

Knetterende Luchten

onweer in natuurkundeles of profielwerkstuk

Berenice I. Michels**

Arnold F. Moene*

Adrie F.G. Jacobs *

De zomer zit er weer en we weten het als Nederlanders ook weer: onweer is welkom als verkoeler na zwoele hitte, maar eist daarvoor jaarlijks zijn tol (zie figuur 1). Deze Nederlandse onweersbuien vormen slechts een verwaarloosbare fractie van wat zich wereldwijd afspeelt. Op elk moment van de dag woeden er op aarde zo'n 2000 onweersbuien tegelijkertijd. Iedere seconde wordt de aarde door zo'n tien bliksemflitsen getroffen, waarbij temperaturen ontstaan van 20.000 K en hoger. Onweer, de grootste angstaanjager sinds mensenheugenis, een onmisbare component in 's werelds klimaatmotor of de mooiste denkbare achtergrond voor natuurfotografen (figuur 2)?

1. Geschiedenis: verklaringen voor een natuurverschijnsel

Onweer is een natuurverschijnsel dat moeilijk over het hoofd gezien kan worden. Geen wonder dat al in de vroegste jaren van menselijke beschaving gezocht werd naar verklaringen voor dit verschijnsel. Onweer boezemt ontzag in, en de meeste *mythologische* verklaringen gingen dan ook uit van boze goden: Volgens de Grieken wierp Zeus vertoornd met zijn vlammeende speer, de Germanen hielden het op ruzie tussen Thor en Wodan en de indianen in het oude Amerika beeldden onweer af als een boze adelaar met flitsende en klapperende vleugels.

De natuurfilosofen ontteden onweer van zijn goddelijke herkomst, en probeerden het verschijnsel vanuit hun theorieën te verklaren. Zo beschrijft Aristoteles dat het element lucht bestaat uit droge en vochtige dampen. Wanneer lucht tot wolken verdampt (vocht) blijft soms de droge damp gevangen. Deze schiet dan krachtig de wolk uit, waarbij omliggende wolken geraakt worden. De klap van deze botsing horen we als donder, die gevolgd (!) wordt door een brandende windvlaag: de bliksem.

Met de komst van de *experimentele natuurwetenschap* kon het niet lang uitblijven voor iemand besloot onderzoek te doen naar de eigenschappen van onweer. Het was Benjamin Franklin, die in de tweede helft van de 18^e eeuw zijn vlieger in een onweerswolk opliet. Het mag een wonder heten, dat hij dit overleefd heeft, maar feit is dat hij als eerste het verband aantoonde tussen onweer en elektriciteit. Hij toonde aan dat lading uit een onweerswolk kan worden weggeleid, waarbij vonken ontstaan, zoals men die van de Leydsche fles kende.

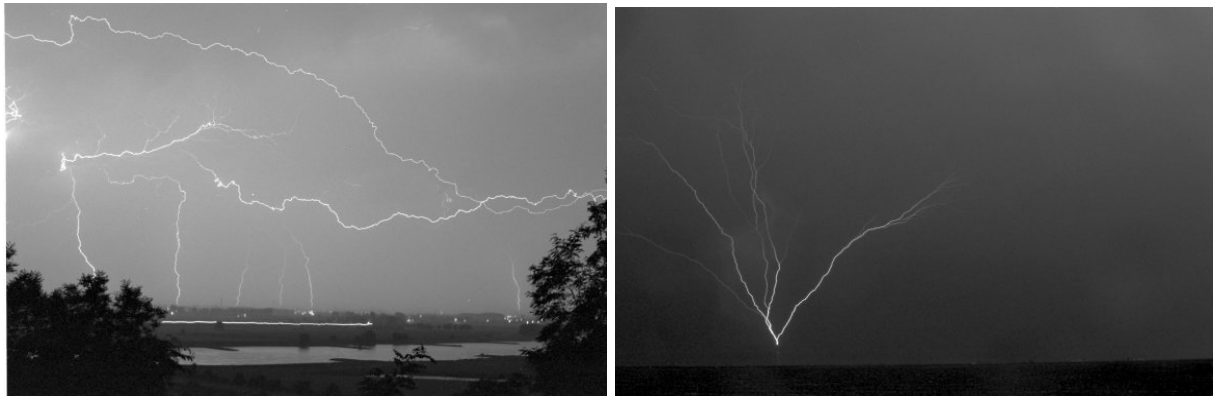


Figuur 1. Onweer blijft gevaarlijk

Onweer wordt in de vwo-eindtermen expliciet als context genoemd. Hoewel er veel materiaal over onweer is te vinden (zowel in mediatheek als op internet) is dat zelden direct bruikbaar om kwantitatief mee te werken in de les of in een profielwerkstuk. In dit artikel gaan we in op de natuurkundige achtergrond van donder en bliksem. Aparte kaders belichten daarbij het 'rekenwerk' dat voor havo of vwo toepasbaar is. Speciale aandacht besteden we aan de wisselwerking tussen onweer en het aardelektrisch veld. De sterkte van het aardelektrisch veld aan het oppervlak wordt in Wageningen continu in gemeten door de leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit van Wageningen Universiteit. Overigens is onweer ook een mooi voorbeeld voor ANW als het gaat om de ontwikkeling van verklaringen die mensen zochten voor natuurverschijnselen (zie kader 1).

** Dorenweerd College, Doorwerth

* Leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit, Wageningen Universiteit. Dit artikel is eerder verschenen in NVOX . nummer 8, oktober 2001. pp 411-417



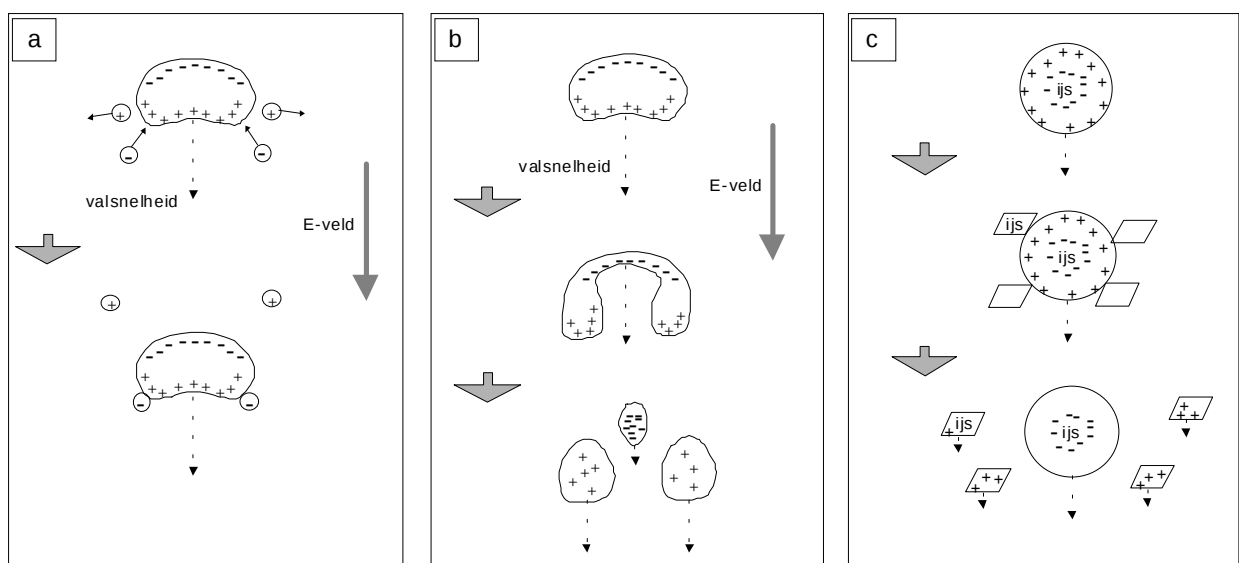
Figuur 2. Wolk-wolk en wolk-aarde ontladingen (links, bij Wageningen, Nederriijn op voorgrond, 2-8-2001) en aarde-wolk ontlading (zuid-west Kansas, VS, 16-5-2001). Foto's © Floris Bijlsma. (www.lightningchaser.nl).

Ontstaan van onweer: ladingscheiding

De hoeveelheid vrije lading in de atmosfeer is (bij afwezigheid van onweer) zeer gering, getuige de zeer hoge soortelijke weerstand van lucht (zie kader 2). Over de oorsprong van deze lading heerste aan het begin van de vorige eeuw grote onzekerheid: ionisaties ten gevolge van radioactiviteit in de aarde zelf leek de meest waarschijnlijke oorzaak. Tot uit onderzoek in 1912 bleek dat het aantal ionisaties per volume eenheid met de hoogte toenam. De oorzaak van atmosferische elektriciteit moest van buiten de aarde komen, en zo stond het atmosferisch onderzoek aan het kraambed van een geheel nieuwe fysieke tak van sport: het onderzoek aan kosmische straling.

Voor het ontstaan van onweer is het nodig dat die schaarse vrije lading in de atmosfeer op een andere manier wordt gerangschikt. De eerste stap hiervoor blijkt te zijn dat vrije ionen door diffusie en geleiding worden ingevangen in wolkendruppels. Vervolgens zorgen sterke verticale stromingen in grote regenbuien (Cumulonimbi, of Cb) voor het transport. Maar transport van lading is niet voldoende: de *scheiding* van lading is het essentiële proces voor de vorming van onweer. Tot op de dag van vandaag zijn de details van die ladingscheiding een mysterie voor de wetenschap. Er bestaan diverse theorieën rond ladingscheiding, die echter geen van allen op zichzelf het gehele scheidingsproces kunnen verklaren. De laatste inzichten maken wel duidelijk dat vooral vaste neerslag (hagel, sneeuw en 'graupel' of zachte hagel) een rol speelt bij ladingscheiding.

De bekendste theorie voor ladingscheiding is waarschijnlijk afkomstig van C.T.R. Wilson uit 1929 (Figuur 3a). Deze theorie is gebaseerd op de dipoolstructuur van watermoleculen. De moleculen in een waterdruppel richten zich naar het aardelektrisch veld (zie verderop) waardoor de onderkant van een druppel positief wordt ten opzicht van de bovenkant. Wanneer een druppel valt zal hij op geladen deeltjes botsen. Hierbij zullen negatieve



Figuur 3. Drie mechanismen voor ladingscheiding: a) theorie van Wilson gebaseerd op dipoolstructuur van water; b) Simpson's fragmentatie theorie; c) uitwisseling van lading bij botsing van ijsdeeltjes met aangroeiende 'zachte hagel'.

2. De atmosfeer en de wet van Ohm

Een eenvoudige toepassing van de wet van Ohm voor de atmosfeer is te vinden in het HAVO eindexamen van 1986. Gegeven het spanningsverschil tussen aarde en elektrofeer, de stroomsterkte door de atmosfeer en de hoogte van de elektrofeer kan de (gemiddelde) soortelijke weerstand van lucht worden berekend. Met de gegevens uit tabel 1 (stroom in A/m^2 !):

$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow R = \frac{300 \cdot 10^3}{2,7 \cdot 10^{-12}} = 1,1 \cdot 10^{17} \Omega \text{m}^2$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \Rightarrow \rho = \frac{1,1 \cdot 10^{17}}{50 \cdot 10^3} = 2,2 \cdot 10^{12} \Omega \text{m}$$

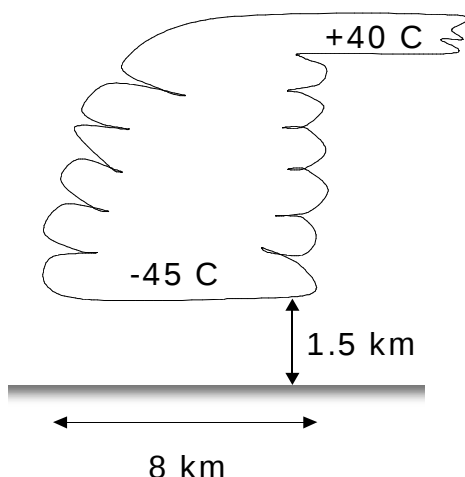
Deze soortelijke weerstand is een orde van grootte kleiner dan de soortelijke weerstand genoemd in tabel 1. Dit kan begrepen worden aan de hand van figuur 11. De elektrische veldsterkte varieert twee ordes van grootte over de genoemde elektrofeerhoogte van 50 km. Aangezien (zonder ladingsbronnen en -putten) de stroomsterkte constant is, zal de soortelijke weerstand sterk afnemen tussen aarde en elektrofeer.

deeltjes vasthechten aan de (positieve) onderkant van de druppel, terwijl positieve deeltjes afgestoten worden. De kans dat het afgestoten positieve deeltje zich hecht aan de negatieve bovenkant van de waterdruppel is klein, door de grote snelheid van de vallende druppel. Het resultaat is dat de waterdruppel negatieve lading omlaag transporteert, terwijl positieve lading boven in de wolk achterblijft. Een variant op dit mechanisme is de selectieve ion-opname: uitwisseling van ionen tussen neutrale druppels en/of ijsdeeltjes wanneer zij botsen (en weer afketsing). Hiervoor moeten wel vrije ionen beschikbaar zijn in de botsende deeltjes.

Iets ouder nog is Simpson's fragmentatie theorie (figuur 3b). Deze is gebaseerd op het feit dat druppels met een diameter groter dan 6 mm door de luchtwrijving niet stabiel zijn als ze naar beneden vallen. Ze zullen daarbij breken in ongelijke delen, waarbij de resulterende druppels verschillen in lading: de kleinste fragmenten blijken negatief geladen. De ladingsscheiding die door deze theorie beschreven wordt geeft op de schaal van een wolk het verkeerde teken, maar kan wel mede verantwoordelijk zijn voor het multipolaire karakter van een onweerswolk.

Verreweg het belangrijkste mechanisme voor ladingscheiding blijkt te maken te hebben met de concentratie van lading aan het oppervlak van 'zachte hagel' (sneeuw kristallen waarop onderkoeld water aanvriest, zie figuur 3c). Bij zachte hagel blijkt, wanneer het groeit door aanvriezing van onderkoeld water, positieve lading zich aan het oppervlak op te hopen, terwijl de binnenkant negatief wordt (bij verdamping is de verdeling andersom). Bij botsing met ijsdeeltjes zal een deel van die positieve lading aan de rand opgenomen worden door die deeltjes.

Daarna zal de zachte hagel negatief geladen naar beneden vallen. De lichte ijsdeeltjes vallen minder snel naar beneden of kunnen met opwaartse bewegingen naar de top van de wolk worden vervoerd.

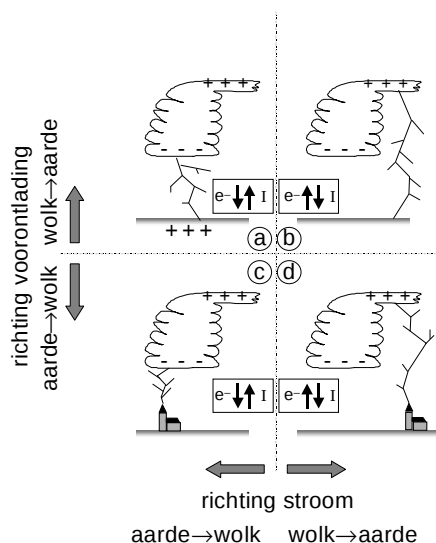


Figuur 4. Lading en grootte van een karakteristieke Cumulonimbus.

Het gevolg van het samenspel van diverse ladingscheidingsmechanismen is een zeer complexe ladingverdeling in een onweerswolk. Een volledig ontwikkelde onweerswolk is bovenin positief geladen (figuur 4). Over het algemeen is de wolk onderin negatief geladen is, hoewel soms met een klein positief gebied in het centrum van de wolkbasis. Het midden van een onweerswolk is multipolair: diverse ladingsgebieden bevinden zich naast en boven elkaar, ten gevolge van de wisselwerking van diverse ladingscheidingsprocessen en de luchtstromingen binnen de wolk.

Ontlading

Onweer is pas onweer als er ontladingen optreden. Ontladingen kunnen onderverdeeld worden in ontladingen binnen één onweerswolk, wolk-wolk ontladingen en wolk-aarde ontladingen. De laatste komen het minst voor, maar zijn doorgaans wel het spectaculairst.



Figuur 5. Classificatie van ontladingen

hun beurt ook weer een goed geleidend kanaal in de lucht, het ‘vangontladingskanaal’ genoemd. Wanneer voorontlading (met de potentiaal van de wolk) en vangontlading (met de potentiaal van de aarde) elkaar ontmoeten ontstaat een kortsluiting: de ‘hoofdontlading’. Het ‘dumpen’ van de lading uit het ontladingskanaal naar de grond gebeurt van beneden naar boven: eerst stroomt het onderste deel van het kanaal leeg naar de aarde, vervolgens de hogere delen (waarna aanvulling van lading vanuit de wolk plaatsvindt). Het oplichten van de bliksem verplaatst zich dus van het aardoppervlak naar de wolk. Meestal volgen na de hoofdontlading nog een aantal ontladingen door hetzelfde kanaal. Deze verschijnselen spelen zich zo snel af dat het met het blote oog niet waarneembaar is, maar wel met bijvoorbeeld video-opnames. In tabel 2 staan een aantal karakteristieke gegevens van de verschillende ontladingen, zoals die verzameld zijn door Uman (1984)

Naast de indeling naar start- en eindpunt van de bliksem, kunnen ontladingen ook worden ingedeeld naar stroomrichting en richting van de voorontlading (zie figuur 5). In het hierboven beschreven (meest voorkomende) voorbeeld was de stroomrichting van aarde naar wolk (de elektronen gingen van wolk naar aarde). Dit noemt men een negatieve ontlading (figuur 5a/c). Vooral in de winter kunnen soms ontladingen optreden tussen de aarde en het positieve ‘aambeeld’ (de karakteristieke top van een onweerswolk bestaande uit ijsdeeltjes, die zich over een veel groter oppervlak uitspreid dan de eronderliggende bloemkoolachtige wolk met waterdruppels). In dat geval worden de elektronen aan de aarde onttrokken (figuur 5b/d). Wanneer zich aan het aardoppervlak spitse voorwerpen bevinden kan het vangontladingskanaal tot vlak bij de wolk leiden. Dit soort ontladingen heten opwaartse ontladingen. Ze zijn herkenbaar (op bijvoorbeeld foto’s, zie figuur 2b) aan de bovenwaarts gerichte vertakkingen (figuur 5c/d).

Een voor de hand liggend misverstand rond het ontstaan van een ontlading is, dat deze ontstaat wanneer het spanningsverschil tussen wolk en aarde groot genoeg is geworden. Dit is echter bij wolk-aarde ontladingen niet het geval (zie kader 3). De doorgaans negatieve wolkbasis-lading induceert een positieve lading aan aardoppervlak. Hierdoor wordt het veld tussen wolk en aarde wel iets sterker, maar niet genoeg. De verklaring voor het toch ontstaan van een bliksemflits begint bij de inhomogeniteit van de wolkbasis. Her en der in deze basis bevinden zich kleine ijsdeeltjes. Aan de spitse punten van deze deeltjes is het lokale veld veel sterker dan het gemiddelde veld. Deze veldsterkte kan zo hoog oplopen dat er vonken ontstaan, die de lucht plaatselijk ioniseren. Langs deze ionisatiebaan ontstaat een geleidend kanaal, aan het uiteinde waarvan wederom een zeer sterk veld heerst. Door dit zich herhalend proces ontstaat een goed geleidend ‘voorontladingskanaal’ met een doorsnede van enkele centimeters en dezelfde potentiaal als de wolkbasis. Wanneer dit kanaal de aarde nadert ziet men soms vonken overspringen naar spitse voorwerpen, zoals kerktorens. Dit is het (vroeger gevreesde) ‘Sint Elmusvuur’. De vonken die van diverse plaatsen op de aarde naar het voorontladingskanaal springen vormen op

3. Onweer en de wet van Coulomb

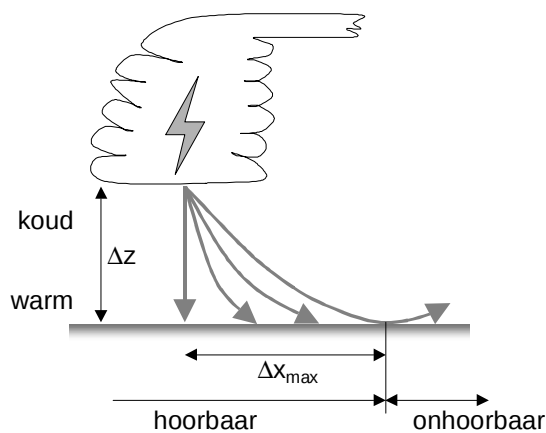
Met behulp van de wet van Coulomb (geschrapt uit het examenprogramma, maar wellicht bruikbaar als vwo-plus stof of voor een praktische opdracht) is eenvoudig aan te tonen dat de karakteristieke spanningsverschillen tussen onweerswolk en aarde kleiner zijn dan de doorslagspanning van lucht (zie tabel 1). Met behulp van tabel 2 (voor f) en figuur 6 (voor Q en r):

$$\left. \begin{aligned} F &= f \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \\ E &= \frac{F}{q} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = f \cdot \frac{Q}{r^2} \Rightarrow E = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{45}{1500^2} = 0,2 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

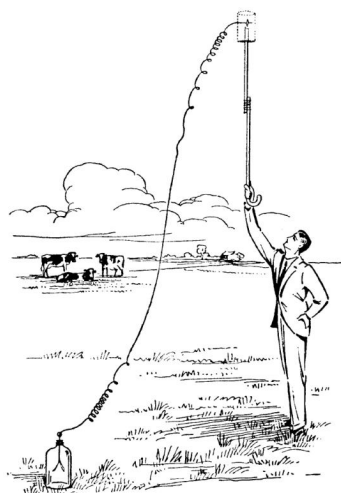
Tabel 1: Gegevens over het gemiddeld aardelektrisch veld en andere grootheden

Grootheid	waarde	eenheid
sterkte elektrisch veld aan het oppervlak bij mooi weer	200	V/m
hoogte van de elektroosfeer	50	km
spanningsverschil aarde – elektroosfeer	300	kV
soortelijke weerstand droge lucht aan de grond	$4,0 \cdot 10^{13}$	Ωm
doorslag veldsterkte (doorslagspanning) van droge lucht	$3,0 \cdot 10^6$	V/m
lekstroomdichtheid	$2,7 \cdot 10^{-12}$	A/m ²
elektrische permitiviteit (vacuum) ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$	F/m

Figuur 6. De donder is slechts over een beperkte afstand hoorbaar door breking van de het geluid (naar Stull (2000)).



Figuur 7. Waarnemen van het aardelektrisch veld volgens Minnaert (uit Minnaert, 1970).



blootstelling aan het veld op de onderste plaat heeft verzameld, stroomt tijdens de periode van afscherming via deze weerstand naar de aarde. De stroomsterkte is een maat voor de grootte van het aardelektrisch veld.

Donder ontstaat op het moment van de hoofdontlading. Tijdens deze ontlading wordt de lucht in zeer korte tijd verwarmd tot meer dan 20.000 K. Hierdoor ontstaat een schokgolf, overgaand in een geluidsgolf: de donder.

Die geluidsgolf ontstaat op ieder deel van de ontlading. Wanneer de ontlading op grote afstand plaatsvindt, of horizontaal (wolk-wolk), bereikt het geluid van de verschillende delen van de ontlading je op verschillende momenten: het karakteristieke rommelen. Bij een verticale ontlading vlakbij bereikt het geluid je juist als één klap. Geluidsgolven zullen (net als licht) breken bij overgangen tussen warme en koude lucht. Door de gebruikelijke temperatuurverschillen in de atmosfeer (hoe hoger, hoe kouder) zal de baan van de geluidsgolf gekromd zijn in de richting van de koude lucht. Hierdoor is er een maximale afstand Δx_{max} tot waar de donder hoorbaar is (figuur 6). Voor een ontlading op hoogte Δz bij temperatuur T aan het aardoppervlak, kan deze afstand worden uitgerekend met de volgende formule:

$$\Delta x_{\text{max}} \approx 2 \cdot \sqrt{\frac{T \cdot \Delta z}{-\gamma}}$$

Hierin is γ de verticale temperatuurgradiënt $\Delta T/\Delta z$ (van de orde van $-6 \text{ }^\circ\text{C/km}$). Het is deze breking van geluidsgolven die tot gevolg heeft dat ver verwijderd nachtelijk onweer soms wel zichtbaar is (het oplichten van de lucht), maar niet hoorbaar.

Het aardelektrisch veld

Onweer wordt wel omschreven als het topje van de ijsberg waar het gaat om atmosferische elektriciteit. In de atmosfeer is altijd een elektrisch veld aanwezig (tabel 1). De aarde is negatief geladen, de top van de atmosfeer (elektrisch gezien op 50 km hoogte) positief. Bij mooi weer loopt daardoor in de atmosfeer continu een zeer kleine lekstroom richting de aarde.

De bekendste methode om het aardelektrisch veld bij het aardoppervlak te meten is waarschijnlijk afkomstig van Minnaert. Hij laat zien hoe het mogelijk is om het elektrisch veld waar te nemen, slechts gewapend met een paraplu, conservenblik, waxinelicht en (eventueel zelfgebouwde) elektrooscoop (figuur 7). Om de grootte van het veld te meten is uiteraard ijking van de elektrooscoop noodzakelijk. Iets minder provisorisch en daarmee ook iets betrouwbaarder (want minder gevoelig voor allerlei verstoringen) is de zogenaamde veldmolen. Deze bestaat uit een goed geleidende plaat, die periodiek wordt afgeschermd van het heersende veld door een andere soortgelijke plaat. De bovenste plaat is geaard, de onderste is via een weerstand met de aarde verbonden. De lading die zich tijdens

4. De atmosfeer als condensator

Bij het analyseren van het aardelektrisch veld kan het systeem atmosfeer – aarde – onweer worden beschouwd als een condensator-schakeling. De elektrofeer en de aarde vormen de twee condensatorplaten. Opladen van de condensator gebeurt via de omgekeerde lekstroom onder onweersbuien (zie kader 5). Hoe snel zou de atmosferische condensator ontladen in afwezigheid van onweer?

Als zeer grove benadering gaan we ervan uit dat alle atmosferische lading geconcentreerd is in de elektrofeer en kiezen we de veldsterkte aan het oppervlak (zie tabel 1) als condensator veldsterkte. De ladingsdichtheid in de elektrofeer kan dan eenvoudig berekend worden:

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot E = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 200 = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ C / m}^2.$$

Boven iedere vierkante meter aardoppervlak bevindt zich dus 1,8 pC. De capaciteit van de condensator bedraagt

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{1,8 \cdot 10^{-9}}{300 \cdot 10^3} = 6,0 \cdot 10^{-15} \text{ F / m}^2,$$

Ontlading van de condensator kan berekend worden (zie kader 2 voor de waarde van R):

$$Q(t) = Q(0) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \Rightarrow \frac{Q(t)}{Q(0)} = e^{-\frac{t}{660}}.$$

Hieruit volgt dat zonder onweersbuien, na 30 minuten de atmosferische lading teruggelopen zou zijn tot 6,5% van de oorspronkelijke waarde.

Tenslotte bestaan er nog zogenaamde antennesystemen, waarbij het spanningsverschil tussen een geïsoleerd opgehangen draad en de aarde wordt gemeten (zie figuur 8).

Uit metingen van het aardelektrisch veld blijkt het zogenaamde mooi-weer veld (zie figuur 9) positief te zijn en een lichte dagelijkse gang te vertonen. Dit mooi-weer veld kan verstoord worden door diverse invloeden, zoals (naast uiteraard onweer): bewolking (verlaging E), verontreiniging (pollen, toename van E) en vocht (mist, sterke stijging). In beide laatste gevallen neemt E toe doordat vrije ionen worden ingevangen waardoor de soortelijk weerstand van de lucht toeneemt.

Figuur 8. Antenne-systeem op weerveld Leerstoelgroep Meteorologie en luchtkwaliteit. Het systeem bestaat uit een draad die geïsoleerd opgehangen is boven de grond. Vooral zichtbaar zijn de blikken die de isolatoren moeten beschermen tegen vocht.



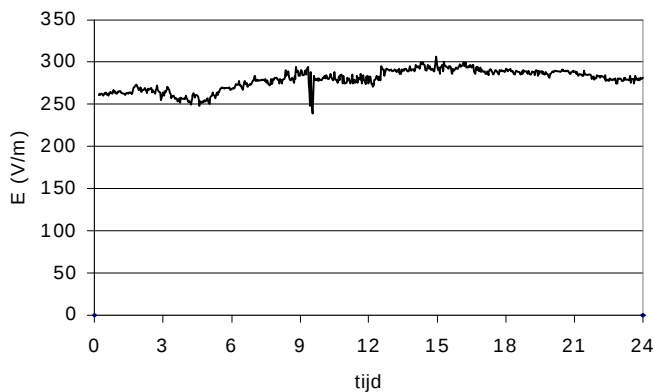
Onweer en het aardelektrisch veld

Door de lekstroom van atmosfeer naar aarde, zou de atmosferische lading in zeer korte tijd verdwenen zijn (zie kader 4). Het aardelektrisch veld bestaat echter geruime tijd en het ziet er nog niet naar uit dat het binnenkort uitput. Er moet dus een generator zijn, die de atmosfeer continu oplaadt.

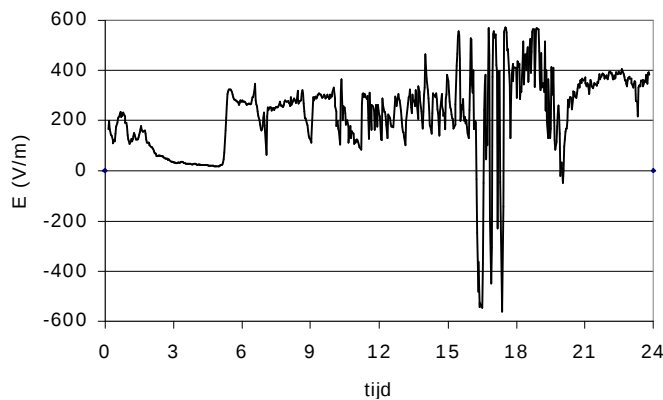
Zoals hierboven is beschreven wordt tijdens onweersbuien negatieve lading van de onweerswolk naar de aarde getransporteerd, waarbij dus feitelijk de atmosfeer positief geladen wordt. De ontladingen tijdens onweersbuien resulteren in de oplading van het aardelektrisch veld. Overigens vormen de echte ontladingen maar een fractie van de totale lading die tijdens een

onweersbui wordt overgebracht naar de atmosfeer. Bovendien wordt dit opladen van de atmosfeer grotendeels tenietgedaan door het ladingtransport door de neerslag. Veel belangrijker voor het opladen van de atmosfeer is de omgekeerde lekstroom, die optreedt onder onweersbuien (kader 5). Deze blijkt wereldwijd zo'n 1400 A te zijn en daarmee de mooi-weer lekstroom te compenseren.

Figuur 9. Verloop van het aardelektrisch veld op een dag zonder verstoringen (6 mei 2000).



Figuur 10. Verloop van het aardelektrisch veld op een dag met onweer (8 mei 2000).



Uit onderzoek is gebleken dat het verloop van het aardelektrisch veld in de onderste luchtslaag (de zgn. oppervlaktelaag) een goede indicator is om de polariteit in de buurt van onweerswolken te analyseren. Bij de passage van een onweersbui (op enige afstand) kunnen uit het verloop van het aardelektrisch veld de volgende gebeurtenissen worden gedestilleerd:

- De passage van het 'aambeeld'. Er treedt overcompensatie op, waardoor E aan de grond sterk stijgt.
- Passage van de basis van de onweerswolk. Over het algemeen veroorzaakt dit een negatief veld (E_{basis}) t.g.v. de negatieve lading aan de onderkant van de wolk.
- Bliksemontladingen. Het veld wordt sterk negatief. De verhouding $E_{\text{basis}} / E_{\text{ontlading}}$ is indicator voor de afstand van de ontlading. Een onderzoek meldt $E_{\text{basis}} / E_{\text{ontlading}} = 4.4$ voor $s < 6$ km en $E_{\text{basis}} / E_{\text{ontlading}} = 1.1$ voor $s > 50$ km.
- Periodes met regen. Deze veroorzaken een sterk fluctuerend veld door de ladingsoverdracht door regen. Overigens kunnen metingen in een regenbui zelf niet als betrouwbaar worden beschouwd i.v.m. de gevoeligheid van de apparatuur.

De leerstoelgroep Meteorologie en Luchtkwaliteit van Wageningen Universiteit heeft een permanente opstelling (een passief antennesysteem, zie figuur 8) op haar meetveld (Haarweg) om het aardelektrisch veld te meten. In figuur 10 is een meting te zien, op een dag dat een

5. Onweer en de wet van Ohm

Met de wet van Ohm kan de (omgekeerde) lekstroom onder een onweerswolk bepaald worden. Hiervoor moet een aannemelijke waarde gekozen worden voor de soortelijke weerstand, die immers sterk afneemt tussen aardoppervlak en onweerswolk. Volgens figuur 11 is E gemiddeld over de onderste 1500 m van de atmosfeer een factor 3 lager dan E aan de grond. Daarom zal ρ een factor 3 kleiner zijn dan de grondwaarde. Verder gebruik makend van de gegevens uit figuur 6 en tabel 1:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \Rightarrow R = 1,3 \cdot 10^{13} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 2,0 \cdot 10^{16} \Omega / m^2$$

$$U = \frac{E}{r} = f \cdot \frac{Q}{r} = 8,99 \cdot 10^9 \cdot \frac{45}{1,5 \cdot 10^3} = 2,7 \cdot 10^8 V$$

$$I = \frac{U}{R} = 1,4 \cdot 10^{-8} A / m^2$$

Met behulp van figuur 6 vinden we voor de totale omgekeerde lekstroom voor één bui (uitgaande van een cirkelvormige basis van de bui):

$$I_{\text{tot}} = 1,4 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 10^6 = 0,7 A$$

Voor alle 2000 buien op aarde geeft dat 1400 A.

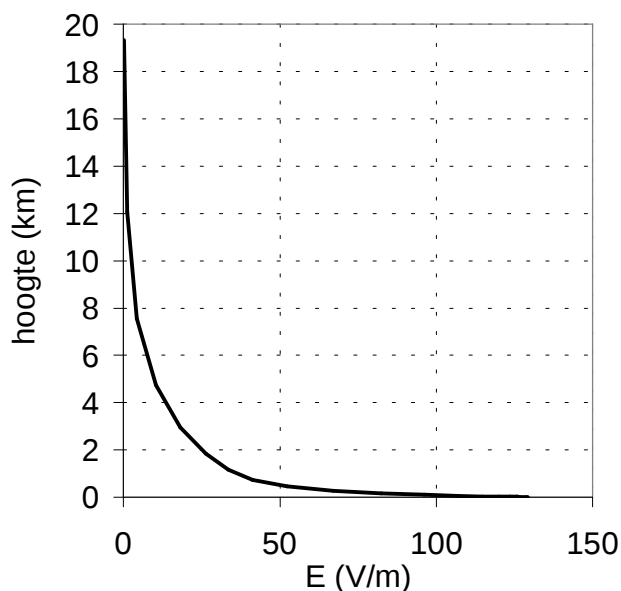
Tabel 2. Karakteristieke waarden voor een ontlading (bron: Uman, 1984)

Wat	Grootheid	waarde	eenheid
Voorontlading	voortplantingssnelheid	$1,5 \cdot 10^5$	m/s
	lading in het kanaal	4	C
Vangontlading	voortplantingssnelheid	$2 \cdot 10^6$	m/s
	lading in het kanaal	1	C
Hoofdontlading	voortplantingssnelheid	$8 \cdot 10^7$	m/s
	piekstroom	$1,5 \cdot 10^4$	A
	lading in het kanaal	2,5	C
Totale ontlading	aantal ontladingen door zelfde kanaal	3-4	
	tijd tussen ontladingen	40	ms
	totale lading door kanaal	25	C

onweersbui voorbij trok. Zichtbaar is de aanwezigheid van onweer op enige afstand vanaf een uur of 11. Rond 16:00 uur stijgt het aardelektrisch veld sterk. Op dat moment heeft het onweer Wageningen bereikt en volgen een aantal sterke dalingen, ten gevolge van inslagen in de buurt

van Wageningen. Rond 18:00 uur stijgt het elektrisch veld nog eenmaal om dan, na een fikse daling te stabiliseren rond de mooi weer waarde van 400 V/m. Deze fluctuatie in het aardelektrisch veld is karakteristiek voor dissiperende onweersbuien en wordt de End Of Storm Oscillation (EOSO) genoemd.

Figuur 11. Verloop van de sterkte van het aard-elektrisch veld met de hoogte.



Profielwerkstuk over onweer

De Aarde.nu-site (link 1 en 2) over onweer is bedoeld om leerlingen op weg te helpen bij het maken van een (profiel-) werkstuk over onweer. Verschillende suggesties worden gedaan, en het eerste bronnenmateriaal staat op de site vermeld. Zo is het mogelijk om zelf metingen te doen aan het aardelektrisch veld of aan de hand van bestaande metingen de karakteristieken van dit veld te onderzoeken, voor tijdens en na een onweersbui. De Leerstoelgroep Meteorologie van Wageningen Universiteit is bereid om leerlingen op aanvraag op het Haarweg-meeetveld metingen te laten doen (onder begeleiding). Overigens zijn de metingen van dit weerveld (inclusief antennesysteem) ook online te bekijken of te downloaden (link 4, 'current weather' → 'raw data').

Een andere optie is dat leerlingen een video-opname maken van een onweersbui en die vervolgens analyseren. Door de

video vertraagd te laten afspelen is het mogelijk de verschillende karakteristieken van een onweersbui die in dit artikel vermeld staan te vergelijken met de eigen waarnemingen.

Wanneer leerlingen zelf waarnemingen willen doen die betrekking hebben op het thema onweer, is het verstandig als de onderwerp-keuze al voor de zomervakantie gemaakt wordt. De meeste onweersbuien in Nederland treden immers in de zomer op. Bovendien is het verstandig om af te spreken met welk materiaal de leerlingen aan de slag gaan, mocht het niet lukken om zelf waarnemingen te doen. Video-opnames van onweersbuien zijn bijvoorbeeld ook op internet te vinden (bijv. link 5).

Tenslotte, het lijkt haast triviaal, maar toch: laat leerlingen die zelf waarnemingen gaan doen eerst, als voorbereiding, de gevaren van onweer bestuderen en hoe zich ertegen te beschermen (zie bijvoorbeeld link 3). Om bijvoorbeeld een video-opname van onweer te maken is het helemaal niet nodig om onbeschermd het vrije veld in te gaan (wanneer dat wel zo zou zijn, zouden er aanzienlijk minder onweer-video's bestaan). Een veilige plek met uitzicht op het onweer (bijvoorbeeld een flatgebouw aan de rand van de bebouwing) is een prima plaats om de opnames te maken.

Uiteraard is het ook mogelijk om een PWS over onweer te maken, zonder zelf waarnemingen te doen of waarnemingen van anderen te gebruiken. Op de Aarde.nu-site staan ook suggesties voor ontwerp opdrachten of meer theoretische opdrachten.

Bronnen

Internet

- Link 1: <http://www.aarde.nu/>
Link 2: <http://www.werkstuknetwerk.nl/wau/bwa/bwa/8/thema.html>
Link 3: http://www.meteo.oma.be/IRM-KMI/educ/lightning_nl.html
Link 4: <http://www.met.wau.nl/>
Link 5: <http://www.lightningwizard.com/Lightning/>
Link 6: <http://www.vwo-campus.net/>

Literatuur

- Dozeman, H.-J., 2000. *Atmosferische elektriciteit*. Afstudeerverslag. Wageningen Universiteit, Meteorologie en Luchtkwaliteit.
- Feynman, R.P., Leighton, R.B. and Sands, M.L., 1989. *The Feynman Lectures on Physics: Commemorative Issue*. Addison-Wesley Publishing Company Inc., Reading, Massachusetts . Part II
- Hage, J.C.H. van der, 1975. Elektriciteit in de atmosfeer. *Natuur en Techniek* 1975/9.
- Stull, R.B., 2000. *Meteorology for Scientists and Engineers: A Technical Companion Book to C. Donald Ahrens' Meteorology Today* (2nd ed.). Brooks/Cole Pub Co.
- Minnaert, M.G.J., 1970. *Natuurkunde van 't vrije veld*. Deel 2. Thieme, Zutphen 3e dr.
- Uman, 1984. *Lightning*. Dover Publ., New York.

Achtergrond

Dit artikel past in de reeks over profielwerkstukken van de website Aarde.nu. Aarde.nu is een samenwerkingsverband tussen de aardwetenschappelijke opleidingen van de Vrije Universiteit Amsterdam, Universiteit van Amsterdam, Wageningen Universiteit, Technische Universiteit Delft en Universiteit Utrecht. Op de website van aarde.nu (link 1) wordt een scala aan aardwetenschappelijke profielwerkstuksuggesties aangeboden. De site leidt leerlingen en leraren door de fases van verkenning, onderzoek, documentatie en presentatie.

De bijdrage van de eerste auteur aan de profielwerkstuksuggestie 'Knetterende luchten' vond mede plaats in het kader van een beurs van de Nederlandse Natuurkunde Vereniging, voor het maken van een verzameling Praktische Opdrachten en Profielwerkstuksuggesties over omgevingsnatuurkunde. Ander materiaal hiervan is (binnenkort) te vinden op de site van VWO-campus van Wageningen Universiteit (link 6). De andere auteurs zijn medewerkers van de opleiding Bodem, Water, Atmosfeer van Wageningen Universiteit. Deze opleiding leidt op tot bodemkundige, hydroloog of meteoroloog.