



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

DE HAAGSE
HOOGESCHOOL

KALIBRATIEMETHODEN VOOR EEN POLARISATIE GEVOELIG LIDARSYSTEEM



Juni 2014

Auteur: Anne Moerdijk

KALIBRATIEMETHODEN VOOR EEN POLARISATIE GEVOELIG LIDAR SYSTEEM

Dit rapport is geschreven als afsluiting van een afstudeeronderzoek van een student technische natuurkunde van de Haagse Hogeschool te Delft. Het onderzoek is uitgevoerd bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI)

Auteur:

Anne Moerdijk

Studente Technische Natuurkunde aan de Haagse Hogeschool

Studentnummer: 10063501

Email: anne.moerdijk@knmi.nl

Begeleiders vanuit de Haagse Hogeschool:

A.J. Lock

Docent aan de Haagse Hogeschool

Eerste afstudeercoach

Email: a.j.lock@hhs.nl

J.H.R. Lambers

Docent aan de Haagse Hogeschool

Tweede afstudeercoach

Email: j.h.r.lambers@hhs.nl

Begeleider vanuit het KNMI:

A. Apituley

Specialist bij het KNMI

Email: apituley@knmi.nl

Gecommitteerde:

Dr. M.J.A. de Dood

Hoogleraar Universiteit Leiden

Email: dood@physics.leidenuniv.nl

VOORWOORD

Na een periode van vijf maanden ligt het eindresultaat van mijn afstudeeronderzoek voor u. Het onderzoek is uitgevoerd bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) in De Bilt. Mijn bezigheden binnen het KNMI hadden te maken met het kalibreren van een polarisatie gevoelig lidar systeem. Dit lidar systeem bevindt zich in Cabauw bij de 213 meter hoge meetmast en maakt onderdeel uit van CESAR (Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research). Bij een bezoek aan deze meetmast werd mij verteld dat wanneer je bij het KNMI werkt je een keer op de toren geweest moest zijn. Deze kans liet ik natuurlijk niet aan mij voorbij gaan. Een onvergetelijke ervaring was het om in een mini lift tot grote hoogte te stijgen om te genieten van een fantastisch uitzicht over een groot deel van Nederland. Naast deze mooie ervaring kijk ik terug op een periode waarin ik met veel plezier heb mogen werken. Mij werd veel zelfstandigheid gegeven en daarnaast ook allerlei middelen aangereikt om mijn opdracht tot een goed einde te brengen. Ik ben zeer tevreden met de begeleiding die mij vanuit het KNMI geboden werd. Er was altijd ruimte voor vragen en het bespreken van de voortgang van het project. Ik wil Arnoud Apituley daarom bedanken voor zijn inzet in het begeleiden bij mijn project. Daarnaast wil ik Arjan Lock bedanken die namens de Haagse Hogeschool mij begeleiding heeft geboden.

SAMENVATTING

Het KNMI is in het bezit van een Raman lidar met polarisatie ontvanger die in dit onderzoek op twee verschillende kalibratiemethoden is getest. Uit dit onderzoek moet blijken welke methode onder de gegeven omstandigheden de juiste benadering geeft voor de depolarisatie ratio. De polarisatie ontvanger meet de intensiteit van de twee verschillende polarisatiecomponenten. Met deze signalen wordt de depolarisatie verhouding bepaald van het uitgezonden licht na interactie met de atmosfeer. De depolarisatie verhouding is de verhouding tussen een polarisatie component die evenwijdig is aan de polarisatierichting van het uitgezonden laser licht, en een component die een polarisatierichting heeft die hier loodrecht op staat. Deze verhouding is karakteristiek voor elk soort deeltje afzonderlijk. Om met een bepaalde zekerheid de waarde voor de depolarisatie te kunnen bepalen is het systeem op twee verschillende manieren gekalibreerd. Vervolgens is gemeten aan een cirrus wolk en is de depolarisatie verhouding daarvan met twee methoden bepaald.

Bij de eerste methode, de moleculaire methode, is de depolarisatie verhouding van een stukje aerosolvrije atmosfeer bepaald met de polarisatie ontvanger. Omdat de depolarisatie verhouding van een aerosolvrije range uit de theorie bekend is kan deze meting op de bekende waarde worden genormaliseerd. Uit de metingen is een kalibratieconstante bepaald. Deze is gelijk aan $k = 0,46 \pm 0,007$. Met deze waarde is de depolarisatie verhouding van een cirrus wolk bepaald $\delta^V = 0,05 \pm 0,008$. Een nadeel van deze methode is dat de aanname moet worden gedaan dat er inderdaad in de gekozen range geen aerosolen aanwezig zijn. Een voordeel van deze methode is echter dat de kalibratiemetingen en de 'normale' metingen tegelijkertijd kunnen worden uitgevoerd.

Voor de tweede methode, ± 45 graden kalibratie, is er een half lambda plaatje in de opstelling gemonteerd. Om het systeem te kalibreren is de depolarisatie verhouding bepaald met het half lambda plaatje op $22,5^\circ$ en op $-22,5^\circ$. In deze situaties wordt de polarisatierichting van het ingekomen licht verdraaid naar 45 graden ten opzichte van de bundelsplitser zodat de verhouding tussen de kanalen één is. Aan de hand van deze metingen is er een kalibratieconstante bepaald, deze is gelijk aan $V^* = 0,6 \pm 0,02$. De depolarisatie verhouding van een cirrus wolk is vervolgens gemeten met het half lambda plaatje op nul graden en is $\delta^V = 0,2 \pm 0,03$.

De laatste methode is de drie kanalen methode. Deze methode maakt gebruik van drie kanalen. In het derde kanaal wordt het totale signaal gemeten. In de andere twee kanalen worden de twee polarisatie componenten gemeten net als bij de twee andere methoden. Deze methode leverde, door gebrek aan tijd en kennis over de precieze uitvoering van de methode, geen zinvolle depolarisatie ratio's op.

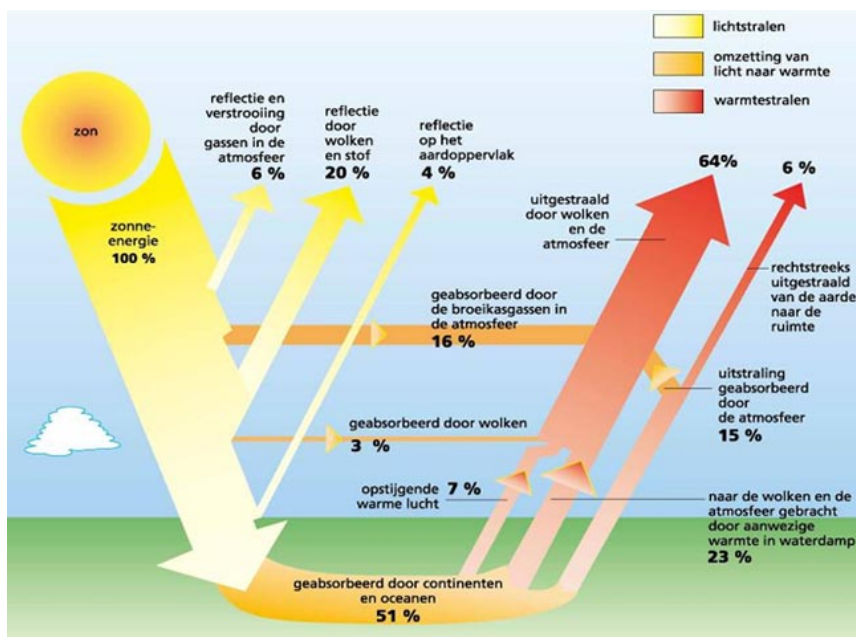
De bekende depolarisatie ratio van een cirrus is uit de literatuur bekend en gelijk aan $\delta^V = 0,28 \pm 0,15$. Uit de berekende waarde blijkt dat de waarde die volgens de ± 45 graden kalibratiemethode is berekend, het beste overeenkomt met de literatuurwaarde. Er kan op dit moment geconcludeerd worden dat deze methode een verbetering van het systeem heeft opgeleverd.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	2
Samenvatting	3
1. Inleiding	5
1.1 Lidar	5
1.2 Doelstelling	6
2. Interactie van het licht met aerosolen	8
2.1 Moleculaire verstrooiing	8
2.2 Aerosolverstrooiing	9
3. Kalibratietechnieken	10
3.1 Moleculaire of Rayleigh methode	11
3.2 ± 45 graden kalibratie	13
3.3 Drie kanalen methode	15
4. Methode en opstelling	17
4.1 Test opstelling in De Bilt	17
4.2 Opstelling Cabauw	18
5. Resultaten	20
5.1 Aerosolvrije metingen	20
5.2 ± 45 graden kalibratiemetingen	23
5.3 Vergelijken van methoden	25
6. Conclusie en vooruitblik	26
Referenties	27
Bijlage 1 – Opdracht omschrijving	28

1. INLEIDING

Recentelijk zijn de klimaat scenario's van 2014 door het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) gepresenteerd. Hierin wordt het toekomstige klimaat van Nederland in voorspeld. Uit de gepresenteerde scenario's komt naar voren dat de aarde opwarmt als gevolg van veranderingen in het klimaat. Waarom het klimaat verandert en welke processen daar een rol in spelen wordt al jaren onderzocht bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). Deze veranderingen worden veroorzaakt door een verstoring in de stralingsbalans van de atmosfeer. De energie die de zon levert wordt op verschillende manieren door de atmosfeer en de aarde opgenomen en ook weer afgevoerd. Op deze manier blijft de energie in de atmosfeer in evenwicht. In de atmosfeer bevinden zich allerlei kleine (10nm - 100µm) vaste en vloeibare deeltjes, aerosolen. Aerosolen vinden hun oorsprong in de natuur of in vervuiling als gevolg van invloeden van de mens. De aanwezigheid van aerosolen beïnvloedt de energiebalans van de atmosfeer omdat ze straling absorberen of reflecteren. Daarnaast spelen aerosolen ook een rol bij wolkvorming. Wolken spelen op hun beurt weer een belangrijke rol in de stralingsbalans dit wordt weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Overzicht van de energie stromen en de verschillende interacties die invloed hebben op de stralingsbalans [1].

Figuur 1 geeft de verschillende processen weer die van invloed zijn op de stralingsbalans. Het is van belang om de invloed van de aanwezige aerosolen in de atmosfeer goed in kaart te brengen. De directe en indirecte invloeden van de aanwezigheid van aerosolen vergt intensief onderzoek.

1.1 LIDAR

Voor klimaatonderzoek is het van belang de verschillende soorten aerosolen en hun herkomst te kunnen bepalen. Het karakteriseren van aerosolen wordt met name gedaan door lidar (Light Detection And Ranging) metingen. Het KNMI beschikt over een Raman lidar met de naam Caeli. Caeli is gesitueerd op de meetlocatie CESAR (Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research) in Cabauw en is gebouwd bij het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). Een aantal jaren na de bouw is Caeli overgedragen aan het KNMI en verhuisd naar Cabauw. Figuur 2 a en b zijn foto's van de buiten kant en de binnenkant van Ceali, respectievelijk.

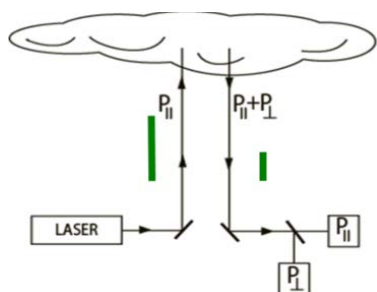


Figuur 2a : Vooraanzicht van Caeli



1b: Interne lidar systeem van Caeli

Een lidar is een systeem wat een laser puls genereert en deze lineair gepolariseerde licht puls de atmosfeer inzendt. In de atmosfeer wordt het licht door de aanwezige deeltjes in de lucht verstrooid en het verstrooide licht wordt opgevangen. De reistijd van de licht puls geeft informatie over de hoogte waarop het licht is verstrooid. Zodoende kan met een lidar systeem een verticaal profiel van de atmosfeer worden verkregen. Caeli is een lidar die licht in drie verschillende golflengtes kan uitzenden namelijk, 1064 nm, 532 nm en 355 nm. Het infrarode (1064 nm) en het ultraviolette (355 nm) licht wordt gebruikt om te meten aan waterdamp en wolken. Het groene licht (532 nm) wordt gebruikt voor het meten aan aerosolen door depolarisatie metingen [2]. Aerosolen hebben elk hun eigen optische eigenschappen. Door het verschil in optische eigenschappen wordt het licht dat de lidar uitzendt op verschillende manieren verstrooid. Door verstrooiing kan de polarisatie van het licht na interactie met aerosolen veranderen. Er wordt dan gesproken van een depolarisatie van het licht. Men noemt het licht volledig gedepolariseerd als de oorspronkelijke richting van de polarisatie, 90 graden is gedraaid. De depolarisatie wordt altijd gegeven als een verhouding van de polarisatie componenten van het verstrooide licht ten opzichte van de polarisatie van het oorspronkelijke licht.



Figuur 3: Schematische weergave van het principe van een polarisatie gevoelig lidar systeem [3].

Om de mate van depolarisatie te bepalen wordt het verstrooide licht met een telescoop opgevangen. In een speciale ontvanger wordt het licht gesplitst in een component die een polarisatierichting heeft parallel aan de laser en in een component loodrecht daarop. Dit wordt geïllustreerd in figuur 3. De verhouding tussen de twee polarisatie componenten levert een depolarisatie ratio. Deze verhouding is karakteristiek en verschilt per deeltje.

1.2 DOELSTELLING

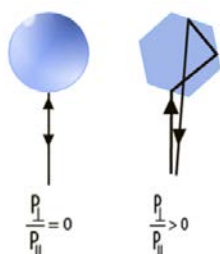
Om aerosolen te karakteriseren is het van belang dat de depolarisatie verhouding goed wordt gemeten. De depolarisatie verhouding staat in verband met de polarisatie van de laser en met de uitlijning van de optische elementen en de gevoeligheid van de detectoren. Het systeem kan een mate van onzekerheid veroorzaken in de metingen door de optische eigenschappen van de verschillende elementen. Deze onzekerheid moet voorkomen zien te worden of bekend zijn, door een kalibratie van het systeem. Een gekalibreerd systeem maakt het mogelijk om aan de hand van de verkregen depolarisatie ratio, en de bekende atmosferische omstandigheden, te zeggen wat voor soort deeltje er op een bepaalde hoogte in de atmosfeer aanwezig is. Hierdoor kan een verticaal

profiel van de atmosfeer worden verkregen. De polarisatie ontvanger (POL-R) van Caeli is niet gekalibreerd. De verkregen signalen geven daarom alleen maar kwalitatieve informatie over of het ontvangen licht wel of geen depolarisatie heeft ten opzichte van het uitgezonden licht. Het doel van dit onderzoek is het bepalen van de meest geschikte kalibratiemethode voor de polarisatie ontvanger, zodat er ook kwantitatieve informatie gegeven kan worden over de aanwezige aerosolen. Hiervoor worden drie methoden getest en op basis van deze tests wordt gekeken naar de meest geschikte methode voor de polarisatie ontvanger in Caeli. Wanneer de data van Caeli gekalibreerd is kan deze data worden toegevoegd aan de database van EARLINET (European Aerosol Lidar Network). Dit netwerk is bedoeld om zoveel mogelijk kwalitatieve data over aerosolen boven Europa te verzamelen. Dit geeft een inzicht in het gedrag van aerosolen en de invloeden van aerosolen op een continentale schaal.

Allereerst wordt er in hoofdstuk 2 beschreven welke interacties er in de atmosfeer plaats vinden tussen het laser licht en de aanwezige aerosolen. Het gebruik van de polarisatie lidar is op deze principes gebaseerd. Daarnaast wordt er informatie gegeven over het typeren van aerosolen op basis van de depolarisatie ratio. De theorie achter de drie verschillende kalibratiemethoden wordt in hoofdstuk 3 beschreven. Hoofdstuk 4 zal de opstellingen en de methoden toelichten. De resultaten zullen gepresenteerd worden in hoofdstuk 5. In dit hoofdstuk zal ook een toelichting worden gegeven over de verwachte onnauwkeurigheid. Hoofdstuk 6 vat het onderzoek samen in een conclusie en geeft een vooruitblik op eventueel vervolgonderzoek.

2. INTERACTIE VAN HET LICHT MET AEROSOLEN

Het doel van depolarisatie metingen is het karakteriseren van aerosolen in de atmosfeer op basis van de depolarisatie ratio. Het karakteriseren van de aerosolen kan niet alleen op basis van de depolarisatie verhouding. Hiervoor is ook informatie nodig over de temperatuur en de druk van de atmosfeer en over de karakteristieken van het lidar systeem. Uit eerder onderzoek is gebleken dat depolarisatie metingen informatie bevatten over de vorm, de grootte, de samenstelling en de verdeling van aerosolen in de lucht [4]. Verstrooiing van het licht kan een depolarisatie van het licht veroorzaken afhankelijk van de eigenschappen van het verstrooiende deeltje. Er zijn verschillende theorieën die verstrooiing van licht aan deeltjes beschrijven. Deze theorieën vormen de achtergrond voor de lidar depolarisatie metingen. Zo beschrijft de theorie van Lorenz-Mie [5] hoe homogene sferische deeltjes het licht altijd zullen verstrooien zonder de polarisatierichting te veranderen. Aan sferische deeltjes vindt dus geen depolarisatie plaats. Wanneer een deeltje niet sferisch is zal deze wel een depolarisatie van het licht veroorzaken. De mate van depolarisatie hangt o.a. af van de mate waarin de vorm van het deeltje afwijkt van een sferische symmetrische vorm en de brekingsindex van het deeltje.

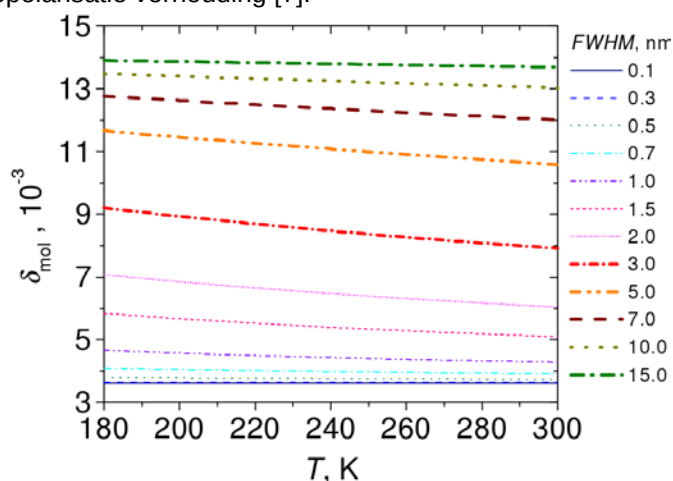


Figuur 4: Schematische weergave van de interactie van een licht golf met aerosol van verschillende vorm [2].

De reden waarom er bij een niet sferisch deeltje depolarisatie plaatsvindt is vanwege de interne reflecties die er in het deeltje plaatsvinden, zie figuur 4 [6].

2.1 MOLECULAIRE VERSTROOIING

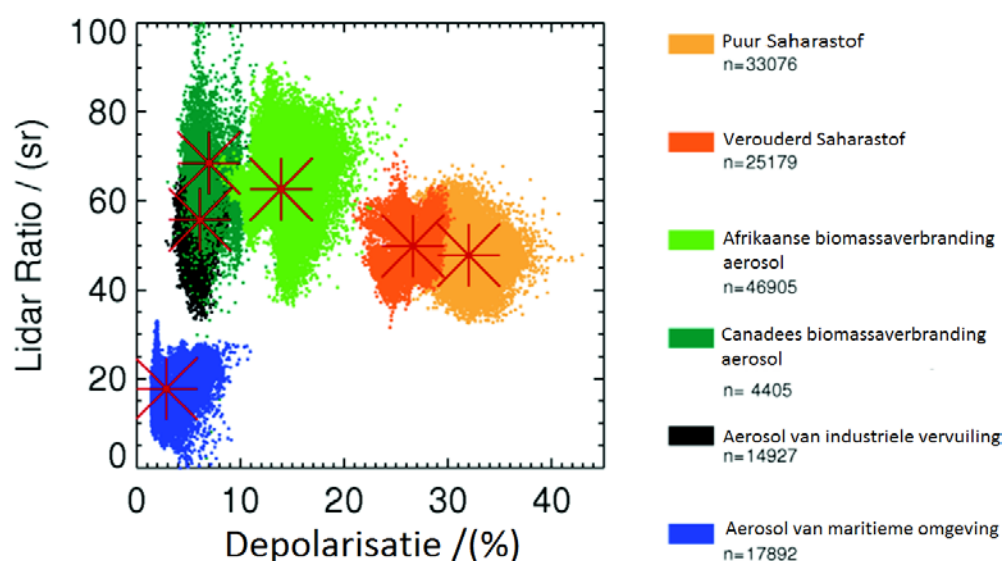
De typische grootte van moleculen is vele malen kleiner, orde grote van een paar nanometer, dan die van de golflengte. Vanwege dit feit kan de moleculaire verstrooiing beschouwd worden als uitsluitend Rayleigh verstrooiing. De typische waarden voor moleculaire depolarisatie zijn een paar procent. De waarde hangt af van de atmosferische omstandigheden. Figuur 5 laat het verband zien tussen de temperatuur in de atmosfeer, de transmissiebandbreedte van het detectie systeem en de moleculaire depolarisatie verhouding [7].



Figuur 5: Moleculaire depolarisatie verhouding als functie van de temperatuur en de transmissiebandbreedte van het ontvangende systeem. Voor de polarisatie ontvanger van Caeli is de transmissiebandbreedte (full width at half maximum ,FWHM) gelijk aan 1.0 nm [7].

2.2 AEROSOLVERSTROOIING

De depolarisatie ratio is een goede indicator van de aanwezigheid van aerosolen in de atmosfeer. Inmiddels zijn, door veelvuldig en zorgvuldig onderzoek, de waarden van de depolarisatie verhouding van een aantal aerosolen bekend. De deeltjes die onder de aerosolen worden geschaard zijn: door de wind opgenomen stof, rook, vulkanisch as en deeltjes die vrij zijn gekomen als gevolg van verontreiniging of deeltjes die van het oppervlak van de oceaan worden opgenomen [6]. De grootte van deze deeltjes varieert van moleculaire afmetingen tot deeltjes van een aantal micrometers. De hoogste depolarisatie ratio's zijn waargenomen bij het meten van onder andere puur stof, zoals Saharastof. Deze deeltjes veroorzaken een depolarisatie van 30% tot 35% in pure vorm en een verhouding van 8% tot 10% voor een mix van stof en sferische deeltjes [8]. Figuur 6 laat een grafiek zien waarin de depolarisatie verhouding per specifiek aerosol materiaal is weergegeven ten opzichte van de lidar ratio. De lidar ratio is de verhouding tussen de deeltjes backscatter coëfficiënt en de extinctie coëfficiënt. Caeli beschikt over de mogelijkheid om beide verhoudingen te bepalen.



Figuur 6: Depolarisatie ratio van verschillende bronnen afhankelijk van de lidar ratio. De rode ster geeft de gemiddelde waarde aan met een bepaalde onnauwkeurigheid [9].

De signalen weergegeven in figuur 6 zijn van verschillende typen aerosol gemeten dicht bij de bron. Deze grafiek laat zien hoe het mogelijk is om, met de gemeten depolarisatie ratio en een juiste kalibratie, het type aerosol in te delen. Er is bij deze metingen een selectie van een aantal depolarisatie ratio's van aerosolen gemaakt.

3. KALIBRATIETECHNIKEN

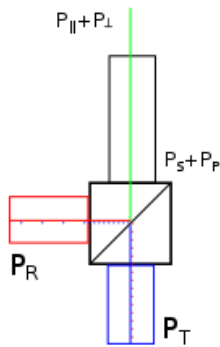
In dit hoofdstuk wordt de theorie achter drie verschillende kalibratietechnieken toegelicht. Het doel van elk van deze methoden is het bepalen van de volume depolarisatie verhouding van het verstrooide licht. Deze is in formule (1) gedefinieerd als de verhouding van de loodrecht gepolariseerde component ten opzichte van de lineair gepolariseerde component van het verstrooide licht afhankelijk van hoogte z [7]. Of als de verhouding tussen de backscatter coëfficiënten van de verschillende componenten. De backscatter coëfficiënten geven de mate aan waarin het uitgezonden licht, verstrooid wordt op hoogte z en in de detectie kanalen gedetecteerd wordt.

$$\delta^v(z) = \frac{P_{\perp}(z)}{P_{\parallel}(z)} = \frac{\beta_{\perp}(z)}{\beta_{\parallel}(z)} \quad (1)$$

waarin

$P_{\parallel}$	Parallel aan de laser gepolariseerde component van het verstrooide licht	[mV]
$P_{\perp}$	Loodrecht op de laser gepolariseerde component van het verstrooide licht	[mV]
$\beta_{\parallel}$	Backscatter coëfficiënt voor parallelle component	[$\text{Sr}^{-1}\text{m}^{-1}$]
$\beta_{\perp}$	Backscatter coëfficiënt voor loodrechte component	[$\text{Sr}^{-1}\text{m}^{-1}$]

Het bepalen van deze verhouding gebeurt door een optisch systeem. Door de optische eigenschappen zoals de transmissie- en reflectiecoëfficiënten, zal het ontvangen signaal een bepaalde versterking ondervinden. Deze versterking is voor elk detectiekanaal verschillend. Om deze verhouding te kunnen bepalen moet het ontvangen signaal worden opgesplitst in de twee componenten. Dit gebeurt door een Polarising Beamsplitter Cube (PBC).



Figuur 7: De binnenkomende polarisatie componenten ondervinden een versterking als gevolg van het systeem. Het P_R signaal is het totale gereflecteerde signaal, zowel loodrecht (P_S) als parallel gepolariseerd (P_P) licht. P_T is het totale doorgelaten signaal, zowel parallel als loodrecht gepolariseerd.

Een deel van het parallel gepolariseerde licht zal daarbij ook gereflecteerd worden en een deel van het loodrecht gepolariseerde licht zal doorgelaten worden, zie figuur 7. De verhouding die door het systeem wordt gemeten zal dus afwijken van de daadwerkelijke verhouding van het verstrooide licht.

De daadwerkelijke vermogenscomponenten $P_{\parallel}$ en $P_{\perp}$ zijn gegeven door de formules (2) en (3) [4].

$$P_{\parallel} = \frac{\eta_{\parallel}(\beta_{\parallel}^p + \beta_{\parallel}^m)\tau^2}{z^2} \quad (2)$$

$$P_{\perp} = \frac{\eta_{\perp}(\beta_{\perp}^p + \beta_{\perp}^m)\tau^2}{z^2} \quad (3)$$

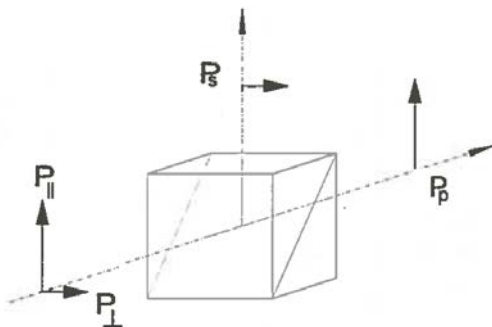
Hierin zijn $\eta_{\parallel}$ en $\eta_{\perp}$ de efficiëntie constanten van de parallelle en loodrechte detectiekanalen, respectievelijk. β betreft de backscatter coëfficiënten voor de verschillende componenten voor de verstrooiing door deeltjes (p) en door moleculen (m). De τ^2 term staat symbool voor de atmosferische transmissie voor licht van 532 nm, over de afstand van de laser tot het verstrooiende deeltje, hoogte z , en terug naar de ontvanger. Om zo goed mogelijk de werkelijke depolarisatie verhouding te kunnen bepalen moet het systeem gekalibreerd worden. Bij de verschillende kalibratietechnieken wordt een methode gebruikt om te compenseren voor de effecten van het systeem.

3.1 MOLECULAIRE OF RAYLEIGH METHODE

Een van de manieren om een systeem te kalibreren is het meten van een deel van de atmosfeer waarvan de depolarisatie verhouding bekend is. Dit signaal kan als referentie worden gebruikt en het systeem kan hierop genormaliseerd worden. Met de moleculaire methode wordt hiervan gebruik gemaakt. Men gaat er vanuit dat er in een aerosolvrije range alleen Rayleigh verstrooiing door moleculen plaatsvindt. De depolarisatie verhouding van een aerosolvrije atmosfeer is bekend. De moleculaire depolarisatie verhouding hangt af van een aantal atmosferische omstandigheden zoals in hoofdstuk 2 is toegelicht. De depolarisatieverhouding voor verstrooiing door moleculen in de atmosfeer wordt gegeven door formule (4) [7].

$$\delta_{mol}(z_0) = \frac{\beta_{\perp}^{mol}(z_0)}{\beta_{\parallel}^{mol}(z_0)} \quad (4)$$

Hierin zijn $\beta_{\perp,\parallel}^{mol}$ de bekende backscatter coëfficiënten voor moleculaire verstrooiing. Deze formule geldt voor het signaal van een aerosol vrije range in de atmosfeer op een bepaalde hoogte z_0 .



Figuur 8: Schematische weergave van het detectie systeem waarin alleen de PBC is weergegeven. Het binnengekomen signaal wordt gesplitst in twee componenten waarbij de oorspronkelijke signalen $P_{\parallel}$ en $P_{\perp}$ een versterking ondergaan wat resulteert in de gemeten signalen P_p en P_s [4].

Door de imperfecties in het systeem wordt er een kalibratieconstante k aan de formule toegevoegd. Formule (5) geeft de verhouding weer tussen de gemeten polarisatie componenten. Deze krijgen een ander symbool dan in formule (4) omdat de gemeten componenten afwijken van de oorspronkelijke polarisatie componenten, dit is ook weergegeven in figuur 8.

$$\delta(z) = k \frac{P_s}{P_p} \quad (5)$$

waarin

P_p	Intensiteit van de meten parallelle component	[mV]
P_s	Intensiteit van de gemeten loodrechte component	[mV]

Om de waarde voor k van het systeem te bepalen wordt formule (5) gelijk gesteld aan formule (4). Hier uit volgt formule (6).

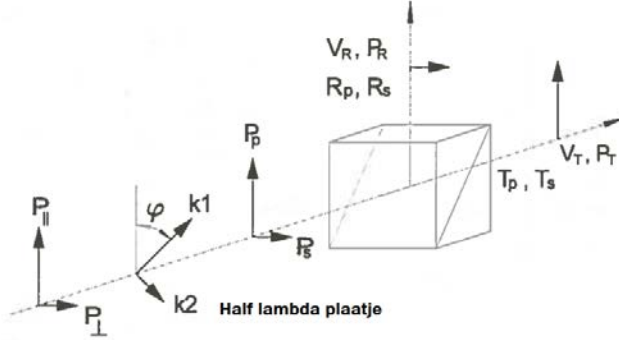
$$k = \delta_{mol}(z_0) \frac{P_p(z_0)}{P_s(z_0)} \quad (6)$$

Door de waarde van $\delta_{mol}(z_0)$ uit figuur 5 af te lezen en het gemeten signaal over een aerosolvrije range te nemen kan de waarde voor k worden bepaald. Met een bekende waarde voor k kan de depolarisatie verhouding van de volledige meting met formule (5) worden bepaald.

Een andere manier om de waarde van k te bepalen zonder gebruik te maken van een bekende moleculaire depolarisatie ratio, is het meten van ongepolariseerd licht. Wanneer er met de polarisatie ontvanger ongepolariseerd licht wordt gemeten zal de verhouding tussen het parallelle en het loodrecht kanaal gelijk moeten zijn aan één. Bij ongepolariseerd licht is er namelijk sprake van een situatie waarbij het licht geen specifieke voorkeurs richting heeft. Er zijn evenveel loodrecht gepolariseerde componenten als parallel gepolariseerde componenten in het signaal aanwezig waardoor de detectie kanalen beide dezelfde intensiteit moeten meten. Met behulp van deze twee methoden kan het systeem gekalibreerd worden [7]. Het voordeel van deze methode is dat zowel de kalibratie als de meting tegelijkertijd kunnen worden uitgevoerd. Een nadeel van deze methode is echter dat er de aanname wordt gemaakt dat er in de gekozen range geen aerosolen aanwezig zijn. Dit zal echter vaak niet het geval zijn, dit zorgt dan voor een onnauwkeurigheid in de bepaalde depolarisatie verhouding.

3.2 ±45 GRADEN KALIBRATIE

De in paragraaf 3.1 beschreven kalibratiemethode volgens Behrendt et. al. [6] kan worden toegepast zonder een aanpassing aan het detectie systeem. Dit is bij de ±45 graden kalibratiemethode niet het geval. Bij deze methode wordt voor de PBC een rotatie stage met een half lambda plaatje geïmplementeerd in de opstelling. Deze stage moet nauwkeurig van -22,5 graden naar +22,5 graden kunnen bewegen en deze positie moet reproduceerbaar zijn. In deze twee posities wordt de polarisatierichting van het licht -45 of +45 graden gedraaid, respectievelijk. Dit is vanwege het feit dat er een half lambda plaatje wordt gebruikt. De 'normale' metingen worden uitgevoerd met het half lambda plaatje op nul graden. Op grond van het artikel van Freundenthaler et. al. [4] is er gekeken naar de bepaling van de lineaire volume depolarisatie verhouding.



Figuur 9: De polarisatiecomponenten in het detectie systeem. De parallelle en loodrechte component van het binnenkomende licht worden, afhankelijk van de hoek (φ), door het half lambda plaatje gedraaid ten opzichte van het invallend vlak van de PBC. Vervolgens worden de componenten gesplitst door de PBC met de reflectiecoëfficiënten R_P en R_S , en de transmissiecoëfficiënten T_P en T_S voor parallel gepolariseerd licht (p) en loodrecht gepolariseerd licht (s). De oorspronkelijke signalen, $P_{\parallel}$ en $P_{\perp}$, ondervinden een versterking V_T en V_R door het systeem. P_T en P_R zijn de gemeten signalen [4].

In figuur 9 zijn de polarisatiecomponenten op verschillende plekken in het systeem weergegeven. De oorspronkelijke componenten van het verstrooide licht zijn weergegeven met de symbolen $P_{\parallel}$ en $P_{\perp}$. Vervolgens wordt door het half lambda plaatje een verdraaiing van de polarisatie gerealiseerd van hoek φ . De hoek φ kan ook veroorzaakt worden door een niet goed uitgelijnd systeem. Er wordt in dit geval bij de berekeningen uitgegaan van een perfect uitgelijnd systeem. Hoek φ wordt alleen door het half lambda plaatje geïnduceerd. Wanneer het half lambda plaatje een hoek van nul graden heeft, zijn de componenten P_P en P_S gelijk aan $P_{\parallel}$ en $P_{\perp}$, respectievelijk.

Het totale doorgelaten licht (P_T) bestaat voornamelijk uit de parallel gepolariseerde component. Maar ook een deel van het loodrecht gepolariseerde licht zal worden doorgelaten. De grootte van P_T is afhankelijk van de transmissiecoëfficiënten van de PBC en de versterkingsfactor V_T . De gereflecteerde component (P_R) is het totale gereflecteerde licht, voornamelijk de loodrecht gepolariseerde component, en is afhankelijk van de reflectiecoëfficiënten en de versterkingsfactor V_R . Dit zijn de signalen die worden gemeten en worden gedefinieerd door formule (7) en (8).

$$P_R(\varphi) = [P_P(\varphi)R_p + P_S(\varphi)R_s]V_R \quad (7)$$

$$P_T(\varphi) = [P_P(\varphi)T_p + P_S(\varphi)T_s]V_T \quad (8)$$

Zoals in formule (7) en (8) zijn de gemeten signalen de som van een deel parallel en een deel lineair gepolariseerd licht. De reden dat er in beide kanalen ook een component is opgenomen die daar

eigenlijk niet thuis hoort, is vanwege het feit dat de PBC de componenten niet perfect van elkaar scheidt. Er zal altijd een deel van het loodrecht gepolariseerde licht doorgelaten worden en er zal ook altijd een deel van het parallel gepolariseerde licht worden gereflecteerd. Zonder correcties aan het gemeten signaal toe te passen wordt er een relatieve depolarisatie verhouding bepaald, formule (9).

$$\delta^*(\varphi) = \frac{P_R(\varphi)}{P_T(\varphi)} \quad (9)$$

Ook wordt er een relatieve versterkingsfactor gedefinieerd. Deze is gelijk aan de verhouding tussen de versterkingsfactoren van beide signalen, formule (10).

$$V^* = \frac{V_R}{V_T} \quad (10)$$

Vervolgens wordt met behulp van formules (7) tot (10) de relatieve depolarisatie gegeven door formule (11).

$$\delta^*(\varphi) = V^* \frac{[1 + \delta^V \tan^2(\varphi)]R_p + [\tan^2(\varphi) + \delta^V]R_s}{[1 + \delta^V \tan^2(\varphi)]T_p + [\tan^2(\varphi) + \delta^V]T_s} \quad (11)$$

Hierin is δ^V de volume depolarisatie verhouding die bepaald moet worden. Om deze verhouding te kunnen bepalen moet het systeem worden gekalibreerd door een waarde voor de relatieve versterkingsfactor te bepalen, deze moet onafhankelijk zijn van δ^V . Hierbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat $\tan(45^\circ) = 1$ en van het feit dat het signaal in beide kanalen gelijk is wanneer de polarisatie-richting onder een hoek van 45 graden staat. Daarnaast worden de bekende transmissie- en reflectie coëfficiënten in de formule meegenomen. Formule (12) geeft de versterkingsfactor afhankelijk van de gemeten relatieve depolarisatie verhoudingen bij +45 graden en -45 graden.

$$V^* = \frac{T_p + T_s}{R_p + R_s} \sqrt{\delta^*(+45^\circ) \cdot \delta^*(-45^\circ)} \quad (12)$$

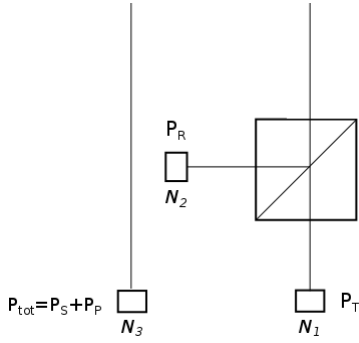
In beide standen moeten de kanalen aan elkaar gelijk zijn. De signalen worden in deze twee standen gemeten om te compenseren voor de fout in het afstellen van de rotatie stage op exact +45 en -45 graden. Hierbij wordt uitgegaan van een fout van ongeveer orde grootte 1° . Met de waarde voor V^* kan vervolgens de depolarisatie verhouding worden bepaald voor de reguliere metingen. Hiervoor wordt gemeten met het half lambda plaatje op 0° . De volumedepolarisatie verhouding wordt uiteindelijk berekend met formule (13) [4].

$$\delta^V = \frac{P_s}{P_p} = \frac{\delta^* T_p - V^* R_p}{V^* R_s - \delta^* T_s} \quad (13)$$

Waarin δ^* de relatieve depolarisatie ratio is gemeten met het half lambda plaatje op nul graden. Het voordeel van deze methode is dat men niet afhankelijk is van de omstandigheden van de atmosfeer. Zolang deze niet al te sterk tussen de verschillende kalibratiemetingen varieert kunnen de kalibratiemetingen altijd worden toegepast. Het nadeel is dat er een aparte kalibratie handeling nodig is voordat er gemeten kan worden. Echter is de kalibratie handeling wel eenvoudig uit te voeren omdat het half lambda plaatje in het systeem is geïmplementeerd.

3.3 DRIE KANALEN METHODE

De derde methode die is getest, is de methode die wordt beschreven in een artikel van Reichardt et. al. [10]. Deze methode maakt gebruik van drie kanalen i.p.v. de gebruikelijke twee kanalen. Het totale signaal van het opgevangen 532 nm licht, wordt gedetecteerd in het extra kanaal. In de andere twee kanalen worden de bekende parallel- en loodrecht gepolariseerde componenten van het licht gemeten. Figuur 10 laat de verschillende kanalen zien. Hierbij zijn de symbolen weergegeven zoals die in de voorgaande methoden zijn gebruikt. Daarnaast zijn de symbolen N_1 - N_3 weergegeven die staan voor het aantal fotonen dat in de kanalen wordt gedetecteerd.



Figuur 10: De drie kanalen schematisch weergegeven. Één kanaal voor licht met een polarisatie parallel aan de laser, waar N_1 staat voor het foton signaal van kanaal 1. Kanaal 2, N_2 , staat voor het foton signaal van het licht dat loodrecht op de laser richting is gepolariseerd. Het totale aantal 532 nm fotonen wordt met een andere telescoop gedetecteerd in kanaal 3, N_3 .

De standaard formule voor het aantal gedetecteerde fotonen van een hoogte z kan worden beschreven door formule 14.

$$N_i(z) = \eta_i [\eta_i^\perp \beta^\perp(z) + \eta_i^\parallel \beta^\parallel(z)] \tau^2(z) / z^2 \quad (14)$$

waarin

$$\begin{aligned} \eta_i & \text{ Hoogte onafhankelijke systeemconstante} \\ \eta_i^\perp, \eta_i^\parallel & \text{ Optische efficiëntie van de detectiekanalen} \end{aligned}$$

Uit de metingen wordt er een referentiehoogte voor de metingen gekozen (z_0), alle andere signalen worden op deze hoogte genormaliseerd. Het genormaliseerde signaal wordt gegeven door formule (15).

$$\frac{N_i(z)}{N_i(z_0)} = K(z) \frac{[1 + \delta(z_0)][1 + D_i \delta(z)]}{[1 + \delta(z_0)][1 + D_i \delta(z_0)]} \frac{\beta(z)}{\beta(z_0)} \quad (15)$$

Waarin $K(z)$ een functie is afhankelijk van hoogte z die voor alle kanalen hetzelfde is. De depolarisatie ratio's zijn gelijk aan: $\delta(z_0) = \beta^\perp(z_0) / \beta^\parallel(z_0)$ voor het signaal op referentie hoogte z_0 en $\delta(z) = \beta^\perp(z) / \beta^\parallel(z)$ voor het signaal op hoogte z . De verhouding van de totale backscatter coëfficiënten is gelijk aan $\beta(z) / \beta(z_0)$. De efficiëntie coëfficiënten zijn opgenomen in de constante

$$D = \eta^\perp / \eta^\parallel.$$

Met deze genormaliseerde signalen worden vervolgens twee verhoudingen bepaald tussen de drie kanalen, bijvoorbeeld tussen kanaal één en drie en tussen twee en drie. In kanaal één wordt het signaal van het parallel gepolariseerde licht gedetecteerd, in kanaal twee het loodrecht gepolariseerde licht en in kanaal drie het totale backscatter signaal. Dit resulteert in de volgende formule (16).

$$V_{ij} = \frac{N_i(z)N_j(z_0)}{N_i(z_0)N_j(z)} = \frac{[1 + D_j\delta(z_0)][1 + D_i\delta(z)]}{[1 + D_i\delta(z_0)][1 + D_j\delta(z)]} \quad (16)$$

Met behulp van de twee verhoudingen, V_{13} en V_{23} kan door de formules (17) en (18) de depolarisatie verhouding worden bepaald..

$$\delta(z) = \frac{1 - V_{13}[1 + D_1\delta(z_0)]/[1 + D_3\delta(z_0)]}{D_3V_{13}[1 + D_1\delta(z_0)]/[1 + D_3\delta(z_0)] - D_1} \quad (17)$$

$$\delta(z_0) = \frac{1 - V_{23}[1 + D_3\delta(z)]/[1 + D_2\delta(z)]}{D_2V_{23}[1 + D_3\delta(z)]/[1 + D_2\delta(z)] - D_3} \quad (18)$$

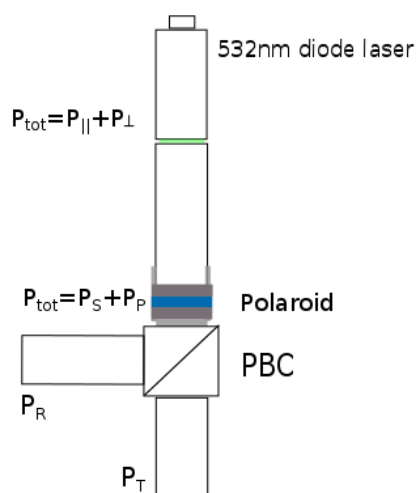
Met deze twee formules zijn de waarden voor $\delta(z)$ en $\delta(z_0)$ op te lossen wanneer de waarden voor D bekend zijn. De waarden van D worden bepaald door de efficiëntie coëfficiënten van de verschillende kanalen. Deze waarden kunnen experimenteel bepaald worden of er kan een waarde worden aangenomen op basis van de bekende specificaties van de optische elementen. Tijdens de test van deze methode zijn de volgende waarde aangenomen op basis van het artikel van Reichardt et. al. [10]. Kanaal 1 is het kanaal waarin het parallelle signaal wordt opgevangen, $D_1 = 2529$. In kanaal 2 wordt het loodrecht gepolariseerde signaal gedetecteerd met een efficiëntie ratio van $D_2 = 0.038$. Het totale signaal wordt opgevangen in kanaal 3 en daarvan is $D_3 = 0.705$. Naast de waarden voor de efficiëntie ratio's die zijn aangenomen is er ook in niet gecorrigeerd voor de het niet perfect uitgelijnde systeem, dus de aanname is gedaan dat deze perfect is uitgelijnd. Met de gemeten waarden en de aangenomen efficiëntie ratio's zijn de waarden voor $\delta(z)$ en $\delta(z_0)$ op te lossen met een rekenprogramma. Het voordeel van deze methode is dat er geen aparte kalibratie handeling nodig is. Een meting kan gelijk uitgevoerd worden. Met de signalen van de drie kanalen kunnen met behulp van een rekenmethode, de depolarisatie verhoudingen bepaald worden. Het nadeel van de methode is dat voor een nauwkeurige meting de efficiëntie ratio's van de kanalen goed bekend moeten zijn. Hiervoor zijn nauwkeurige experimentele metingen in een lab nodig.

4. METHODE EN OPSTELLING

Uit hoofdstuk 3 is duidelijk geworden wat voor signalen er voor de verschillende methoden nodig zijn om de volume depolarisatie te kunnen meten. Dit hoofdstuk beschrijft als eerste de test metingen in het lab die zijn uitgevoerd om te kijken of de methoden werken als verwacht. Hierbij wordt de gebruikte opstelling beschreven en de gebruikte meetmethode. Vervolgens is de polarisatie ontvanger weer teruggeplaatst in Caeli en zijn er metingen gedaan. De specificaties en de meetmethode van de lidar zullen ook kort worden toegelicht.

4.1 TEST OPSTELLING IN DE BILT

Voor de ± 45 kalibratiemethode was het nodig de originele opstelling van de POL-receiver aan te passen. Om dit te realiseren is de POL-receiver uit Caeli gehaald in Cabauw en weer opgebouwd in een optisch lab in De Bilt. Dit lab wordt o.a. gebruikt voor kalibratie van zonnemeters en stralingsmeters. Hier is een testopstelling gerealiseerd om de ± 45 graden kalibratiemethode te testen. Dit met als doel te begrijpen hoe de methoden precies werken en hoe deze met de opstelling uitgevoerd moeten worden.



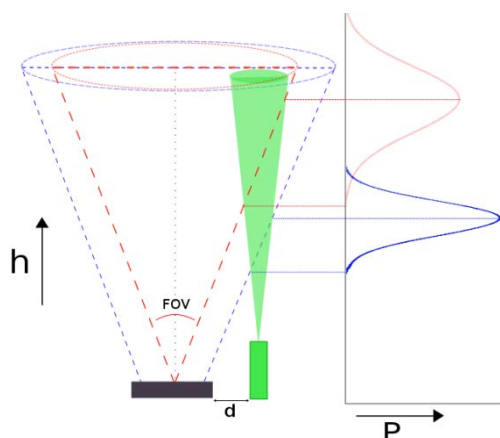
Figuur 11: Schematische weergave van de test opstelling. Deze opstelling maakt gebruik van een on gepolariseerde 532nm laserbron met een vermogen van 8 mW die verzwakt wordt met een ND4.0 filter. Het licht van de laser wordt via een fiber en een collimator rechtstreeks op de telescoop van de POL-receiver gemonteerd. Het licht wordt door de PBC gesplitst op basis van de polarisatierichting. De polarisatierichting die parallel is aan de polarisatierichting van de laser, wordt door gelaten. De polarisatierichting die daar loodrecht op wordt door de PBC gereflecteerd. Het licht wordt gedetecteerd in zeer gevoelige PMT's die zowel een analoog signaal kunnen geven als individuele fotonen kunnen tellen (Hamamatsu R7400 serie).

Figuur 11 geeft een schematische weergave van de testopstelling. De 532 nm diode laser dient als lichtbron tijdens het testen van de opstelling. Deze heeft dezelfde golflengte als het licht dat in de lidar wordt gebruikt vanwege golflengte afhankelijke onderdelen in de POL receiver. De laser is via een fiber en een collimator direct aan de telescoop gekoppeld. Als toevoeging voor de kalibratie is er een polaroid in een draaibaar frame tussen het interferentie filter en de telescoop geplaatst. Er is een polaroid gebruikt omdat er nog geen beschikking was over een half lambda plaatje. Na de kalibratiemetingen kan de polaroid weer uit de opstelling worden gehaald en de telescoop worden teruggeplaatst om de reguliere metingen uit te voeren. Als de opstelling gereed is wordt eerst het achtergrondsignaal gemeten. Hierbij wordt de opstelling donker afgesloten en wordt het gedetecteerde signaal opgeslagen. Daarna wordt het signaal gemeten, de waarde van deze metingen worden gecorrigeerd met het achtergrondsignaal.

Bij deze kalibratiemethode wordt er gemeten met de polaroid in twee verschillende standen, namelijk 45 graden en -45 graden. In deze standen worden de intensiteiten van de beide kanalen gemeten en de verhouding tussen deze waarden bepaald. Dit gebeurt met een programma dat eerst de gemiddelde waarde van de meetreeksen bepaalt en daarmee verder rekent. Er wordt gerekend met een gemiddelde waarde omdat in deze opstelling een continu signaal wordt gemeten van de lichtbron. Dit verschilt van de situatie in Caeli waar een verticaal profiel van de atmosfeer wordt bepaald, waarbij de depolarisatie verhouding per hoogte verschilt. Vervolgens is via de methode, zoals in paragraaf 3.2 beschreven, de relatieve versterkingsfactor van het systeem (V^*) bepaald. Wanneer deze berekend is kan er gemeten worden zonder de polaroid in het systeem en kan de volume depolarisatie van de metingen worden bepaald. In dit geval is deze gelijk aan één, omdat de lichtbron onpolariseerd is.

4.2 OPSTELLING CABA UW

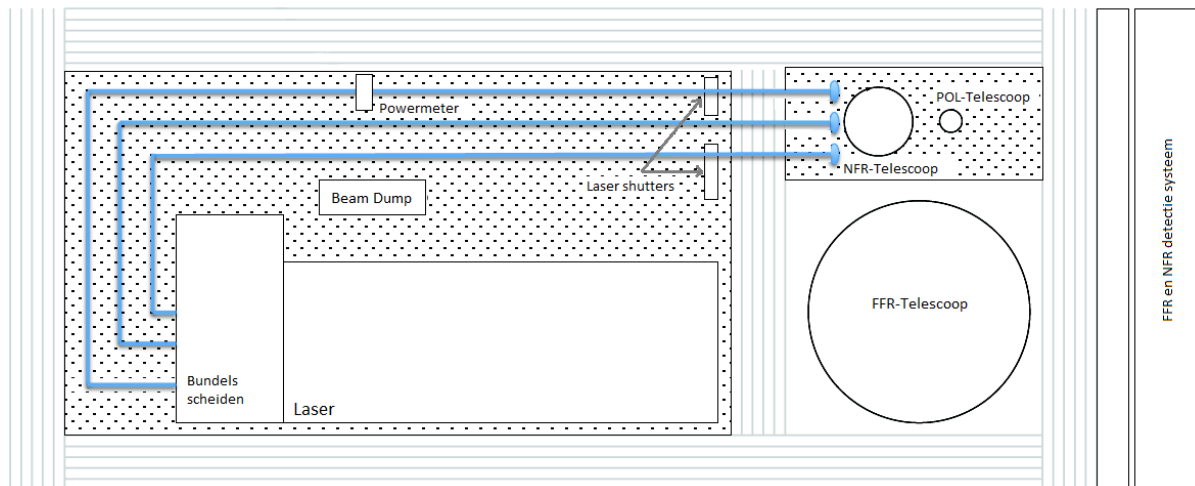
De polarisatie ontvanger is weer terug geplaatst in Caeli. Daarbij is het polaroid vervangen door een half lambda plaatje. De lidar beschikt over een Q-switched Nd:YAG laser waarmee 1064 nm pulsen worden gegenereerd met een vermogen van ongeveer 45W en een pulstijd van 10 ns. De gepulste output van de Nd:YAG laser wordt vervolgens verdubbeld en verdrievoudigd. Door deze verdubbeling (Second Harmonic Generation, SHG) en verdrievoudiging (Third Harmonic Generation, THG) van de frequentie van het licht worden 532 nm en 355 nm pulsen verkregen. Elk van deze bundels heeft een ander vermogen. Dit is mede het gevolg van de frequentie-verdubbeling en -verdrievoudiging waarbij een deel van de energie in het proces verdwijnt. De verdeling is als volgt: infrarode licht heeft een vermogen van 12W, het groene licht een vermogen van 5W en het UV-licht een vermogen van 10W. Het verstrooide licht moet opgevangen worden om de gewenste informatie te verkrijgen. Omdat de intensiteit van het licht afhangt van de afstand tot de lidar zijn er drie verschillende telescopen beschikbaar om zo veel mogelijk van het verstrooide signaal op te vangen. De verschillen tussen de telescopen zit in de locatie van de telescoop ten opzichte van de uitgaande laserbundel en de grootte van het gezichtsveld van de telescoop (Field Of View, FOV). Om informatie over het terug verstrooide licht te kunnen ontvangen is het belangrijk dat de FOV van de telescoop een overlap heeft met de uitgaande laserbundel. Afhankelijk van de waarde van de FOV en de afstand (d) tot de laser, wordt het signaal van dichtbij of van veraf wel of niet opgevangen, figuur 12 geeft dit schematisch weer.



Figuur 12: Schematische weergave van het effect van de grootte van de FOV en de afstand d tot de laser, op het ontvangen signaal P . De rode lijnen geven een kleinere FOV aan dan de blauwe lijnen. Wanneer de afstand d verandert, verandert daarmee de hoogte h waar de overlap plaatsvindt.

In figuur 12 is te zien dat hoe kleiner de FOV hoe later de overlap tussen het FOV en de bundel plaatsvindt. Naast de grootte van de FOV is de afstand van de telescoop tot de laser, d , ook van invloed op de mate van overlap. Op het moment dat de hele laserbundel volledig binnen het gezichtsveld is, is het ontvangen signaal het grootst. De reden dat het signaal daarna afneemt is de

toenemende afstand tot de telescoop. Voor de signalen die van ver moeten komen is er een telescoop met een diameter van 57cm geïnstalleerd de Far Field Receiver (FFR). Deze telescoop heeft een FOV van 1 mrad en bevindt zich op een grotere afstand van de laser en is daarom te klein om signalen van dichtbij op te vangen. Voor de signalen van dichtbij is er beschikking over een kleinere telescoop met een diameter van 15 cm die dicht bij de laser staat en een FOV van 1.4 mrad. De polarisatie ontvanger beschikt over een telescoop met een diameter van 5 cm en een FOV van 5 mrad en vangt vooral het signaal van dichtbij op [2].



Figuur 13: De laser opstelling in Caeli. 1064 nm laserlicht wordt gegenereerd in een Nd:YAG laser. De output wordt vervolgens versterkt en de frequentie wordt verdubbeld (SHG) en verdrievoudigd (THG). Door drie verschillende spiegels worden de bundels de atmosfeer ingezonden en door drie verschillende telescopen wordt het licht weer opgevangen.

Figuur 13 laat een bovenaanzicht zien van de opstelling van het lasersysteem en de telescopen in Caeli. In dit figuur is te zien hoe het licht vanuit de Nd:YAG laser wordt versterkt en de frequentie wordt verdubbeld en verdrievoudigd. Hierna zijn de paden van de verschillende golflengtes van het licht in de figuur weergegeven. Elk van de golflengtes wordt met een aparte spiegel de atmosfeer ingestuurd. Deze spiegels maken het ook mogelijk om de richting van de lichtbundel een beetje bij te sturen om een goede overlap van de laser bundel en de FOV van de telescoop te realiseren. Het licht dat wordt opgevangen door de telescopspiegels wordt in een fiber gekoppeld waardoor het licht naar de verschillende detectie kanalen wordt geleid. Met de NFR en FFR detectie kanalen wordt het totale signaal en de ontvangen Raman signalen gemeten. Deze signalen geven informatie over waterdamp en wolken. De NFR gebruikt het signaal van de kleine telescoop die het licht van dichtbij op kan vangen en de FFR gebruikt het signaal wat door de grote telescoop wordt opgevangen. Naast die twee telescopen bevindt er zich een derde telescoop, de polarisatie ontvanger. Tijdens de metingen aan de depolarisatie van het uitgezonden licht wordt het signaal van de POL-R gebruikt. De kalibratiemetingen worden gedaan met het half lambda plaatje op +22,5 graden en op -22,5 graden.

5. RESULTATEN

Met behulp van de opstellingen die in hoofdstuk 4 staan beschreven zijn testmetingen gedaan en metingen met Caeli. De testmetingen zijn bedoeld om meer begrip te krijgen van de methode en werking van de ± 45 graden kalibratiemethode en komen verder in dit hoofdstuk niet aan de orde. Nadat de testmetingen zijn uitgevoerd in het lab is de polarisatie ontvanger terug geplaatst in Caeli, waar vervolgens metingen zijn gedaan om te testen of alles nog werkt en om de drie kalibratiemethoden te testen. De resultaten staan in dit hoofdstuk beschreven.

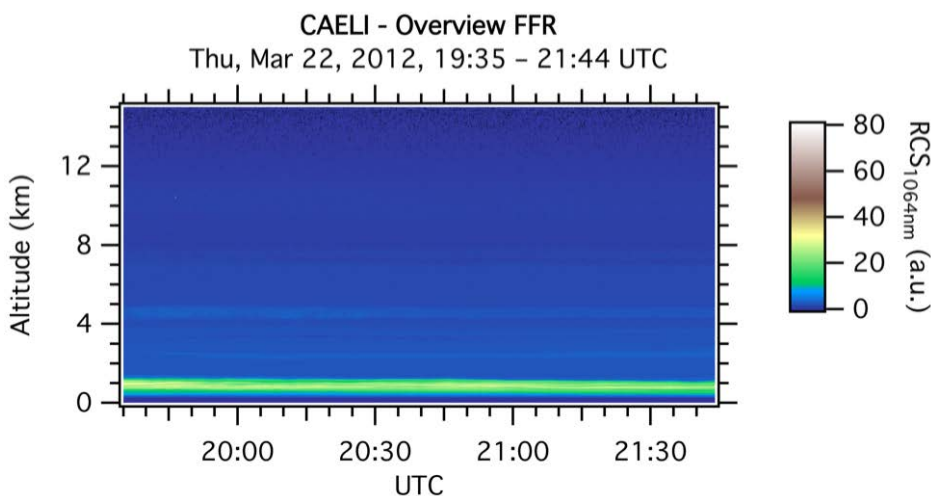
5.1 AEROSOLVRIJE METINGEN

Voor de moleculaire kalibratietechniek zijn er metingen gedaan van de atmosfeer met een aerosolvrije range. Figuur 14 laat een momentopname zien van de lucht op het moment dat de meting werd gedaan. Op de foto is duidelijk te zien dat de lucht helder is en dat er geen wolken aanwezig zijn.



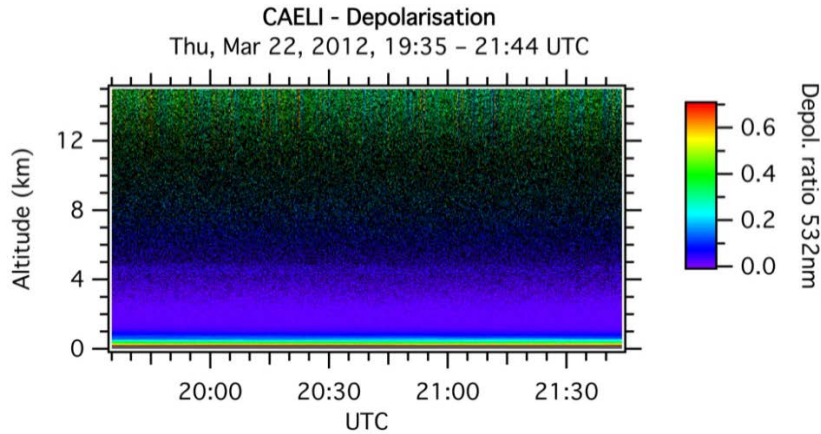
Figuur 14: Foto van de lucht op de meetlocatie op de tijd van de meting.

Er is gebruik gemaakt van twee metingen. De eerste meting is vóór de aanpassing aan het systeem en de andere is uitgevoerd nadat het systeem is aangepast. Uit de theorie is de depolarisatie ratio van een aerosolvrije atmosfeer bekend. Met het gegeven dat de polarisatie ontvanger een transmissiebandbreedte heeft van 1,0 nm en de temperatuur (op de gemeten hoogte) aangenomen op 240 K, is de moleculaire depolarisatie verhouding gelijk aan $\delta_{mol} = 4,43 \cdot 10^{-3}$ (figuur 5) [7]. In figuur 15 is een lidar opname te zien van 22 maart 2012. De opname is gemaakt met de FFR-telescoop en laat het ontvangen backscatter signaal zien met een golflengte van 1064 nm, afhankelijk van de hoogte en de tijd.



Figuur 15: Range corrected signal (RCS) van het ontvangen verstrooide licht (1064 nm) met de FFR. Het signaal is uitgezet tegen de tijd en de hoogte van het ontvangen signaal.

In figuur 15 is te zien dat er weinig of geen structuur is vanaf een hoogte van 2 km en dat er vrijwel geen licht terug ontvangen wordt vanaf die hoogte. Het feit dat de intensiteit van het signaal minder dan 10 a.u. is, impliceert dat er weinig tot geen depolarisatie plaats vindt. Omdat er geen depolarisatie plaats vindt wordt er aangenomen dat er geen aerosolen in die range aanwezig zijn. Dit wordt bevestigd wanneer er gekeken wordt naar het signaal dat met de POL-R is opgevangen. Figuur 16 laat de mate van de relatieve depolarisatie verhouding zien aan de hand van een kleur, afhankelijk van de hoogte en tijd. De depolarisatie verhouding is verkregen door de verhouding van kanaal P_R ten opzichte van kanaal P_T . Vervolgens is deze verhouding genormaliseerd tussen 0 en 0,6.



Figuur 16: De relatieve depolarisatie ratio uitgezet tegen de hoogte en de tijd.

Het signaal vanaf 12 km laat een korrelig patroon van groene stippen zien. Dit is echter te wijten aan ruis. Het signaal van die hoogte is te zwak om op die hoogte een betrouwbare waarde voor de depolarisatie verhouding te verkrijgen. De reden dat het signaal toch tot die hoogte wordt weergegeven is zodat het signaal tot dezelfde hoogte wordt weergegeven als in figuur 15. Op basis van deze metingen is het signaal vanaf een hoogte van 2 km tot 2,5 km genomen als aerosolvrije range. Er is voor deze range gekozen omdat daar de relatieve depolarisatie verhouding het constantst is. De keuze in de aerosolvrije range is erg bepalend voor de waarde van k en daarom voor de waarde van de depolarisatie ratio. De signalen zijn in dit stuk gesommeerd en de verhouding tussen kanaal P_T en kanaal P_R is vervolgens berekend. Met behulp van deze waarde en de bekende moleculaire depolarisatie ratio is de kalibratieconstante k met formule (6) bepaald. In tabel 1 staan de waarden waarmee de constante k is berekend.

Tabel 1: De waarden van de berekeningen met onnauwkeurigheid.

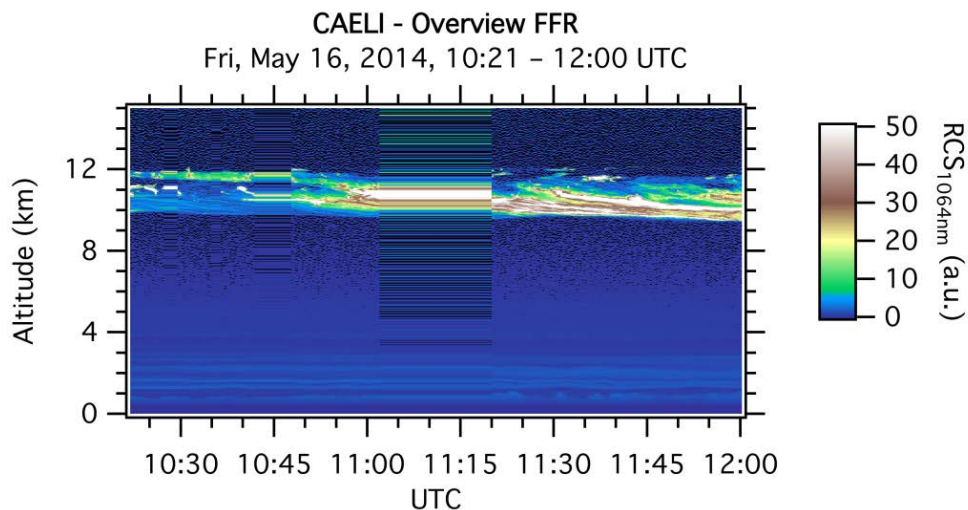
δ_{mol}	$\sum P_{Tm}$	$\sum P_{Rm}$	P_{Tm}/S_{Rm}	k
$4,5 \pm 0,05 \cdot 10^{-3}$	$5,66 \pm 0,1 \cdot 10^3$ mV	$54,2 \pm 0,1$ mV	$104 \pm 0,5$	$0,46 \pm 0,007$

Voor de onnauwkeurigheid in de kanalen P_R en P_T is de standaard afwijking genomen en voor de moleculaire depolarisatie ratio is de afleeson nauwkeurigheid genomen. De onnauwkeurigheid in P_{Tm}/S_{Rm} en k kunnen vervolgens worden bepaald met formule (19).

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} \quad (19)$$

Hierin is G de berekende grootheid en ΔG de te berekenen onnauwkeurigheid in de bepaalde grootheid. Deze onnauwkeurigheid wordt verkregen met de bekende relatieve onnauwkeurigheden in de gemeten grootheden x en y . Formule (19) geldt alleen wanneer de grootheid wordt berekend doormiddel van een product of een quotiënt. In beide gevallen is er sprake van een product, formule (5) en (6), dus kan formule (19) worden toegepast.

Omdat de meting van 22 maart 2012 is uitgevoerd voordat het half lambda plaatje in het systeem werd geplaatst is er ook een aerosolvrije range gekozen in de meting nadat het systeem was aangepast. Figuur 17 laat een opname zien die is gemaakt van het signaal dat met de FFR is opgevangen. Hier in is het RCS signaal uitgezet tegen de hoogte en de tijd. Er zijn 4 verstoringen in het signaal te zien rond 10.20 UTC, 10.35 UTC, 10.45 UTC en tussen 11.05 en 11.20 UTC. Deze worden veroorzaakt wanneer de metingen worden gepauzeerd en vervolgens weer worden hervat. In de data verwerking wordt vervolgens het gat opgevuld met de kleur van de laatst waargenomen waarde, dit veroorzaakt een strepen patroon. De structuur die rond de 10 km in figuur 17 te zien is, is afkomstig van een cirrus wolk als gevolg van contrails (vliegtuigstrepen). Dit wordt nader toegelicht in de volgende paragraaf.



Figuur 17: RCS uitgezet tegen de hoogte en de tijd, gemeten op 16 mei 2014.

De meting uit figuur 17 is gedaan op 16 mei 2014. Uit de metingen is een aerosolvrije range gekozen van 877,5 m tot 1195,5 m. In deze range was het signaal het minst aan het fluctueren. In tabel 2 zijn de gemeten en berekende waarden weergegeven met de onnauwkeurigheden.

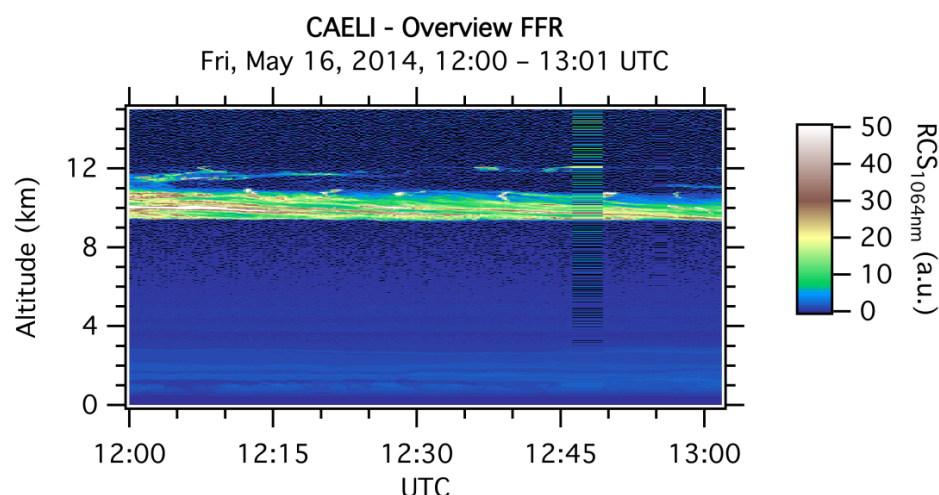
Tabel 2: De waarden van de berekeningen met onnauwkeurigheid.

δ_{mol}	$\sum P_{Tm}$	$\sum P_{Rm}$	P_{Tm}/S_{Rm}	k
$4,5 \pm 0,05 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \pm 0,2 \cdot 10^2 \text{ mV}$	$7,7 \pm 0,6 \text{ mV}$	65 ± 7	$0,29 \pm 0,03$

De onnauwkeurigheden in de waarden uit tabel 2 zijn op dezelfde manier bepaald als bij de meting van 22 maart 2012. De waarden in de aerosolvrije range van deze meting variëren sterker dan die van de meting hiervoor. Dit zorgt voor een grotere onnauwkeurigheid in de metingen van P_{Tm} en P_{Rm} en daardoor in de bepaling van k . Daarom zal voor de berekening van de depolarisatie ratio, gebruik gemaakt worden van de waarde van k die berekend is met de data van 22 maart 2012.

5.2 ± 45 GRADEN KALIBRATIEMETINGEN

Om het systeem volgens de ± 45 graden methode te kalibreren wordt er gemeten met een half lambda plaatje in het systeem. Er is gemeten met een redelijk constante atmosfeer om te voorkomen dat tussen de twee metingen door de omstandigheden sterk veranderen. In figuur 18 is de situatie van de atmosfeer te zien tijdens de metingen op 16 mei 2014. De signalen zijn gemeten met de FFR-telescoop en zijn vervolgens gecorrigeerd voor de hoogte. Dit is gedaan door het signaal te vermenigvuldigen met de hoogte in het kwadraat, omdat de intensiteit van het signaal afneemt met de hoogte in het kwadraat.



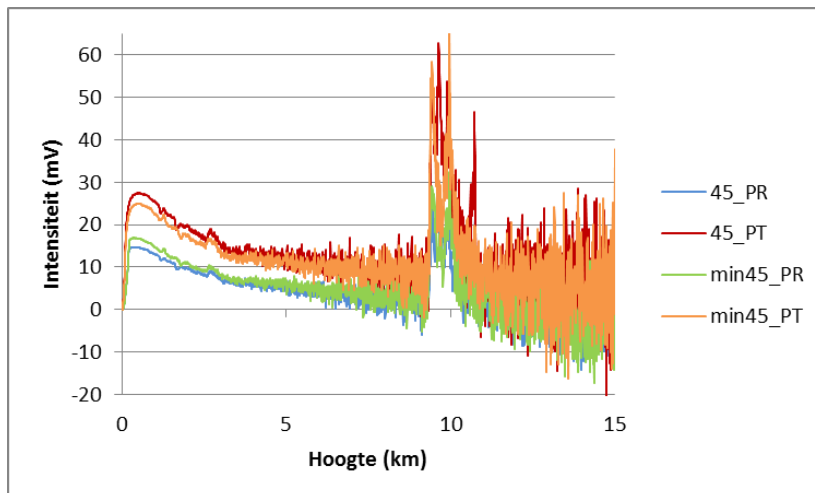
Figuur 18: Opname van de FFR waar het Range corrected signal (RCS) van het ontvangen verstrooide licht (1064 nm) is uitgezet tegen de tijd en de hoogte. Het signaal is gemeten met het half lambda plaatje op nul graden.

Het signaal dat in figuur 18 is weergegeven laat zien dat er op een hoogte van ongeveer 10 km tot 11 km een structuur bevindt. Uit waarnemingen is geconcludeerd dat dit een cirrus wolk is afkomstig van contrails (vliegtuigstrepen). Een cirrus wolk wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van ijskristallen, die op hun beurt weer een depolarisatie aan het licht aanbrengen. De verstoring in het signaal rond 12.50 UTC wordt veroorzaakt vanwege het feit dat de meting toen even is gestopt en vervolgens weer is voortgezet. Figuur 19 laat een moment opname zien van de lucht boven de meetlocatie op het moment van de metingen in figuur 18.



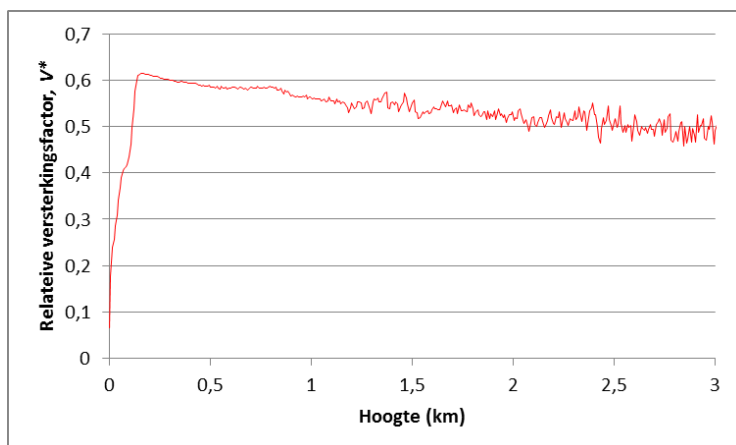
Figuur 19: Foto van de lucht boven de meetlocatie op de tijd van de meting.

Het ingekomen signaal wordt van polarisatierichting veranderd naar een richting met een hoek van 45 graden ten opzichte van de polarisatierichting van het laserlicht. Een polarisatierichting van 45 graden levert twee even grote polarisatie componenten.



Figuur 20: Range corrected lidar signalen van beide kanalen bij +45 en -45 graden. Hierbij is de intensiteit in mV uitgezet tegen de hoogte in km van waar het signaal vandaan komt. P_P P_T

In figuur 20 zijn de signalen per kanaal gegeven bij zowel +45 graden als -45 graden. Hieruit is op te merken dat in beide gevallen het signaal in de kanalen bijna even groot zijn. Daarnaast valt op dat het signaal van kanaal P_T in beide gevallen groter en iets meer ruis heeft dan het signaal van kanaal P_R . Het ruissignaal neemt ook toe naarmate de afstand tot de ontvanger groter wordt. Dit komt vanwege het feit dat het signaal steeds zwakker wordt en de signaal/ruis verhouding kleiner wordt. De piek die aan het begin te zien is komt vanwege verstrooiing op lage hoogte ten opzichte van de ontvanger. Het signaal dat van dichtbij wordt gereflecteerd heeft een hogere intensiteit ten opzichte van signalen die van verder weg worden opgevangen. Dit is enigszins gecorrigeerd door het signaal te vermenigvuldigen met de hoogte in het kwadraat. Rond de 10 kilometer is een duidelijke piek te zien in de intensiteit van beide kanalen. Deze piek vindt zijn oorsprong in het feit dat er rond die hoogte een cirrus wolk aanwezig is, zoals in figuur 18 is te zien. Met de signalen van het P_T en P_R kanaal in de twee 45 graden posities zijn de relatieve verhoudingen tussen kanaal P_R en P_T bepaald afhankelijk van hoogte z . Vervolgens is met formule (12) de relatieve versterkingsfactor bepaald. Aangezien deze versterkingsfactor een constante moet zijn is er gekeken naar de hoogte waarop de waarde van V^* het meest constant is, zie figuur 21.

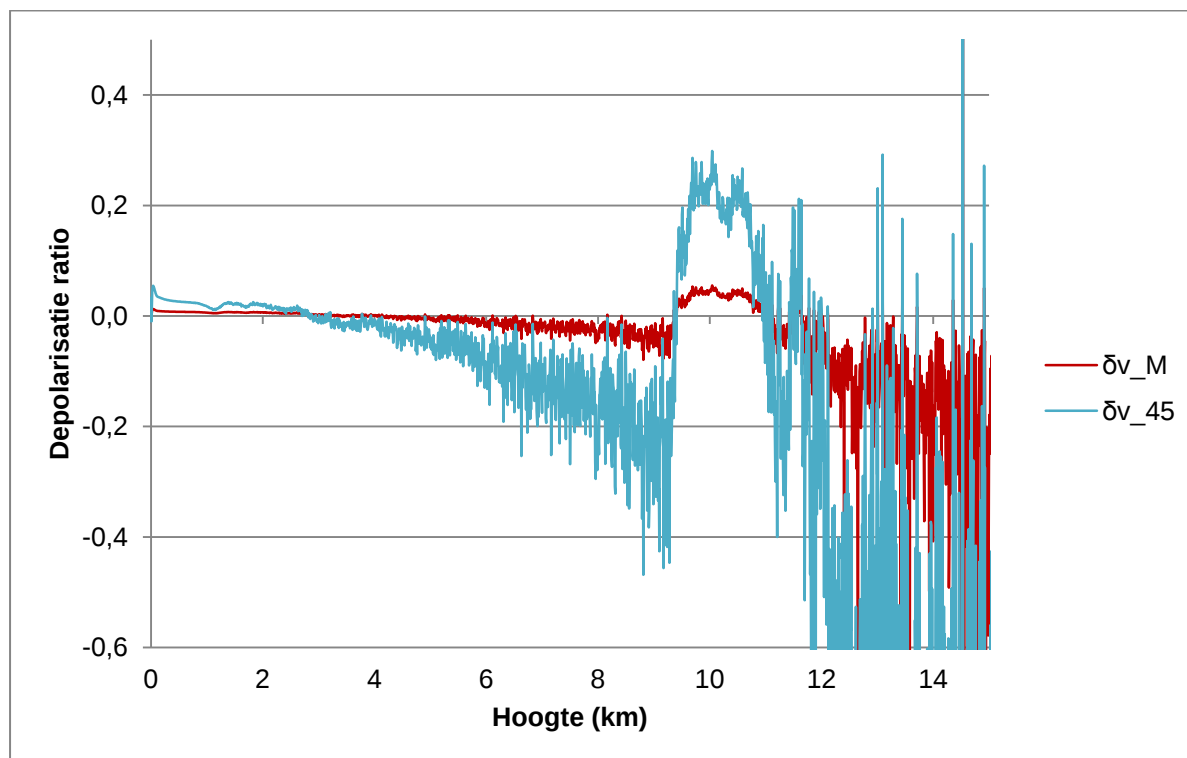


Figuur 21: Relatieve versterkingsfactor uitgezet tegen de hoogte.

Uit figuur 21 blijkt dat het signaal het meest stabiel is tussen de 500 m en de 900 m. Over deze range is de waarde van V^* gemiddeld en is de standaarddeviatie berekend als onnauwkeurigheid in de bepaalde waarde. De waarde van de relatieve versterkingsfactor is bepaald op: $V^* = 0,59 \pm 0,02$. Nadat met de signalen een relatieve versterkingsfactor is bepaald volgens de methode beschreven in hoofdstuk 3, kan de depolarisatie verhouding worden bepaald.

5.3 VERGELIJKEN VAN METHODEN

Om de verschillende methode aan elkaar te toetsen is gekozen om de twee methoden los te laten op de situatie waarbij een cirrus wolk aanwezig was. Van een cirrus wolk is de orde grootte van de depolarisatie ratio bekend en heeft een waarde tussen de 0,2 en de 0,5 [11]. In de voorgaande paragraaf werd al aangegeven dat in de metingen van vrijdag 16 mei 2014 er op een hoogte van ongeveer 10 km een cirrus wolk aanwezig is. Deze situatie wordt daarom gebruikt om de twee methoden te vergelijken.



Figuur 22: De moleculaire kalibratiemethode vs. de ± 45 graden kalibratiemethode voor de situatie van een cirrus op een hoogte van 10 km.

De ruis op het signaal in figuur 22 wordt groter naarmate de afstand tot de ontvanger groter wordt. Daarnaast neemt de depolarisatie ratio af en wordt deze negatief. Verwacht wordt dat de waarde lineair afneemt met de hoogte en niet onder nul komt. De reden hiervoor kan zijn dat er een verstoring zit in het donkerstroomsignaal van een of beide detectoren, die veroorzaakt wordt door bijvoorbeeld een aardlus. Dit is vooral belangrijk bij het meten van kleine signalen. Het signaal dat van de cirrus komt bevat minder ruis en kan daarom wel gebruikt worden. Figuur 22 geeft een indicatie van de grote van de depolarisatie ratio berekend met de verschillende methoden. De gemiddelde waarde voor de depolarisatie ratio voor de cirrus komt uit op een waarde van $\delta^V = 0,07 \pm 0,007$ voor de moleculaire kalibratiemethode en een waarde van $\delta^V = 0,2 \pm 0,03$ voor de ± 45 graden kalibratiemethode. De onnauwkeurigheden zijn op basis van de variatie in het signaal berekend. De waarden die zijn verkregen door de ± 45 graden kalibratiemethode liggen binnen de range die uit de literatuur bekend is.

6. CONCLUSIE EN VOORUITBLIK

Het doel van dit onderzoek was het bepalen van de beste kalibratiemethode voor de polarisatie ontvanger in Caeli. Hierbij was het doel om drie verschillende methoden te testen. Uiteindelijk zijn er twee verschillende methoden getest. Als eerste is de ± 45 graden kalibratiemethode getest. Voor deze methode is de oorspronkelijke opstelling aangepast door een half lambda plaatje in de opstelling te monteren. Hierdoor kon er data worden verkregen bij $+45$ graden en bij een hoek van -45 graden. Dit geeft de mogelijkheid om met een bepaalde rekenmethode de waarde van de depolarisatie ratio te bepalen. Als tweede is de moleculaire kalibratietechniek getest. Voor deze methode is data nodig van een aerosolvrije range binnen de atmosfeer. Op de data van die situatie wordt het systeem gekalibreerd en wordt er een kalibratieconstante bepaald. De derde methode is geprobeerd uit te voeren maar al snel bleek dat er onvoldoende gegevens over de methode en over het systeem bekend waren om zinnige informatie te verkrijgen. Voor deze methode zou geen kalibratie handeling nodig zijn. Echter was het wel vereist om de efficiëntie ratio's van de verschillende kanalen nauwkeurig te bepalen. Hiervoor zou de opstelling gedemonteerd moeten worden en is speciale apparatuur nodig die niet voor handen was. Met de aannamen voor de efficiëntie ratio's werden geen zinvolle waarden voor de depolarisatie ratio gevonden. Dit kan worden verklaard doordat de aangenomen waarden uit een artikel kwamen waarbij een ander systeem is gebruikt.

De twee andere methoden zijn getest op een situatie waarin er een cirrus wolk op een hoogte van 10 kilometer aanwezig was. Met de moleculaire kalibratiemethode is de depolarisatie ratio van de cirrus bepaald op een waarde van $\delta^V = 0,07 \pm 0,007$. De depolarisatie ratio is met de ± 45 graden kalibratiemethode bepaald op een waarde van $\delta^V = 0,2 \pm 0,03$. Duidelijk blijkt hier uit dat de waarde die met de ± 45 graden methode is bepaald in de range valt van de waarde uit de theorie. Uit de theorie zijn er waarden voor de depolarisatie ratio bekend tussen de 0,2 en de 0,5 voor een cirrus wolk.

Wat opvalt is dat de waarde voor de depolarisatie ratio, berekend met de moleculaire kalibratietechniek, sterk afwijkt van de bekende waarden. Een reden voor deze afwijking zou kunnen zijn dat er voor de aerosolvrije metingen oude data is genomen. Hiermee is de kalibratieconstante k bepaald van het systeem waarmee destijds werd gemeten. In de tussentijd is het systeem gewijzigd en dit zorgt er voor dat de waarde van k zou kunnen afwijken. Deze afwijking kan veroorzaakt worden door het half lambda plaatje dat is toegevoegd, met de daarbij horende optische eigenschappen die het signaal beïnvloeden. Daarnaast kan de gevoeligheid van de detectoren zijn afgenomen. Door nieuwe metingen met het huidige systeem uit te voeren en opnieuw de waarde van k te berekenen, vervallen deze factoren van onzekerheid. Een andere reden kan zijn dat tijdens het installeren van het lambda plaatje er andere onderdelen zijn verdraaid of niet meer goed staan uitgelijnd. De onnauwkeurigheid wordt ook veroorzaakt door het feit dat de gekozen aerosolvrije range niet aerosolvrij hoeft te zijn. De waarde voor de depolarisatie ratio was gemakkelijk te manipuleren door een ander deel van de atmosfeer als aerosolvrije range te nemen. Dit geeft ook gelijk het nadeel van deze methode weer.

Uit de verkregen waarden kan geconcludeerd worden dat de ± 45 graden kalibratiemethode de betere methode is onder de gegeven condities. Met deze methode kan de waarde worden bepaald van de depolarisatie ratio met een acceptabele onnauwkeurigheid en binnen de range die uit de theorie bekend is. De kalibratiemethode kan eenvoudig worden uitgevoerd omdat het half lambda plaatje in het systeem is geïmplementeerd. In de toekomst zullen er meer metingen met het huidige systeem moeten worden gedaan onder verschillende omstandigheden. Dit biedt een beter inzicht in de kwaliteit van het nieuwe kalibratiesysteem. De kalibratiemethode lijkt een verbetering te zijn van het systeem. Door extra metingen zal moeten blijken of dit daadwerkelijk zo is. Daarnaast moet de rekenkundige bewerking in het huidige dataverwerkingsproces worden opgenomen zodat dit niet meer handmatig hoeft te gebeuren.

REFERENTIES

Afbeelding omslag: Foto M. de Graaf, RIVM

- [1] Depuydt P. et. al. (2004), Warmtebalans op aarde, Geoscoop 5/6, Mechelen: Plantyn Wolters.
- [2] Apituley A. (2009), Performance Assessment and Application of Caeli – A high-performance Raman lidar for diurnal profiling of Water Vapour, Aerosols and Clouds. Delft: 8th International Symposium on Thropospheric Profiling.
- [3] Tropos (2013), Application of lidar to discriminate between ice crystals and cloud droplets, Mei 2014.

<http://www.tropos.de/en/research/aerosol-cloud-interaction/process-studies-on-small-spatial-and-temporal-scales/aerosol-cloud-interaction/remote-sensing-of-heterogeneous-ice-formation/detection-of-water-drops-and-ice-crytals-in-natural-clouds-with-lidar-and-radar/>
- [4] Volker Freudenthaler (2008), “Depolarization ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006”, Stockholm: Tellus.
- [5] Liou K.N. (2002), An Introduction to Atmospheric Radiation, San Diego: Elsevier Science
- [6] Sassen K. (2005), “Polarization in Lidar”, New York: Springer
- [7] Behrendt A. (2002), Calculation of the calibration constant of polarization lidar and its dependency on atmospheric temperature. Washington: Optical Society of America
- [8] Burton S.P. (2012), Aerosol classification using airborne High Spectral Resolution Lidar measurements - methodology and examples, Atmospheric Measurement Techniques
- [9] Petzold A. (2010) ICAROHS- Inter-Comparison of Aerosol Retrievals and Observational Requirements for Mult-Wavelength HSRL Systems. European Space Agency. ESA Living Planet Symposium, Bergen, Norway
- [10] Reichardt, Jens (2003), Three-signal method for accurate measurements of depolarization ratio with lidar, Applied Optics: vol. 42, no. 24.
- [11] Wang Z. et al. (2008), Depolarization properties of cirrus clouds from polarization lidar measurements over Hefei in spring, Beijing: Chinese Optics Letters

BIJLAGE 1 – OPDRACHT OMSCHRIJVING

Calibratie van polarisatie lidarmetingen met de Raman lidar in Cabauw

Supervisor : Arnoud Apituley (KNMI)

Team : Marijn de Haij, Dave Donovan

BSc. Student : Anne Moerdijk

Inleiding

In het kader van klimaat monitoring en atmosferisch onderzoek wordt op het meteorologisch meetterrein van KNMI bij Cabauw een uitgebreid observatieprogramma uitgevoerd door het KNMI en verschillende partners die samenwerken binnen CESAR (Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research). In-situ metingen worden gedaan aan de grond en in de 200 meter hoge mast, maar ook Remote Sensing metingen maken deel uit van het meetprogramma. Hierbij worden onder andere optische meetmethoden gebruikt. Eén van de instrumenten is een geavanceerde Raman lidar, dat verticale profielen van waterdamp, aerosol optische eigenschappen en wolkeneigenschappen meet.

Om de eigenschappen van fijnstof/aerosolen (kleine stofdeeltjes in de lucht) en wolken goed te begrijpen zijn (de-)polarisatiemetingen van belang. Polarisatiemetingen worden gedaan door naar veranderingen van de polarisatie van het uitgezonden laserlicht te kijken. Eén van de drie ontvangers in de lidar is speciaal hiervoor ingericht. De polarisatiemetingen worden gedaan bij een golflengte van 532 nm.

Opdracht

Momenteel zijn de polarisatiemetingen niet gekalibreerd, wat voor kwantitatieve interpretatie belemmeringen oplevert. Er zijn een aantal methoden in de literatuur beschreven om de kalibratie uit te voeren.

- Het is de bedoeling van dit project om te zorgen dat er één of meerdere methoden kunnen worden toegepast in de Raman lidar.
- Bij de implementatie zal het optische systeem moeten worden aangepast zodat een kalibratie regelmatig kan worden uitgevoerd. Dit systeem zal worden getest.
- Na implementatie zullen de resultaten worden vergeleken met andere (lidar) polarisatiemetingen en zal gekeken worden naar consistentie met alternatieve kalibratiemethoden binnen het systeem zelf.
- Als de polarisatiemetingen zijn gekalibreerd kunnen deze metingen worden toegevoegd aan de dataproducten van het instrument die in de database van CESAR en het European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET) worden gezet.

Periode

10 februari 2014 – 6 juni 2014