

PyroCb's brengen rook naar de stratosfeer

KES FLOOR

In de zomer van 2010 woedden er in het westen van Rusland na een langdurige droogteperiode met extreem hoge temperaturen talrijke natuurbranden. Deze zetten honderdduizenden hectaren land en honderden woningen en gebouwen in vuur en vlam. Meer dan 50 mensen kwamen om, duizenden bewoners moesten hun huizen ontvluchten en miljoenen anderen leden dagenlang onder de verstikkende rook die met de branden samenhang. Ook raakte het vliegverkeer volledig ontregeld. Satellietbeelden laten zien dat rook van dit soort natuurbranden terecht kan komen op plekken waar je dat niet zou verwachten. Zo zat er op 1 augustus 2010 niet alleen rook in de buurt van het aardoppervlak boven het gebied ten oosten van Moskou, maar ook op veel grotere hoogte en op grote afstand van de vuurzeeën. Een eerder door de hitte van het vuur gevormde of geactiveerde pyrocumulonimbus (pyroCb) voerde de rook door de tropopauze heen tot net in de stratosfeer; de heersende luchtstromingen verzorgden het rooktransport vanaf de vuurhaarden naar het noorden van de West-Siberische laagvlakte.

Satellietbeelden

De rook was goed te zien op de talrijke satellietbeelden in het zichtbaar licht, zoals figuur 1 [1]. Tegelijkertijd detecteerden infraroodsensoren van de satellietplatforms de grotere brandhaarden, althans voor zo ver die niet door dikke rook of bewolking werden afgeschermd (figuur 2) ([2,], [3] en [4]). Weer andere satellietproducten gaven een beeld van de verspreiding en de concentraties van rookdeeltjes (aerosolindex AAI, figuur 3; zie voor AAI en andere afkortingen en acroniemen tabel 1) en van het bij onder andere de branden vrijgekomen stikstofdioxide (troposferisch NO_2 , niet afgebeeld). Over het algemeen was er, zoals verwacht, een goede overeenkomst tussen de posities van de branden en de rook op de diverse satellietproducten: waar rook is, is vuur. Een uitzondering vormen echter de hoge waarden van de aerosolindex boven het noorden van het West-Siberisch laagland op 1 augustus 2010 volgens GOME-2 (figuur 3) en OMI [5]. Op dezelfde positie gaf OMI ook hoge waarden van het troposferisch NO_2 (niet afgebeeld). Het AAI-maximum van 1 augustus werkt zelfs nog door in het GOME-2 aerosolproduct over de periode 1-9 augustus 2010 [6]. Op het brandenkaartje van ongeveer dezelfde periode (30 juli tot en met 8 augustus, figuur 2) zien we in dat gebied merkwaardigerwijze slechts enkele branden, net als op het kaartje van de tien eraan voorafgaande dagen (niet afgebeeld). Waar komen al die rookdeeltjes daar op 1 augustus 2010 dan vandaan?

Pyrocumulonimbus

De Amerikaanse meteoroloog Mike Fromm van het Naval Research Laboratory in Washington DC heeft hierop wel een antwoord. De rook boven het noorden van het West-Siberisch laagland op 1 augustus is volgens hem afkomstig van



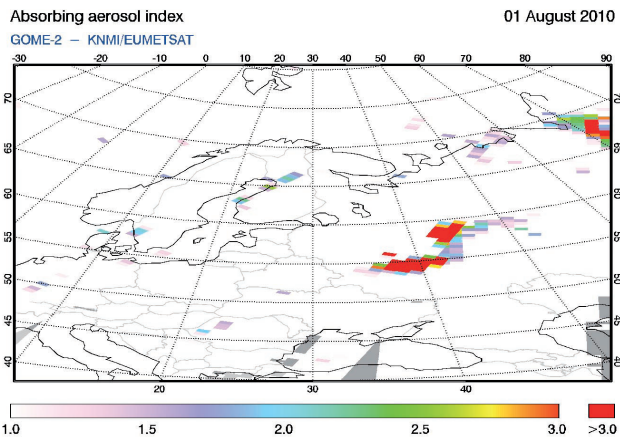
Figuur 1. Natuurbranden ten oosten van Moskou gaan vergezeld van enkele grote rookpluimen. Moskou bevindt zich linksonder in het satellietbeeld. Datum: 29 juli 2010 (Instrument: MERIS; bron: ESA).

dezelfde natuurbranden die op de diverse satellietproducten van die dag en voorgaande dagen zichtbaar zijn in het gebied direct ten oosten van Moskou. Door de intense hitte van de daar optredende, snel uitslaande en heviger wordende branden kon zich een pyrocumulonimbus, een soort vuurgedreven onweerswolk, vor-

men. Deze pyroCb voerde de rook naar grote hoogte, tot net in de stratosfeer. Vervolgens brachten de heersende luchtstromingen de rook naar het noorden van de West-Siberische laagvlakte, waar op 1 augustus onder andere het rechter maximum van de AAI (figuur 3) en het troposferisch NO_2 (niet afgebeeld) werd



Figuur 2. Kaart met locaties van branden in het getoonde gebied. Periode 30 juli tot en met 8 augustus 2010 (Instrument: MODIS; bron: NASA/Rapidfire 2010).



Figuur 3. Absorbing aerosolindex (AAI). Datum: 1 augustus 2010 (Instrument: GOME-2; bron: EUMETSAT/KNMI).



Figuur 4. Pyrocumulonimbus (Foto: Mike Fromm).

gemeten.

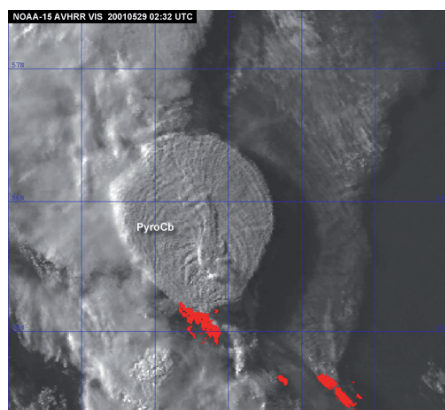
Rook in de stratosfeer

Tot zo'n tien jaar terug dacht men bij het uitwerken van satellietmetingen van aerosolen in de stratosfeer niet direct aan de rook van natuurbranden. De tropopauze werd beschouwd als een vrijwel onneembare barrière voor de rook. Daarom schreef men destijds het stratosferisch aerosol toe aan al dan niet gerapporteerde vulkaanuitbarstingen. Fromm onderzocht echter talrijke gevallen van hoge aerosolconcentraties in de stratosfeer en maakte in zijn werk aannemelijk dat door grote branden gegenereerde pyroCb's (figuur 4) rook in de stratosfeer kunnen brengen (Fromm et al., 2010). PyroCb's reiken net als 'gewone' cumulonimbi tot onder in de stratosfeer en kunnen vergezeld gaan van onweer, windvlagen, hagel en soms tornado's. Een van de eerste goed gedocumenteerde gevallen van rook die door pyroconvectie in de stratosfeer was gebracht, dateert van 29 mei 2001 (Fromm and Servranckx, 2003). Tijdens een periode met natuurbranden bij Chisholm in Alberta, Canada, vormde zich een

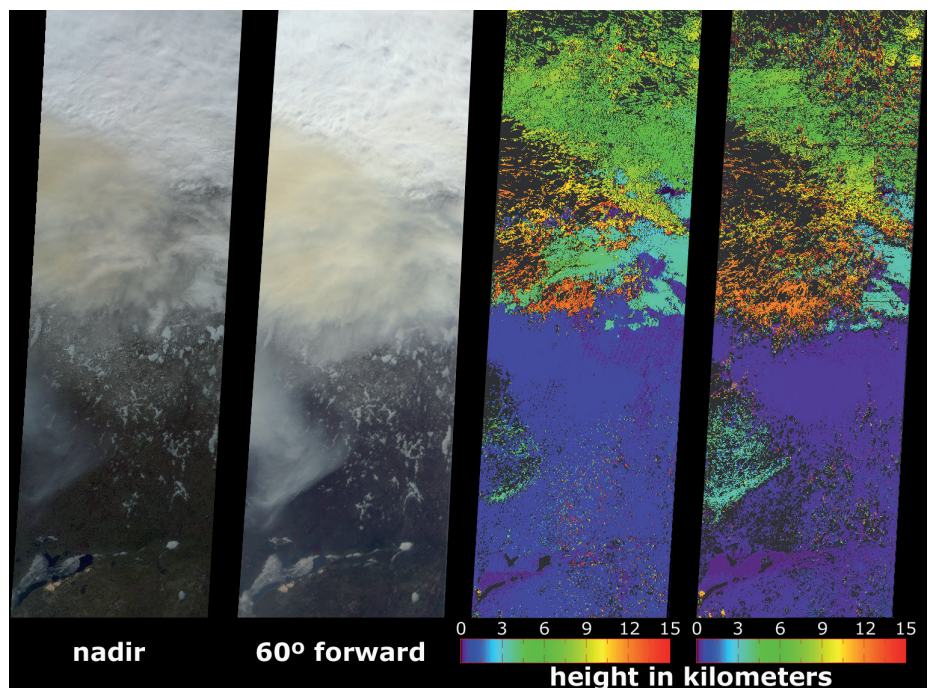
pyroCb, waarvan de rookhoudende ijskap onder andere in beeld werd gebracht door de NOAA-15 (figuur 5). De door de satelliet gedetecteerde hete plekken zijn in het zichtbaarlichtbeeld in rood ingetekend. Overigens is uit het beeld niet op te maken hoe hoog de rook van die branden kwam.

Met behulp van beelden en meetgegevens van MISR was daarover meer te zeggen. Het instrument bekijkt het aardoppervlak en de bewolking daarboven onder verschillende hoeken, zodat een stereoscopisch effect kan worden verkregen. Figuur 6 geeft net als het AVHRR-beeld van figuur 5 de situatie op 29 mei 2001. De vier stroken tonen steeds hetzelfde gebied van 380 bij 1137 kilometer. Linksonder zien we Lake Athabasca, dat deels in het uiterste noordwesten van Alberta ligt. De linker

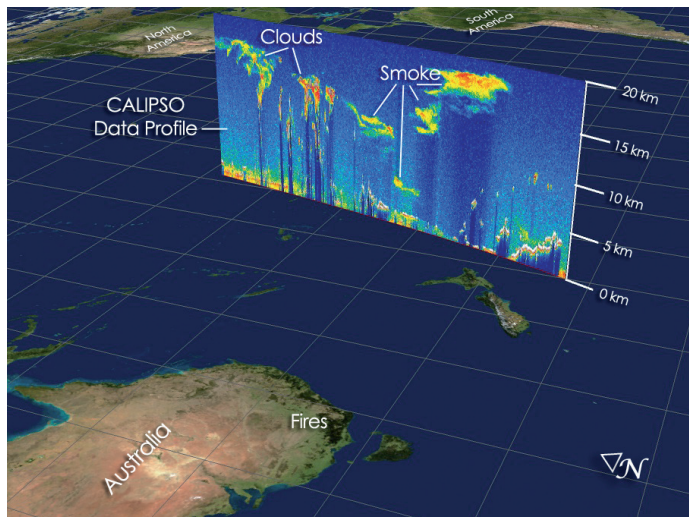
strook is een 'gewoon' satellietbeeld. Aardoppervlak en bewolking zijn recht van boven gescand. De strook daarnaast is in beeld gebracht onder een hoek van 60 graden. Op beide beelden bevindt de bruinetinte rook zich duidelijk boven de bewolking. Nog iets verder naar rechts zien we het standaard hoogteproduct van MISR, gebaseerd op kijkrichtingen recht naar beneden en van 26 graden vooruit en achteruit. Bij het speciale hoogteproduct geheel rechts werden beelden gebruikt van camera's die respectievelijk 46 en 60 graden vooruit waarnamen. Doordat de rook voor deze schuin-kijkende camera's dikker lijkt, worden betere resultaten verkregen en ondervindt men minder hinder van het onderliggende wolkendeck. De rook in het zuiden bevindt zich op een hoogte van 3 tot 5 kilometer. Meer naar het noorden zit de rook op 12 tot 13 kilometer hoogte, dus hoger dan de



Figuur 5. Satellietbeeld van een pyrocumulonimbus veroorzaakt door natuurbranden bij Chisholm, Alberta, Canada, 29 mei 2001 (Instrument: AVHRR, satelliet: NOAA-15; bron: NOAA/COMET).



Figuur 6. Satellietbeelden (links) en hoogtekarten van bewolking en rook tijdens de natuurbranden bij Chisholm, Alberta, Canada, 29 mei 2001 (Instrument: MISR; bron: NASA/GSFC/LARC/JPL, MISR Team).



Figuur 7. Dwarsdoorsnede door de atmosfeer boven de Grote Oceaan. Op een ongebruikelijke hoogte van bijna 20 kilometer bevindt zich midden en rechts in het getoonde profiel rook afkomstig van de Black Saturday (7 februari 2009) bushfires in de Australische staat Victoria. Links in de dwarsdoorsnede is bewolking zichtbaar. Datum: 10 februari 2009 (Instrument: CALIOP; bron: Chieko Kittaka, NASA/LaRC).

tropopause, die op 11 kilometer lag.

Meer gevallen

Inmiddels zijn er talrijke andere gevallen van pyroCb's gevonden en aan nader onderzoek onderworpen. Een berucht geval is de van een tornado vergezeld gaande pyroCb van Canberra van 18 januari 2003, die een ware ravage aanrichtte in de Australische hoofdstad (Fromm et al., 2006). Ook bij de grote bosbranden in het Yellowstone Park in 1988 bleek achteraf sprake van diverse pyroCb's (Fromm, 2009). Een recentere situatie waarin een pyroCb rook in de atmosfeer bracht, deed zich voor in de Australische staat Victoria tijdens de Black Saturday bushfires van februari 2009. De rook kwam destijds volgens lidarmetingen van CALIOP zelfs bijna 20 kilometer hoog. Deze metingen worden in figuur 7 gepresenteerd als dwarsdoorsnede door de atmosfeer. Op zo'n doorsnede is bewolking zichtbaar, maar ook aerosolen, zoals rookdeeltjes, vulkanische as, zand en stof. Men kan onderscheid maken tussen de verschillende soorten deeltjes doordat rookdeeltjes doorgaans kleiner zijn dan wolkenelementen en ook een andere vorm hebben dan waterdruppeltjes, ijskristallen of vulkanische as.

Rusland 2010

Terug naar de recentere branden in Rusland van 2010. Fromm is ervan overtuigd dat deze ook pyroCb's genereerden. De situatie van 1 augustus bevat hiervoor naar zijn mening voldoende aanwijzingen, zoals hij in [5] uitvoeriger toelicht. Enerzijds vond hij hints in wolkenpatronen boven het noorden van het West-

Siberisch laagland op MODIS-satellietbeelden in natuurlijke kleuren van 1 augustus. Temperatuurmetingen (MODIS-infrarood) en hoogtemetingen gebaseerd op MISR-data gaven aan dat er zich bewolking bevond op 12 kilometer hoogte, een hoogte die je vooral in verband kunt brengen met cumulonimbi of, zoals in dit geval, pyroCb's. Genoemde instrumenten bevinden

zich beide op de Terra-satelliet, die aan het eind van de ochtend over komt. Niet veel later op de dag trok de satelliet Aura met daarop onder andere OMI over het gebied, zodat gegevens beschikbaar kwamen als de AAI en het troposferisch NO₂. Ook GOME-2 leverde informatie over de aanwezige aerosolen (zie figuur 3). Toevallig passeerde op diezelfde dag ook nog eens de met een lidar uitgeruste CALIPSO de Russische laagvlakte, zodat er een dwarsdoorsnede van het gebied beschikbaar kwam. Daarop is te zien dat er rookdeeltjes zweven in het onderste deel van de stratosfeer; die kunnen er volgens Fromm alleen gekomen zijn door pyroconvectie.

Blijft natuurlijk nog de vraag waarom die hoge bewolking en die rook boven het noorden van het West-Siberisch laagland zweven, waar bepaald niet het zwaartepunt van de branden zat en waar de temperaturen in juli 2010 zelfs gemiddeld beneden normaal lagen. Om die vraag te beantwoorden draaide Fromm een trajectoriënmodel. Daarbij bleek dat de lucht die op 1 augustus die regio passeerde, op 29 juli over het zwaartepunt was getrokken van de zich snel uitbreidende en op figuur 1 zichtbare bosbranden in Midden-Rusland. De pyroCb moet daar dus zijn ontstaan; de restanten ervan waren 1 augustus boven het noorden van het West-Siberisch laagland terecht gekomen en de rook had op die positie de stratosfeer bereikt.

Literatuur

- Fromm, M. D. and R. Servranckx, 2003: Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection. *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1542, doi:10.1029/2002GL016820.
- Fromm, M.D. et al., 2006: Violent pyro-convective storm devastates Australia's capital and pollutes the stratosphere. *Geophysical Research Letters*, 33 (L05815), doi:10.1029/2005GL025161 (http://earth.huji.ac.il/data/pics/Fromm_etal_2005GL025161.pdf)
- Fromm, M.D. et al., 2009: Yellowstone and beyond: pyrocumulonimbus storms sent smoke to the stratosphere and around the globe [abstract]. Page 22 in R.E. Masters et al., (eds.). *The '88 Fires: Yellowstone and Beyond*, Conference Proceedings. Tall Timbers Miscellaneous Publication No. 16, Tall Timbers Research Station, Tallahassee, Florida, USA.
- Fromm, M. et al., 2010: The untold story of pyrocumulonimbus. *Bull. Am. Met. Soc.*, 91, pp 1193-1209. (<http://journals.asmetoc.org/doi/pdf/10.1175/2010BAMS3004.1>).

Tabel 1. Overzicht van gebruikte afkortingen en acroniemen. Bij instrumenten op satellietplatforms is in de rechterkolom de naam van de satelliet en de betrokken ruimtevaartorganisatie vermeld.

Afkorting	Betekenis	satelliet (operator)
AAI	absorbing aerosol index	
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	NOAA-15 en andere NOAA's (NOAA)
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization	CALIPSO (NASA/CNES)
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations	
Envisat	Environment satellite	
FIRMS	Fire Information for Resource Management System	
GOME-2	Global Ozone Monitoring Experiment 2	MetOp-A (EUMETSAT)
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer	Envisat (ESA)
MetOp	Meteorological Operational satellite	
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer	Terra (NASA)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	Terra, Aqua (NASA)
OMI	Ozone Measuring Instrument	Aura (NASA)

Internetadressen

[1] Meer voorbeelden van satellietbeelden in natuurlijke kleuren zijn te vinden op internetpagina 'Smoke in Western Russia', <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/event.php?id=44953>

[2] MODIS Rapid Response System Global Fire Maps, <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/firemaps/>

[3] FIRMS web fire mapper, <http://firefly.geog.umd.edu/firemap/>

[4] FAO Web fire mapper, <http://geonetwork4.fao.org/firemap/>

[5] Russian Firestorm: Finding a Fire Cloud from

Space, <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/PyroClouds/printall.php>

[6] Satellietinstrument OMI volgt bosbranden in centraal Rusland, http://www.knmi.nl/cms/content/83174/satellietinstrument_omi_volgt_bosbranden_in_centraal_rusland

De Golfstroom in de Kleine IJstijd

GERARD VAN DER SCHRIER EN NANNE WEBER (KNMI)

In de 18^e eeuw vergingen meer marineschepen door te navigeren op slechte kaarten dan door vijandelijk vuur. Een dringende reden voor de Britse admiraliteit om Engeland's beste cartograaf de opdracht te geven de Atlantische oceaan in kaart te brengen. Deze immense klus is voortvarend aangepakt door Major James Rennell. Dit biedt ons nu een uniek kijkje op de Atlantische Oceaan aan het eind van de Kleine IJstijd en de mogelijkheid om het aandeel van de Golfstroom in de afkoeling van deze koude periode onder de loep te nemen.

Major James Rennell

Kennis over de oceaanstromen in de Atlantische oceaan was minimaal aan het eind van de 18^e eeuw. Sir Charles Blagden (arts en bekend wetenschapper, later secretaris van de Royal Society) beklaagt zich daar in 1778 over:

"the difficulty of ascertaining currents is well known to be one of the greatest defects in the present state of navigation."

James Rennell was op dat moment Engeland's belangrijkste geograaf door zijn succesvolle poging om delen van India in kaart te brengen. Vanaf 1810 ging hij zich, op initiatief van de Britse admiraliteit, bezig houden met de hydrografie. Rennell was toen al 68 en het zou hem de laatste 20 jaar van zijn leven bezig houden. Via zijn uitgebreide netwerk van vrienden binnen de marine (figuur 1), waaronder Admiral Beaufort en Alexander Dalrymple, hoofd hydrografie van de Britse marine, wist Rennell aan metingen te komen van zeewatertemperaturen. Deze metingen werden toen niet routinematig gedaan - het nut van deze metingen werd pas duidelijk nadat Rennell had gedemonstreerd dat zeewatertemperaturen een hulp bij de navigatie konden zijn. De metingen werden gedaan door 'ships of opportunity' maar Rennell wist een aantal kapiteins ook te overtuigen van het nut van het varen van doelgerichte tracks dwars over de Golfstroom om de karakteristieken daarvan beter in kaart te kunnen brengen. Deze doelgerichte expedities behoren tot de eerste oceanografische meetcampagnes.

De datacollectie die Rennell op deze manier bij elkaar sprokkelde is waarschijnlijk het eerste zinvolle overzicht van zeewaterstromingen en -tempera-

turen van de Atlantische oceaan. De reden dat een dergelijk overzicht niet eerder beschikbaar kon zijn is dat een nauwkeurige positiebepaling op een schip een chronometer vereiste. Dit dure instrument was destijds niet algemeen verspreid.

Rennell's kaarten

Rennell zou zo'n 20 jaar aan het verzamelen van data, het opstellen van kaarten en het analyseren van de waarnemingen werken. Hij wordt hierin bijgestaan door zijn dochter, Lady Jane Rodd. Volgens een biografische schets in *The Geographical Journal* door Jane's kleinzoon, de schrijver James Rennel Rodd, is zij de enige van Rennell's kinderen die zijn belangstelling en talent geërfd heeft¹. Bij Rennel's dood, op 29 maart 1830, lag er een heleboel ongeordend materiaal. Lady Jane Rodd heeft dit ruwe materiaal geordend en de kaarten met een begeleitend boek in 1832 gepubliceerd. Verschillende bibliotheken in Nederland bezitten een exemplaar van Rennell's boek (ook het KNMI): de kaarten zijn echter in Nederland verloren gegaan. Uiteindelijk zijn er kaarten getraceerd in het Maritime Museum in Greenwich en bij de *UK Hydrographic Office*.²

Rennell beschrijft de kaarten voor verschillende delen van de Atlantische Oceaan uitvoerig in zijn boek. Op alle kaarten staan

als puntwaarnemingen de zeewatertemperatuur waarnemingen - al of niet verbonden door een ship track - waarnemingen van stroomrichting en windsterkte en -richting vermeld. Langs de kust en over ondiepten zijn peilingen gegeven. Verder zijn op de kaarten een aantal waarnemingen van ijsbergen ingetekend, net als data waarop flessen zijn uitgeworpen en weer opgevist en data waarop stukken van scheepswrakken gevonden zijn. Een deel van de tweede kaart is weergegeven in figuur 2, wat de mate van detail illustreert.

De nauwkeurigheid van de zeewatertemperatuur metingen is lager dan moderne metingen, maar de procedure bij de Britse Marine om metingen te doen was goed beschreven. Er was duidelijk aandacht om de meting representatief te laten zijn voor het gesampelde zeewater, en niet voor de temperatuur aan dek. Sterker nog: doordat later (midden 19^e eeuw)



Figuur 1. 'The Arctic Council' van Stephan Pearcel, 1851. In de bijeenkomst op dit schilderij werden plannen gesmeed voor een expeditie op zoek naar de Noordwestelijke passage. Centraal op het schilderij is Beaufort (zittend), met van links naar rechts, Back, Parry, Bird, Clark Ross, Barrow Jr. Sabine, Baillie Hamilton, Richardson en Beechey (zittend). Crozier, kapitein van de HMS Terror, behoorde ook tot dit gezelschap, maar men vond hem niet 'gentlemanly enough' om ook een plaats op het schilderij te verdienen. (National Portrait Gallery)