beeld te hebben van de verticale beweging in de atmosfeer.

¹Light Detection And Ranging of Laser Imaging Detection And Ranging



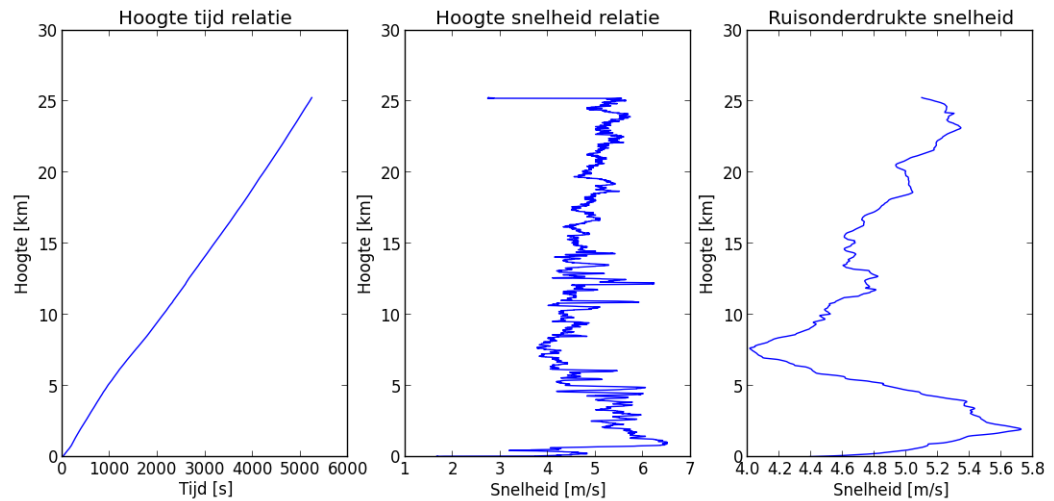
FIGUUR 3.1: Voorbeeld van een radiosonde met (1) thermometer, (2) vochtmeter, (3) GPS ontvanger en (4) radioantenne. De kleine drukmeter bevindt zich in de behuizing.

Om de verticale wind, en het verloop hiervan ten opzichte van de hoogte te kunnen berekenen, wordt er fysisch model van de stijgsnelheid van een meteorologisch ballon vergeleken met een hoogte meting van de radiosonde van een werkelijke oplating. Tijdens de nachtelijke oplating vertrekt een, met helium gevulde, latex ballon vanuit de Bilt met hierin een radiosonde welke vier meteorologisch relevante grootheden meet: druk, temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en hoogte en zendt deze real-time terug naar het KNMI. De positie wordt vanaf 2010 via de GPS positie en bepaald, maar voor het oudere gedeelte van de dataset wordt Loran-C, een radio-pijl methode, gebruikt [4]. Ook heeft deze data een lagere resolutie met een tijdsinterval van tien inplaats van twee seconde². De hoogte van de radiosonde wordt via de barometrische hoogte formule omgerekend aan de hand van de gemeten druk. Een voorbeeld van de moderne sonde is te zien in figuur 3.1 op pagina 6. De gemeten grootheden dienen voor dit onderzoek twee doelen, de relatie tussen druk, temperatuur en vocht ten opzichte van hoogte zijn input parameters voor een fysisch model, de hoogte gegevens en tijdsstap zijn input voor de werkelijke stijgsnelheid.

3.2 Gemeten stijgsnelheid

De KNMI ontvanger maakt tijdens de vlucht een digitaal bestand aan met hierin om de twee seconde een gemeten waarde voor de druk [hPa], temperatuur [K], relatieve luchtvochtigheid [%], lengte- en breedtegraad met hieruit afgeleid de hoogte [m], horizontale windsnelheid [$\frac{m}{s}$] en windhoek [graden]. Een fractie van zo een bestand is als voorbeeld te zien in bijlage C. Om de gemeten stijgsnelheid te bepalen voldoet een afgeleide over de hoogte ten opzichte van tijd aangevuld met ruisonderdrukking in de vorm van een afvlak methode met variabele interval.

²Hoewel de bestanden een 5^e van de grootte van hoge resolutie bestanden zijn is er genoeg data om een nauwkeurig profiel op te stellen.



FIGUUR 3.2: Grafische weergaven van drie stappen om gemeten snelheid te bepalen

Figuur 3.2 op pagina 7 geeft de uitkomst van een willekeurige vlucht. Het toepassen van de afvlak methode, vanaf nu SMOOTHING genoemd, geeft een nauwkeurig beeld van het verloop in snelheid. De opgetreden ruis, veroorzaakt door een combinatie van kort meetinterval (twee seconde), de fout in hoogtebepaling³ (± 6 meter) en discretisatiefouten bij de opslag is verholpen wanneer er over een interval van $s = 4$ meetpunten smoothing wordt toegepast. Elke waarde voor de snelheid wordt dan overschreven door het gemiddelde van de twee waarden erna en ervoor. Dit geeft formule 3.1.

$$Y_i = \frac{\Sigma(Y_{i-1/2s} \dots Y_{i+1/2s} + 1)}{(i + 1/2s) - (1 - 1/2s) + 1} \quad (3.1)$$

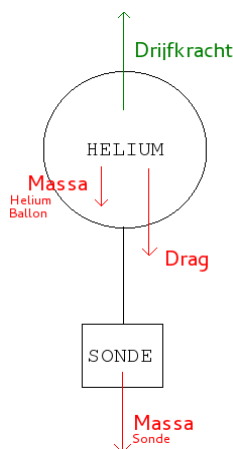
Belangrijk gegeven is dat de randen van het dataset minder veranderen. Wanneer $s = 4$ geldt dit voor de eerste en laatste twee waarden.

3.3 Fysisch model

Met de waarden voor druk, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid kan een fysisch model worden gemaakt dat de stijgsnelheid van de ballon en bijbehorende sonde berekend. Hiervoor is een opzet gemaakt door twee voorgaande stagiars die een model van een Zwitsers onderzoeksteam onder leiding van Gallice [5]. Binnen het KNMI is dit model omgeschreven⁴ en toegepast op de eigen dataset en uitgebreid met extra functionaliteit. Het model van Gallice heeft een aantal gedocumenteerde beperkingen en aannamen welke in dit verslag nader uitgelegd zullen worden.

³Te wijten aan onnauwkeurigheid in GPS/Loran-C positiebepaling, en de fout in drukmeting.

⁴Gallice's methode is geschreven in MATLAB



FIGUUR 3.3: Werkende krachten op de ballon en sonde tijdens de vlucht

3.3.1 Globale vergelijking

In essentie draait het model om het oplossen van een simpel krachtenevenwicht tussen drijfvermogen (gegenereerde lift van het helium) en neerwaartse krachten (zwaartekracht en luchtweerstand). Figuur 3.3 op pagina 8 toont dit evenwicht. Wanneer er wordt aangenomen dat de ballon en sonde een constante stijgsnelheid hebben is de drijfkracht even groot als alle neerwaartse krachten. De volgende formules kunnen worden verbonden aan dit krachtenevenwicht.

$$m_{\text{totaal}}[N] = g \cdot (M_{\text{ballon}} + M_{\text{sonde}} + M_{\text{Helium}})$$

$$F_{\text{drijfkracht}}[N] = V \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot g \quad (3.2)$$

Waarbij ρ_{lucht} berekend wordt als:

$$\rho_{\text{lucht}} = \frac{p}{R_{\text{lucht}} T} \quad (3.3)$$

En als wrijvingskracht:

$$F_{\text{drag}}[N] = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_{\text{lucht}} \cdot v^2 \cdot A_{\perp} \quad (3.4)$$

Waar bij $V[m^3]$ het volume van het drijfkracht genererend object (ballon) is, C_d een empirisch bepaald coëfficiënt, $v[\frac{m}{s}]$ de snelheid ten opzichte van het medium en $A_{\perp}[m^2]$ het frontale oppervlakte ten opzichte van de bewegingsrichting is. Met deze vergelijkingen en de ideale gaswet kunnen ook de volume en straal worden berekend:

$$V[m^3] = \frac{F_{\text{lift}} + M_{\text{ballon}} \cdot g + M_{\text{sonde}} \cdot g}{\frac{p}{T} \cdot g \cdot \left(\frac{M_{\text{lucht}}}{R_u} - \frac{M_{\text{He}}}{R_u} \right)}$$

$$r[m] = \left(\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{F_{\text{lift}} + M_{\text{ballon}} \cdot g}{\frac{p}{T} \cdot g \cdot \left(\frac{M_{\text{lucht}}}{R_u} - \frac{M_{\text{He}}}{R_u} \right)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.5)$$

Waar bij $F_{lift}[N]$ ⁵ de opwaartse kracht is als product van $F_{drijfkracht} - m_{totaal}$, $P[Pa]$ en $T[K]$ de respectievelijke druk en temperatuur zijn. Door de formules te combineren kan er een snelheid worden berekend zoals in vergelijking 3.6.

$$v\left[\frac{m}{s}\right] = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot r}{3 \cdot C_d} \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot m_{totaal}}{4 \cdot \rho_{lucht} \cdot \pi \cdot r^3}\right)} \quad (3.6)$$

3.3.2 De dragcoëfficiënt

Een onbekende factor in formule 3.6 is de dragcoëfficiënt (luchtweerstandcoëfficiënt), C_d . Dit eenheidsloze getal is van belang om de juiste weerstand te berekenen en is afhankelijk van de waarden die in de formule van F_{drag} staan: het frontale oppervlak, het snelheidsverschil tussen object en medium, de dichtheid van het medium en de resulterende luchtweerstand. Er is echter een relatie met het Reynoldsgetal zodat deze ook empirisch te bepalen is. Dit onderzoek is reeds uitgevoerd door de voorgaande stagiair onderzoeker en is als conclusie te zien in het verslag van Thewessem. De coëfficiënt is bepaald door, van alle beschikbare oplatingen, het Reynoldsgetal te berekenen, deze met een relatieve verplaatsing uit de GPS data te vergelijken[3] en vervolgens voor elk meetpunt een bijbehorende waarde voor C_d te zoeken. Dit is gedaan door het Reynoldsgetal te berekenen als

$$Re = \frac{P \cdot v \cdot 2 \cdot r}{R_{lucht} \cdot T \cdot \eta}$$

Waarbij v de gemeten snelheid is. De viscositeit van het medium lucht, η , is alvorens berekend via het verband van Sutherland [6]

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{T_0 + C_s}{T + C_s} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.7)$$

Waarbij C_s een gas specifieke constante is en T_0 en η_0 referentieparameters zijn.

3.3.3 Thermodynamische volumebepaling

Een belangrijke factor die de stijgsnelheid van de ballon bepaald is de ontwikkeling van het volume ten opzichte van de hoogte. Het onderzoeksteam van Gallice [5], het fundament van het aanvangsmodel, besloot hiervoor niet alleen de adiabatische expansie te gebruiken maar deze te combineren met een thermische vertraging binnen het helium systeem. De adiabatische component is een eenvoudige relatie tussen volume, temperatuur en druk volgens:

$$V[m^3] = \frac{m \cdot R_u \cdot T}{P}$$

Door middel van goniometrie en de ideale gaswet is de toename in straal als gevolg van drukverandering te beschrijven als:

$$r_{expansie} = \frac{P_1^{\frac{1}{3}}}{P_2} \cdot r_{voorheen}$$

⁵Met behulp van hefboom wordt er gezorgd dat voor elke vlucht een enigszins constante lift is door de heliumtoevoer automatisch af te breken wanneer er $11,47 \pm 0,2$ N omhoog getrokken wordt

Als aanvulling hierop is de aanname dat de heliumvulling een vertraagde afkoeling ondervindt. Door de bol op te delen in een aantal schillen. Hiervoor kan formule 3.8 op pagina 10 worden gebruikt.

$$\frac{\delta T(r, t)}{\delta t} = \frac{\alpha_{gem}}{R^2} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\delta}{\delta r} \left(r^2 \cdot \frac{\delta T(r, t)}{\delta r} \right) \quad (3.8)$$

Waar bij parameter α_{gem} de diffusiecoëfficiënt is. De verhouding tussen de adiabatiscie verandering en temperatuur diffusie wordt vervolgens gecorrigeerd volgens de ideale gaswet, dit geeft:

$$\frac{V_2}{V_{adia}} = \frac{T_2}{T_{adia}}$$

Hiermee kan de straal en volume worden berekend:

$$V_2 = \frac{T_2}{T_{adia}} \cdot V_{adia} \quad (3.9)$$

$$R_2 = \left(\frac{T_2}{T_{adia}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot R_{adia} \quad (3.10)$$

De straalontwikkeling wordt vervolgens gebruikt om het frontale oppervlakte, de inhoud en hiermee ook de verticale stijgsnelheid te berekenen. Voor details met betrekking tot de numerieke implementatie van de themische diffusie kan het rapport van Rouws [2] worden geraadpleegd.

3.3.4 Volledig aanvangsmodel

Nu de basis principes van het aanvangsmodel bekend zijn is het zaak om deze op de juiste manier te gebruiken. Lineair zien de stappen er als volgt uit:

- Initiële volume, massa en straal berekening aan de hand van ingeschatte lift⁶
- Iteratie over meetpunten beginnen (twee seconde interval)
- Afgeleide $v_{meting}(t) = \frac{dz}{dt}$ bepalen als gemeten hoogteprofiel van de snelheid.
- Ruisreductie toepassen op $v_{meting}(t)$
- Reynoldsgetal (Re) en dragcoëfficiënt C_d berekenen .
- De ballonstraal als functie van druk opstellen aan de hand van adiabatiscie expansie, $r(t)$.
- De temperatuurdiffusie in de ballon bepalen aan de hand van een differentiaal vergelijking en mee berekenen in $r(t)$.
- Correctie op $r(t)$ met behulp van ideale gaswet.
- Stijgsnelheid $v_{model}(t)$ bepalen aan de hand van $r(t)$ en een eerder bepaalde vorm van de relatie Tussen $C_d(Re)$.
- Verticale windsnelheid bepalen door profiel $v_{meting}(t)$ te verminderen met $v_{model}(t)$.
- Naar volgende meetpunt stappen.

⁶Aangenomen dat de hoeveelheid helium een vaste hoeveelheid vrije lift genereert van 11,47 N.

Visueel is dit weergegeven in figuur 3.4 op pagina 12. Het huidige model heeft een aantal variabele parameters die de eindgebruiker kan aanpassen om zo de *output* te veranderen. Zo kunnen er parameterisatie opties worden gekozen, de diffusietoedracht kan worden gevarieerd en kunnen onafhankelijke parameters worden veranderd.

Een fractie van het gegenereerde bestand is als voorbeeld te zien in bijlage D. Het aanvangsmodel werkt en berekend een *geloofwaardig*⁷ profiel voor de stijgsnelheid. De uitkomst van het model, met gemiddelde instellingen is weergegeven in figuur 3.5 op pagina 13. Hier is van een willekeurige dag zowel de ruisonderdrukte gemeten snelheid bepaald alsmede de uitkomst van het fysisch model. Het verschil tussen beide is een aangenomen verticale wind welke de ballon heeft ondervonden tijdens de vlucht. Hoewel het model meer elementen bevat dan figuur 3.4 laat zien is de essentie gebaseerd op de vergelijking uit deze sectie.

3.4 Verbeteringen

Alvorens modelresultaten en toedracht tot potentiële verbeteringen te bespreken wordt de theorie van een aantal verderop doorgevoerde aanpassingen besproken. In overleg met de opdrachtgever zijn er een aantal opties besproken welke mogelijk de nauwkeurigheid van de uitkomst verbeteren.

3.4.1 Vochtimplementatie

Het aanvangsmodel gebruikt twee van de drie gemeten grootheden, druk en temperatuur, terwijl de sonde ook een luchtvochtigheid profiel opslaat. Het model bevat een aantal formules die omgeschreven kunnen worden naar een variant die ook luchtvochtigheid als variabele heeft. Vaak zijn dit parameterisaties of empirische verbanden, maar wel proefondervindelijk bewezen. Er zijn twee kandidaten die een variant kennen waarbij dit het geval is, de dichtheid (gebruikt in formule 3.4 en 3.2) en de viscositeit (formule 3.7).

De luchtdichtheid, ρ_{lucht} neemt af wanneer deze vocht bevat, de moleculaire massa van water is immers lager dan die van lucht⁸. De bepaling start met een inschatting van de temperatuur afhankelijke verzadigde dampdruk van water [7]

$$p_{\text{sat}} = 6.1078 \times 10^{\frac{7.5T+237.3}{T}}$$

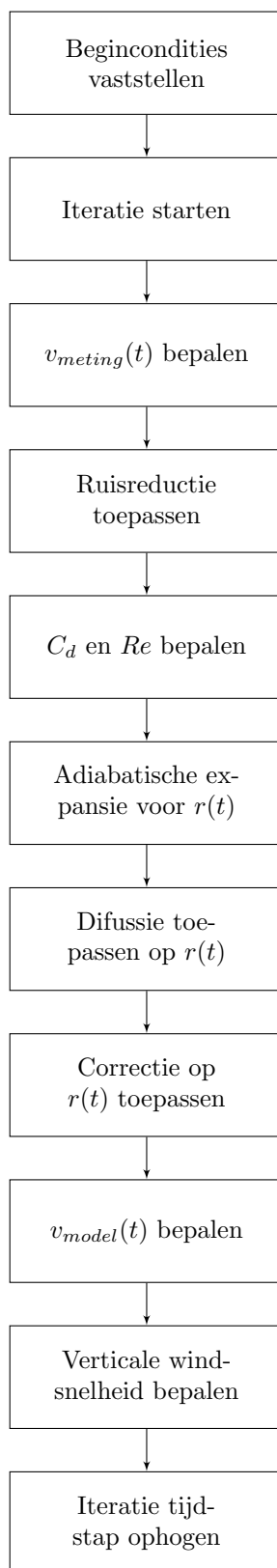
Door deze te vermenigvuldigen met de relatieve vochtigheid ϕ wordt de (onverzadigde) dampdruk bepaald:

$$p_v = \phi p_{\text{sat}} \tag{3.11}$$

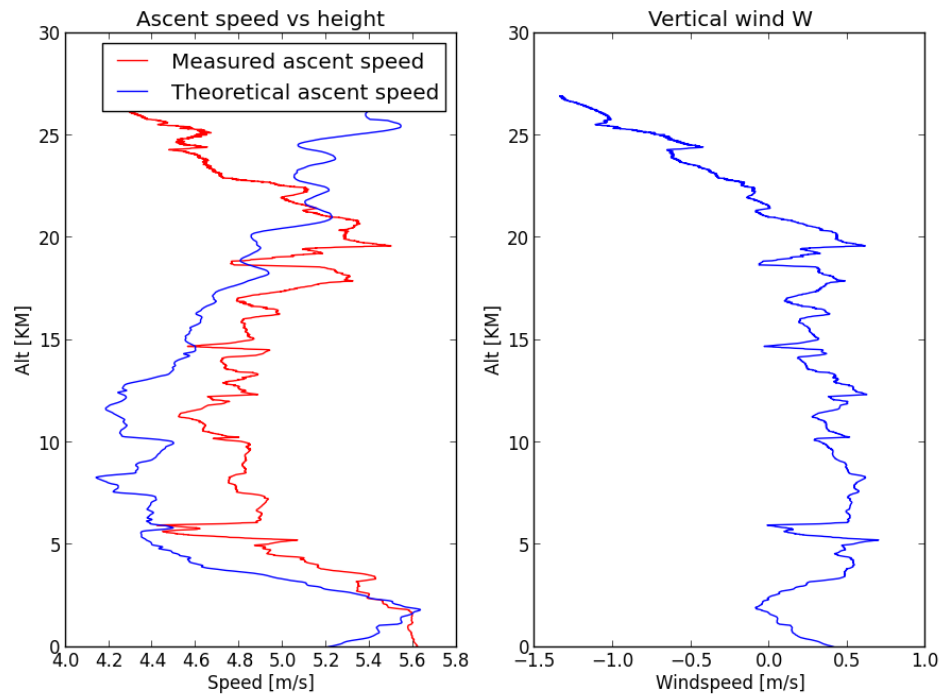
Hiermee kan vervolgens een partiële druk worden bepaald door de werkelijke luchtdruk te verminderen met de onverzadigde dampdruk. Deze partiële druk kan beschouwd worden als een hypothetische druk van de situatie waarbij de overgebleven fractie het volledige volume zou beslaan. Bij een 100% luchtvochtigheid is er geen overgebleven fractie en zou deze partiële druk

⁷D.w.z, de orde grootte van de uitkomst is realistisch

⁸18 g/mol ten opzichte van 29,1 g/mol



FIGUUR 3.4: Stroomschema aanvangsmodel



FIGUUR 3.5: Model uitkomst voor een willekeurig profiel (04-11-2013)

nul zijn. De vergelijking is dus als volgt:

$$p_d = p - p_v$$

Met behulp van de druk fracties kan er een optelling worden gemaakt van de dichtheid van water en lucht volgens de ideale gaswet.

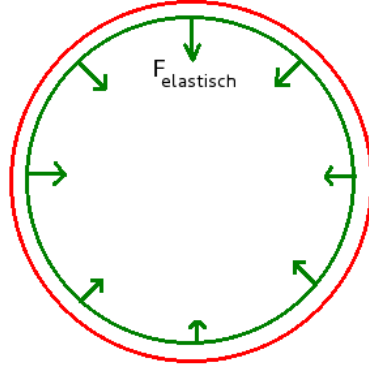
$$\rho_{\text{vochtige lucht}} = \frac{p_d}{R_{\text{lucht}}T} + \frac{p_v}{R_v T}$$

Welk als volgt versimpelt kan worden naar:

$$\rho_{\text{vochtige lucht}} = \frac{p_d M_{\text{lucht}} + p_v M_{\text{water}}}{R \cdot T} \quad (3.12)$$

Een soortgelijke methode is bekend voor de viscositeit, belangrijk voor het bepalen van het Reynoldsgetal. Het, wederom empirisch bepaalde, verband is geldig voor een bereik tussen +50 en -200 deg C [8] en begint met een massaverhouding tussen vocht en lucht. Deze kan vervolgens gecombineerd worden met formule 3.11

$$x = \frac{m_{\text{water}}}{m_{\text{lucht}}} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v}$$



FIGUUR 3.6: Elastische straal (groen) ten opzichte van de straal volgens de ideale gaswet (rood).

Hiermee kan de dynamische viscositeit van vochtige lucht worden bepaald:

$$\eta = \frac{\eta_A}{1 + \phi_{AV} \cdot 1,61x} + \frac{\eta_V}{1 + \frac{\phi_{VA}}{1,61x}} \quad (3.13)$$

Waar bij:

$$\phi_{AV} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{lucht}}{\eta_{water}} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{m_{water}}{m_{lucht}} \right)^{0.25} \right]^2}{2\sqrt{2} \cdot \left(1 + \frac{m_{lucht}}{m_{water}} \right)^{0.5}}$$

$$\phi_{VA} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_{water}}{\eta_{lucht}} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{m_{lucht}}{m_{water}} \right)^{0.25} \right]^2}{2\sqrt{2} \cdot \left(1 + \frac{m_{water}}{m_{lucht}} \right)^{0.5}}$$

Met:

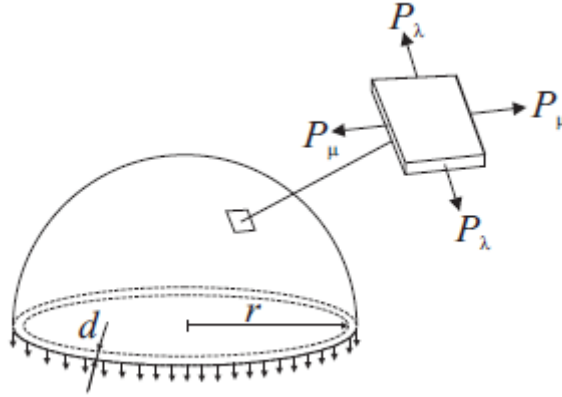
$$\eta_{lucht} \cdot 10^6 = 0,40401 + 0,074582T - 5,7171 \cdot 10^{-5}T^2 + 2,9928 \cdot 10^{-8}T^3 - 6,2524 \cdot 10^{-12}T^4 [Pa \cdot s]$$

$$\eta_{water} \cdot 10^6 = \frac{\sqrt{\frac{T}{647,27}}}{0,0181583 + 0,0177624 \cdot \frac{647,27}{T} + 0,0105287 \cdot \left(\frac{647,27}{T} \right)^2 - 0,0036744 \cdot \left(\frac{647,27}{T} \right)^3} [Pa \cdot s]$$

3.4.2 Hyperelastisiteit

Door de ballon als een hyper elastisch systeem te beschouwen kan er op een alternatieve manier gerekend worden met het model. De elasticiteit van de latex wand zorgt voor een binnenwaarts gekeerde kracht, dit betekend dat de ballon een toenemende kracht naar het centrum heeft wanneer de straal toeneemt. Het gevolg hiervan is dat de straal van de ballon minder snel toeneemt dan deze volgens de ideale gaswet zou doen. Figuur 3.6 op pagina 14 geeft dit grafisch weer. Hieruit is op te maken dat de druk in de ballon altijd een beetje groter is dan de druk buiten de ballon, de *herstellende* kracht kan bij de buitendruk worden opgeteld. In formule vorm geeft dit:

$$P_{uit}[Pa] = P_{in} - \delta P \quad (3.14)$$



FIGUUR 3.7: Krachten evenwicht op een halve ballon met stress in twee componenten. (Bron: [9])

Waarbij P_{uit} de druk buiten de ballon is en P_{in} volgens de gaswet een functie is van het aantal mol helium, het volume en de temperatuur is. Wanneer deze wordt omgeschreven volgt:

$$P_{in}[Pa] = \frac{nRT(h)}{V}$$

$$V[m^3] = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3$$

$$P_{in}[Pa] = \frac{nRT(h)}{\frac{4}{3}\pi \cdot r^3} \quad (3.15)$$

Om δP uit formule 3.14 te bepalen is er een elastisch model nodig die de rek in de latex wand berekend. hiervoor wordt gebruik gemaakt van een op latex toegepaste modelvariant van Mooney-Rivlin [9]. Eerst wordt de rek in twee richtingen loodrecht op elkaar beschreven aan de hand van een kinetisch krachten evenwicht:

$$t_{\lambda\lambda} = t_{\mu\mu} = \rho \frac{k}{m} T \left(\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^4 \right). \quad (3.16)$$

Met $t_{\lambda\lambda}$ en $t_{\mu\mu}$ als de respectievelijke stress door rek, ρ de dichtheid van het latex, k de Boltzman-constante⁹, en m de massa is van het aantal beïnvloede moleculen. Visueel is dit beschreven in afbeelding 3.7.

Waarde r_0 staat voor de *ongerekte straal*. Uit de datasheet [10] van het gebruikte merk weerballonen is bij het type TX350 $r_0[m] = 0,59$ af te lezen. Dit is de ballon die tijdens de vluchten vanuit De Bilt wordt gebruikt. De breuk $\frac{r}{r_0}$ geeft dus een rekverhouding aan. Het drukverschil is nu te berekenen uit de krachtenbalans van de helft van de ballon. De tangentiële krachten $t_{\lambda\lambda}2\pi r d$ moet gelijk zijn aan het drukverschil $\delta P_\lambda \pi r^2$, zodat:

$$\delta P \pi r^2 = t_{\lambda\lambda} 2\pi r d$$

⁹De stress is in werkelijkheid afkomstig van verandering in entropy

Waarin d de dikte is. Wanneer er wordt uitgegaan dat de latex wand incompressibel is geldt $dr^2 = t_0 r_0^2$ en geldt voor dP :

$$\delta P = 2\rho \frac{k}{m} T \frac{t_0}{r_0} \left(\frac{r_0}{r} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^7 \right) \quad (3.17)$$

Met hierin t_0 als waarde voor de ongerekte dikte van het latex en r_0 als ongerekte straal van de ballon. Met behulp van de dichtheid van latex $\rho_{latex} [\frac{kg}{m^3}] = 1100$ [11] en r_0 is t_0 te berekenen.

$$t_0[m] = \frac{m_{ballon}}{4\pi r_0^2 \cdot \rho_{latex}} \quad (3.18)$$

Om de druk-straal verhouding te vinden kan formule 3.17 gecombineerd worden met het Mooney-Rivlin model [12]:

$$t_{\lambda\lambda} = \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda^2 \mu^2} \right) (s_+ - s_- \mu^2)$$

$$t_{\mu\mu} = \left(\mu^2 - \frac{1}{\mu^2 \lambda^2} \right) (s_+ - s_- \lambda^2)$$

Waarin λ en μ de rekverhouding is in eigen richting, deze zijn gelijk aan elkaar door bolsymmetrie. De factoren s_+ en s_- zijn twee materiaal eigenschappen. Eén van deze twee is de *shear modulus*¹⁰ Hiermee kan s_+ vervangen worden door:

$$\mu_{latex}[Pa] = s_+ = \rho \frac{k}{m} T$$

Constante s_- is een parameter bestaande uit $\frac{C_{01}}{C_{10}}$ en zijn wederom materiaaleigenschappen gebruikt bij het Mooney-Rivlin model. De groottes van C_{01} en C_{10} worden vaak bepaald destructieve testen of tijdrovende metingen [13]. De ordegrrootte voor $\alpha = s_- = \frac{C_{01}}{C_{10}}$ ligt voor rubber tussen 0,8 en 1,2 [14] en hiermee blijkt het een handige parameter om de uitkomst van het model te *tweaken*. Wanneer de Mooney-Rivlin formule wordt toegepast op 3.16 geeft dit:

$$t_{\lambda\lambda} = t_{\mu\mu} = \mu_{latex} \left(\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^4 \right) + \alpha \left(\left(\frac{r_0}{r} \right)^2 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^4 \right) \quad (3.19)$$

Vervolgens levert dit, in plaats van formule 3.17, nu:

$$\delta P = 2\mu_{latex} \frac{d_0}{r_0} \left(\frac{r_0}{r} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^7 \right) \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right) \quad (3.20)$$

Door formule 3.14 te combineren met 3.20 geeft dit de volgende verhouding:

$$P_{uit}(h) - \frac{nRT(h)}{\frac{4}{3}\pi r^3} + 2\mu_{latex} \frac{t_0}{r_0} \left(\left(\frac{r_0}{r} \right) - \left(\frac{r_0}{r} \right)^7 \right) \left(1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right) = 0 \quad (3.21)$$

¹⁰Een product van de elasticiteit modulus.

Het aantal mol (n) in formule 3.21 is bepaald door formule 3.21 uit te drukken in n en te combineren met de ideale gaswet:

$$n = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{R_u T P - 2\mu_{latex} \frac{t_0}{r_0} \left(\left(\frac{r_0}{r}\right) - \left(\frac{r_0}{r}\right)^7 \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha} - 1\right) \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 \right)} \quad (3.22)$$

3.4.3 Lift afname

Naarmate de ballon stijgt neemt de herstellende kracht toe en zal de straal van de ballon minder snel toenemen dan wanneer er een adiabatische methode wordt gebruikt. Als gevolg van dit straalverschil neemt de gegenereerde lift af: het gewicht van de hoeveelheid verplaatste vloeistof ten opzichte van de hoogte wordt steeds minder¹¹. Door formule 3.6 op pagina 9 om te schrijven naar een variant die hier rekening mee houdt bereikt men:

$$\begin{aligned} V_{elastisch}(h) &= \frac{4}{3}\pi r_{elastisch}^3(h) \\ \rho_{lucht}(h) &= \frac{P(h)}{R_{lucht}T(h)} \\ \rho_{helium}(h) &= \frac{P(h)}{R_{helium}T(h)} \\ lift_{elastisch}(h) &= g(\rho_{lucht} \cdot V_{elastisch}) - g(\rho_{helium} \cdot V_{elastisch}) - g(m_{totaal}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Dit betekent echter niet automatisch dat de ballon langzamer stijgt: zoals te zien is in formule 3.4 op pagina 8 is ook het frontaal oppervlak van belang en zorgt de kleinere straal $r_{elastisch}$ voor minder neerwaartse drag.

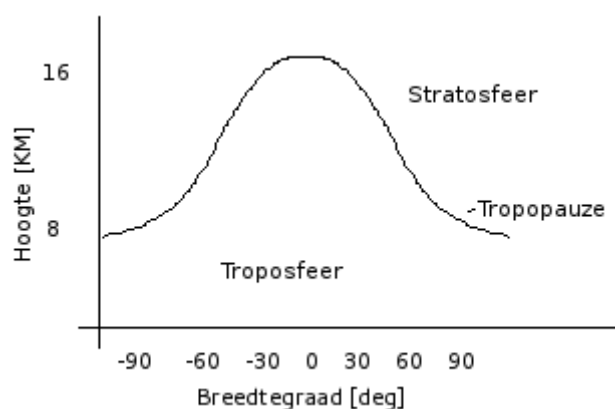
3.5 Verificatie

Er is geen enkel (meteorologisch) instrument dat zo vaak metingen verricht buiten de troposfeer¹² als de radiosonde weerballon. De tropopauze¹³ is dan ook goed te herkennen in het temperatuurprofiel en kenmerkt zich als overgang naar een profiel met vaak een positief gradiënt (*lapse rate*). Omdat de afstand met de warme aarde toeneemt, neemt de lapse rate (Γ) binnen de troposfeer af. Wanneer de stratosfeer is bereikt volgt echter de warmere ozonlaag, het ozon absorbeert een deel van het zonlicht. De oplating in figuur 1.1 toont een tropopauze boven de Bilt op hoogte van 13,5 kilometer. De locatie van de tropopauze is variabel en ligt lager boven de polen dan boven de evenaar, dit door de afgenomen mate van convectie. Afbeelding 3.8 op pagina 18 toont dit schematische verband. [15].

¹¹Wet van Archimedes

¹² Onderste (8 á 15 kilometer) luchtlaag van de atmosfeer.

¹³ Dunne laag waar de troposfeer overgaat in de stratosfeer.



FIGUUR 3.8: Hoogte van tropopauze ten opzichte van aardse breedtegraad.

Cell naam	Breedtelocatie [°]	Maximale hoogte [km]
Hadley	0 - 30	15 - 18
Ferrel	30 - 60	15 - 10
Polar	60 - 90	10 - 6

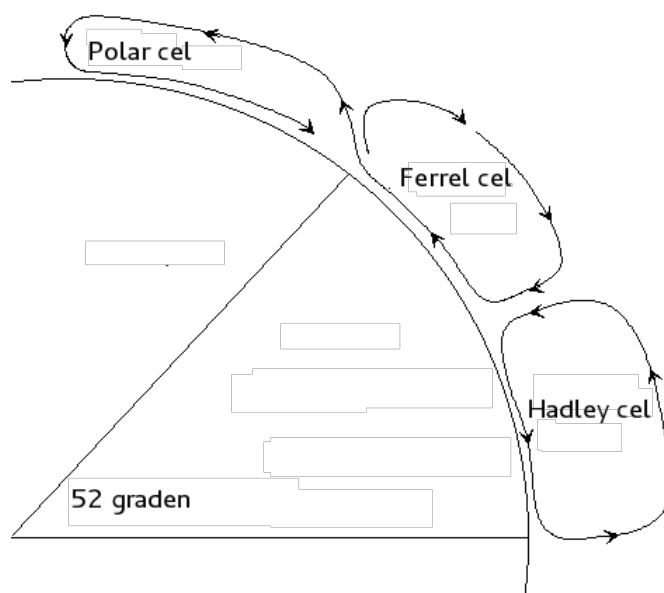
TABEL 3.1: Cell kenmerken

3.5.1 Vergelijkingswaarde

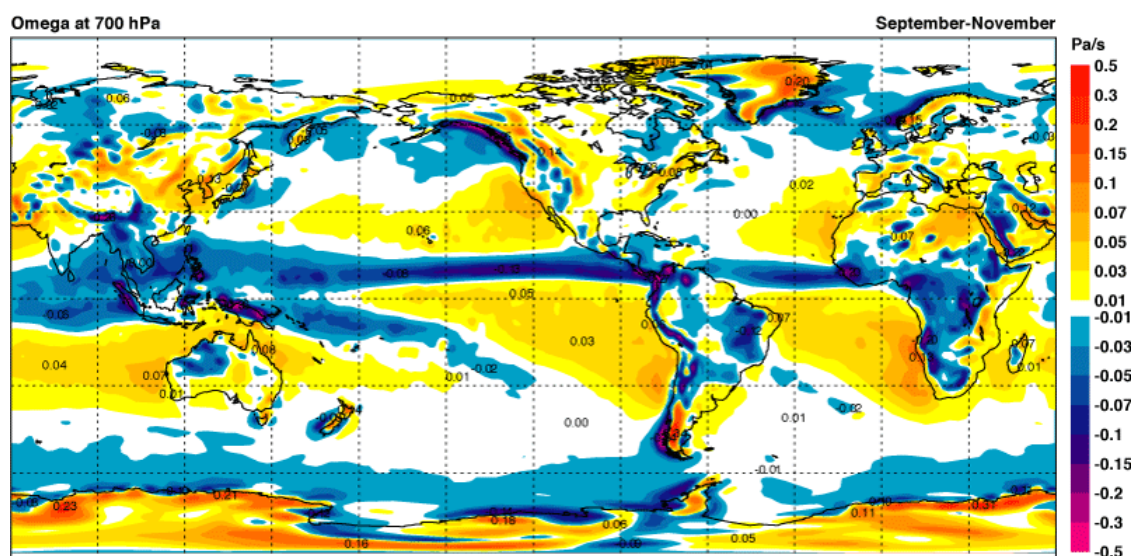
Algemene circulatie De zon warmt vooral het gebied rond de evenaar op, alwaar de lucht opstijgt in zogeheten *convectieve systemen* en via de bovenlucht getransporteerd wordt naar de subtropen. Tijdens dit transport koelt de lucht af en daalt deze naar het aardoppervlak. Bij de polen koelt de lucht juist sterk af waardoor deze uitstroomt naar lagere breedten alwaar het op de grens met de warmere lucht uit de subtropen het *polaire front* vormt. Daartussen ligt een circuleert een derde cel die het patroon sluit. Het noordelijk halfrond kent daarmee de drie cellen [16] gegeven in tabel 3.1 op pagina 18. Een grafische weergave van deze mondiale stroming is te zien in figuur 3.9 op pagina 19. Wordt dit vergeleken met de geografische locatie van de Bilt uit tabel 3.2 op pagina 19 dan is te zien hoe de locatie aan de rand van de *Ferrel cell* ligt. Globaal en gemiddeld over een lange periode zou dit betekenen dat de lucht hier stijgt. Het *ECMWF*¹⁴ waar het KNMI bij is aangesloten produceert dagelijks verwachte weervelden waar deze algemene circulatie goed te herkennen is [17]. Over het algemeen is de gemiddelde circulatie goed bekend. Afbeelding 3.10 op pagina 19 toont de gemiddelde verplaatsing tussen de maanden september en november. De afleesfout is groot, maar voor het gehele jaar ligt de orde grootte van de verplaatsing op $\omega = -0.02 \pm 0.03 \frac{Pa}{s}$. De uitdrukking $\omega \left[\frac{Pa}{s} \right]$ is afkomstig uit de *omega vergelijking*, een meteorologisch belangrijke differentiaalvergelijking die de verticale snelheid ω als drukverschil ten opzichte van tijdverschil definieert. De formule bevat onder andere de Coriolis (f) invloeden, horizontale wind, vorticeiteit (ζ_g) en ook lapse rate. De volledige formule luidt:

$$\sigma \nabla_H^2 \omega + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = f \frac{\partial}{\partial p} [\mathbf{V}_g \cdot \nabla_H (\zeta_g + f)] - \nabla_H^2 \left(\mathbf{V}_g \cdot \nabla_H \frac{\partial \phi}{\partial p} \right) \quad (3.24)$$

¹⁴European Centre for Medium-Range Weather Forecast



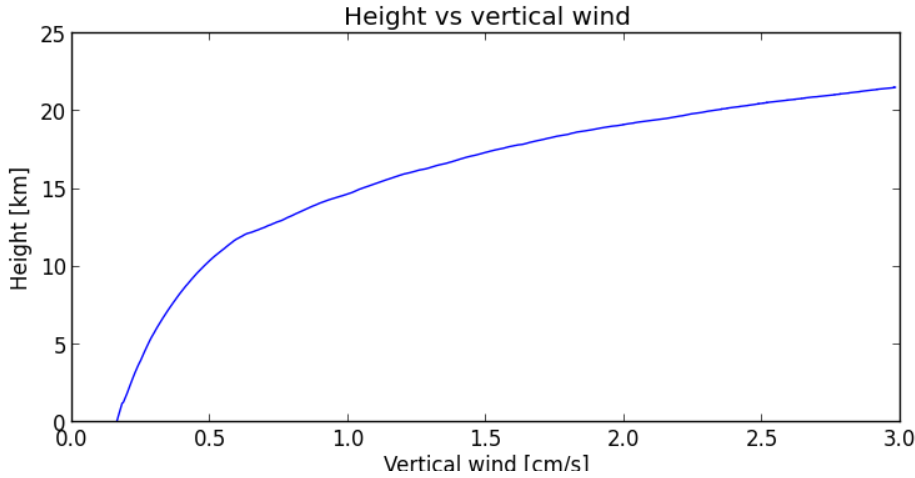
FIGUUR 3.9: De circulatiecellen van het noordelijk halfrond.



FIGUUR 3.10: Product van het *ECMWF* waarin de luchtverplaatsing op 6,5km hoogte tussen september en november is te zien.

De Bilt	Prov. Utrecht
Breedtegraad	52.1 °
Lengtegraad	5.17 °

TABEL 3.2: Geografische gegevens de Bilt



FIGUUR 3.11: Inschatting verwachtingswaarde van verticale wind (W) ten opzichte van hoogte

Een grove inschatting aan de hand van ECMWF data laat een verplaatsing zien van $\omega = -0.02 \pm 0.03 \frac{Pa}{s}$. Wanneer er wordt uitgegaan van een hydrostatisch evenwicht kan de verticale wind (W) proportioneel aan de horizontale wind (u, v) worden beschouwd. Dit vereenvoudigd formule 3.24 tot een simpele:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{\delta P}{\delta z} = \frac{\delta p}{\delta z} \frac{\delta z}{\delta t} = \frac{\delta p}{\delta z} W \\ \frac{\delta p}{\delta z} &= -\rho g \\ \omega(h) &= -\rho(h)gW\end{aligned}\quad (3.25)$$

Met deze simpele variant is er een getal voor W uit te rekenen. Figuur 3.11 geeft een grafische weergave van het verloop in verticale wind ten opzichte van de hoogte. Nu er een ordegrrootte van de verticale wind bekend is, zal $W = 2 \frac{cm}{s}$ worden aangehouden als verwachtingswaarde.

Turbulentie en Convection De algemene circulatie geeft een aanwijzing voor de gemiddelde verticale verplaatsing, maar vergeleken met de actuele verticale verplaatsing is deze klein. De actuele verplaatsing is de spreiding rond het gemiddelde en varieert erg snel in de atmosfeer, op de convectieve (buien) tijdschaal is dit rond de 20 minuten. De schering van de horizontale wind met de hoogte zorgt voor mechanische turbulentie, en dit is vooral wat de ballon ervaart bij het opstijgen. Houchi et al. [18] hebben aangetoond dat er veel meer windschering in de atmosfeer is dan in het ECMWF model wordt weergegeven (factor 2 á 3). Verder zijn kleinschalige variaties in de horizontale wind door mechanische turbulentie ook een indicatie voor de kleinschalige variaties in de verticale wind (3D turbulentie). De verticale schaal hangt hierbij af van de atmosferische stabiliteit. Zo zijn verticale bewegingen bij schapjeswolken minder dan 1.0 m/s, terwijl bij stapelwolken de verticale bewegingen groter dan 1.0 m/s zijn. Metingen van de verticale wind vanuit grondgebaseerde lidar laten een spreiding zien van ongeveer 1.0 m/s, maar met uitzonderlijke uitschieters tot 30 m/s in convectieve updrafts¹⁵.

¹⁵Turbulente weersituaties zoals onweer en grote wolkvormingen.

3.5.2 Statistische toetsing

Om de kwaliteit van het model te testen dient een verwachtingswaarde vergeleken te worden met de uitkomst van de berekening. Het idee van deze *performance index* is om de juiste conclusie uit een aangebrachte wijziging te trekken. Wanneer er door middel van één of twee getallen een score kan worden toegekend aan de uitkomst geeft dit een overzichtelijke indicatie over de prestatie en functionele toevoeging van de wijziging. Omdat er vaak een grote set radiosonde data van verschillende oplatingen in één keer wordt doorgerekend is er gekozen voor vier verschillende methode:

- Chikwadraat (χ^2) toets (getal)
- Bias offset (getal)
- Gauss verdeling (grafisch)
- Deviatieplot (grafisch)

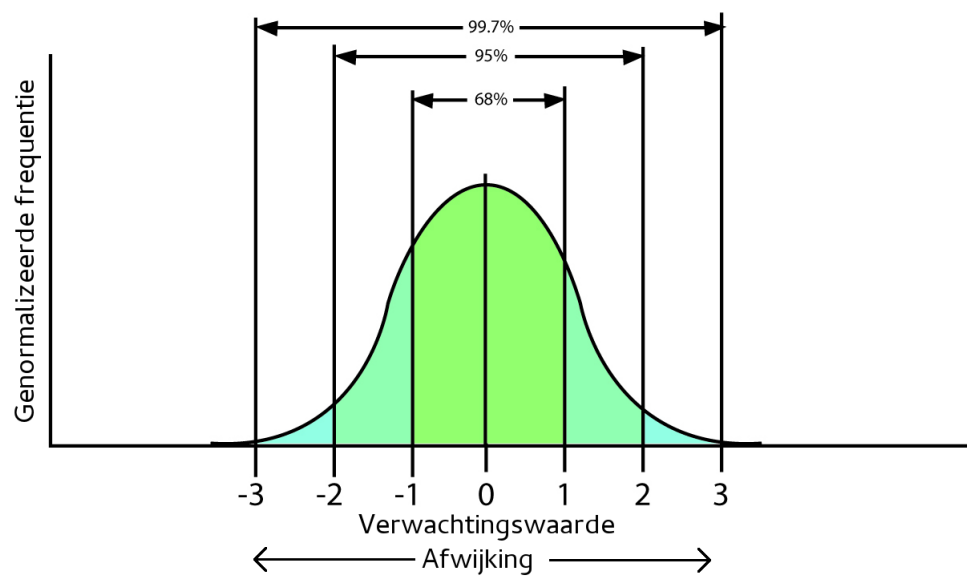
De χ^2 toets bepaald de diversiteit tussen twee reeksen. Het is een toets waarbij beide reeksen onafhankelijk van elkaar kunnen zijn. In dit geval kan de simpelste variant worden gekozen: er is een bekende reeks verwachtingswaardes en een reeks berekende uitkomsten. Dit geeft:

$$\chi^2 = \sum \frac{(f - e)^2}{e} \quad (3.26)$$

Waarbij e de verwachtte waarde is en f het aantal keer dat een mate van afwijking voorkomt.

De bias offset is een getal die de gemiddelde afwijking ten opzichte van de verwachting aangeeft. De bias zegt niet zozeer iets over de prestatie van het model maar is in de praktijk uiterst handig gebleken voor het *tweaken* van parameters. In combinatie met de correlatiecoëfficiënt geeft het een goed beeld van de statistische afwijking van de berekende uitkomst ten opzichte van de verwachtingswaarde.

Een derde hulpmiddel is een visuele Gauss verdeling. Hierbij wordt in instelbare stapgrootte datasegmenten vergeleken met een verwachtingswaarde (μ) en een onzekerheid in de verwachtingswaarde (σ). Wanneer de gemiddelde van het datasegment binnen één, twee of drie maal σ valt wordt deze aan de Gauss verdeling toegevoegd. In het ideale geval ziet de verdeling er als figuur 3.12 uit, waarbij de oppervlakte onder de grafiek 100% is. Waar de Gauss verdeling wordt toegepast op een gemiddelde van alle berekeningen wordt bij de deviatieplot per profiel de afwijking ten opzichte van de verwachtingswaarde berekend. Het resultaat is een staafdiagram waarin de genormaliseerde frequentie ten opzichte van de gemiddelde afwijking staat.



FIGUUR 3.12: Algemene Gauss verdeling

Hoofdstuk 4

Uitvoering

Een aantal theoretisch beschreven onderdelen dienen numeriek vertaald te worden zodat deze in Python en Fortran¹ gebruikt kunnen worden. Dit hoofdstuk dient als stap tussen theorie en resultaat en bevat de vereiste uitleg die de correcte interpretatie van de resultaten, en de weg daarnaartoe verzorgt.

4.1 Data selectie

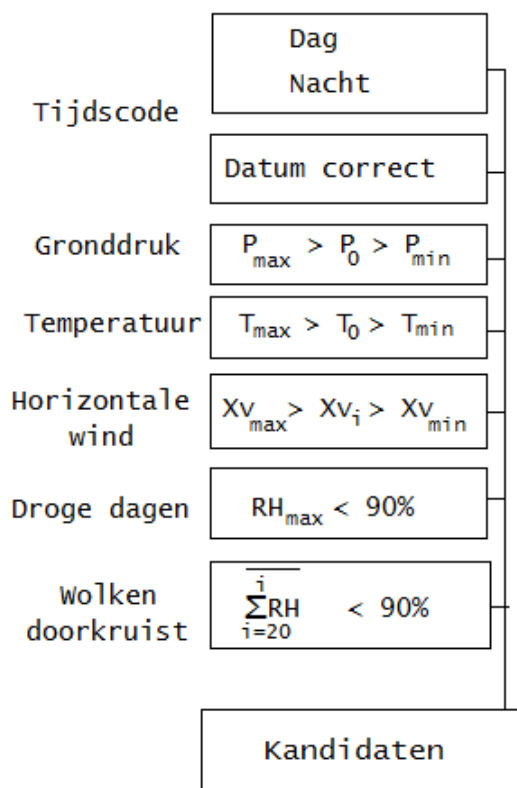
Omdat er een zeer grote dataset² voor handen is, is het mogelijk om te experimenteren met data selectie. De bedoeling is dat de selectie van data de uitkomst beïnvloed. Op elke gemeten fysische grootte en de tijdscode kan een selectie worden gemaakt: horizontale verplaatsing, gronddruk, temperatuur, tijdstip (dag, nacht), seizoen, droge dagen en het doorkruisen van wolken. Hiervoor wordt er per oplating gecontroleerd of aan al deze voorwaarden wordt voldaan. Een schematische *flowchart* geeft dit weer in afbeelding 4.1.

4.2 Vochtimplementatie

Om de invloed van de vochtimplementatie te toetsen wordt de Fortran rekenserie uitgebreid met een schakelaar. Wanneer de relatieve vochtigheid als variabele berekend moet worden wordt in plaats van formule 3.3 en 3.7 formule 3.12 en 3.13 gebruikt.

¹Van het model is ook een variant in de gecompileerde taal Fortran gemaakt. Deze versie is ongeveer tien maal sneller.

²De dataset bevat vluchten van 1993 tot heden. Tot 1998 werden er vier radiosondes per dag opgelaten, tot half 2013 vertrokken er twee per dag, hierna alleen een enkele 's nachts nog. Dit brengt het totaal op 21.000 radiosonde bestanden. De afname is te wijten aan deels de kosten maar ook aan de afgenomen noodzaak van de weerballon: het belang van satelliet- en vliegtuigwaarnemingen is het laatste decennium sterk toegenomen.



FIGUUR 4.1: Schematische weergaven van de gemaakte selectie eisen.

4.3 Hyperelastische methode

Formule 3.21 op pagina 16 dient herschreven te worden naar een numeriek uitvoerbare variant. Hierbij zijn de termen die onafhankelijk zijn van de hoogte vervangen door respectievelijk X_1 , X_2 en X_3 waarbij:

$$X_1 = \frac{nR}{\frac{4}{3}\pi}$$

$$X_2 = 2\mu \frac{t_0}{r_0}$$

$$X_3 = \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$

Dit leidt tot:

$$P_{uit} - \frac{X_1 T}{r^3} + X_2 \left(\left(\frac{r_0}{r} \right) - \left(\frac{r_0}{r} \right)^7 \right) \left(1 + X_3 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right) = 0$$

De termen uitvermenigvuldigen levert:

$$P_{uit} - \frac{X_1 T}{r^3} + X_2 \frac{r_0}{r} - X_2 \frac{r_0^7}{r^7} + X_2 \cdot X_3 \frac{r}{r_0} - X_1 \cdot X_2 \frac{r_0^5}{r^5} = 0$$

Alle termen vermenigvuldigen met een gemeenschappelijke r^7 :

$$P_{uit} r^7 - X_1 T r^4 + X_2 r_0 \cdot r^6 - X_2 r_0^7 + X_2 \cdot X_3 \frac{r^8}{r_0} - X_1 \cdot X_2 \cdot r_0^5 \cdot r^2 = 0$$

Rangschikken op volgorde van exponent:

$$\frac{X_2 \cdot X_3}{r_0} r^8 + P_{uit} r^7 + (X_2 r_0) r^6 - X_1 T r^4 + (X_1 \cdot X_2 \cdot r_0^5) r^2 + (X_2 r_0^7) r^0 = 0$$

Nu de termen herschreven zijn als een functie van r^n is er een 8^{ste} macht polynoom ontstaan:

$$polynoom = \begin{bmatrix} \frac{X_2 \cdot X_3}{r_0} & P_{uit}(h) & (X_2 r_0) & 0 & X_1 T(h) & (X_1 \cdot X_2 \cdot r_0^5) & 0 & (X_2 r_0^7) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Aan de hand van deze polynoom is een *companion matrix* [19] op te stellen waarvan vervolgens de eigenwaarden kan worden berekend. Deze eigenwaarde zijn tevens de polynome wortels [20]. Voor deze complexe methode heeft Python een uitbreiding waarmee hogere wiskunde functies kunnen worden berekend³. Door elke tijdstap de nieuwe waarde voor P en T te gebruiken is de straal te berekenen. Een voorbeeld van de uitkomst van de *roots* functie op de 15^e tijdstap van een willekeurige oplating met $P_{i=15} = 92440.0[Pa]$ en $T_{i=15} = 272.45[K]$ is:

$$Roots = \begin{bmatrix} -5.144e^3 + 0j & 7.516e^{-1} + 0j \\ -3.760e^{-1} + 0.651j & -3.760e^{-1} - 0.651j \\ 6.393e^{-2} + 0.065j & 6.393e^{-2} - 0.065j \\ -6.401e^{-2} + 0.065j & -6.401e^{-2} - 0.065j \end{bmatrix}$$

Het juiste getal voor de straal bevindt zich op locatie $Roots_{12}$ welk overeen komt met de 7^e orde functie P_{uit} . Voorwaarde is echter dat $\Re_{Roots_{12}} \geq 0$ en $\Im_{Roots_{12}} = 0$ [19]. Bij deze druk en temperatuur is de straal 0,7516 m, dit is een fractie kleiner dan wanneer deze adiabatisch (via formule 3.5 op pagina 8) wordt berekend: 0,7520 m. Naarmate de iteratie vordert neemt het verschil tussen de elastische straal en de adiabatische straal aanzienlijk toe.

Om de invloed van liftvermindering mee te berekenen in de uitkomst wordt de formule voor de elastisch gecorrigeerde lift 3.23 op pagina 17 gecombineerd met de formule voor de verticale windsnelheid, formule 3.6 op pagina 9. Dit leidt tot:

$$V[m^3] = \frac{4}{3} \pi r_{elastisch}^3$$

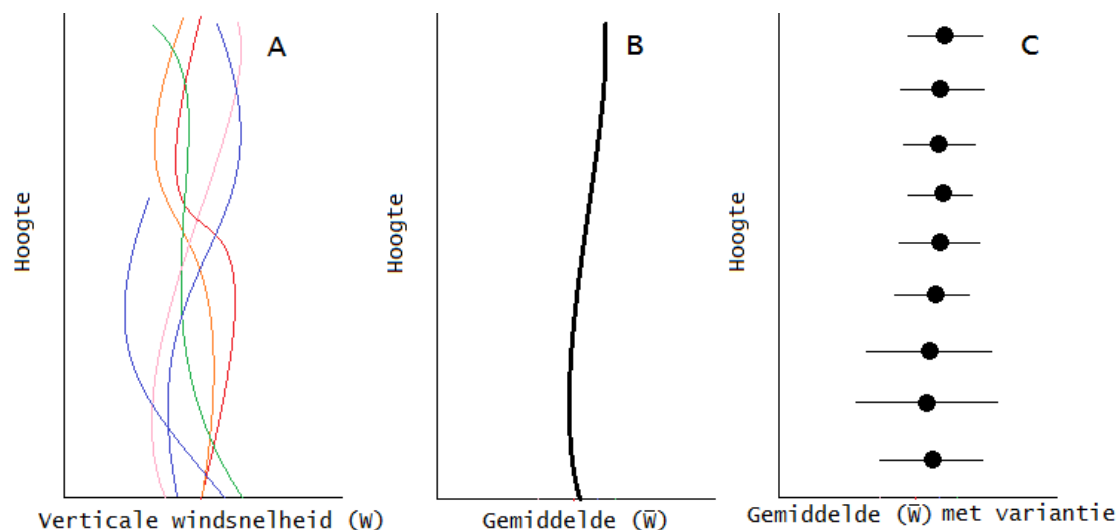
$$v \left[\frac{m}{s} \right] = \sqrt{\frac{2g(V\rho_{lucht} - m_{totaal})}{\rho_{lucht} C_d \pi r_{elastisch}^2}} \quad (4.2)$$

Wanneer het elastische model wordt gebruikt worden er geen rekenstappen ondernomen die een relatie hebben met thermisch diffusie. Er is geen combinatie van beide modellen geïmplementeerd.

4.4 Performance indicatie

De vier methoden om de score vast te stellen worden gebruikt in een numerieke omgeving. Drie van de vier methoden bepalen een score aan de hand van een verzameling gemiddelden, alleen de deviatieplot maakt een staafdiagram aan de hand van individuele oplatingen. De verzameling gemiddelden zijn ontstaan na het bij elkaar optellen van segmenten van elke profiel.

³NumPy, www.numpy.org



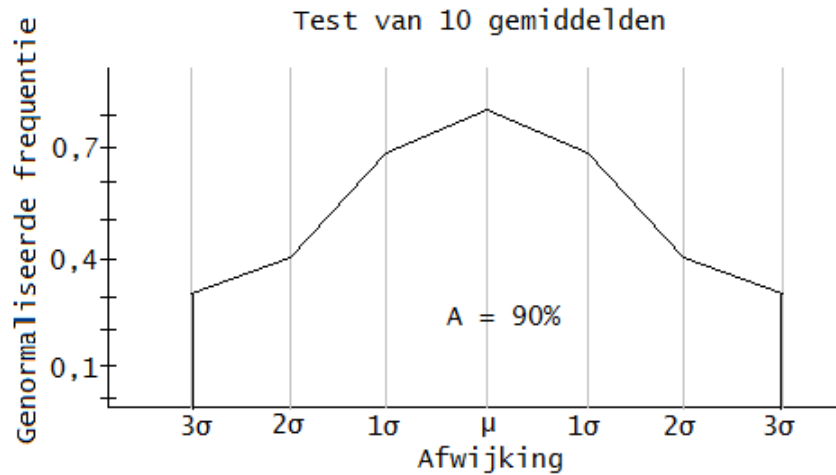
FIGUUR 4.2: Schematische weergaven gemiddelde per laag. (A) Losse profielen W t.o.v. h , (B) Gemiddelde van alle profielen. (C) Gemiddelde per segment (dH) met bijbehorende variantie σ^2

De grootte van een segment wordt vastgelegd op een hoogteverschil van 500 meter, $dH = 500$. Een radiosonde haalt gemiddeld 25 kilometer verticaal, dit betekent dat er 50 gemiddelden ten opzichte van de hoogte zijn. Per gemiddelde is ook de variantie (σ^2) te bepalen, Figuur 4.2 geeft dit schematisch weer. De performance die getoetst wordt is de verticale windsnelheid W , het resultaat van $v_{meting} - v_{model}$. De waarde van χ^2 is nu eenvoudig te bepalen: de gemiddelden reeks wordt vergeleken met een even lange reeks verwachtingswaardes (μ). De χ^2 uitkomst zal worden berekend via een Python module [21]. Ook de *bias* is gemakkelijk te berekenen. Per getal in de reeks wordt berekend hoeveel deze van μ af ligt en vervolgens gemiddeld om als *offset* te worden weergegeven.

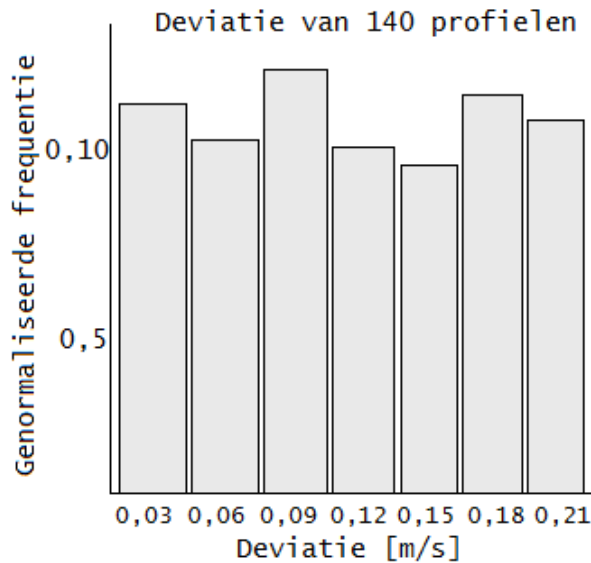
Om de Gauss verdeling te maken wordt de reeks gemiddelden vergeleken met een verwachtingswaarde μ en de fout in de verwachtingswaarde $\mu + \sigma$. De verwachtingswaarde is eerder in sectie 3.5.1 vastgesteld op $2 \frac{cm}{s}$. In deze sectie is ook een fout in ω vastgesteld van $\pm 0,03 \frac{Pa}{s}$, wat volgens 3.25 neerkomt op $6 \frac{cm}{s}$. Figuur 3.12 geeft aan hoe de verdeling wordt opgesteld. Per getal wordt bekeken of deze binnen 2, 4 of 6 maal σ van μ ligt. De frequentie wordt voor alle vier⁴ de opties genormaliseerd en grafisch weergegeven. Een schematisch voorbeeld van deze weergaven is te zien in figuur 4.3.

De staafdiagram met informatie over het aantal profielen met een gemeenschappelijke deviatie bevat informatie over de afwijking ten opzichte van μ . Het vergeleken getal is de gemiddelde verticale windsnelheid (\bar{W}) in een gekozen hoogte regio. Een schematisch voorbeeld hiervan is te zien in figuur 4.4. De deviatieplot heeft opvallende overeenkomsten met de waarde van χ^2 . Hoe beter χ^2 , hoe sneller de frequentie afneemt ten opzichte van de deviatie.

⁴Meer dan 6σ afwijking is ook mogelijk, dit geeft 2, 4, 6 of meer dan 6σ afwijking als optie



FIGUUR 4.3: Schematische weergaven van Gauss verdeling. Het percentage A geeft aan hoeveel van de gemiddelden daadwerkelijk binnen 6σ vallen.



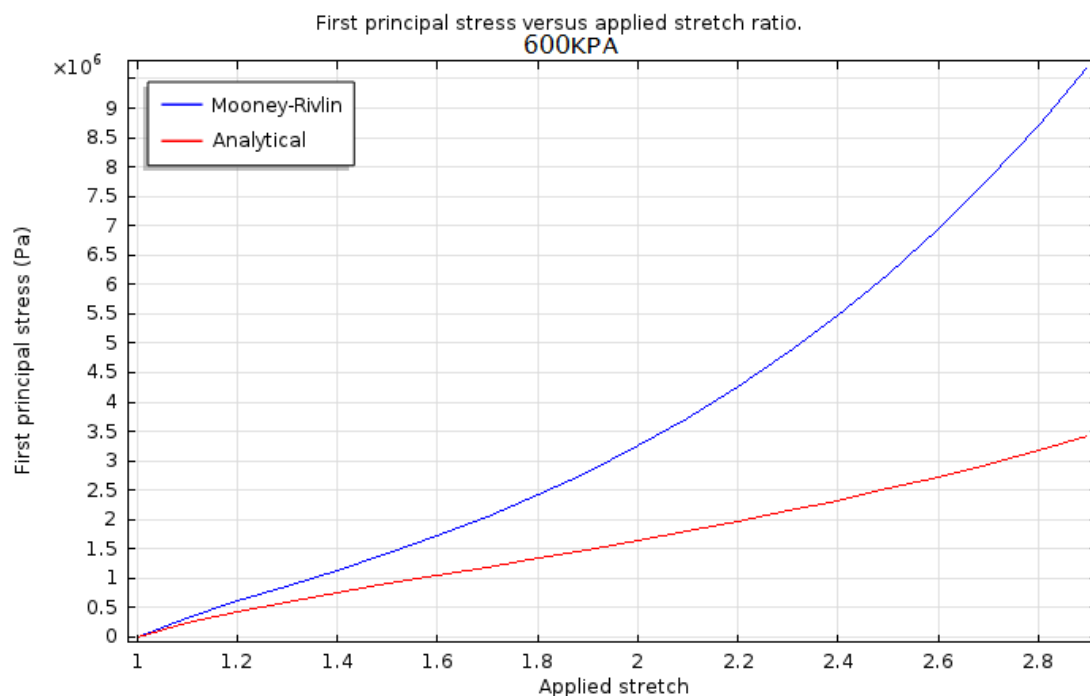
FIGUUR 4.4: Schematische weergaven van de deviatie staafdiagram.

4.5 Simulatie

De grootte van de shear modulus μ_{latex} is in verschillende bronnen opgezocht en varieert van 330KPa tot 600KPa ([22],[23],[24]). Om een impressie van de keuze van μ_{latex} te krijgen is er een COMSOL model gebruikt waarin rekratio tegen één dimensionale stress wordt uitgedrukt. Hierbij wordt het Mooney Rivlin model vergeleken met een analytisch model, een geparameteriseerde formule voor de vergelijking van het Ogden elastisch model ⁵.

$$S_d = \kappa_1 (x^{\alpha_1} - x^{-2\alpha_1}) + \kappa_3 (x^{\alpha_2} - x^{-2\alpha_2}) - \kappa_3 (x^{\alpha_3} - x^{-2\alpha_3}) \quad (4.3)$$

⁵Een vergelijkbaar hyper elastisch model



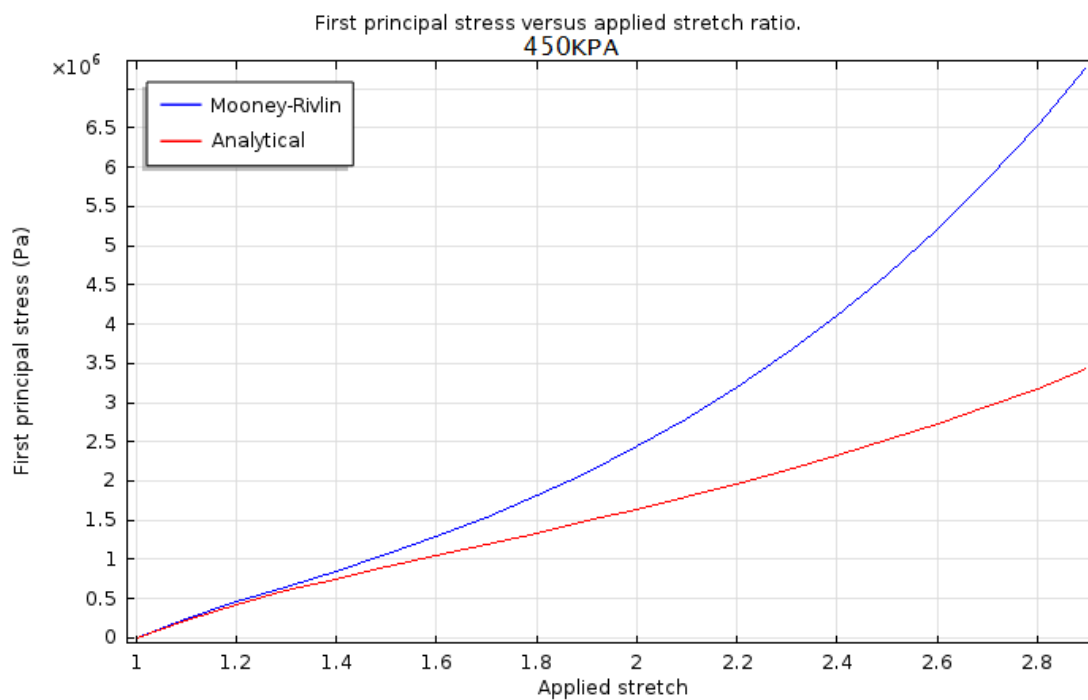
FIGUUR 4.5: Verhouding tussen analytisch model en mooney rivlin met $\mu_{latex} = 600Kpa$

	n	α	κ
Met	1	1,3	630KPa
	2	5	1,2KPa
	3	-2	-10KPa

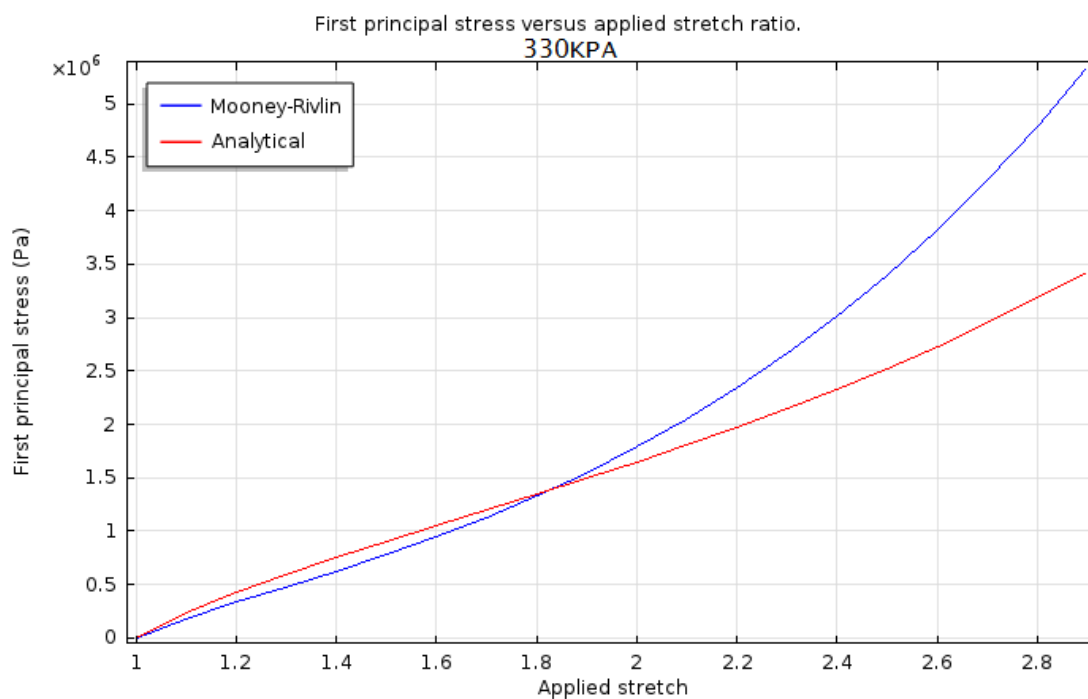
Waarbij κ_{123} en α_{123} de Ogden parameters zijn, x de rekratio $\frac{r}{r_0}$ is en S_d de rek energie dichtheid ⁶. Dit zijn veel gebruikte waarden voor incompressiebele dunne rubberachtige lagen en zijn onderdeel van het COMSOL model [25] en herhaaldelijk terug te vinden in de literatuur [26], [27]. De resultaten worden met drie verschillende waarde voor μ_{latex} gesimuleerd: 330KPa, 450KPa en 600KPa. De uitkomst van de analytische methode is onafhankelijk van deze parameter maar berekend vergelijkbare waarde als de Mooney-Rivlin stress [27]. Wanneer de stress-rekratio van beide modellen enigszins gelijk zijn kan er verondersteld worden een waarde voor μ_{latex} te zijn gevonden die overeenkomt in twee modellen. Figuren 4.5, 4.6 en 4.7 tonen de resultaten. Een uitgebreidere beschrijving van het COMSOL model is te vinden in bijlage E. Aan de hand van deze simulatie is μ_{latex} gekozen als 330KPa, elastischer dan de meeste vormen van rubber⁷.

⁶Strain energy density

⁷Door de fabrikant is dit een bewust gekozen materiaaleigenschap: hoe better het rubber rekt, hoe kleiner het drukverschil is.



FIGUUR 4.6: Verhouding tussen analytisch model en mooney rivlin met $\mu_{latex} = 450Kpa$



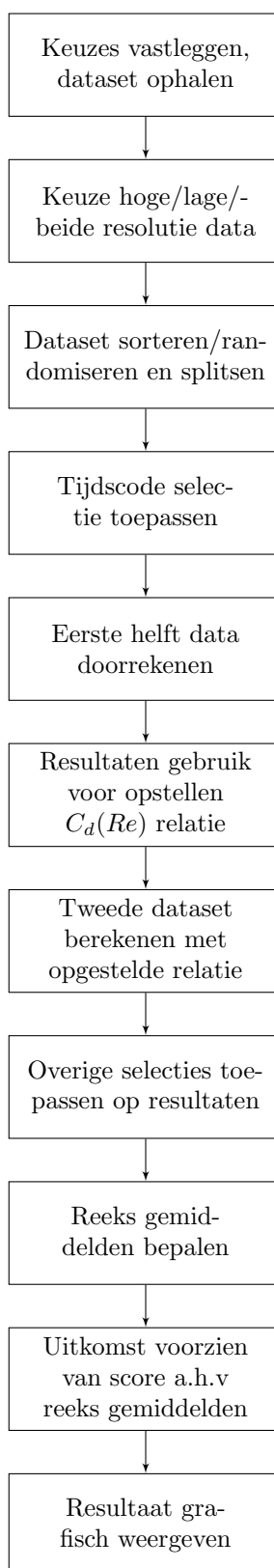
FIGUUR 4.7: Verhouding tussen analytisch model en mooney rivlin met $\mu_{latex} = 330Kpa$

4.6 Experimenteer omgeving

Het fysische model wordt opgenomen in een geprogrammeerde experimenteer omgeving⁸ waar alle selectieopties en parameter instellingen te kiezen zijn. Ook wordt de dataset in twee gesplitst om vanuit de eerste set een $C_d(Re)$ relatie op te stellen. De te maken keuzes zijn uitgelegd in sectie 4.1 en aangevuld met een keuze voor het sorteren van de twee datasets: op maand, seizoen, chronologisch of willekeurig⁹. In de *flowchart* van figuur 4.8 op pagina 31 is dit grafisch weergegeven.

⁸Om overzichtelijk werken is er besloten een grafische user interface (GUI) te maken.

⁹Wanneer een effect van een parameter getest moet worden is het duidelijker dit op dezelfde gesplitste dataset te doen, wanneer herhalingsfouten uitgesloten moeten worden kan de dataset eerst in willekeurige volgorde worden gezet alvorens deze te splitsen.



FIGUUR 4.8: Stroomschema experimenteer omgeving

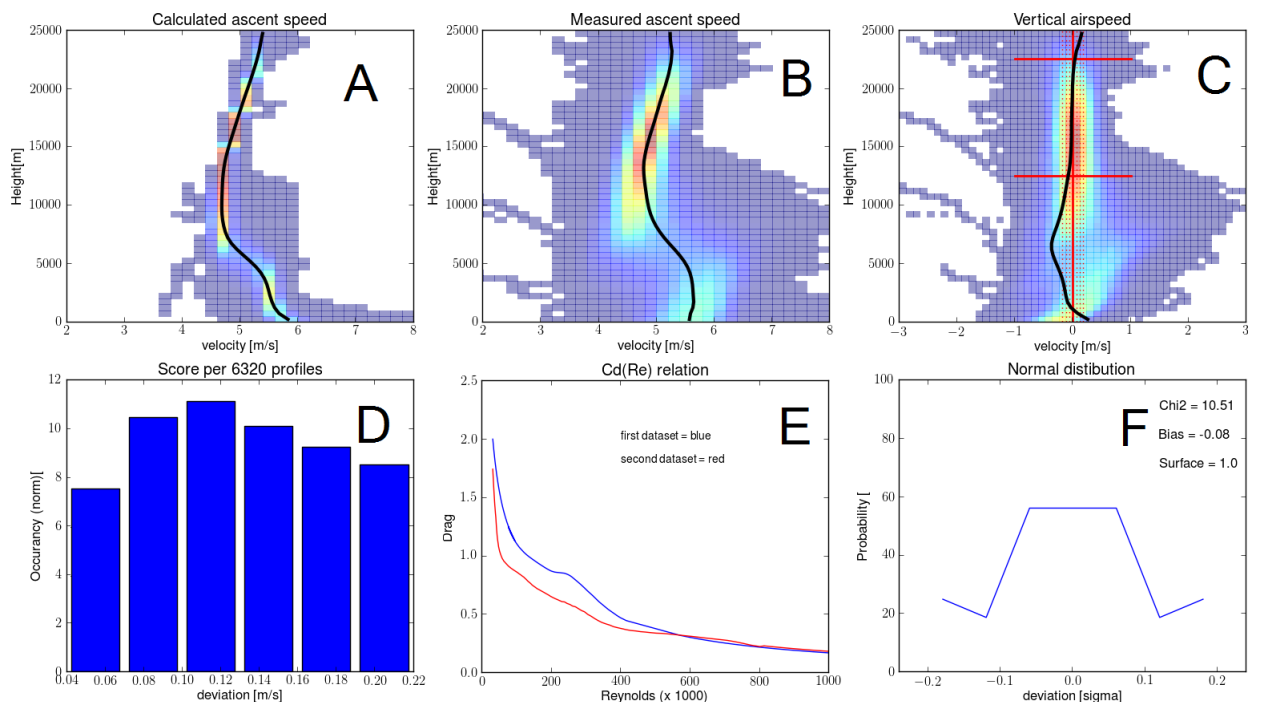
Hoofdstuk 5

Resultaten

Nadat het fysische model is voorzien van de juiste parameters en opties beschreven in voorgaande hoofdstukken kunnen er resultaten worden geproduceerd en wijzigingen worden getest.

5.1 Aanvangsmodel

Na verloop van de *flowchart* in figuur 4.8 berekend het aanvangsmodel een stijgsnelheid W [$\frac{m}{s}$] in de juiste ordegrootte. Het gegenereerde overzicht is te zien in afbeelding 5.1. Grafieken A tot en met F in figuur 5.1 geven het volgende aan:

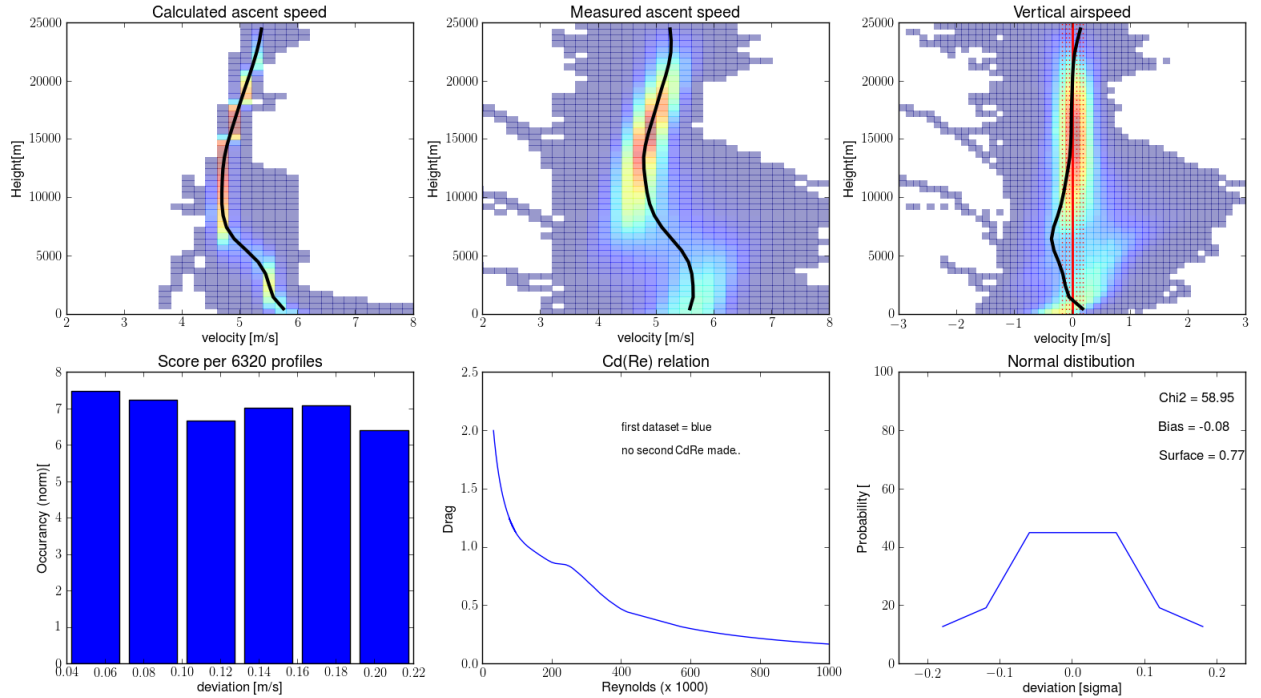


FIGUUR 5.1: Voorbeeld van resultaten na standaard input met de volledige dataset.

- A Berekende stijgsnelheid v_{model} waarbij de zwarte lijn het gemiddelde van alle profielen weergeeft. De achtergrond is representatief voor de datadichtheid: hoe roder de kleur hoe hoger de dataconcentratie is dit punt.
- B Gemeten stijgsnelheid v_{meting} . Ook hier is de zwarte lijn het gemiddelde van van alle profielen en geeft de achtergrond de datadichtheid aan. Er is hier een opvallend grote spreiding waar te nemen.
- C Resultaat van B - A geeft windsnelheid w . Eveneens is de zwarte lijn het gemiddelde en de achtergrond de datadichtheid. Verder zijn er drie rode lijnen te zien: de horizontale lijnen geven de zone aan waar de score op toe wordt gepast (ROI)¹, de verticale lijn is de verwachtingswaarde.
- D De deviatieplot: Hierin staat hoeveel profielen welke afwijking hebben ten opzichte van de verwachtingswaarde. Deze staafdiagram is opgesteld aan de hand van het gemiddelde van de verticale windsnelheid binnen de ROI.
- E Tweemaal een $C_d(Re)$ relatie, de blauwe lijn is gebruikt voor het berekenen van de verticale snelheid voor de eerste set, deze relatie is empirisch bepaald door voorgaande stagiair [3]. Hiermee is vervolgens de rode lijn gemaakt waar de tweede dataset de drag coëfficiënt mee berekend. Deze lijnen liggen vaak dicht bij elkaar, tenzij de beide datasets onwillekeurig is verdeeld. Bijvoorbeeld als de eerste set alleen winterdagen bevat en de tweede set alleen zomerdagen.
- F De Gauss verdeling: voor dit specifieke voorbeeld is af te lezen dat 60% van de waarden in de gemiddeldereeks in de ROI binnen 2σ ligt. Tevens is hier de modelscore χ^2 en de bias offset af te lezen. De waarde for *surface* geeft aan hoeveel van de berekende gemiddelde binnen 6σ vallen. In het voorbeeld is dit 1, wat overeenkomt met 100% van de gevallen.

Om het model te beoordelen zegt χ^2 in één oogopslag het meest: de waarde van 10,51. Hoe dichter dit getal bij 1 ligt, hoe beter de score. Deze specifieke score geeft een middelmatige prestatie aan: er zijn situaties waar de score onder de vijf ligt, waar minder presterende modellen vaak in de tien- of honderdtallen presteren. Er is een afwijking van $-0,08 \frac{m}{s}$, iets meer dan 1σ , wat duidt op een statische afwijking in v_{model} . De Gauss verdeling is niet normaal verdeeld, wat duidt op een willekeurige verdeling. Wel bevinden alle gemiddelden zich binnen 6σ (*Surface* = 1). De deviatieplot laat het genormaliseerde resultaat per profiel zien, slechts 6% van van het totaal ligt dicht bij de verwachtingswaarde. Per uniek profiel blijkt er dus een redelijke afwijking te zijn ten opzichte van μ , maar alles bij elkaar opgeteld geeft echter een correct gemiddelde. Om een impressie van de getallen te krijgen kan dezelfde dataset in figuur 5.2 met een andere ROI worden gescoord, deze is hier bepaald over de volledige 25 kilometer. In dit geval zijn de bias offset en Gauss distributie bijna gelijk. De modelscore χ^2 van enkele tientallen geeft echter aan dat er wel degelijk een flinke afwijking tussen berekening en verwachtingswaarde bestaat. De combinatie van vier verschillende scoringsmethoden vullen elkaar hier goed aan.

¹Bekend als region of interest, in het voorbeeld is dit de regio tussen 17,5 en 22,5 kilometer



FIGUUR 5.2: Voorbeeld van de volledige dataset met score over hele bereik.

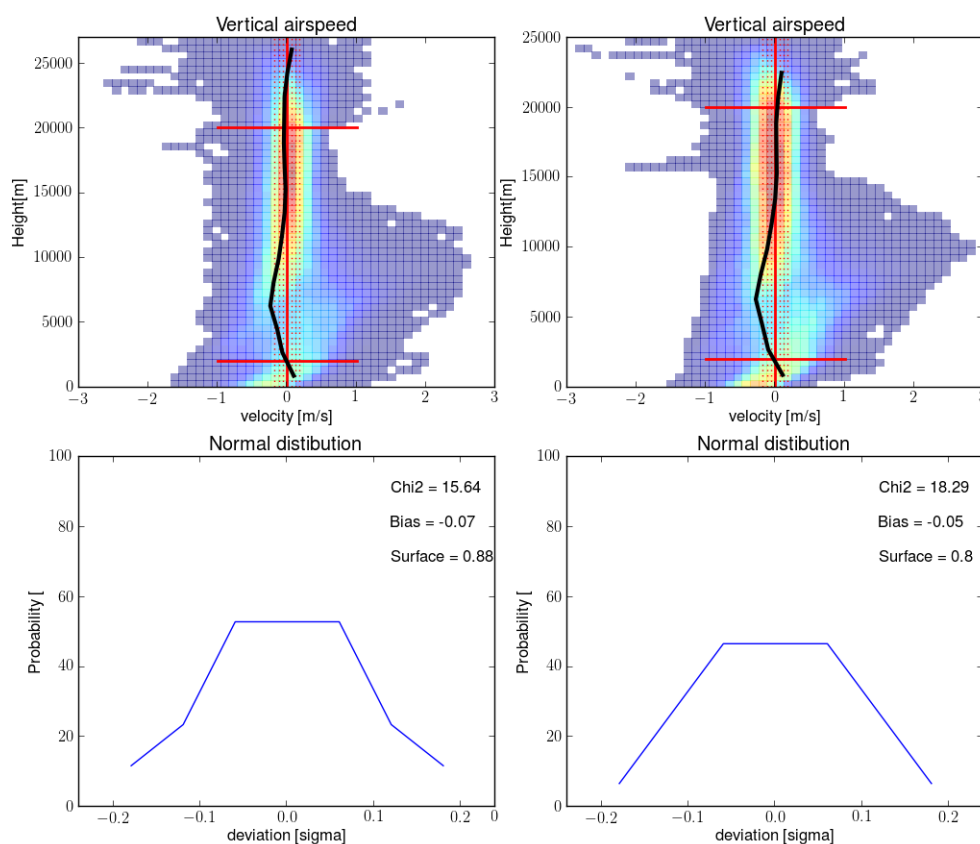
5.2 Data selectie

Door de aanwezigheid van grote hoeveelheid data kan met behulp van voorkeursselectie ongunstige profielen worden uitgesloten. Van alle selectiemethoden beschreven in sectie 4.1 zijn er twee die een reproduceerbaar positief effect op de score hebben: dag/nacht selectie en een $P_0 > 1030$ [hPa] eis.

Wanneer er alleen nachtprofielen worden berekend geeft dit een betere modelscore: dit is echter naar verwachting. Het model werkt door thermische diffusie in de ballon te simuleren aan de hand van meetgegevens van een radiosonde². In dit model wordt geen rekening gehouden met instraling en opwarming door zonlicht, na de tropopauze hangt de ballon overdag in de volle zon. Het effect van deze instraling is terug te zien wanneer dag en nacht wordt gesplitst. Figuur 5.3 toont het verschil tussen dag (links) en nacht (rechts) oplatingen. De score is over bijna het gehele verticale profiel. Wanneer deze naar ROI tussen 15km en 20km nadert neemt de score van beide varianten toe, maar de nacht oplating blijft altijd een iets hogere score houden. Uit de deviatieplot (niet getoond) blijkt dat slechts 9% van de profielen dicht bij de verwachtingswaarde liggen, per profiel is er moeilijk onderscheid te maken tussen dag en nacht oplatingen.

Een tweede selectie die positief uitpakt is het selecteren van oplating waarbij er een hoge gronddruk is van meer dan 1030 hPa. In hoge druk gebieden wordt er aangenomen [28] dat de atmosfeer stabiel is wat ervoor zorgt dat er minder extreme verticale transport is in de atmosfeer. Theoretisch zou er in deze gevallen een reproduceerbaar hogere score toegeschreven moeten worden aan profielen die deze startdruk eis halen. Van de totale dataset is dit 4%.

²De sonde hangt ongeveer 25 meter onder ballon, dit wordt gedaan om geen invloed van de ballon te hebben op de gemeten waarde (schaduw, luchtdruk verandering als gevolg van verplaatsing van de ballon)

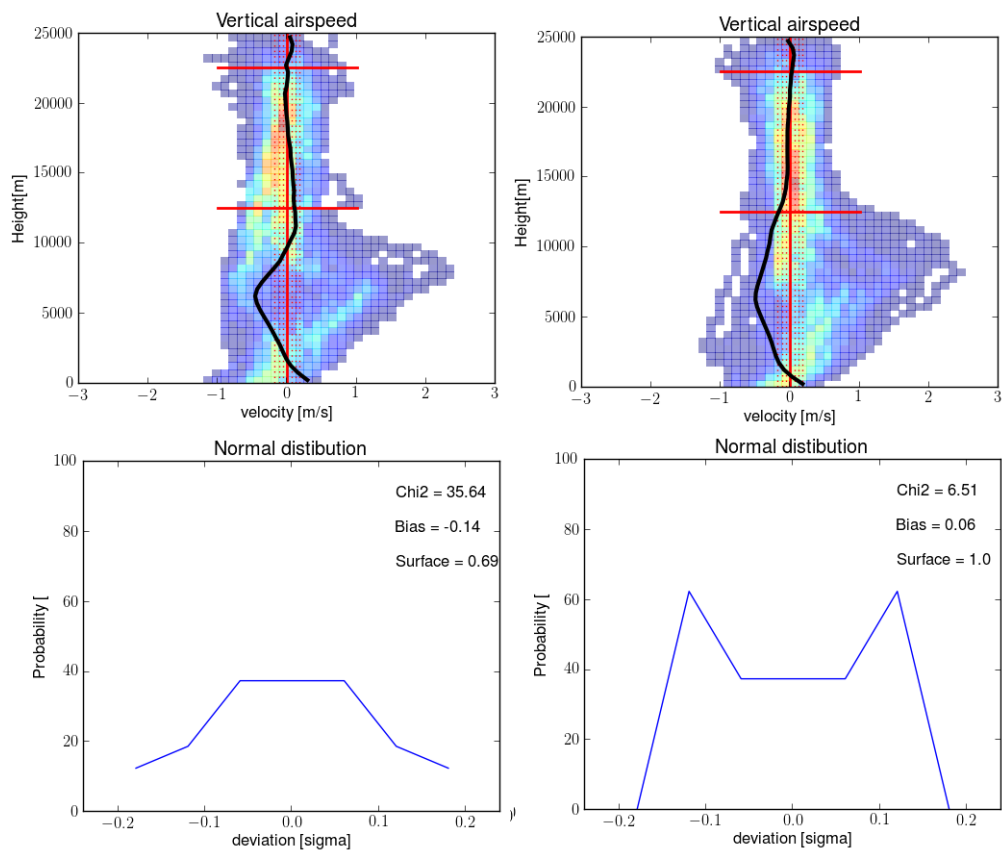


FIGUUR 5.3: Alle dag profielen (links) en alle nacht profielen (rechts) van de volledige dataset vergeleken.

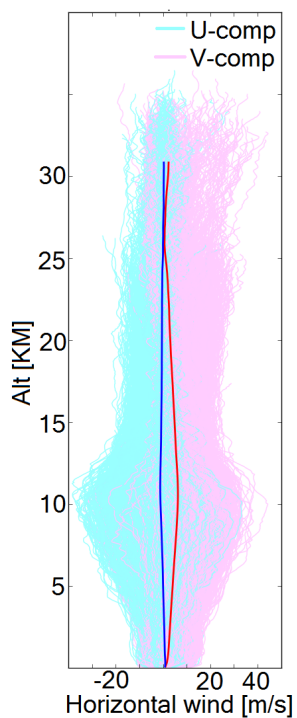
In figuur 5.4 is te zien hoe de prestatie van het model in lage druk gebieden (links) en hoge druk gebieden (rechts) zijn. Naast stabiliteit in de atmosfeer kunnen ook andere, hoge druk gebied gerelateerde, zaken de prestatie beïnvloeden. In deze gevallen is er vaak ook minder horizontale wind, een andere tropopauze locatie en minder wolken. De deviatieplot (niet getoond) geeft wederom per profiel een minder goede score aan: 11% van de profielen ligt dicht bij de verwachting.

5.3 Fysische verbanden

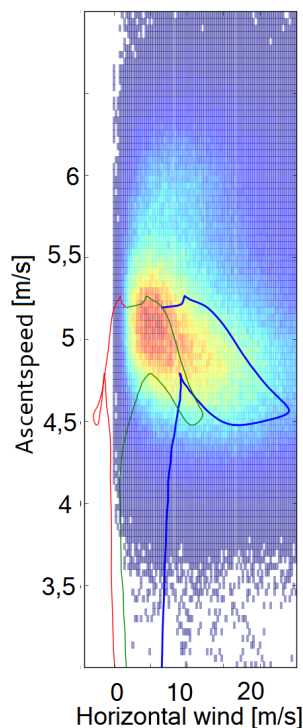
De berekende afgeleide stijgsnelheid W heeft een aantal nog niet verklaarbare eigenschappen: onder de tropopauze is er een negatieve gradiënt in w te zien, na de tropopauze is er een duidelijke en terugkerende positieve gradiënt δw . Dit lijkt sterk overeen te komen met de horizontale wind. Figuur 5.5 toont het profiel van horizontale wind in u - en v component, voor deze berekening is gebruik gemaakt van de horizontale windsnelheid z en -hoek θ_z . Hierbij is $v \left[\frac{m}{s} \right] = z \cos \left(\frac{\pi \theta_z}{180} \right)$ en $u \left[\frac{m}{s} \right] = z \sin \left(\frac{\pi \theta_z}{180} \right)$. In de figuur is een soortgelijke gradiënt $\delta u, v$ te zien als in de verticale windsnelheid δw . Mogelijk bestaat er een relatie tussen de horizontale en verticale gradiënt.



FIGUUR 5.4: Lage druk gebied (links) en hoge druk gebied (rechts) oplatingen vergeleken. Selectie op alle profielen met $P_0 < 1000$ of $P_0 > 1300$ hPa als grenzen.



FIGUUR 5.5: Meerdere windcomponent profielen tegen hoogte uitgezet.



FIGUUR 5.6: Stijgsnelheid en horizontale wind rond de tropopauze.
(blauw) z, v , (groen) v, v en (rood) u, v .

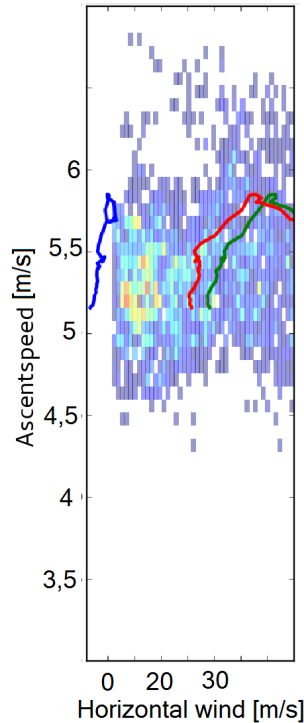
Om dit te testen zijn v_{meting} en u, v tegen elkaar uitgezet in de regio $5km < hoogte < 15km$. Wanneer er een verband blijkt te bestaan tussen deze parameters zou dit een goede verklaring kunnen geven voor het gedrag van het model rond de tropopauze. De relatie tussen beide gradiënten kan dan in het model worden geïmplementeerd. Figuur 5.6 toont het verband tussen (blauw) z, v , (groen) v, v en (rood) u, v . De intensiteit van de achtergrond geeft de datadichtheid aan.

Uit figuur 5.6 is het moeilijk vast te stellen of er een verband is. De u component is nauwelijks aanwezig en voor de v component en gecombineerde wind z is het verband een wiskundig uitdagende relatie. Een poging om alleen profielen met harde horizontale wind te vergelijken met v_{meting} levert figuur 5.7 op. Hoewel de wiskundige beschrijving enige lineariteit bevat is een vereiste dat deze alleen geldig is bij hoge data dichtheid³, en dat is hier niet het geval. Hieruit kan geconcludeerd worden dat er geen duidelijk verband is tussen de stijgsnelheid en de gemeten horizontale wind.

Een andere fysische relatie die onderzocht is, is de functionele toevoeging van een eerder geïmplementeerde heliummassa afschattingsmethode. Omdat de vulprocedure van de heliumballon onnauwkeurig is⁴ kan het variëren van de toegevoegde helium massa mogelijk een spreiding in de theoretische snelheid v_{meting} veroorzaken. Er zijn drie methoden bekeken:

³De lijnen geven een gemiddelde aan, als deze sterk beïnvloed is door een aantal extreme uitschieters ligt deze buiten de bulk van de data.

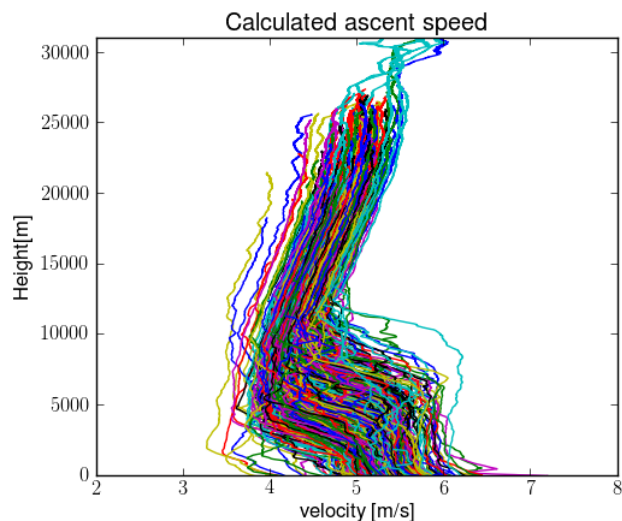
⁴De helium toevoer wordt gestopt wanneer de ballon een massa omhoog trekt.



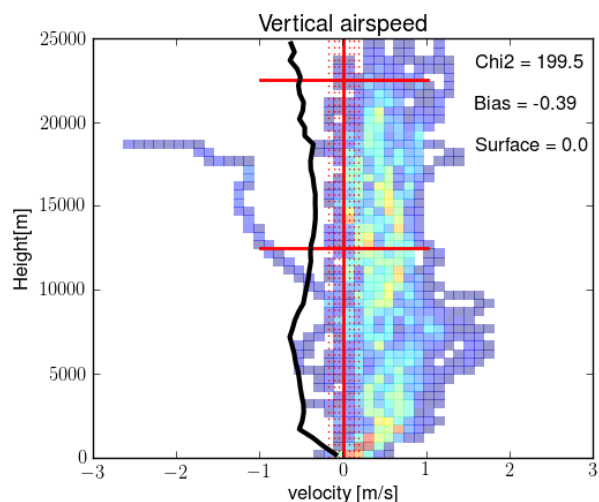
FIGUUR 5.7: Verticale stijgnelheid en extreme horizontale wind rond de tropopauze. (groen) z, v , (rood) v, v en (blauw) u, v waarbij selectie is toegepast op een gemiddelde horizontale windsnelheid van minimaal 10 meter per seconde in de regio tussen 5 en 10 kilometer

- Afschatting door middel van het berekenen van w over een gegeven interval en deze gelijk te stellen aan nul. Dit gelijkstellen gebeurt door de vrije lift te veranderen. Wanneer er binnen het interval een te hoge verticale windsnelheid wordt berekend, wordt de vrije lift naar beneden bijgesteld. Hierna wordt de berekening opnieuw uitgevoerd en wederom de lift bijgesteld, tot deze nog maar minimaal verschilt. Het resultaat is een grotere spreiding van v_{model} in de berekende profielen. Deze spreiding is te zien in 5.8. Het resultaat van deze toepassing is dat de berekende verticale windsnelheid binnen het interval dicht bij nul ligt. Wanneer er over hetzelfde interval ook een modelscore wordt berekend zal dit dus altijd een hoge score opleveren. Door $ROI_{inschatting}$ in de onderste regio te kiezen en ROI_{score} in een hoge regio te kiezen zou de heliumcorrectie mogelijk van positieve invloed zijn. De gemiddelde verticale wind en score uit figuur 5.9 tonen echter een heel ander beeld. Wanneer de ROI's dicht bij elkaar liggen levert dit figuur 5.10. Dit is weliswaar een redelijke modelscore maar de lift is nu dermate gecorrigeerd dat er een spreiding in F_{lift} van 200% is ontstaan, veel groter dan de mogelijke fout tijdens het vullen kan zijn⁵. Om deze reden is er aangenomen dat de methode niet met de realiteit overeenkomt.
- Een lineaire functie $F_{lift}(P_0)$ gebruiken om de vrije lift te veranderen aan de hand van de initiële gronddruk. Wanneer er een ballon wordt gevuld bij hoge gronddruk is er meer helium nodig om dezelfde hoeveelheid lift te genereren. Door in dit geval de liftkracht te vergroten wordt het model geforceerd hier een correctie op te maken. Door uit te

⁵Bij slecht weer wordt er soms meer helium in de ballon gedaan zodat deze iets sneller stijgt. Navraag levert echter op dat dit ongeveer 10% is



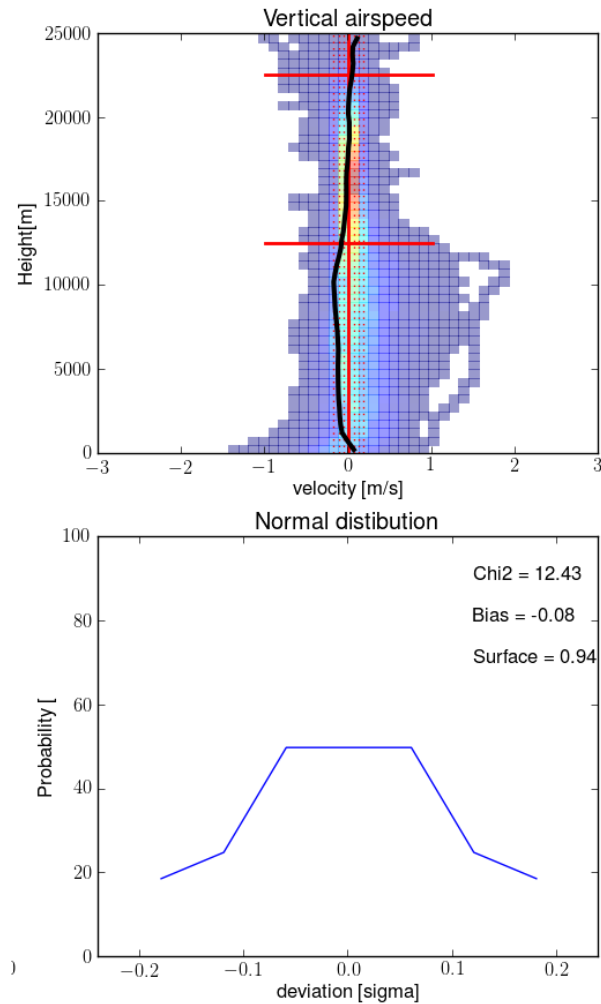
FIGUUR 5.8: Gevolg van het toepassen van lift inschatting op v_{model} ten opzichte van de hoogte.



FIGUUR 5.9: Resultaat van lift inschatting tussen 1 en 2 kilometer en score tussen 15 en 20 kilometer op 150 willekeurige profielen zonder dataselectie eisen.

gaan van een maximaal verschil van 15% meer of minder lift is de relatie $F_{lift}[N] = 0,0917 \cdot P_0[Pa] - 81,58$ ontstaan. Door eerst de gronddruk te bekijken, hier de lift op aan te passen en dan de modeluitkomst te berekenen resulteert dit in figuur 5.11. Het geeft een slechtere modelscore dan wanneer er een vaste lift waarde wordt gebruikt, en ook de (niet afgebeelde) deviatieplot geeft aan dat de individuele profielen afwijken.

- Zoeken naar een relatie tussen breekhoogte (h_{burst}) en initiële straal (r_i) kan mogelijk tot nieuw inzicht leiden. Wanneer blijkt dat er een verband bestaat tussen deze gegevens kan hieruit een lift correctie worden berekend. Een mogelijke redenatie is dat een kleine r_i hoger komt omdat de maximale rek op de latex wand op een later punt in tijd wordt

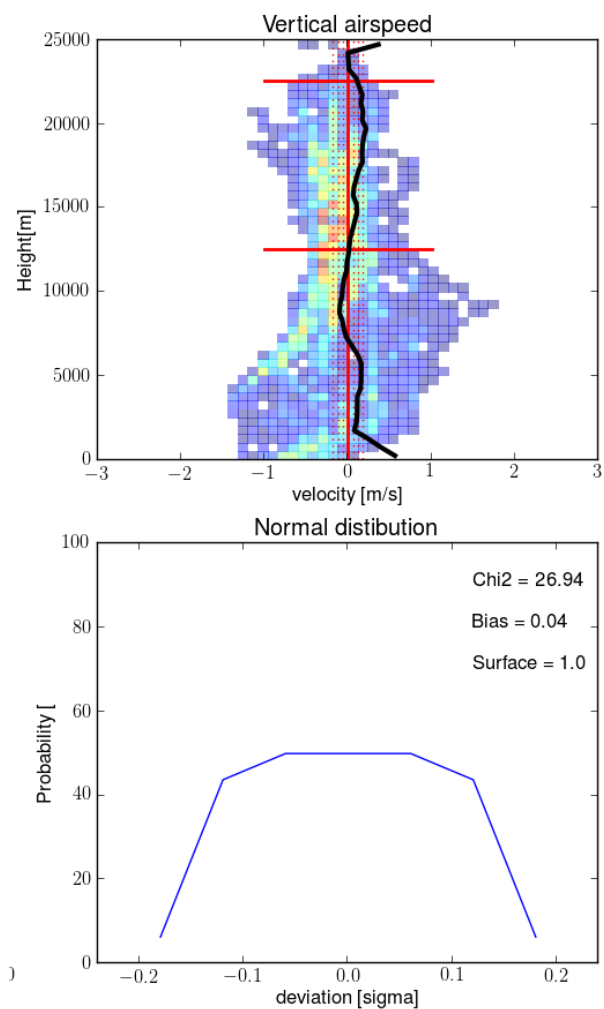


FIGUUR 5.10: Resultaat van lift inschatting tussen 15 en 18 kilometer en score tussen 15 en 20 kilometer op de volledige hoge resolutie dataset.

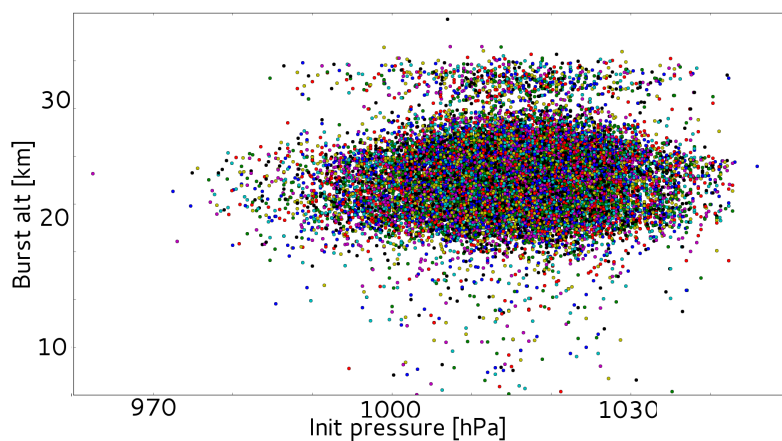
bereikt. De *scatterplot* in figuur 5.12⁶ laat zien dat er geen correlatie tussen beide bestaat.

Een derde onderzoek betreft het zoeken van een verband tussen een gemeten grootheden en de initiële acceleratie van de ballon. In de onderste laag tot ongeveer 1500m hebben stijgsnelheidsprofielen sterk de neiging te versnellen of te vertragen. De gradiënt δv_{model} is in dit gebied vaak extremer dan in de rest van de klim. Als er een fysisch verband bestaat tussen deze δv_{model} en een gemeten grootheid zou het model in de onderste laag beter kunnen gaan presteren. Een voorbeeld van deze initiële acceleratie is te zien in figuur 5.13. Wanneer de gemeten en berekende grootheden druk, temperatuur, dauwpunt, verplaatsing en relatieve vochtigheid tegen de hoogte worden uitgezet levert dit figuur 5.14. Hierin zijn extreme positieve δv_{model} profielen groen gekleurd, en extreem negatieve δv_{model} profielen rood. De verplaatsing is uitgerekend aan

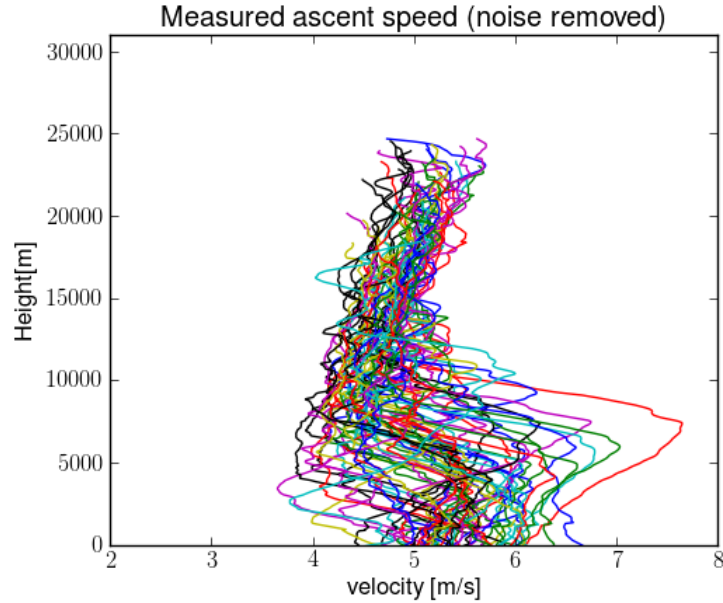
⁶De verticale scheiding geeft aan dat er twee type ballonnen zijn gebruikt: normale radiosonde ($h_{burst} \approx 25km$) en ozon radiosondes welke extra metingen verrichten in de hoger gelegen ozonlaag ($h_{burst} \approx 31km$)



FIGUUR 5.11: Resultaat van geparameteriseerde liftinschatting op 150 willekeurig gekozen profielen zonder selectie eisen.



FIGUUR 5.12: Scatterplot met initiële gronddruk tegen breekhoogte uitgezet voor de complete dataset.



FIGUUR 5.13: Opvallende initiële acceleratie in onderste deel van stijgprofiel, elke lijn is één van de 150 willekeurig gekozen profiel.

de hand van de *Haversine* formule in 5.1 en de GPS coördinaten.

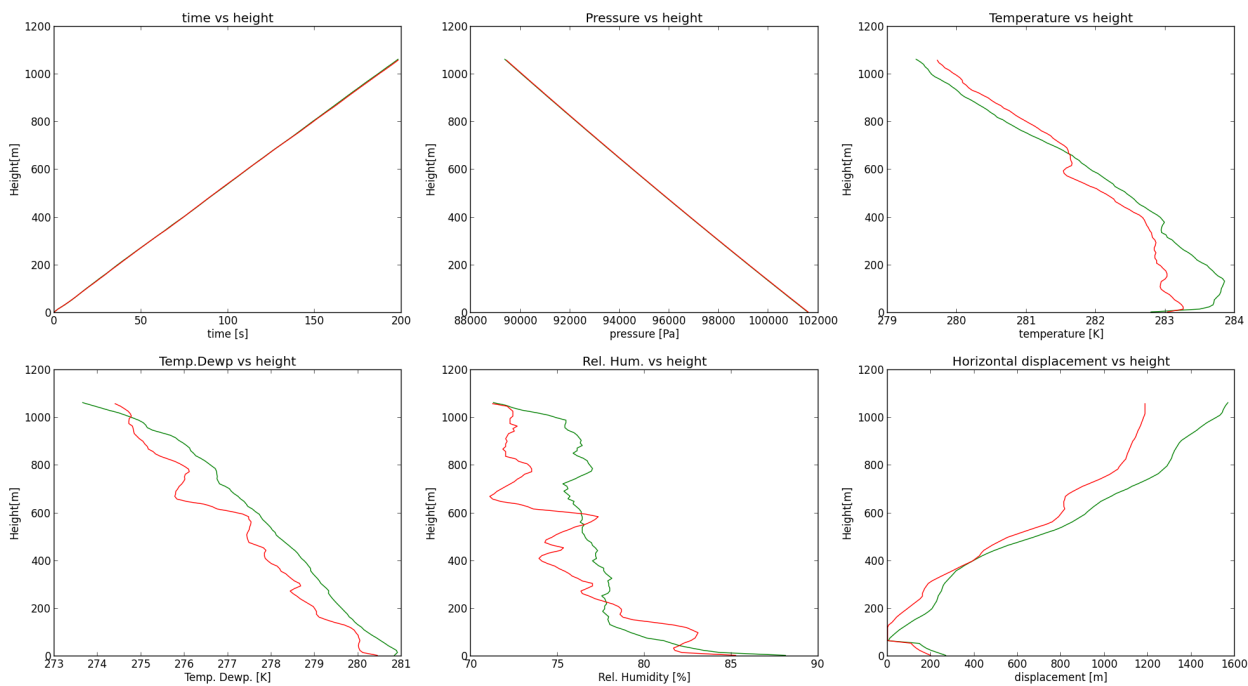
$$X_{\text{horizontaal}} = 2r_{\text{aarde}} \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_{i=2} - \phi_{i=1}}{2} \right) + \cos(\phi_{i=1}) \cos(\phi_{i=2}) \sin^2 \left(\frac{\lambda_{i=2} - \lambda_{i=1}}{2} \right)} \right) \quad (5.1)$$

Waarbij ϕ de lengtegraad en λ de breedtegraad vertegenwoordigd. Uit figuur 5.14 is er geen duidelijk en reproduceerbaar verschil tussen de positieve en negatieve versnelling te zien. Hiermee kan verondersteld worden dat er geen verband bestaat tussen de gradiënt in de eerste kilometer en de gemeten grootheden.

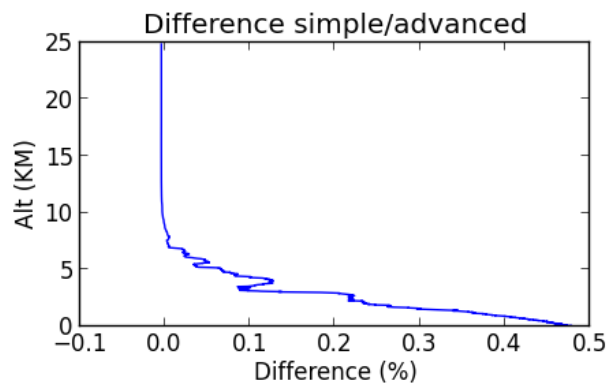
5.4 Vocht implementatie

Als modelverbetering is geëxperimenteerd met het toevoegen van de gemeten relatieve vochtigheid. Deze parameter is tot dusver onbenut. Zoals in sectie 3.4.1 te zien is, kan de dichtheid van lucht ρ_{lucht} en de viscositeit η herberekend worden naar een variant waarbij rekening met vocht wordt gehouden. Voor ρ_{lucht} wordt een grafiek gemaakt waarbij het procentuele verschil tussen droge lucht en vochtige lucht ($\rho_{\text{droog}} - \rho_{\text{vochtig}}$) tegen de hoogte wordt uitgezet. Dit is te zien in figuur 5.15. Er wordt een maximale afwijking van 0,5% berekend, en dit is bij een luchtvochtigheid van 100%. Deze fractie heeft een verwaarloosbare invloed op de uiteindelijke berekening van v_{model} en geen invloed op de modelscore. Er is gekozen om de berekening van de dichtheid van lucht niet aan te passen.

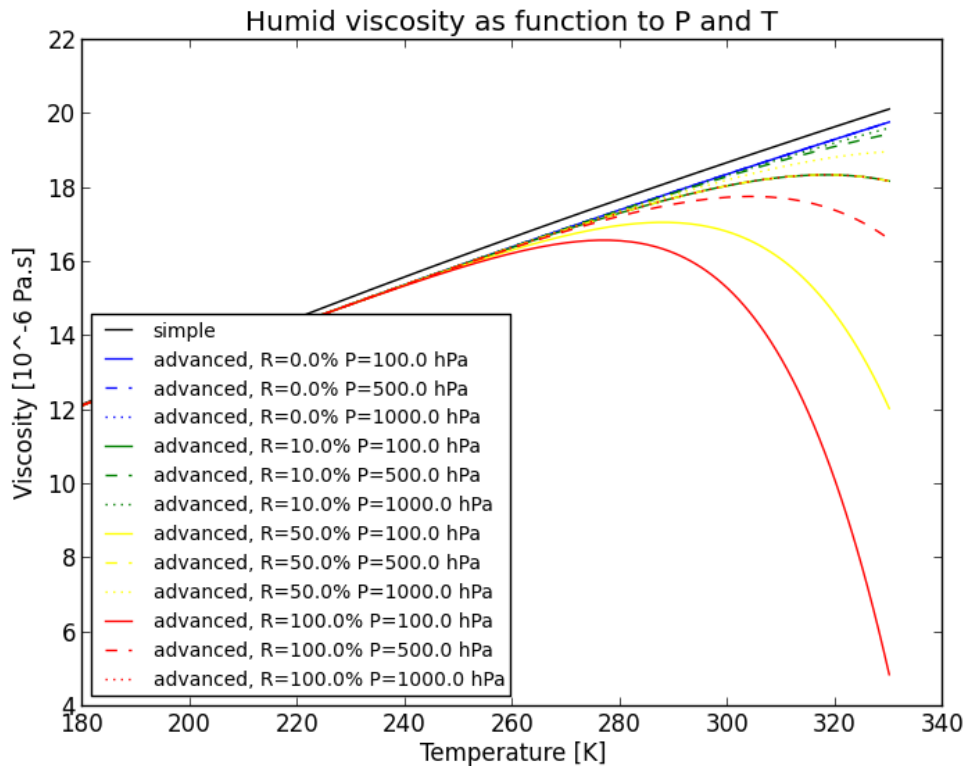
De tweede parameter, de viscositeit, heeft theoretisch een groter verschil wanneer relatieve luchtvochtigheid mee wordt berekend. Figuur 5.16 geeft de fysische relatie aan tussen viscositeit, relatieve luchtvochtigheid, druk en temperatuur. Hieruit is op te maken dat er 80% verschil in de



FIGUUR 5.14: Gemiddelde van profielen welke een initiële absolute acceleratie groter dan 1 meter per seconde hebben. Hierbij zijn de gemeten grootheden uitgezet tegen positieve δv_{model} (groen) en negatieve δv_{model} (rood).



FIGUUR 5.15: Verschil tussen dichtheid van vochtige en droge lucht.



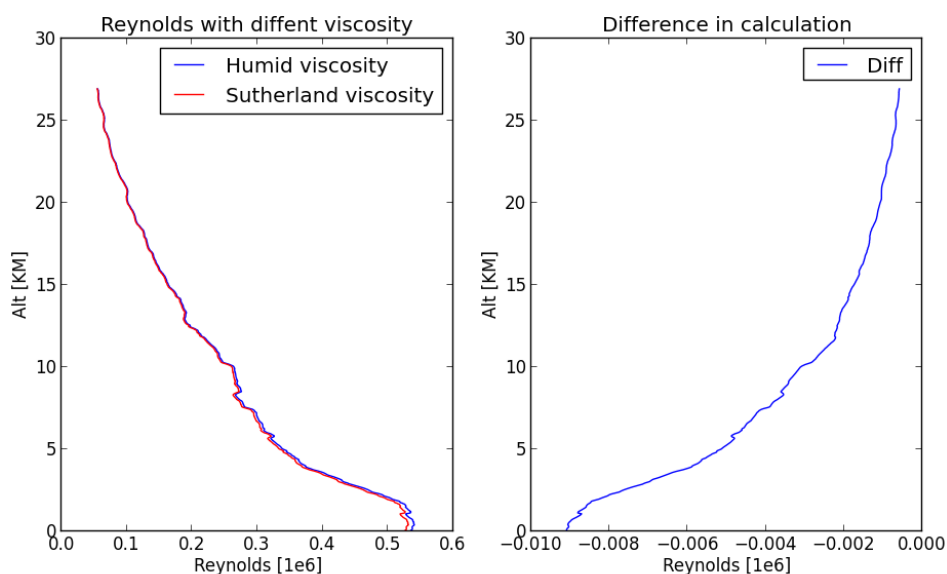
FIGUUR 5.16: Relatie tussen viscositeit, druk, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid.

viscositeit kan optreden, welke weer gevolgen voor de grootte van Reynolds heeft. Wanneer de theorie op de praktische meting wordt toegepast levert dit figuur 5.17 op. Het maximale verschil van Reynolds is in de praktijk $0,01 \cdot 10^5$, dit komt overeen met maximaal 2%. Het verschil is niet genoeg om invloed op de uiteindelijke v_{model} uit te oefenen en daarom wordt er verder niet gerekend met deze variant van viscositeit. 5.17

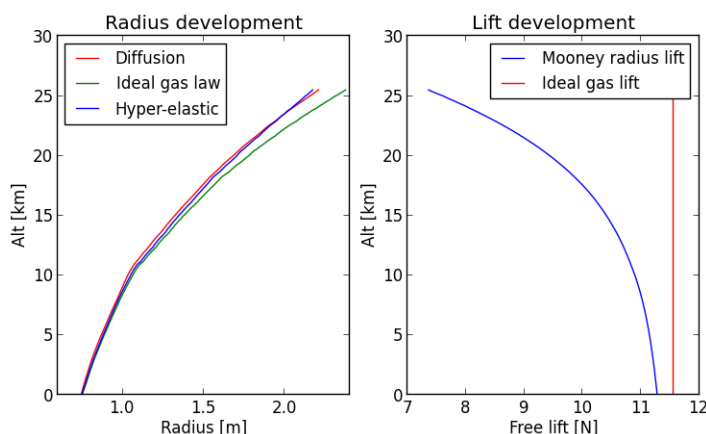
5.5 Hyperelastisch model

Ter vervanging van het thermisch diffusie model is het Python model⁷ omgeschreven naar het hyperelastische model besproken in sectie 3.4.2. De elastische variant wordt op dezelfde manier getoetst als de diffusie versie, hierdoor kunnen beide modellen met elkaar vergeleken worden. Ook kan er met dezelfde dataset worden gerekend. De straalontwikkeling kan op drie verschillende manieren berekend worden: adiabatisch, elastisch en thermisch diffuus. Een vergelijking tussen deze drie methoden is weergegeven in afbeelding 5.18 links. Het is opvallend dat de elastische straal en de diffusie straal nagenoeg zelfde ontwikkeling meemaken. In sectie 4.3 is tevens een suggestie geopperd om de liftkracht F_{lift} bij te stellen als gevolg van de straalvermindering. Deze liftvermindering is in figuur 5.18 rechts weergegeven. Een ander product dat uit te rekenen is, is de herstellende kracht δP . Deze neemt toe met de rekratio $\frac{r_0}{r}$. Deze relatie kan in de toekomst zelf

⁷Een Fortran implementatie bleek niet nodig aangezien het elastisch model 30 maal sneller te berekenen is dan het diffusie model



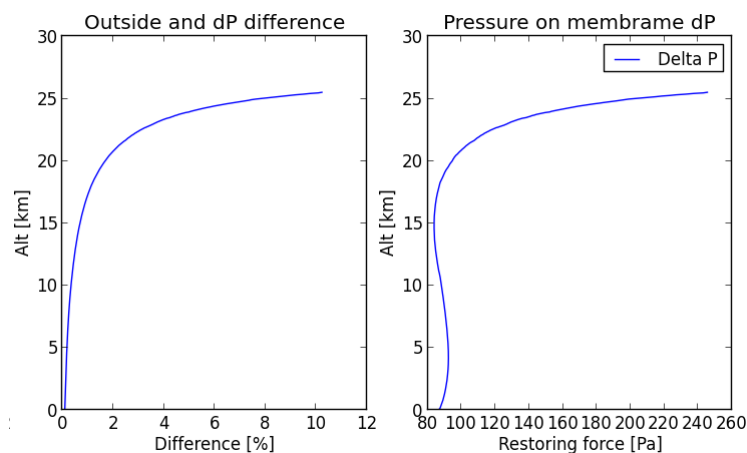
FIGUUR 5.17: (Links) $Re_{\text{drogelucht}}$ en $Re_{\text{vochtigelucht}}$, (rechts) het verschil tussen beide



FIGUUR 5.18: Straalontwikkeling volgens drie modellen (links), vermindering van lift als gevolg van kleinere straal (rechts).

geparameteriseerd worden, hiermee neemt het aantal vrijheidsgraden van het model en daarmee de complexiteit van de berekening af. Voor dit onderzoek is deze relatie niet nodig. In figuur 5.19 is de binnenwaartse druk (rechts) te zien, en de verhouding tussen buitendruk en binnenwaartse druk $\frac{\delta P}{P_{\text{uit}}}$ [%] (links). Op 25km hoogte is de buitendruk slechts 2KPa: het drukverschil is hier niet meer verwaarloosbaar zoals in het diffusie model is geopperd [5].

Wanneer het hyperelastische en thermische diffuse model met elkaar vergeleken worden levert dit figuur 5.20 op. De score is hier gebaseerd op het profiel tussen 5 en 20 kilometer. Voor beide modellen zijn de meest optimale parameter instellingen gebruikt. Hierbij vallen een paar zaken op:



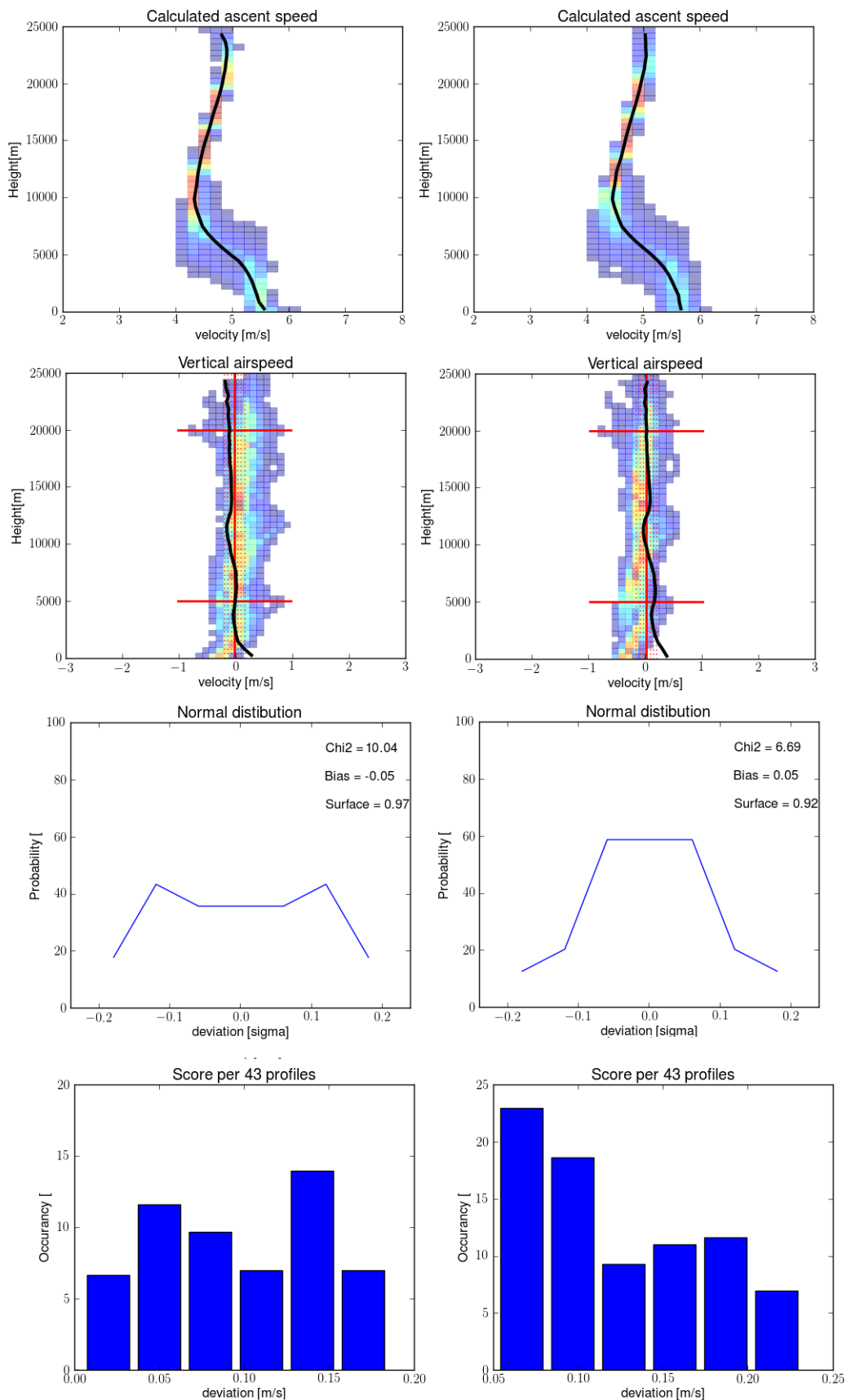
FIGUUR 5.19: Binnenwaartse druk ten opzichte van hoogte (rechts), verhouding buitendruk en binnenwaartse druk (links).

- Beide modellen tonen een afwijking aan de start, dit is onafhankelijk van de gekozen dataset.
- De modelscore χ^2 voor het gemiddelde van alle berekende oplating is reproduceerbaar beter bij het elastische model.
- De bias en Gauss verdeling zijn ongeveer gelijk. Wanneer er naar het gemiddelde wordt gekeken, en er genoeg profielen zijn berekend, zorgt dit ervoor dat de extreme verdwijnen.
- De afwijkingen rond de tropopauze is ook aanwezig in het elastisch model.
- De deviatieplot toont een veel grotere nauwkeurigheid per profiel bij het elastische model.

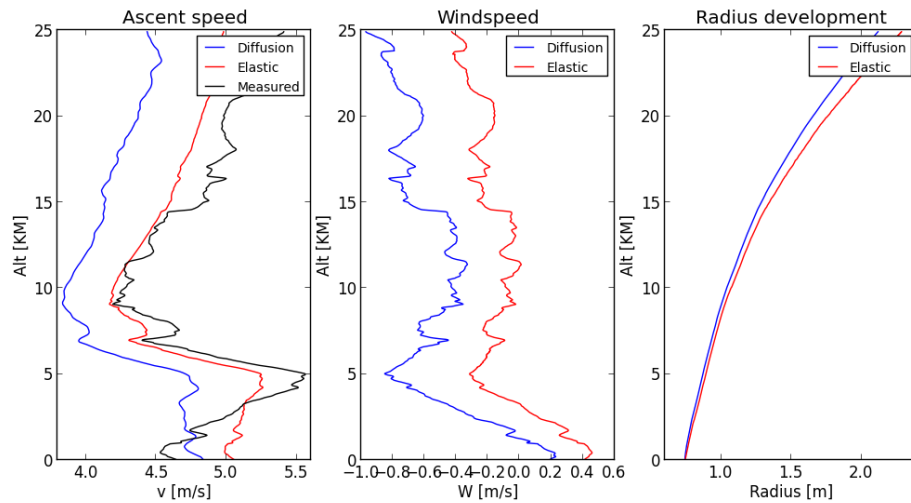
De modelscore kan extra verhoogt worden naar $\chi^2 = 1,45$ door uitschieters te verwijderen, selectie op grond druk toe te passen en de score ROI te verschuiven naar 15km - 20km. Dit heeft echter geen invloed op de deviatieplot, wat mogelijk betekend dat extremere gevallen ook goed worden berekend. Om dit te testen zijn er een aantal willekeurige losse profielen vergeleken. Figuren 5.21 tot en met 5.23 laten berekeningen aan drie willekeurige oplatingen zien. De figuren tonen de stijgsnelheid (links), verticale wind (midden) en straalontwikkeling (rechts). Uit de afbeeldingenreeks vallen wederom weer drie dingen op:

- De snelheidsprofielen hebben dezelfde vorm, maar in detail is te zien dat het elastische model sneller reageert op uitwijkingen die de meting ook heeft. Mogelijk is het vertragende effect van diffusie overschat.
- Beide modellen hebben een statistische fout welke overeenkomsten vertoont met de bias offset.
- Na ongeveer 10 kilometer *stabiliseren* beide modellen.

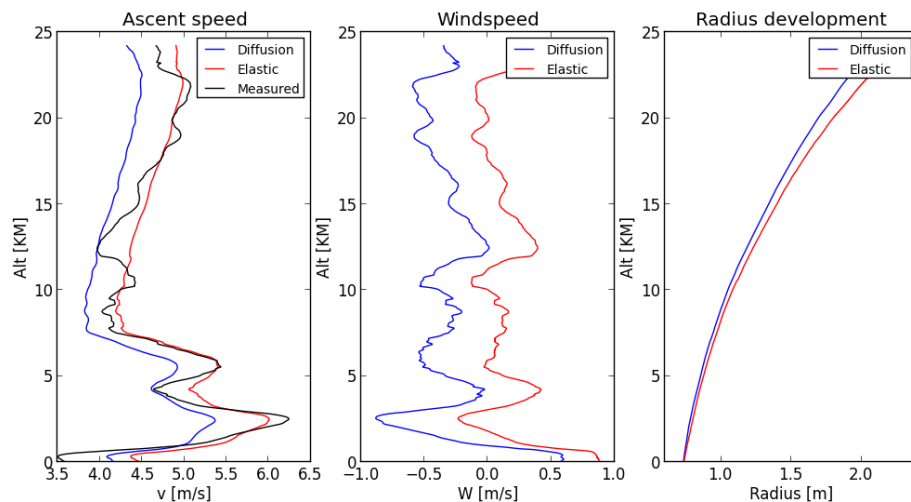
Door de uitkomst te kalibreren met de gemiddelde bias offset is er duidelijker verschil te zien tussen het elastische en diffusie model. Afbeelding 5.24 laat hier een voorbeeld van zien. In



FIGUUR 5.20: Diffusie model (links) vergeleken met elastisch model (rechts) toegepast op dezelfde dataset van 43 willekeurig gekozen profielen zonder verdere datasetselectie.



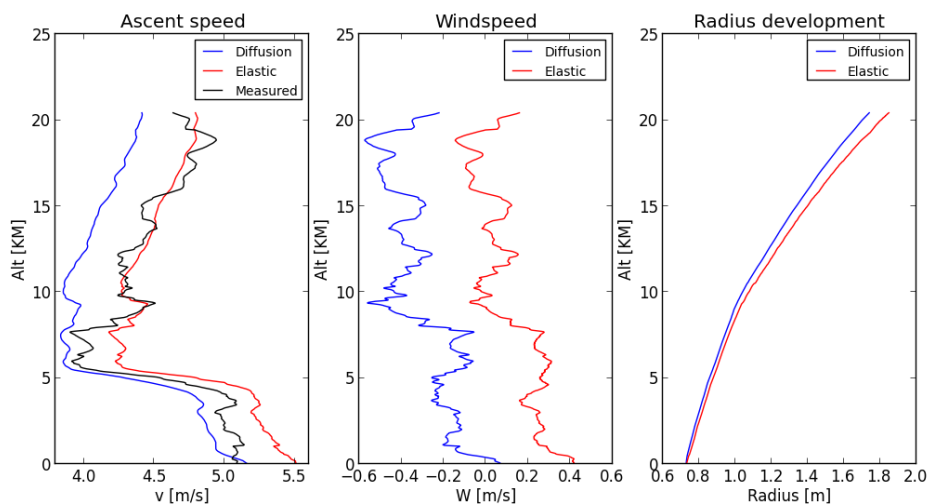
FIGUUR 5.21: Vergelijking tussen elastisch en diffusie model. Oplating: 2012-09-14



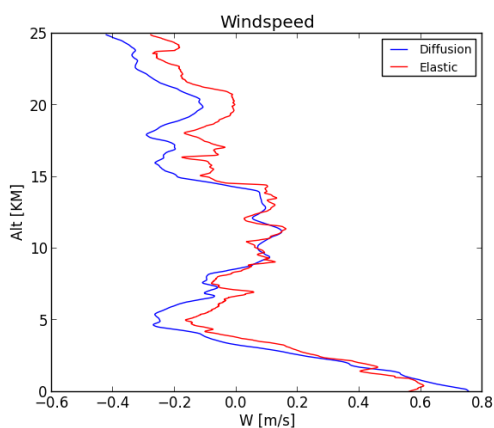
FIGUUR 5.22: Vergelijking tussen elastisch en diffusie model. Oplating: 2012-01-20

deze situatie is op de gemeten stijgsnelheid extra smoothing toegepast op elke 10 meetpunten: dit verduidelijkt de responsiviteit. Zowel de losse profielen, de modelscore als de deviatieplot tonen de potentie van een hyperelastisch model. Door middel van het bijstellen van α , de verhouding tussen Mooney-Rivlin materiaaleigenschappen $\frac{C_{01}}{C_{10}}$, is de elasticiteit bij te stellen. Uit experimenten met α op dezelfde kleine dataset (20 profielen) blijkt dat dit vooral effect heeft bij een grotere rekratio. Het variëren van α levert een correctie op de stijgsnelheid berekend door het model. Bij een instelling van $C_{01} = 10$ en $C_{10} = 11$ geeft dit de beste resultaten. De waarde 10/11 is overigens een veel gekozen verhouding voor rubberachtige materialen [29].

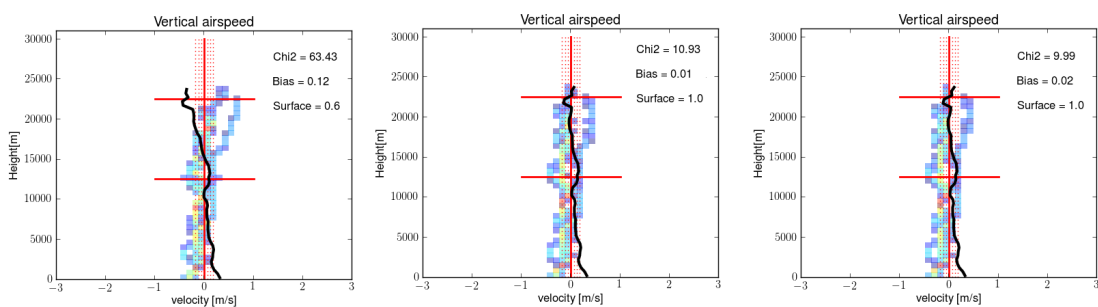
Ditzelfde experiment kan met de waarde van de shear modulus worden gedaan, μ_{latex} . Deze is door een vergelijking met een analytische functie geschat op 300KPa, maar is een variabele parameter van het elastische model. Afbeelding 5.26 toont drie instellingen van μ op een gelijke



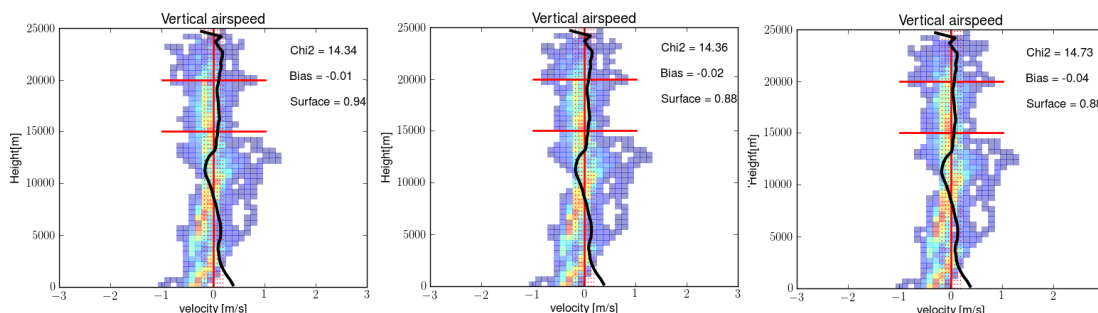
FIGUUR 5.23: Vergelijking tussen elastisch en diffusie model. Oplating: 2013-01-10



FIGUUR 5.24: Gekalibreerde uitkomst W van beide modellen.



FIGUUR 5.25: Vergelijking verschillende α instellingen: 5/11 (links), 8/11 (midden) 10/11 (rechts) op 40 willekeurige profielen.



FIGUUR 5.26: Vergelijking verschillende μ_{latex} instellingen: 200Kpa (links), 600Kpa (midden) 1000Kpa (rechts) op 40 willekeurige profielen.

kleine dataset van 40 profielen, de waarde van α is hier constant: $10/11$. Waar α de grootste term in de polynoom beïnvloed heeft het variëren van de shear modulus dit pas op de 5^e en 6^e term in de polynoom. Pas bij grotere extreme is er verschil duidelijk in de uitwerking van de variatie in shear moduli: hoe hoger de modulus, hoe minder snel de ballon stijgt. De toegenomen binnenwaartse kracht zorgt voor een grotere liftafname.

Hoofdstuk 6

Conclusie

Bij aanvang van de opdracht ontbrak er een goede manier om veranderingen aan het fysische model voor de stijgsnelheid van een radiosonde te interpreteren. Door de uitkomst van de berekening te voorzien van verschillende scoringmethoden is er snel te zien of een doorgevoerde verandering positief of negatief effect heeft. Er is gekozen voor een χ^2 toets met bias offset, een Gauss distributie en een deviatieplot. Door de informatie van de vier methoden te combineren is er een goed beeld van de prestatie van het model te scheppen.

Gedurende het verslag zijn er aan de hand van deze *modelscore* een aantal conclusies getrokken. Zo is uit experimenten gebleken dat het thermisch diffuus aanvangsmodel, tot dusver, onbekende en reproduceerbare fouten heeft in de berekening. Vooral rond de tropopauze is er een grote afwijking tussen de gemeten en berekende stijgsnelheid. Er is gepoogd de oorzaak hiervan, met behulp van fysische verbanden, te doorgronden maar deze zijn niet gevonden. Er is wel een relatie gevonden tussen verbeterde modeluitkomsten wanneer er alleen nacht oplatingen of oplatingen vanuit een hoge druk gebied worden berekend. Gezien de grenzen van het model en de stabiliteit van de atmosfeer is dit volgens verwachting. Hoewel deze verbetering reproduceerbaar is, is een verhoging in de modelscore slechts twee procent.

Het idee om de gemeten luchtvochtigheid in de calculatieroutine toe te voegen heeft niet tot een merkbare verbetering van de score. De omgezette formules maken een klein deel uit van het krachterevenwicht om de stijgsnelheid te berekenen. De verandering van een half procent in de tussen berekening is te klein om van invloed te zijn op de stijgsnelheid.

Als alternatief voor de op thermisch diffusie van het helium gebaseerde rekenmethode is er een hyperelastisch model opgesteld. Aan de hand van een Mooney Rivlin vergelijking kan de elastische rek kracht van het latex gesimuleerd worden ten opzichte van de rekverhouding. De onbekende parameters uit de elastische vergelijking zijn theoretisch benaderd, opgezocht in de literatuur en via fysische simulatie software gecontroleerd. Het hyperelastisch model heeft sterke overeenkomsten met het diffusie model en de uitkomsten liggen dicht bij elkaar. Vergeleken met de gemeten snelheid levert dit grofweg dezelfde windsnelheid op, maar heeft de elastische variant meer detail.

Beide methoden om de stijgsnelheid te berekenen berekenen na tien kilometer niet de snelheidsschommelingen die de radiosonde volgens de hoogte meting ondergaat. Deze snelheidsvariatie heeft een ordegrrootte van ± 10 centimeter per seconde. De theoretische modellen gebruiken de gemeten druk en temperatuur, welke nagenoeg stabiel zijn na deze grens. Dat de oorzaak van de gemeten versnelling de invloed van verticale wind W is, is niet met zekerheid te zeggen.

De producten van het ECMWF die gebruikt zijn om een verwachtingswaarde op te stellen hebben een grote afleesfout. De ω die met behulp van de afbeelding is bepaald is een waarde die de trend van twee maanden aangeeft. Wanneer twee maanden radiosonde data wordt berekend heeft deze ook een trend die gelijk is aan de verwachtingswaarde. Andere onderzoeken, theorieën of metingen naar verticale wind of luchtverplaatsing waar concrete getallen uitkomen is niet gevonden. Aan de hand van zulke data zou er geverifieerd kunnen worden of de berekende verticale windsnelheid realistisch is.

Hoofdstuk 7

Discussie

Tijdens het uitvoeren van de opdracht is de complexiteit van het onderzoek toegenomen. Bij elk gevonden antwoord blijken er weer meerdere nieuwe afhankelijkheden te ontstaan. Door gemaakte keuzes zoveel mogelijk te onderbouwen kan er verantwoordelijk met deze afhankelijkheden worden omgegaan: de verticale windgegevens zijn nu eenmaal in de data van de radiosonde aanwezig. Het vinden van de juiste combinaties blijkt echter moeilijk. Door nieuwe combinaties uit te proberen, is er weer een stap in de juiste richting gezet. Er kan nog niet vastgesteld worden of de berekende resultaten ook daadwerkelijk de windsnelheid voorstelt, hiervoor zou een vergelijking met andere (weer)modellen mogelijk een uitkomst bieden. Om deze reden kan er in een eventuele vervolgstudie onderzoek worden gedaan naar de volgende punten:

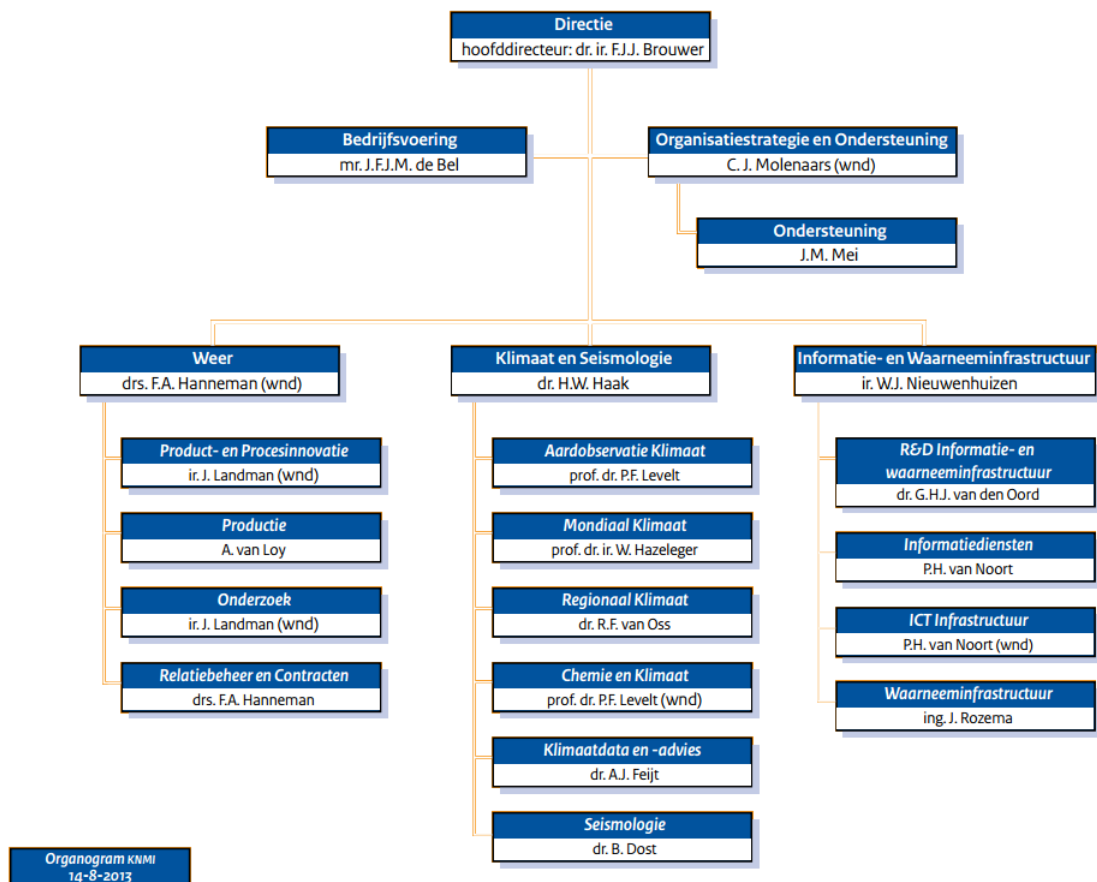
- De verwachting van de verticale windsnelheid baseren op een betere methode met hogere resolutie in plaats van een statisch cijfer met hoge onnauwkeurigheid. Een studie naar de mogelijkheden van bijvoorbeeld grondlidar en neerslagradar is hierbij nuttig.
- Het thermisch diffuus model combineren met het hyperelastische model zou twee fysisch bewezen aanwezige factoren samenvoegen zodat de uitzetting van de ballon correcter berekend kan worden.
- Een uitvoerig geteste relatie tussen binnenwaartse kracht in de ballon ten opzichte van de buiten luchtdruk parameteriseren om zo de rekenroutine te versimpelen en het aantal vrijheidsgraden te beperken.
- De specifieke materiaalconstanten die het elastische model bevat nader uitzoeken en de relatie hiervan met de omgevingstemperatuur.
- De verticale gradiënt uit de data van horizontale wind ten opzichte van hoogte (windshear) uitzetten tegen de gemeten en berekende verticale stijgsnelheid om een verklaring te vinden voor de gevonden afwijkingen
- Onderzoeken of uit kleinschalige variaties de diffusie parameter nauwkeuriger kan worden bepaald.

- Ballonoplatingen van Paramaribo gebruiken in het huidige model om te controleren of de verwachtingswaarde over langere tijd klopt met de ECMWF verwachting.

Bijlage A

KNMI Organogram

Bron: http://www.knmi.nl/over_het_knmi/orgaknmi2.pdf



FIGUUR A.1: Opbouw organisatie KNMI.

Bijlage B

Gebruikte grootheden en constanten

symbool	betekenis	waarde	eenheid
g	valversnelling	9,81	$\frac{m}{s^2}$
R_u	universele gasconstante	8,31	$\frac{J}{mol \cdot K}$
R_{lucht}	specifieke gasconstante van lucht	287,058	$\frac{J}{kg \cdot K}$
R_{helium}	specifieke gasconstante van helium	2077,0	$\frac{J}{kg \cdot K}$
M_a	molaire massa lucht	28,97	$\frac{g}{mol}$
M_{he}	molaire massa helium	4,003	$\frac{g}{mol}$
$C_{s,a}$	constante van Sutherland voor lucht	120	-
C_{01}	Mooney-Rivlin materiaaleigenschap	10,0	-
C_{10}	Mooney-Rivlin materiaaleigenschap	11,0	-
μ_{latex}	Shear modulus latex	$4,30e^5$	Pa
t_0	Wand dikte latex	$7,273e^{-5}$	m
ρ_{latex}	Dichtheid latex	$1,1e^3$	$\frac{kg}{m^3}$
m_{ballon}	Massa lege ballon	0,350	kg
m_{sonde}	Massa radio sonde	0,350	kg
r_{aarde}	Straal van de aarde	6371,0	km

TABEL B.1: Gebruikte constanten

Doel	Naam	Versie	OS
Programmeren	Python	2.7.3	Linux
Programmeren	Fortran90	gFortran 4.7.2	Linux
Tekstverwerking	Texmaker	4.0.2	Linux
Tekstverwerking	EMACS	24.2.1	Linux
Fysische simulatie	Comsol Multiphysics	4.3a	Windows

TABEL B.2: Meest gebruikte software

Bijlage C

Dataformat radiosonde

Symbol	Naam	Eenheid
Time	Gemeten tijd	<i>s</i>
Height	Hoogte (via GPS)	<i>m</i>
Temp	Gemeten temperatuur	<i>K</i>
RH	Relatieve luchtvochtigheid	%
Press	Gemeten druk	<i>Pa</i>
T_{dewp}	Berekende dauwpunttemperatuur	<i>K</i>
X_s	Horizontale windsnelheid	$\frac{m}{s}$
X_a	Horizontale verplaatsingsrichting	deg
<i>Lon</i>	Lengte GPS coördinaat	deg
<i>Lat</i>	Breedte GPS coördinaat	deg

TABEL C.1: Verklaring van symbolen in figuur C.1

time [s]	Height [m]	Temp [K]	RH [%]	Press [hPa]	T_dewp [K]	X_s [m/s]	X_a [deg]	Longitude
0	4	286,6	59	1015,6	278,7	5,57	336	5,18
2	16	285,7	54	1014,1	276,8	4,87	320	5,18
4	24	285,6	55	1013,2	276,8	4,88	319	5,18
6	32	285,4	57	1012,3	277,1	4,98	322	5,18
8	40	285,3	57	1011,2	277,0	4,96	323	5,18
10	51	285,1	57	1009,9	276,7	4,87	325	5,18
12	64	284,8	57	1008,4	276,7	4,86	327	5,18
14	76	284,6	58	1006,9	276,6	4,84	328	5,18
16	89	284,3	58	1005,3	276,4	4,79	329	5,18
18	104	284,1	59	1003,6	276,4	4,79	331	5,18
20	118	284,0	59	1001,9	276,4	4,80	332	5,18
22	131	283,8	60	1000,3	276,2	4,76	332	5,18
24	144	283,6	59	998,8	276,0	4,70	333	5,18
26	153	283,5	60	997,7	276,2	4,77	333	5,18
28	158	283,5	61	997,0	276,4	4,84	334	5,18
30	165	283,4	62	996,2	276,4	4,86	334	5,18

FIGUUR C.1: Voorbeeld van radiosonde data

Bijlage D

Dataformat calculatie

Symbol	Naam	Eenheid
Reynolds	Reynoldsgetal	–
V_m	Gemeten stijgsnelheid	$\frac{m}{s}$
r	Straal	m
C_d	Dragcoëfficiënt	–
V_c	Berekende stijgsnelheid	$\frac{m}{s}$
m_{he}	Helium massa	kg

TABEL D.1: Verklaring van symbolen in figuur D.1

Reynolds	V_m [m/s]	r [m]	C_d	V_c [m/s]	m_{he} [kg]
5,77E+11	5,79	0,73	0,32	5,42	0,29
5,75E+10	5,78	0,73	0,32	5,42	0,29
5,74E+11	5,77	0,73	0,32	5,41	0,29
5,73E+11	5,77	0,73	0,32	5,41	0,29
5,72E+10	5,76	0,73	0,32	5,41	0,29
5,71E+11	5,75	0,73	0,32	5,40	0,29
5,71E+11	5,75	0,73	0,32	5,40	0,29
5,70E+11	5,74	0,73	0,32	5,40	0,29
5,69E+11	5,74	0,73	0,32	5,40	0,29
5,68E+11	5,73	0,73	0,32	5,39	0,29
5,67E+11	5,72	0,73	0,32	5,39	0,29
5,67E+11	5,72	0,73	0,32	5,39	0,29
5,66E+11	5,71	0,73	0,32	5,39	0,29
5,65E+11	5,71	0,73	0,33	5,38	0,29
5,64E+11	5,70	0,73	0,33	5,38	0,29
5,64E+11	5,69	0,73	0,33	5,38	0,29

FIGUUR D.1: Voorbeeld van berekende data

Bijlage E

COMSOL model

Het gebruikte COMSOL model is een aangepast *library* bestand welke het opblazen van een ballon simuleert [25]. Deze bijlage bevat een kort verslag van de simulatie, voor details kan de referentie worden geraadpleegd.

Doel van de simulatie

De simulatie in COMSOL MULTIPHYSICS heeft als voornaamste doel om een ingeschatte waarde van μ_{latex} te controleren. Door gebruik te maken van de *solid mechanics* module zijn ingebouwde Mooney-Rivlin rekenroutines beschikbaar. Wanneer het elastisch model wordt vergeleken met een bekende analytische functie kan de variatie in uitkomst een realistische waarde voor μ_{latex} opleveren. Het gebruikte elastische model voor de stijgsnelheid van een ballon heeft twee onbekende waarden: de shear modulus μ_{latex} en de verhouding $\alpha = \frac{C_{01}}{C_{10}}$. Door één van de twee parameters realistisch in te schatten kan de andere als *tweak* parameter worden gebruikt. Wanneer er twee onbekenden in de vergelijking aanwezig zijn is dit niet mogelijk.

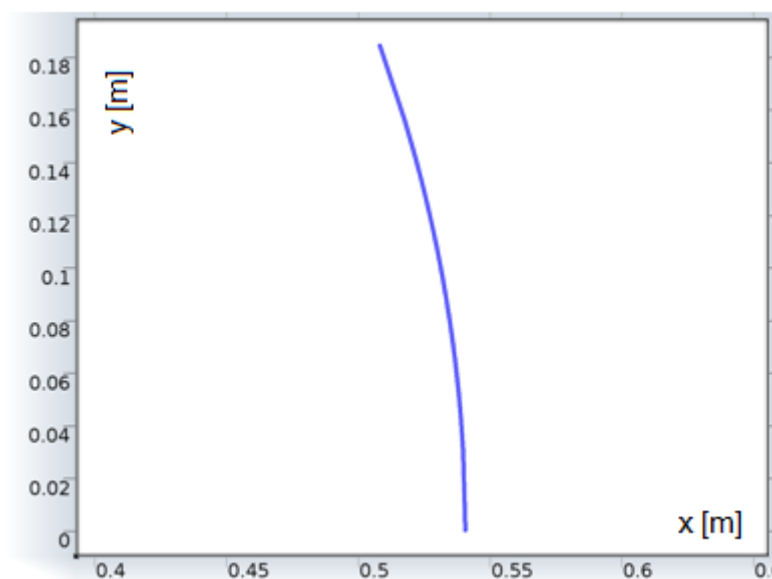
Geometrie

Om de simulatie te versnellen wordt er een sectie van 20deg van een tweedimensionale doorsnede gebruikt. De initiële straal van wordt gelijkgesteld aan r_0 en de dikte aan t_0 . De geometrie is te zien in afbeelding E.1. De geometrie wordt van een *mesh* voorzien zodat er 150 segmenten aanwezig zijn.

Fysica

Er worden drie fysica onderdelen toegevoegd:

- Symmetrie. De korte zijde van geometrie worden als symmetrie ingesteld.



FIGUUR E.1: Gebruikte geometrie.

- Grensbelasting¹. Op de binnenzijde van de geometrie wordt een handmatig belasting $F_b[N] = U_b - U_{appl}$ gedefinieerd. Hierbij is U_{appl} gelijk aan de rekratio $\frac{r_0}{r}$ en U_b de druk na het integreren van de radiale verplaatsing van de binnenzijde.
- Elastisch materiaal. Hierbij wordt gekozen voor een Mooney-Rivlin 2 parameter variant. Voor de twee onbekenden parameters C_{01} en C_{10} wordt een verhouding van $\mu_{latex} = 2(C_{10} + C_{01})$ gebruikt zodat deze afhankelijk zijn van de shear modulus. Dit zijn overigens dezelfde parameters als in α , hier gaat het om omgeschreven Cauchy-Green tensors [9]. De verhouding 10/11 wordt hier gehandhaafd.

Study step

Er wordt een stationaire studie toegevoegd met een voortzetting van U_{appl} oplopend van 1 tot 2,9 in 29 stappen. Omdat de ballon bij een rekratio van 2,9 scheurt is deze waarde als maximum voor de simulatie ingesteld.

Resultaat

Voor de interpretatie van de resultaten wordt een ééndimensionale plotgroep toegevoegd. Hier worden twee lijn grafieken aan toegevoegd:

- Mooney-Rivlin. De first principle stress op de binnenzijde van de latex wand ten opzichte van U_{appl} .
- Analytische functie. Hier wordt formule 4.3 opgegeven. De resultaten zijn besproken in sectie 4.5.

¹Boundary load

Overzicht van figuren

1.1	Relatieve luchtvochtigheid en temperatuur ten opzichte van hoogte. Datum van deze oplating: 04-11-2013	1
3.1	Voorbeeld van een radiosonde met (1) thermometer, (2) vochtmeter, (3) GPS ontvanger en (4) radioantenne. De kleine drukmeter bevindt zich in de behuizing.	6
3.2	Grafische weergaven van drie stappen om gemeten snelheid te bepalen	7
3.3	Werkende krachten op de ballon en sonde tijdens de vlucht	8
3.4	Stroomschema aanvangsmodel	12
3.5	Model uitkomst voor een willekeurig profiel (04-11-2013)	13
3.6	Elastische straal (groen) ten opzichte van de straal volgens de ideale gaswet (rood).	14
3.7	Krachten evenwicht op een halve ballon met stress in twee componenten. (Bron: [9])	15
3.8	Hoogte van tropopauze ten opzichte van aardse breedtegraad.	18
3.9	De circulatiecellen van het noordelijk halfrond.	19
3.10	Product van het <i>ECMWF</i> waarin de luchtverplaatsing op 6,5km hoogte tussen september en november is te zien.	19
3.11	Inschatting verwachtingswaarde van verticale wind (<i>W</i>) ten opzichte van hoogte .	20
3.12	Algemene Gauss verdeling	22
4.1	Schematische weergaven van de gemaakte selectie eisen.	24
4.2	Schematische weergaven gemiddelde per laag. (A) Losse profielen <i>W</i> t.o.v. <i>h</i> , (B) Gemiddelde van alle profielen. (C) Gemiddelde per segment (<i>dH</i>) met bijbehorende variantie σ^2	26
4.3	Schematische weergaven van Gauss verdeling. Het percentage A geeft aan hoeveel van de gemiddelden daadwerkelijk binnen 6σ vallen.	27
4.4	Schematische weergaven van de deviatie staaftogram.	27
4.5	Verhouding tussen analytisch model en mooney rivlin met $\mu_{latex} = 600Kpa$	28
4.6	Verhouding tussen analytisch model en mooney rivlin met $\mu_{latex} = 450Kpa$	29
4.7	Verhouding tussen analytisch model en mooney rivlin met $\mu_{latex} = 330Kpa$	29
4.8	Stroomschema experimenteer omgeving	31
5.1	Voorbeeld van resultaten na standaard input met de volledige dataset.	33
5.2	Voorbeeld van de volledige dataset met score over hele bereik.	35
5.3	Alle dag profielen (links) en alle nacht profielen (rechts) van de volledige dataset vergeleken.	36
5.4	Lage druk gebied (links) en hoge druk gebied (rechts) oplatingen vergeleken. Selectie op alle profielen met $P_0 < 1000$ of $P_0 > 1300$ hPa als grenzen.	37
5.5	Meerdere windcomponent profielen tegen hoogte uitgezet.	37
5.6	Stijgsnelheid en horizontale wind rond de tropopauze. (blauw) z, v , (groen) v, v en (rood) u, v	38
5.7	Verticale stijgsnelheid en extreme horizontale wind rond de tropopauze. (groen) z, v , (rood) v, v en (blauw) u, v waarbij selectie is toegepast op een gemiddelde horizontale windsnelheid van minimaal 10 meter per seconde in de regio tussen 5 en 10 kilometer	39
5.8	Gevolg van het toepassen van lift inschatting op v_{model} ten opzichte van de hoogte.	40

5.9	Resultaat van lift inschatting tussen 1 en 2 kilometer en score tussen 15 en 20 kilometer op 150 willekeurige profielen zonder dataselectie eisen.	40
5.10	Resultaat van lift inschatting tussen 15 en 18 kilometer en score tussen 15 en 20 kilometer op de volledige hoge resolutie dataset.	41
5.11	Resultaat van geparameteriseerde liftinschatting op 150 willekeurig gekozen profielen zonder selectie eisen.	42
5.12	Scatterplot met initiële gronddruk tegen breekhoogte uitgezet voor de complete dataset.	42
5.13	Opvallende initiële acceleratie in onderste deel van stijgprofiel, elke lijn is één van de 150 willekeurig gekozen profiel.	43
5.14	Gemiddelde van profielen welke een initiële absolute acceleratie groter dan 1 meter per seconde hebben. Hierbij zijn de gemeten grootheden uitgezet zijn tegen positieve δv_{model} (groen) en negatieve δv_{model} (rood).	44
5.15	Verschil tussen dichtheid van vochtige en droge lucht.	44
5.16	Relatie tussen viscositeit, druk, temperatuur en relatieve luchtvochtigheid.	45
5.17	(Links) $Re_{drogelucht}$ en $Re_{vochtigelucht}$, (rechts) het verschil tussen beide	46
5.18	Straalontwikkeling volgens drie modellen (links), vermindering van lift als gevolg van kleinere straal (rechts).	46
5.19	Binnenwaartse druk ten opzichte van hoogte (rechts), verhouding buitendruk en binnenwaartse druk (links).	47
5.20	Diffusie model (links) vergeleken met elastisch model (rechts) toegepast op dezelfde dataset van 43 willekeurig gekozen profielen zonder verdere dataselectie.	48
5.21	Vergelijking tussen elastisch en diffusie model. Oplating: 2012-09-14	49
5.22	Vergelijking tussen elastisch en diffusie model. Oplating: 2012-01-20	49
5.23	Vergelijking tussen elastisch en diffusie model. Oplating: 2013-01-10	50
5.24	Gekalibreerde uitkomst W van beide modellen.	50
5.25	Vergelijking verschillende α instellingen: 5/11 (links), 8/11 (midden) 10/11 (rechts) op 40 willekeurige profielen.	50
5.26	Vergelijking verschillende μ_{latex} instellingen: 200Kpa (links), 600Kpa (midden) 1000Kpa (rechts) op 40 willekeurige profielen.	51
A.1	Opbouw organisatie KNMI.	57
C.1	Voorbeeld van radiosonde data	61
D.1	Voorbeeld van berekende data	63
E.1	Gebruikte geometrie.	66

Overzicht van tabellen

3.1	Cell kenmerken	18
3.2	Geografische gegevens de Bilt	19
B.1	Gebruikte constanten	59
B.2	Meest gebruikte software	59
C.1	Verklaring van symbolen in figuur C.1	61
D.1	Verklaring van symbolen in figuur D.1	63

Bibliografie

- [1] ESA Media Relations Office. Adm aeolus factsheet. September 2013.
- [2] Toon Rouws. Model weerballon. 2012. URL <http://www.knmi.nl/publicaties/showAbstract.php?id=9429>.
- [3] Sanne Thewessem. Model verticale windsnelheid. 2013. URL <http://www.knmi.nl/publicaties/showAbstract.php?id=10019>.
- [4] Wikipedia. Loran. Dec 2013. URL <http://nl.wikipedia.org/wiki/LORAN>.
- [5] A. Gallice; F. G. Wienhold; C. R. Hoyle; F. Immler; and T. Peter. Modeling the ascent of sounding balloons: derivation of the vertical air motion. June 2011. URL <http://www.atmos-meas-tech.net/4/2235/2011/amt-4-2235-2011.html>.
- [6] Saylor. Viscosity, april 2011.
- [7] Richard Shelquist. An introduction to air density and density altitude calculations. Dec 2012. URL http://wahiduddin.net/calc/density_altitude.htm.
- [8] Z. K. Morvay; D. D. Gvozdenac. Applied industrial energy and environmental management. 1999. URL <http://www.wiley.com/legacy/wileychi/morvayindustrial/supp/toolbox6.pdf>.
- [9] I. Müller P. Strehlow. Rubber and rubber balloons: Paradigms of thermodynamics. pages 19–28, Feb 2000. URL -ISBN:3-540-20244-7.
- [10] Hoskin Scientific. Sounding balloon datasheet. Dec 2013. URL <http://www.myhoskin.com/newsletters/PDF/BALLOONS.pdf>.
- [11] The Engineering Toolbox. Densities of miscellaneous solids. 2011. URL http://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html.
- [12] Continuummechanics. Mooney-rivlin model. 2004. URL <http://www.continuummechanics.org/cm/mooneyrivlin.html>.
- [13] D. Bhattacharyya Y. Dong, R.J.T. Lin. Determination of critical material parameters for numerical simulation of acrylic sheet forming. Dec 2005. URL <http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~jlin028/MyPapers/JMS1.pdf>.

- [14] Tibor Goda Gábor Bódai. A new, tensile test-based parameter identification method for large strain generalized maxwell-model. pages 100,101, Nov 2011. URL http://www.uni-obuda.hu/journal/Bodai_Goda_31.pdf.
- [15] B. Geerts and E. Linacre. The height of the tropopause, 1997. URL <http://www-das.uwo.edu/geerts/cwx/notes/chap01/tropo.html>.
- [16] Lutgens and Tarbuck. The atmosphere, 2001. URL <http://www.ux1.eiu.edu/cfjps/1400/circulation.html>.
- [17] ECMWF. Pressure level climatologies (latitude-longitude projections). Nov 2011. URL http://www.ecmwf.int/research/era/ERA-40_Atlas/docs/section_D/index.html.
- [18] K. Houchi A. Stoffelen G.J. Marseille J. de Kloe. Comparison of wind and wind shear climatologies derived from high-resolution radiosondes and the ecmwf model, 2010. URL <http://www.knmi.nl/publications/showAbstract.php?id=7840>.
- [19] A. Edelman. Polynomial roots from companion matrix eigenvalues. Jan 1994. URL <http://www-math.mit.edu/~edelman/homepage/papers/companion.pdf>.
- [20] Mathworks. Compan function description. Jan 2014. URL <http://www.mathworks.nl/help/matlab/ref/compan.html>.
- [21] Scipy.org. `scipy.stats.chisquare`, Oct 2013. URL <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.chisquare.html>.
- [22] P. Spanos. Cure system effect on low temperature dynamic shear modulus of natural rubber, Nov 2001. URL <http://www.thefreelibrary.com/Cure+system+effect+on+low+temperature+dynamic+shear+modulus+of+...-a0111451108>.
- [23] P. Hills. Material properties, Jun 2004. URL <http://homepages.which.net/~paul.hills/Materials/MaterialsBody.html>.
- [24] H. Crandall. An introduction to the mechanics of solids, 1959. URL -ISBN:0072380411.
- [25] COMSOL 4.3a model library. Inflation of a spherical rubber balloon. URL http://www.comsol.com/model/download/155913/models.nsm.balloon_inflation.pdf.
- [26] G.A. Holzapfel. Nonlinear solid mechanics: A continuum approach for engineering, Feb 2000. URL -ISBN:978-0-471-82319-3.
- [27] B. Brodersen. Ogden type materials in non-linear continuum mechanics, April 2004. URL <http://www.infam.tu-bs.de/infam2/include/Studium/stuDipl/stud2004-BrodersenBjoern.pdf>.
- [28] J. A. YOUNGH. Static stability, 2003. URL http://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter7/Ency_Atmos/Static_Stability.pdf.
- [29] A. Muhr J. Busfield. *Constitutive Models for Rubber III*. Sep 2003. URL -ISBN: 9789058095664.