

Windmetingen vanuit de ruimte

Dr. Ir. Ad Stoffelen, KNMI

Er is een gebrek aan windmetingen in de atmosfeer en dit bemoeilijkt onder andere waarschuwingen voor kleinschalig extreem weer en het vastleggen van het windklimaat in de tropen. Welke mogelijkheden bestaan er nu voor het verrichten van windmetingen boven gegevensarme gebieden zoals de tropen, de oceanen en het zuidelijk halfrond. Dit artikel beschrijft aardobservatietechnieken vanuit de ruimte, waaronder lasertechnieken.

De Atmosferische Dynamica

De oprichter van het KNMI [1], Prof. C.H.D. Buys Ballot, ontdekte de wetmatigheid dat wanneer je met de rug in de wind staat, je dan aan de linkerhand een lagedrukgebied hebt en aan de rechterhand een hogedrukgebied. Lage druk aan het oppervlak correspondeert met relatief hoge temperatuur of lage dichtheid in de bovenlucht, terwijl hoge druk correspondeert met relatief lage bovenluchttemperaturen. Deze wetmatigheden volgend, zou je op het eerste gezicht kunnen volstaan met druk- en temperatuurmetingen in de atmosfeer en daaruit het windveld afleiden. Voor de grote atmosferische schalen (> 500 km) werkt dit goed op onze breedtegraden. De weersvoorspelling voor enkele dagen vooruit leunt dan ook zwaar op bovenluchtmetingen van temperatuur en drukmetingen aan de grond. Satellietmetingen in het infrarood spelen hier een grote rol. Echter, in de tropen en op kleinere schalen is het juist het windveld dat de atmosferische dynamica bepaald.

Windmetingen

Bovenluchtwaarnemingen van de wind worden verkregen met behulp van vliegtuigen, het volgen van radiosonde ballonoplatingen (GPS techniek), en akoestische, optische of microgolfttechnieken vanaf de grond. We willen echter de driedimensionale structuur van het windveld vastleggen door middel van verticale profilering en dit is boven zeegebieden met deze technieken niet goed mogelijk en erg kostbaar. Windprofielmetingen vanuit satellieten kunnen hier een oplossing bieden. Maar hoe meet je bewegende lucht vanuit de ruimte ?

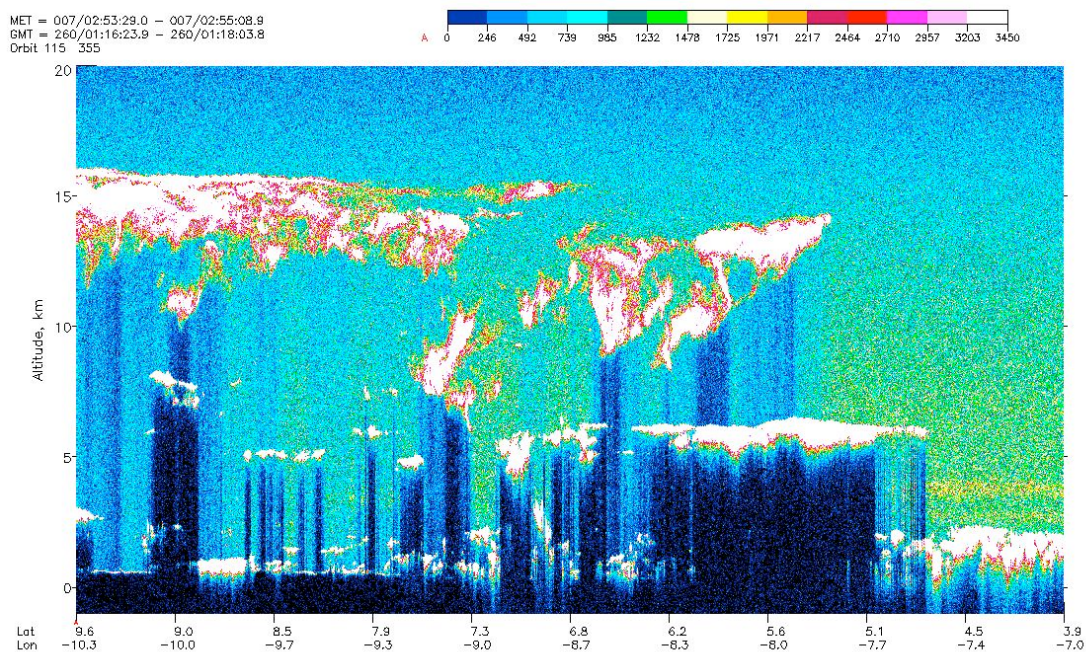
Één satelliettechniek omzeilt dit probleem en gebruikt radar [2] verstrooiing aan het zeeoppervlak om de wind aan het zeeoppervlak af te leiden. De genormaliseerde radar cross sectie onder invalshoeken van 20-60 graden neemt immers toe door verstrooiing aan een steeds ruwer zeeoppervlak bij toenemende wind. Verder blijkt de verruwing windrichtingsafhankelijk, analoog aan de rimpelingen die je ziet in een plas water bij een zuchtje wind. Omdat een theoretische beschrijving van de interactie van de microgolven met de ingewikkelde topografie van het zoute wateroppervlak te lastig is, wordt de radar cross sectie empirisch gerelateerd aan de windsnelheid en -richting op 10 meter hoogte boven het wateroppervlak. Dit soort metingen en de daaruit afgeleide windvelden zijn nu dagelijks beschikbaar [3], maar geven nog geen windinformatie in de bovenlucht op zee.

Lasers in de ruimte

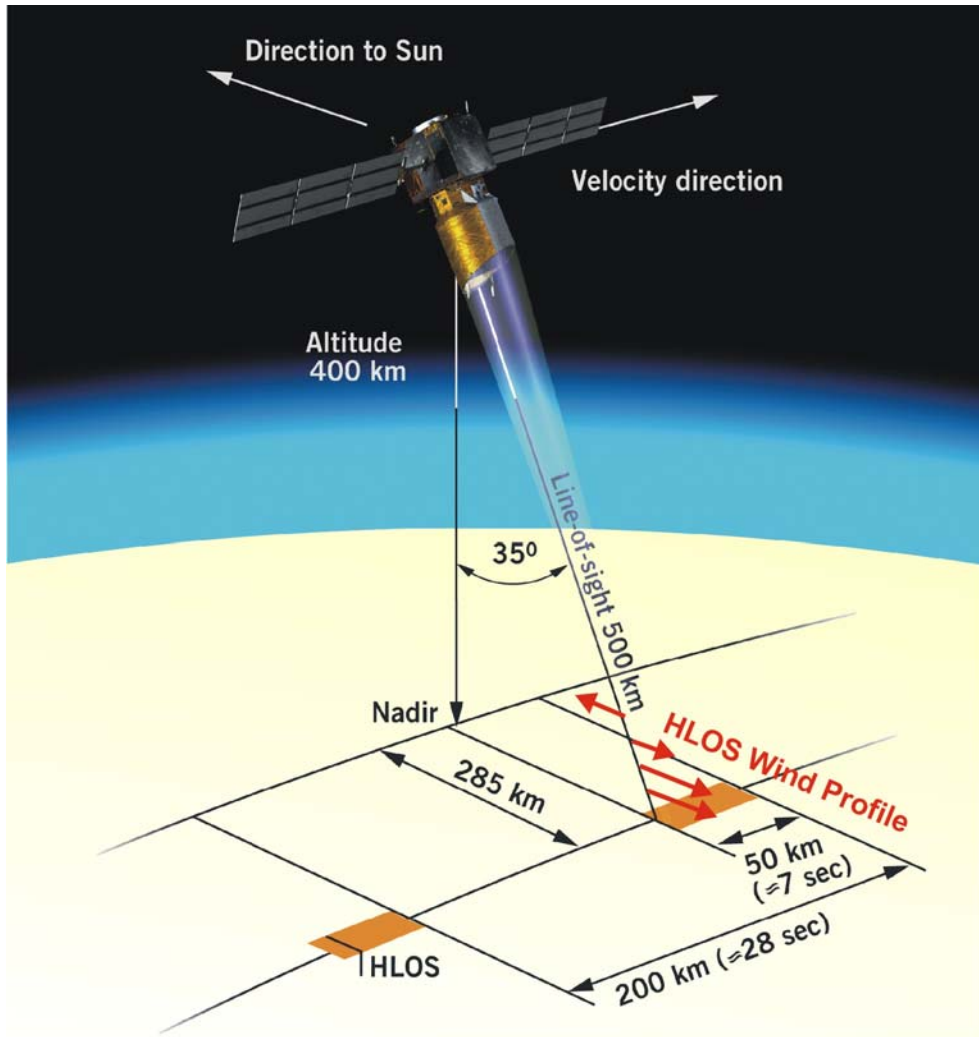
Vanuit de ruimte zijn wolken, aerosolen en molekulen in principe zichtbaar te maken met lasertechnieken op basis van verstrooiing, d.i., Light Detection And Ranging (LIDAR). Wanneer we dit zouden kunnen koppelen aan metingen van het Dopplereffect dan ontstaat

een techniek waarmee je de beweging van deze deeltjes in de atmosfeer in principe zou kunnen bepalen, een Doppler Wind Lidar (DWL). Hoe realistisch is dit nu ?

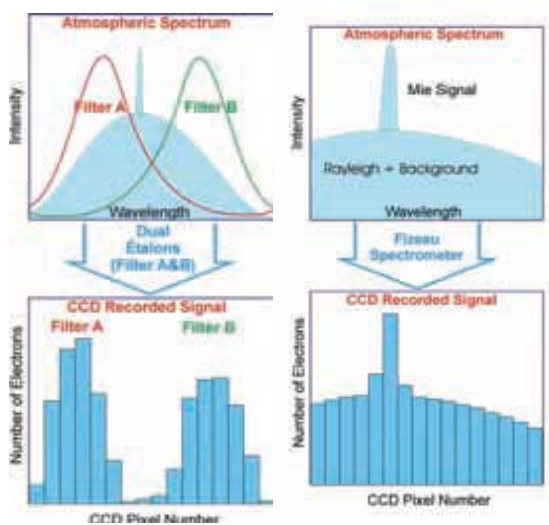
De Verenigde Staten, na een deceptie in het Strategic Defence Initiative (SDI) onder Ronald Reagan, besloot in de tachtiger jaren van de vorige eeuw om militaire laserontwikkelingen in te zetten voor civiele toepassingen, zoals het meten van windprofielen in de atmosfeer met een DWL. De National Aeronautics and Space Administration (NASA) is met diverse ontwerpen aan de slag gegaan, maar is tot op heden nog niet tot een concreet plan gekomen. De Europese Ruimtevaart Organisatie (ESA) is in de negentiger jaren een DWL ontwikkeling gestart waar de auteur nauw bij betrokken is. Hierbij zijn de eerste concepten zodanig vereenvoudigd dat een DWL missie mogelijk werd en ESA heeft de Atmospheric Dynamics Mission (ADM) na een brede gebruikersconsultatie in 1999 geselecteerd als de tweede ESA Core Earth Explorer Mission, Aeolus genoemd, naar de Griekse mythologische bewaarder van de wind [4]. De missie voorziet in de lancering van een DWL in 2011 en wordt in de sectie hieronder verder beschreven.



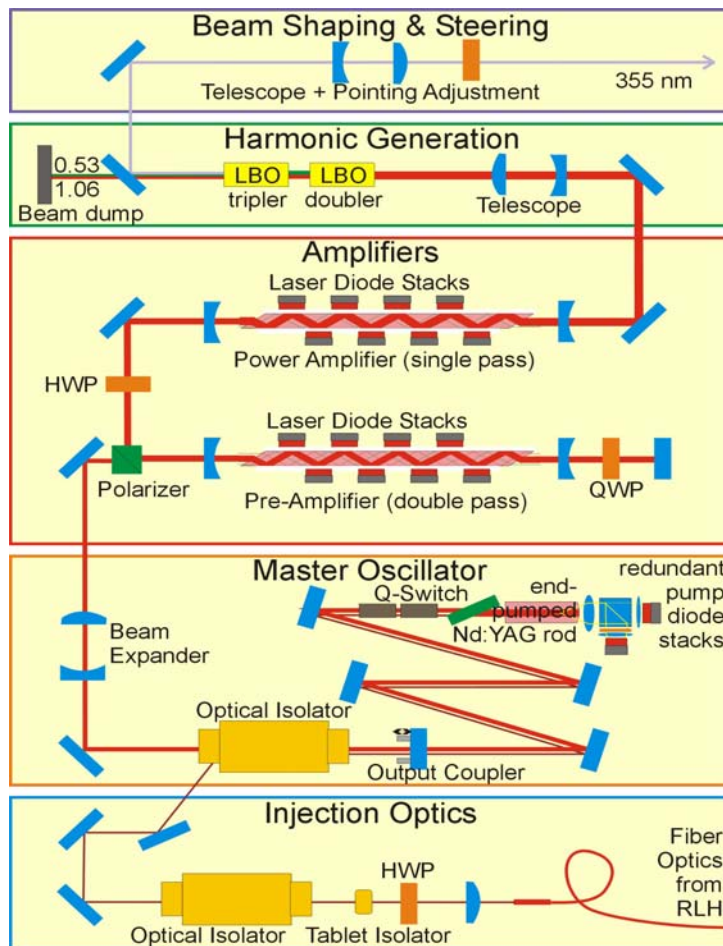
Figuur 1: Intensiteit van het teruggestrooide lidar signaal bij 355 nm gemeten met de CALIPSO satelliet [1].



Figuur 2: Schematische weergave van de Aeolus satelliet © ESA.



Figuur 3: Linksboven schematisch een Dopplerverschoven atmosferisch snelheidsspectrum met de filters A en B op de flanken van de Rayleighverdeling. Linksonder de geregistreerde CCD counts op de Rayleigh CCD. Rechtsboven het Mie signaal met een achtergrond van Rayleigh verstrooiing en omgevingsstraling © ESA.



ME 16 Oct 2007

Figuur 4: Illustratie van de Aeolus laser © ESA.



Figuur 5: Een prototype van de Aeolus satelliet op een trilplaat voor mechanische tests © ESA.



Figuur 6: Impressie van Aeolus in de ruimte © ESA.

De Aeolus missie zal niet de eerste laser in de ruimte brengen [5] en de systeemparemeters van enkele andere LIDARs zijn in de tabel hieronder aangegeven. Gegeven de verzwakking van zowel de laserbundel als het verstrooide licht met de afstand is het een groot voordeel het

instrument zo dicht mogelijk bij de aardse atmosfeer te circuleren. Echter, omdat de atmosfeer wrijving veroorzaakt en de satelliet dan afremt, is bij een lage baan extra propulsiebrandstof nodig om de satelliet niet terug te laten vallen op de aarde. Dit leidt weer tot extra gewicht en risico bij de lancering. Bij een baanhoogte van 400 km ligt hier een goed compromis. De golflengte van het licht bepaalt het verstrooiingsprincipe. Hierbij onderscheiden we verstrooiing aan deeltjes met een diameter ongeveer gelijk aan de golflengte (Mie verstrooiing) en aan deeltjes veel kleiner dan de golflengte (Rayleigh verstrooiing). Rayleigh verstrooiing aan moleculen is golflengteafhankelijk, waarbij bijvoorbeeld overdag blauw zonlicht sterker verstrooid wordt dan rood zonlicht. Dit is de oorzaak van de blauwe hemel overdag. Aerosol- en wolkendeeltjes zijn veel groter en verstrooien alle kleuren zichtbaar licht ongeveer even veel (Mie principe), waardoor belichte wolken wit zien en een heldere maar heilige dag met veel aerosol resulteert in een lichtblauwe hemel, een mix van Rayleigh en Mie verstrooiing. Met een LIDAR golflengte van 355 nm, dat is ultraviolet (UV), kan zowel de Mie als de Rayleigh verstrooiing ter plaatse van de satelliet gemeten worden, terwijl een golflengte van 1064 nm vrijwel alleen Mie verstrooiing oplevert. 1064, 532 en 355 nm kunnen met één hoogvermogen Nd:YAG laser geproduceerd worden d.m.v. niet-lineaire optica en zogeheten frequentieverdubbeling of – verdrievoudiging [6]. De lasers zijn kort gepulst zodat met relatief weinig energie over korte tijd maximale terugstrooiing plaatsvindt die boven de achtergrondstraling en andere ruistermen uitkomt. De diameter van de telescoop wordt uiteraard zo groot mogelijk gekozen, d.w.z., zodanig dat deze in de lanceerraket past. Verder, hoe groter de lanceerraket, hoe duurder de lancering, die toch vaak zo’n 30% van de totale kosten van een satelliet bedraagt. De tijdbemonstering van het teruggestrooide licht, dat is ook de bemonstering van de range, wordt gekozen afhankelijk van de beoogde toepassing.

Zonder scanning wijst de laser in een vaste richting en wordt er gemeten in een 2-dimensionaal vlak opgespannen door de baan van de satelliet en de richting van het laserlicht (Line-Of-Sight, LOS), zie figuren 1 en 2. Dit is een grote beperking voor de bemonstering van de aardse atmosfeer, maar voor sommige toepassingen, zoals de Aeolus DWL demonstratiemissie, afdoende. Het gewicht en het gebruikte vermogen zijn uiteraard belangrijke systeemparemeters voor respectievelijk de lanceringskosten en de grootte van de benodigde zonnecellen. LIDARs op satellieten worden doorgaans getest op een levenduur van 1 tot 3 jaar, hetgeen een grote uitdaging is.

Instrument name	LITE	Balkan – 1	ALISSA	ALADIN	ATLID (ESA)
Platform/Mission	Shuttle STS – 64	MIR/Spektr	MIR/Priroda	ADM (ESA)	EarthCARE
Orbit altitude (km)	260	350 – 400	350 – 400	400	400
Laser type	Nd:YAG	Nd:YAG	Nd:YAG	Nd:YAG	Nd:YAG
Wavelength (nm)	1064,532,355	532	532	355	1064
PRF (Hz)	10	0.18	50	100	100
Telescope diameter	100 cm	27 cm	40 cm	150 cm	60 cm
Range resolution	35 m	3 m	150 m	100 – 2000	15 m
Scanning					± 20°
Instrument mass	990 kg	150 kg		263 kg	240 kg
Instrument power	2000 W	250 W	3000 W	304 W	520 W

Tabel: Systeemparemeters van enkele satelliet LIDARinstrumenten [5].

Aeolus Doppler Wind LIDAR

Na de exploratie van coherente meettechnieken in het μm golflengtegebied in de vorige eeuw is de aandacht verschoven naar UV technologie in deze eeuw in het kader van Aeolus [7]. Een belangrijk voordeel van het UV is dat Rayleigh verstrooiingsmetingen aan moleculen

goed mogelijk zijn en beschikbaar in heldere en schone lucht en tot op grote hoogte (30 km). Verder zijn moleculen tamelijk homogeen verdeeld in de atmosfeer. Een Dopplermeting aan een volume van moleculen geeft bij goede benadering de gemiddelde LOS windcomponent in dat volume. Aerosolen en wolken zijn heterogeen verdeeld in de atmosfeer, bijvoorbeeld vertikaal gelaagd, en geven een minder uniforme signaalopbrengst over het meetvolume. Verder is met name een convectieve wolk geassocieerd met een circulatiepatroon met bijvoorbeeld een opgaande beweging in de wolk (tot 30 m/s!) en een neerwaartse beweging daarbuiten. Dopplermetingen, waarbij het signaal vooral afkomstig is van de Mie verstrooiing aan de rand van de wolk of van een dunne aerosollaag, kunnen dus minder representatief zijn voor de gemiddelde wind in het meetvolume.

De snelheidsverdeling van moleculen in de atmosfeer is bij benadering normaal verdeeld met een gemiddelde snelheid van de moleculen van enkele honderden meters per seconde, afhankelijk van de lokale luchtdruk en temperatuur. De nauwkeurigheid waarmee we de LOS windcomponent willen meten is ongeveer 1 m/s. De windsnelheid manifesteert zich als een verschuiving van de moleculaire snelheidsverdeling, zie figuur 3. Er is daarom gekozen om met twee Fabry-Perot [8] interferometers de signaalopbrengst te meten op de twee flanken van deze verdeling. Bij een windstille zou de signaalopbrengst op beide flanken identiek zijn, maar bij toenemende wind in de LOS richting zal de opbrengst op de rechterflank (I_B) toenemen, terwijl de opbrengst op de linkerflank afneemt (I_A), zie figuur 3. De ratio $R = (I_B - I_A) / (I_B + I_A)$ is hiermee in goede benadering proportioneel met de sterkte van de LOS wind component. Door R op verschillende hoogten in de atmosfeer te bepalen kan dus een windprofiel verkregen worden.

Een groep Nederlandse onderzoekers onder leiding van de Vrije Universiteit heeft onlangs in opdracht van ESA experimenten uitgevoerd om de moleculaire snelheidsverdeling precies vast te leggen; dit vanwege het zogeheten Brillouin effect [9]. Het effect wordt veroorzaakt door coherente molecuulbewegingen, oftewel spontane akoestische golven, voornamelijk bij hoge luchtdruk en temperatuur. Het Brillouin effect is van belang voor Aeolus omdat het de gevoeligheid van de responseratio R voor de wind met bijna 10% procent verandert bij 1000 hPa en 300 K.

De thermische snelheid van aerosolen en wolkendeeltjes is te verwaarlozen en deze deeltjes bewegen in goede benadering met de lokale wind. De breedte van de snelheidsverdeling van het verstrooide Mie signaal wordt vooral bepaald door de bandbreedte van de laserpuls, corresponderend met ongeveer 15 m/s, zie figuur 3. Een Fizeau [10] interferometer wordt gebruikt om het verstrooide spectrum te projecteren op 16 CCD elementen die samen een LOS windbereik bedekken van [-100, 100] m/s (figuur 3). Door een deconvolutie van de laserpuls en CCD breedte te incorporeren in de windbepaling kan een continue windbepaling over het volledige CCD windbereik verricht worden met een nagenoeg constante nauwkeurigheid (bij gegeven signaalintensiteit).

De detectie heeft een nauwkeurigheid op het niveau van één foton. Achtergrondstraling moet dus geminimaliseerd worden. In het Aeolus programma is gekozen voor een polaire satelliet in en schemerbaan. Hierbij heeft de satelliet een baan over beide polen met een passage over de evenaar om precies 6:00 en 18:00 lokale tijd. De LOS is verder van de zon af gericht en raakt het aardoppervlak onder een hoek van 37,5 graden t.o.v. de normaal op het aardoppervlak (zenit), waar het dan dus meestal donker is en vanuit oppervlak of wolken weinig UV straling in de richting van de satelliet gaat. Een tweede groot voordeel van deze baan is dat de zon tijdens een omgang van de satelliet rond de aarde nagenoeg onder dezelfde hoek op de satelliet schijnt, en wel loodrecht op de voortplantingsrichting. Hierdoor

kunnen de zonnepanelen gefixeerd worden langs de voortplantingsrichting waardoor wrijvingsverliezen aan de atmosfeer minimaal zijn.

Het KNMI is betrokken bij simulatiestudies van de DWL [11], het opzetten van de calibratieprocedures, bemonsteringschemas en verwerkingsalgoritmen [12], vliegtuigexperimenten, het simuleren van de Aeolus impact in de meteorologie [13] en het testen van vervolgsenarios [14].

Ter afsluiting

In dit tijdschrift is eerder aandacht besteed aan exploratie vanuit de ruimte [15] waarbij vooral aandacht is besteed aan het passief meten van omgevingsstraling. De RADAR- en LIDAR-technieken besproken in dit artikel meten de interactie van actief geëmitteerde e.m. straling met de atmosfeer of het aardoppervlak. Vanwege de beperkte hoeveelheid energie aan boord van een satelliet en de noodzakelijkerwijs grote afstand tot het meetobject zijn ook dit uiterst uitdagende technieken. Inmiddels is succesvolle toepassing van zowel RADAR als LIDAR vanuit de ruimte gedemonstreerd en worden deze operationeel ingezet. Een belangrijke volgende stap voor de meteorologie is het demonstreren van windprofielmetingen met satellieten middels een LIDAR met Dopplercapabiliteit. ESA heeft hier de primeur met de Aeolus ADM die naar verwachting in 2012 de eerste windprofielen zal gaan meten. Aeolus is zo opgezet dat volgens de gebruikte principes snel overgegaan kan worden naar een operationele missie, waarbij beide horizontale windcomponenten gemeten zouden kunnen worden, wat een voordeel oplevert in het vaststellen van de tropische circulatie [13]. In vergelijking met laserexperimenten in het laboratorium is de tijdschaal van ruimteexperimenten met lasers erg lang. Het succesvolle Europese DWL programma loopt nu ca. 20 jaar, waarbij er de laatste tien jaar gewerkt is aan de huidige UV versie in het Aeolus programma. De lezer kan zich waarschijnlijk goed voorstellen dat het Aeolus team met smacht uitkijkt naar de eerste windprofielen vanuit de ruimte in 2012.

Referenties

- [1] www.knmi.nl/over_het_knmi/
- [2] Scatterometry, proefschrift, igitur-archive.library.uu.nl/dissertations/o1840669/inhoud.htm
- [3] www.knmi.nl/scatterometer
- [5] Patricia Daukantas, 2009: Lidar in SPACE: From Apollo to the 21st Century, Optics & Photonics News 20 (6), 30-35.
- [4] Stoffelen, A., J. Pailleux, E. Källén, J.M. Vaughan, L. Isaksen, P. Flamant, W. Wergen, E. Andersson, H. Schyberg, A. Culoma, R. Meynart, M. Endemann, and P. Ingmann, 2005: The Atmospheric Dynamics Mission For Global Wind Field Measurement, Bull. Amer. Meteor. Soc., 86, 73-87.
- [6] Boyd, Robert W., 2003: Nonlinear optics, 2nd edition, Academic press.
- [7] www.esa.int/esaLP/ESAES62VMOC_LPAdmaeolus_o.html
- [8] Hernandez, G. (1986). *Fabry-Pérot Interferometers*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521322383
- [9] G. Tenti, C. D. Boley and R. C. Desai, "On the kinetic model description of Rayleigh-Brillouin scattering from molecular gases," Can. J. Phys. 52, p. 285, 1974
- [10] P. Hariharan, Basics of Interferometry, 2007, 2nd edition.
- [11] Marseille, G.-J. and A. Stoffelen, 2003: Simulation of wind profiles from a space-borne Doppler wind lidar. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, 3079-3098.

- [12] Tan, D. G. H., E. Andersson, J. deKloe, G.-J. Marseille, A. Stoffelen, P. Poli, M.-L. Denneulin, A. Dabas, D. Huber, O. Reitebuch, P. Flamant, O. Le Rille and H. Nett, 2008: The ADM-Aeolus wind retrieval algorithms. *Tellus*, **60A**, 191-205
- [13] Agar, N., A. Stoffelen, G.-J. Marseille, C. Accadia and P. Schlüssel, 2007: Impact assessment of simulated Doppler wind lidars with a multivariate variational assimilation in the tropics. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2443-2460.
- Stoffelen, A., G.-J. Marseille, F. Bouttier, D. Vasiljevic, S. de Haan, and C. Cardinali, 2006: ADM-Aeolus Doppler wind lidar Observing System Simulation Experiment. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **132**, 1927-1947
- Marseille, G.J., A. Stoffelen, J. Barkmeijer, 2008: A cycled sensitivity observing system experiment on simulated Doppler wind lidar data during the 1999 Christmas storm 'Martin', *Tellus*, **60A**, 249-260
- [14] Marseille, G.J., A. Stoffelen, J. Barkmeijer, 2008: Impact assessment of prospective spaceborne Doppler wind lidar observation scenarios, *Tellus*, **60A**, 234-248
- [15] NTVN 75 (6)