

Ontsluiering van stikstofuitstoot door de luchtvaart middels extrapolatie

~ en de berekende depositie op een Veluws heideveld ~

Evert Mouw

2022-09-15

Samenvatting

Een verkennende datastudie. **INLEIDING** De uitstoot van NO_x door vliegverkeer boven 914 meter wordt niet meegenomen in de stikstofberekeningen. De gegevens over de uitstoot door de luchtvaart zijn beperkt. Door de uitstoot scherper in beeld te brengen ontstaat een betere indruk van de depositie veroorzaakt door vliegtuigen. **METHODE** De emissie brondata voor het OPS zijn geëxtrapolerd naar de uitstoot op grotere hoogtes met behulp van een eenvoudig model over het energieverbruik van een lijnvliegtuig in verschillende stadia en hoogtes tijdens de vlucht. Ook is de spreiding van die extra uitstoot in beeld gebracht met behulp van een dataset met vluchtroutes. **RESULTATEN** Waar in de RIVM brongegevens sprake is van een totale emissie van 87 g/s (2744 ton/jaar), met emissies tot slechts 875 meter geregistreerd, wordt bij een terughoudende extrapolatie t/m 7,5 km hoogte een emissie van 236 g/s (7441 ton/jaar) gevonden voor luchtvaart van en naar Schiphol. De extra depositie die daardoor ontstaat op een Veluws heideveld is echter slechts 1,63 mol/ha/jaar omdat in de hogere luchtlagen de meeste stikstof verwaait. Hierover bestaan nog wel verschillen van inzicht die aanleiding geven tot toekomstig onderzoek. **CONCLUSIE** Uit een terughoudende extrapolatie blijkt dat er fors meer uitstoot gegenereerd wordt door de luchtvaart dan welke in de emissie brondata door het RIVM gebruikt wordt. Dat leidt volgens de bestaande methodiek echter niet tot heel veel meer depositie op een Veluws heideveld.



Versiehistorie

- 2022-06-21: **0.9** Eerste publicatie, in afwachting van *peer review*.
- 2022-07-09: **1.0** Herpublicatie op basis van gecorrigeerde en aangevulde Donderdorp data.
- 2022-07-12: **1.1** Correctie: de Donderdorpdata hebben *geen* relatie met OpenSky.
- 2022-09-15: **1.2** Enkele aanpassingen n.a.v. mondelinge feedback.

Colofon, afkortingen, versiehistorie, etc.

AFKORTINGEN

GCN: Grootschalige Concentratiekaarten Nederland
GCN codes: codes voor categorieën zoals gebruikt in de GCN
GU: GrondUitstoot (totale emissie op hoogte < 300 meter)
N2000: Natura 2000
NEC: National Emission Ceilings (Nationale Emissieplafonds)
NO_x: stikstofoxiden, waaronder NO₂
OPS: Operationele Prioritaire Stoffen model
RD: RijksDienst (grid, coördinatensysteem)
KDW: Kritische DepositieWaarde
SATL: Samenwerkende Actiegroepen Tegen Laagvliegen
TSV: tab-separated values
 1x1 km, vakje, vierkant, xy, één bij één km, vierkante kilometer

DATASETS

Brondata: Emissiegegevens uit 2017 voor invoer in het OPS model van het RIVM
Donderdorpdata: Vluchtgegevens uit 2018, 10 maanden, tot 24,500 voet hoogte, per 1x1 km, van [Donderdorp.nl](#).
Vliegdata: Afgeleide dataset ontwikkeld in deze studie als invoer voor OPS

DANKBETUIGING

- Gerard van [Vlieghinder.nl](#) voor het mij toesturen van de dataset van [Donderdorp.nl](#) (de Donderdorpdata).
- Leon Adegeest van de Samenwerkende Actiegroepen Tegen Laagvliegen (SATL) voor zijn opmerkingen. Fouten blijven uiteraard voor mijn verantwoording.
- Mireille Schaap voor de spellingscontrole op de eerste conceptversie.

BIJ DEZE VERSIE

De oorspronkelijke versie (0.9) ging uit van verkeerde metadata bij de Donderdorpdata; de hoogte bleek niet in meters, maar in voet gegeven te zijn. Enkele scripts en een controle-afbeelding zijn daartoe aangepast. Voor versie 1.0 zijn de berekeningen opnieuw uitgevoerd, deze keer met de puntbron extrapolatie ook met een actuele OPS versie. De bevindingen zijn hierdoor echter niet wezenlijk gewijzigd. Ook is een opmerking van Leon Adegeest in versie 1.0 verwerkt. In versie 1.2 zijn enkele mondelinge opmerkingen verwerkt van Anoniem (2022).

Op het weblog van de auteur zal het verslag en het bronmateriaal zonodig vervangen worden en voorzien worden van een nieuw versienummer indien *peer review* of andere reacties daartoe aanleiding geven.

AUTEUR & COPYRIGHT

© 2022 Evert Mouw, MSc MA. Email: post@evert.net
Vrijgegeven onder de *Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)*.
Afbeelding titelblad: *Italian traffic signs*, door Flanker, Public Domain. Via [Wikimedia Commons](#).

Inleiding

Natura 2000 (N2000) gebieden bevatten zowel natuurgebieden als cultuurgronden. Een voorbeeld van te beheren cultuurgrond die toch juridisch onder de noemer “natuur” is gebracht, vormen de heidevelden midden op de Veluwe. In weerwil van de natuurlijke processen die tot verstruiking en verbossing van zulke cultuurgronden leiden, wordt in Nederland begrepen dat zulke natuurlijke processen tegengegaan kunnen worden door het beperken van stikstofdepositie (Mouw 2019).

Per N2000 gebied is een Kritische Depositiewaarde (KDW) vastgesteld welke niet overschreden dient te worden om te voldoen aan de Habitatrictlijn ('Habitatrictlijn' 1992).

De termen stikstof en KDW komen niet voor in de Habitatrictlijn. Het Europese Milieuagentschap (EMA) is gestopt met het gebruik van “critical load exceedance for nitrogen” als indicator (EMA 2021). In Nederland is hierover nog discussie. Jaap. C. Hanekamp, mede-auteur van het rapport van de commissie Hordijk (Berekenen Stikstof 2020), uit zich op zijn weblog zeer kritisch over het gebruik van KDW's, waarbij hij zich aansluit bij bevindingen van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), en gaat daarbij zelfs nog een stap verder door te stellen dat stikstof een misplaatste hoofdrol speelt in het Nederlandse natuurbeleid (Hanekamp 2021).

Ondanks deze discussies worden de KDW's als toetsingskader gebruikt t.b.v. de Habitatrictlijn. Het berekenen van de depositie van NO_x op de Natura2000 gebieden gebeurt in Nederland met het zgn. Operationele Stoffen Model (OPS), welke de basis vormt voor de AERIUS calculator. Het is van belang om alle emissiebronnen mee te nemen. Immers, *garbage in, garbage out*.

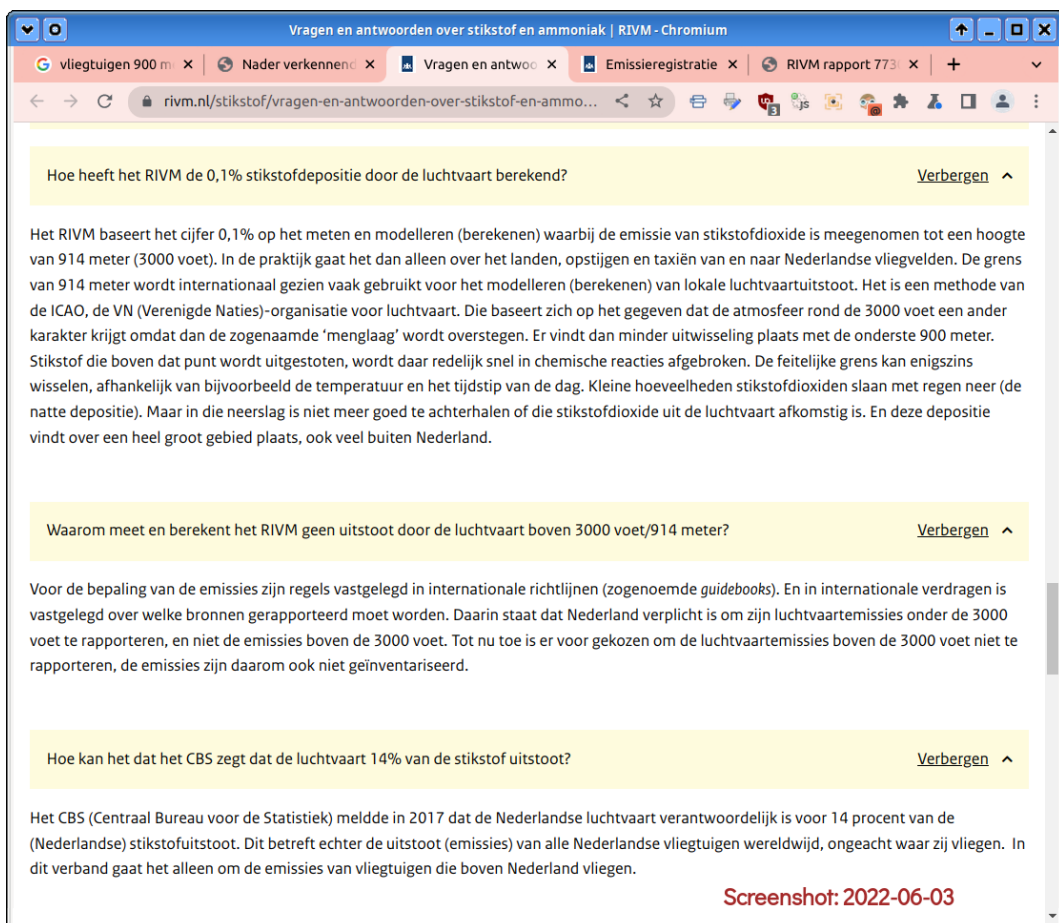
Een verbetering van de emissieregistratie van de scheepvaart op zee is mogelijk door gebruik te maken van de Tropomi satellietbeelden. Het *Leiden Institute of Advanced Computer Science* (LIACS) doet hier onderzoek naar (Kurchaba e.a. 2022).

De stikstofuitstoot van vliegverkeer, voornamelijk stikstofoxiden (NO_x , vnl. NO_2), wordt niet in zijn geheel meegenomen. Conform de NEC-richtlijn wordt uitstoot boven de 3000 voet (914 meter) niet in de emissieregistratie opgenomen (RIVM 2022). In de praktijk wordt alle stikstofuitstoot van vliegtuigen tijdens de kruisvlucht geëxcludeerd (Jansen 2003). Die exclusie is vermoedelijk niet toegestaan in de toepassing van de Habitatrictlijn.

Elke vlucht is anders; het type toestel, het aantal passagiers, het gewicht, de snelheid, de wind, de hoogte en of het vliegtuig opstijgt of juist aan het landen is heeft allemaal invloed op het brandstofverbruik (Chakraborty 2022) en dus op de uitstoot. De complexiteit van de berekening is echter een slecht excuus om een emissiefactor te excluderen.

Het RIVM geeft aan dat deze exclusie te rechtvaardigen is omdat boven de 900 meter de “menglaag” overstegen wordt, waardoor stikstof redelijk snel wordt afgebroken. En wat resteert aan depositie is lastig terug te herleiden tot de luchtvaart, en bovendien over een groot gebied uitgesmeerd (RIVM 2022).

Dat stikstofuitstoot van vliegtuigen ook boven de menglaag vanaf 900 meter relevant kan zijn, lijkt sterk gesuggereerd te worden door een studie van het RIVM zelf (!), geschreven in 2002 en gepubliceerd in 2003 (Jansen 2003). In een onderzoeksnotitie stellen de Samenwerkende Actiegroepen Tegen Laagvliegen (SATL) dat “alle uitgestoten stikstofoxiden uiteindelijk in een bepaalde chemische samenstelling terugvallen naar de aarde” en dat er in werkelijkheid beduidend meer relevante



Afbeelding 1: Screenshot van de website van het RIVM, genomen op 3 juni 2022.

stikstofemissie door de luchtvaart is (Adegeest 2019). Nieuwe technieken kunnen de uitstoot door vliegtuigen verkleinen, maar door de groei van het luchtvaartverkeer is de totale uitstoot toch toegenomen (Prashanth e.a. 2021).

Op 21 juni 2022 zal het embargo verlopen op een studie van de TU Delft, een scriptie voor een *master* die al op 21 september 2021 ingediend werd. Vanwege het embargo kunnen de resultaten ervan niet meegenomen worden in deze studie. De *abstract* is echter al wel beschikbaar en daarin wordt gesteld: “Local regulatory policies do not take into account upwards of 70% of aviation attributable nitrogen deposition.” (Loo 2021)

In verband met het voorzorgsbeginsel (art. 6 Habitatrictlijn) moet er vanuit gegaan worden dat de stikstofuitstoot van vliegtuigen neerslaat (depositie) op N2000 gebieden. Het stellen van limieten aan de toegestane stikstofuitstoot door het luchtverkeer, gebaseerd op de werkelijke uitstoot, zou in lijn zijn met de vergunningsverlening rond diverse bouw- en infrastructurele projecten en ook eisen die gesteld worden aan de agrarische sector.

Los hiervan hebben stikstofoxiden een negatief effect op de volksgezondheid, waardoor ook de depositie van NO_x in (dicht)bevolkte gebieden relevant kan zijn. Verder kan de uitstoot van stikstofoxiden bijdragen aan klimaatopwarming. Deze negatieve effecten vallen buiten het bestek van deze verkennende studie, maar hebben wel de aandacht van de Europese Unie (Neslen 2016).

Het bepalen van de hoeveelheid stikstofdepositie van vliegtuigen *zonder* de limiet van 914 meter (3000 voet), dus *inclusief* de kruisvlucht, maar wel met gebruikmaking van de huidige modelmatige OPS methodiek, benodigt de volgende zaken:

1. Gegevens over de totale emissie van het vliegverkeer per geografisch afgebakende eenheid (emissiepunten). Deze ontbreken in de emissieregistratie.
2. Geodata (receptorpunten) van de N2000 stikstofgevoelige gebieden (130 van de 161). Deze zijn publiekelijk beschikbaar.
3. Het OPS rekenmodel. Gecontroleerd moet worden of binnen het rekenmodel geen afkapwaarde van 3000 voet gehanteerd wordt. Dankzij de rechter is de broncode van OPS publiekelijk beschikbaar.

Het doel van deze verkennende studie is het maken van een conservatieve schatting van de NO_x depositie op een Veluws heideveld, veroorzaakt door het commerciële vliegverkeer (dus zonder militaire vluchten), zonder de hoogtelimiet van 914 meter te volgen, met gebruikname van het OPS rekenmodel.

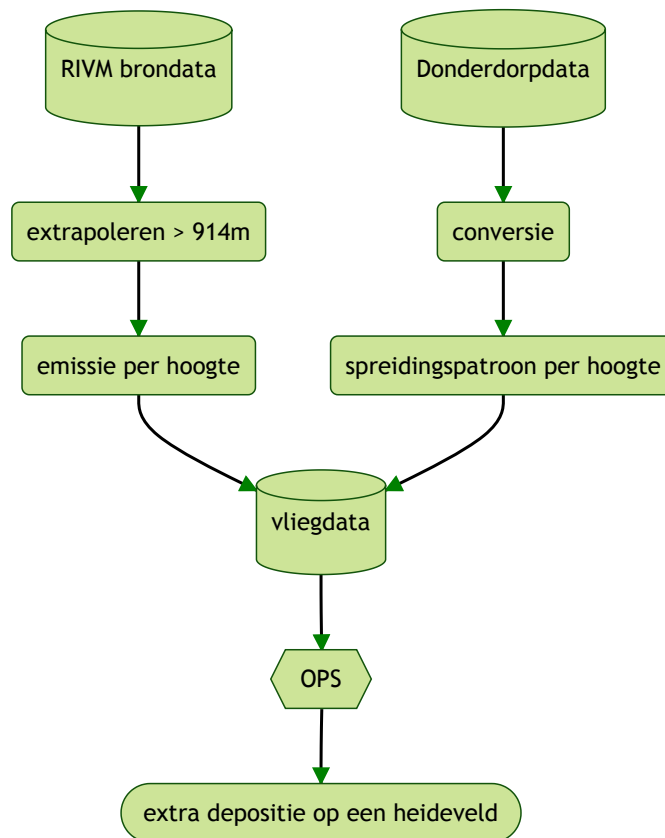
Hiertoe moet eerst een redelijke schatting gemaakt worden van de totale emissie. Dat wordt gedaan in deel 1. Daarna zal gerekend worden met OPS in deel 2.

§1 Emissies

Omdat de emissies van de (burger)luchtvaart boven 914 meter niet in de openbare emissieregistratie zijn opgenomen, zullen alternatieven aangeboord dienen te worden. Daartoe zijn meerdere opties:

1. Extrapolatie van de stikstofuitstoot zoals bekend in de openbare emissiedata.
2. Gebruik van de dataset(s) verzameld door [Donderdorp.nl](#).
3. Gebruikname van API's en/of webhooks zoals [aviationstack](#), [Flightlabs](#) of [OpenSky](#).

Aangezien de eerste twee opties onmiddellijk beschikbaar waren is daarvoor gekozen.

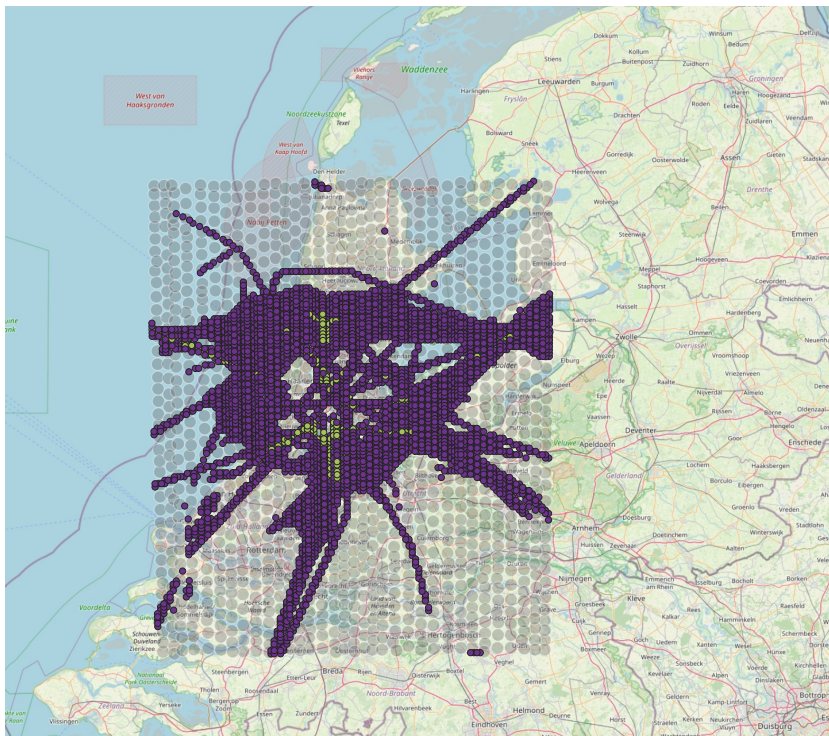


Afbeelding 2: Dataflow

Donderdorpdata: de dataset van Donderdorp.nl

Door [Donderdorp.nl](https://donderdorp.nl) is een dataset samengesteld met voor elke vierkante kilometer op het Nederlandse RD (RijksDienst) vlak [(58500, 405500), (179500, 549500)], per hoogtecategorie, de hoeveelheid vluchten door de reguliere luchtvaart. Ca. 70% tot 95% van de vliegbewegingen zijn geregistreerd. De hoogtecategorieën zijn opgedeeld in starters (S) en landers (L). Alleen vliegbewegingen tot 24,500 voet (~7,5 km) zijn geïnccludeerd. In de praktijk zijn het vooral vluchten van en naar Schiphol en enkele naar Rotterdam. In afb. 3 is duidelijk zichtbaar dat vluchten verder weg van Schiphol in de dataset nauwelijks voorkomen.

De oorspronkelijke Donderdorpdata is t.b.v. deze analyse geconverteerd naar een *tab-separated values* (TSV) bestand, en de maximale geregistreerde hoogte (24,500 voet) is in de kolomnamen opgenomen¹. Deze dataset wordt hierna aangeduid als de **Donderdorpdata**.



Afbeelding 3: Vluchtbewegingen per in de Donderdorpdata van 2018.

¹Zie het bestand `donderdorpdata2018.desc` voor details.

Brondata: De emissiedata voor het RIVM OPS rekenmodel

De emissie brondata van het RIVM uit 2017², die als invoer diende voor het OPS rekenmodel ('Brondata stikstof' 2020 (2017)), bevat de totale emissie per vierkant en per hoogte tot 875 meter³. Hierbij zijn enkel de records overgenomen met de GCN ('Brondata stikstof' 2020 (2017)) categorie 3611 (vluchten van en naar Schiphol)⁴ met de component NO_x. Net als de Donderdorpdata is de spatiële resolutie één bij één kilometer met coördinaten in het RD-grid. Deze dataset wordt hierna aangeduid als de **brondata**.

Vliegdata: Emissies boven 875 meter

Doel is om **vliegdata** te genereren waarmee het OPS kan werken, om zo de depositie van NO_x veroorzaakt door vluchten boven 875 meter te kunnen schatten. De implementatie hiervan is niet triviaal en afhankelijk van de beschikbare gegevens. De technische werkwijze is beschreven in de [bijlagen](#). Kort samengevat zijn nodig:

- Een **extrapolatie** van de totale uitstoot per hoogtebereik m.b.v. de *brondata*.
- Een **spreiding** van de totale uitstoot per hoogtebereik m.b.v. de *Donderdorpdata*.

Extrapolatie

De extrapolatie wordt bemoeilijkt door het feit dat opstijgende vliegtuigen in het begin veel meer energie verbruiken dan wanneer ze de kruisvluchthoogte naderen, terwijl dalende vliegtuigen een constante lage hoeveelheid energie gebruiken ([Epstein en O'Flarity 2019](#)). Zie afb. 4.

Tabel 1: Emissieverhouding per fase vastgesteld voor Juanda International airport ([Chilongola en Ahyudanari 2019](#)).

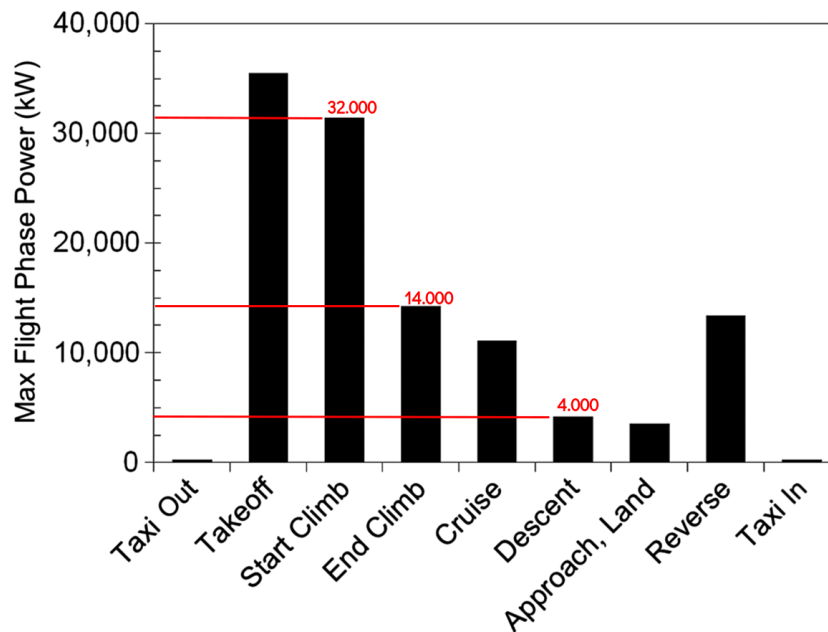
Mode	NO _x Emission [%]
Taxi/Idle	13.28
Approach	13.65
Climb out	48.49
Takeoff	24.58
TOTAL	100.00

De LTO zit geheel in de emissieregistratie. Daar zit ook het taxiën bij, maar dat betreft slechts een marginale bijdrage. Vooral van het opstijgen zorgt op die categorie rond 25 meter voor uitstoot. Dat in de brondata dit alles op 25 meter geregistreerd staat is een vereenvoudiging; het zit er dus wel in. De brondata zijn t.b.v. de grootschalige GCN kaarten; de brondata zijn een versimpelde versie. Voor vergunningsverlening t.b.v. bijv. een individuele veehouderij worden meer gedetailleerde invoerdata gebruikt (die niet openbaar zijn). Overigens doet het taxiën niet veel voor de emissies; de uitstoot is marginaal ([Anoniem 2022](#)).

²Merk op dat de brondata van latere jaren niet publiek beschikbaar gesteld zijn.

³Ligt de grens op 875 of op 914 meter? In de brondata is de grootste waarde voor de hoogte van emissies uit vliegtuigen 875 meter. Dat is lager dan de NEC grens van 914 meter (3000 voet). Mogelijk is dit een veiligheidsmarge om zeker onder de NEC afkapwaarde te blijven.

⁴Hierdoor is het ook niet nodig steeds de clause where cat = 3611 op te nemen in SQL queries. Om het gebruik en de distributie te vergemakkelijken is een selectie genomen, en van BRN naar TSV en sqlite omgezet. Zie het bestand `brondata2017_selectie.desc` voor details.



Afbeelding 4: Power required for a single-aisle airliner by flight phase. (Epstein en O’Flarity 2019)

Tabel 2: Hoogtebereiken en hoeveelheid NO_x uitstoot volgens de brondata.

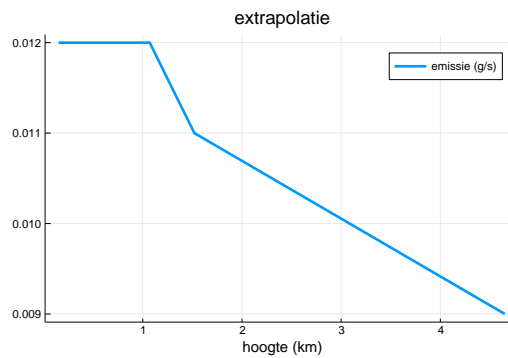
h	n	sum(q) NO _x
25.0	83	25.688469332
75.0	79	07.181109574
125.0	79	04.826785184
175.0	66	01.185028372
250.0	82	01.644386538
350.0	314	08.236867251
450.0	183	04.673260073
625.0	1309	19.076119013
875.0	395	14.439936477

In de gegevens van tabel 2 valt geen lijn te ontdekken. De hoge uitstoot op 25 meter hoogte springt eerst in het oog. Net bij het begin van het stijgen is het energieverbruik het hoogst. Daarna daalt de uitstoot, om weer te stijgen vanaf 350 meter. Het is goed mogelijk dat vliegtuigen in afwachting van permissie om te landen enige tijd rond ca. 400 meter rondjes blijven vliegen (*holding*). Dat vlieggedrag is afwijkend t.o.v. de rest van het landen en stijgen, en kan dan niet in de extrapolatie meegenomen worden. Nemen we alle uitstoot tot 300 meter hoog, dan krijgen we een redelijk beeld van de uitstoot tijdens het eerste deel van de klimfase (en het laatste deel van de daalfase). Die uitstoot kunnen we modelleren (extrapoleren) door te kijken naar het energieverbruik van een vliegtuig per vluchtfase. Dat is verder uitgewerkt in de [bijlagen](#).

Tabel 3: De emissie van alle vliegtuigen samen (stijgers en landers gecombineerd) per hoogtbereik in de Donderdata volgens de extrapolatiefunctie. De totale emissie op het laatste hoogtbereik is zo groot omdat de hoogte daar over een grote *range* gaat.

h [ft]	gem. h [km]	emissie [g/s]	gem. emissie [g/s]
0-1000	0.15	12.241	0.012
1000-1500	0.38	6.037	0.012
1500-2000	0.53	5.982	0.012
2000-2500	0.69	5.926	0.012
2500-3000	0.84	5.871	0.012
3000-4000	1.07	11.575	0.012
4000-6000	1.52	22.483	0.011
6000-24500	4.65	165.848	0.009
<i>totaal</i>		235.963	

Voor alle hoogtbereiken t/m 24500 voet (7,5 km) is de emissie 235,96 g/s (7441 ton/jaar).

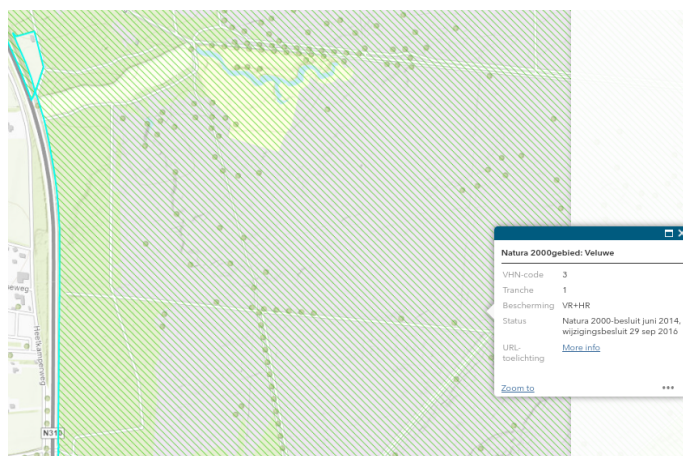


Afbeelding 5: De uitstoot van alle vliegtuigen samen, naar tabel 3. De daling van de emissies op grotere hoogte is hier deels zichtbaar.

§2 Deposities

Proefberekening vanaf een puntbron

Een OPS modelberekening werd uitgevoerd met als invoer de geëxtrapoleerde totale emissies per hoogtebereik – zie tabel 3. Als emissiebron werden alle x,y waarden op een centraal punt op Schiphol gehouden, nl. \square RD 109426, 483094. Als depositiedoel werd een punt gekozen op de Veluwe, nabij Stroe, op de heide; \square RD 177772, 466068. De run leverde een totale depositie van **1,06** mol N/ha/jaar op. Dat is gering; de achtergronddepositie is ter plekke 1400-2400 mol N/ha/jaar (Zweers 2020). Zie de [bijlagen](#) voor technische details.



Afbeelding 6: De droge heide bij Stroe, mogelijk ook met Haarpodzolgronden.

Als de totale emissie per hoogtebereik gespreid wordt volgens het patroon van de Donderdorpdata ontstaat een realistischer beeld.

Gespreid over vliegroutes

De geëxtrapoleerde emissies per hoogtebereik kunnen toebedeeld worden aan de geografische locaties van vluchtroutes met behulp van de Donderdorpdata. Een berekening met die gespreide emissiedata gaf een slechts minimaal grotere depositie op het Veluwse heideveld, te weten **1,63** mol/ N/ha/jaar. Zie de [bijlagen](#) voor een beschrijving van de technische implementatie.

Discussie

De emissieregistratie had als doel een uniforme emissierapportage over verschillende landen. Vergunningsverlening was niet het oorspronkelijke doel. Het RIVM, dat de emissieregistratie beheert, biedt echter wel zelf de AERIUS/OPS calculator aan t.b.v. de vergunningsverlening, waarmee het zelf de oprekking van het doel in de hand werkt. Het gebruik van de emissieregistratie wordt steeds verder opgerekt en gebruikt als basis voor andere onderzoeken (Anoniem 2022). Voor deze studie waren de gegevens in de emissieregistratie wel nuttig, maar inderdaad niet ideaal.

Als Schiphol te vergelijken zou zijn met Juanda, dan zou alleen al het taxiën verantwoordelijk zijn voor ca. 13% van de NO_x uitstoot op de luchthaven, en de *takeoff* voor nog eens 25% tabel 1. Echter volgens Anoniem (2022) is de uitstoot tijdens het taxiën bij Schiphol te laag om relevant te zijn. Onduidelijk is of zo de uitstoot van NO_x onderschat wordt. Dit kan relevant zijn omdat deze uitstoot op lage hoogte plaatsvindt en dus minder ver zal verwaaien.

Onder de 24,500 voet hoogte zijn de Donderdorpdata niet volledig, maar dat is minder bezwaarlijk omdat de gegevens enkel gebruikt zijn om de *spreiding* van de vluchten in beeld te krijgen. Een groter gemis is het ontbreken van vluchtgegevens boven 24,500 voet en buiten het geometrische vlak dat vooral de Randstad bevat. Buiten dat vlak vinden ook veel vluchten onder 7,5 km hoogte plaats en die spreiding en emissies konden in deze studie niet meegenomen worden. Ook de vluchten op kruishoogte zijn niet meegenomen. De werkelijke depositie wordt daardoor waarschijnlijk onderschat. Het is wel zo dat op grotere hoogten de NO_x over grotere afstanden getransporteerd wordt en verdund raakt.

De vliegdata bevatten hoge onzekerheden en zijn onvolledig. Het gebruik van veel cijfers achter de komma is enkel om afrondingsfouten te voorkomen. Echter niet alle cijfers achter de komma's zijn significant – en de cijfers voor de komma misschien ook niet. Bewust is gekozen voor een conservatieve, terughoudende benadering. Daardoor is het mogelijk dat de werkelijke emissie en ook de werkelijke depositie veroorzaakt door luchtverkeer groter is dan in deze studie benaderd is. Bovendien is voor de deposities uitgegaan van het OPS model, dat de depositie van luchtvaart mogelijk onderschat – zie o.a. de discussies over de menglaag (Adegeest 2019) en de abstract van de studie uit Delft die te laat kwam om in deze studie te includeren (Loo 2021). Uit die studie bleek dat minder dan 10% van de uitstoot van NO_x tijdens de LTO fase te ontstaan; dan zou de emissieregistratie mogelijk meer dan 90% van de luchtvaartemissie ontberen.

Bovendien blijkt uit metingen dat tot ver buiten de in het door Donderdorpdata in kaart gebrachte gebied veel hoger dan 7,5 km hoogte wordt gevlogen. Hierdoor zijn zowel de spreiding als de emissies in werkelijkheid nog groter (Adegeest 2022).

Omdat als depositiepunt een Natura 2000-gebied gekozen is waar juist veel heide is en veel boeren zouden moeten verdwijnen, nl. bij Stroe op de Veluwe, is dit ook maatschappelijk relevant.

De proefberekening vanaf een puntbron liet een jaarlijkse depositie zien van 1,63 mol/ha op de Stroese heide op de Veluwe, wat onbeduidend is in het licht van een achtergronddepositie van 1400-2400 mol N/ha/jaar (Zweers 2020). Dat iets meer depositie gevonden werd na het spreiden van de geëxtrapoleerde emissiedata volgens het Donderdorpdata patroon is verklaarbaar uit het gegeven dat een aantal vliegroutes in de buurt van de Veluwe liggen. De hoeveelheid extra depositie is echter zeer gering.

Wel is door de extrapolatie in beeld gebracht dat de werkelijke emissie van het luchtverkeer veel hoger ligt dan waar momenteel mee gerekend wordt. Omdat in deze studie gekozen werd voor een terughoudende extrapolatie, is het goed voorstelbaar dat ook in deze studie de werkelijke emissie van vliegtuigen nog steeds onderschat wordt. De werkelijke emissie schuift in dat geval op in de richting van de zeescheepvaart (zie tabel 5).

Tabel 4: Stikstofuitstoot gerelateerd aan de luchtvaart.

q[(g/s)]	q[ton/j]	Omschrijving
86.95	2744	Emissiedata voor OPS (RIVM, 2017), afkaphoogte 875 meter
229.82	7247	Extrapolatie op basis van OPS emissiedata 2017, 0 t/m 24500 voet

Tabel 5: Verkeer en vervoer in 2018 volgens de emissieregistratie. Bron: ER Reeks 1990-2019 Definitief, via data-preview.emissieregistratie.nl

Verkeer en vervoer in Nederland, 2018	kton NO _x
Railverkeer	1,71
Recreatievaart	2,34
Visserij	2,55
Wegverkeer - niet uitlaatgassen	4,03
Luchtvaart	4,03
Zeescheepvaart stilliggend	9,71
Zeescheepvaart varend op Nederlands grondgebied	15,18
Mobiele werktuigen	21,93
Binnenscheepvaart	25,63
Wegverkeer - uitlaatgassen	75,15
Zeescheepvaart NCP (inclusief ankerliggers)	78,00

Vervolgonderzoek

De achtergrondinformatie, gegevens en methoden in deze kleine studie zijn wellicht nuttig bij eventueel vervolgonderzoek. Enkele suggesties daartoe worden hieronder gegeven.

- De uitstoot kan per vlucht, per type toestel, en per route berekend worden. Dat kan met bijv. de [OpenSky](#) data in combinatie met de RMI database.
- De milieueffectrapportage (MER) voor Schiphol benutten. Die bevat mogelijk meer gedetailleerde informatie over de ruimtelijke spreiding van het vliegverkeer. Schiphol heeft de beste informatie, maar gebruikt wel een ander model ([Anoniem 2022](#)).
- In deze studie zijn enkel de vluchten van en naar Schiphol meegenomen. Als meer vluchtdata bekend zijn, zou dat breder getrokken kunnen worden (GCN codes 3611 t/m 3617.)
- De zeevaart wordt beter in beeld gebracht met nieuwe technieken ([Kurchaba e.a. 2022](#)); mogelijk is dat ook toepasbaar op de luchtvaart.
- Het onderzoek uit Delft ([Loo 2021](#)), nog niet vrijgegeven ten tijde van deze studie, zou nieuw licht kunnen werpen op de stikstofuitstoot door de luchtvaart.

Conclusie

Uit een terughoudende extrapolatie blijkt dat er fors meer uitstoot gegenereerd wordt door de luchtvaart dan welke in de emissie brondata voorkomt. Dat leidt echter niet tot heel veel meer depositie op een Veluws heideveld. Het is mogelijk dat het OPS model de depositie onderschat; toekomstig onderzoek zou daar meer licht op kunnen werpen.

Bronnen

(Inclusief referenties die in de bijlagen gebruikt zijn.)

- Adegeest, Leon. 2019. 'Berekende versus werkelijke stikstofemissie van de luchtvaart in Nederland'. Samenwerkende Actiegroepen Tegen Laagvliegen (SATL). https://satl-lelystad.nl/wp-content/uploads/2019/10/Berekende-versus-werkelijke-stikstofemissie-van-de-luchtvaart-in-Nederland_final.pdf.
- . 2022. 'Persoonlijke email'.
- Anoniem. 2022. 'Persoonlijke communicatie'.
- Berekenen Stikstof, Adviescollege Meten en. 2020. 'Meer meten, robuuster rekenen'. Minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2020/06/15/meer-meten-robuster-rekenen>.
- 'Brondata stikstof'. 2020 (2017). RIVM. <https://www.rivm.nl/documenten/brondata-stikstof>.
- Chakraborty, Esha. 2022. 'Brandstofverbruik van vliegtuigen – 10+ belangrijke concepten en feiten'. <https://nl.lambdageeks.com/aircraft-fuel-consumption/>.
- Chilongola, F. D., en E. Ahyudanari. 2019. 'Aviation and Aircraft Engine Emissions at Juanda International Airport'. *The International Conference on Aerospace and Aviation*. IOP. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/645/1/012022>.
- EMA. 2021. 'Critical load exceedance for nitrogen: Discontinued indicator'. EU. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/critical-load-exceedance-for-nitrogen>.
- Epstein, Alan H., en Steven M. O'Flarity. 2019. 'Considerations for Reducing Aviation's CO2 with Aircraft Electric Propulsion'. *Journal of Propulsion and Power*. <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/1.B37015>.
- 'Habitatrichtlijn'. 1992. EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/HTML/?uri=CELEX:31992L0043&from=LV>.
- Hacobian, Celine. 2018. 'Here's How High Planes Actually Fly, According to Experts'. Time. <https://time.com/5309905/how-high-do-planes-fly/>.
- Hanekamp, Jaap C. 2021. 'Het PBL en Stikstof - Kritisch afwaarderen van Depositie'. <https://jaaphanekamp.com/blog/science/politics/2021-10-17-het-pbl-en-stikstof-kritisch-afwaarderen-van-depositie/>.
- Jansen, W. K. 2003. 'Berekening van luchtvaartemissies voor verschillende allocatiemethoden - rapport 773002023/2002'. RIVM. <https://www.rivm.nl/publicaties/berekening-van-luchtvaartemissies-voor-verschillende-allocatiemethoden>.
- Kurchaba, Solomiia, Jasper van Vliet, Fons J. Verbeek, Jacqueline J. Meulman, en Cor J. Veenman. 2022. 'Supervised segmentation of NO2 plumes from individual ships using TROPOMI satellite data'. Leiden Institute of Advanced Computer Science (LIACS). <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2203.06993>.
- Loo, Marijn van. 2021. 'Quantifying the impact of aviation emissions on global nitrogen deposition'. TU Delft. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:bb8aef34-3fbf-4eab-b1bb-fb8f76259f9f?collection=education>.
- Mouw, Evert. 2019. 'Van heide en boeren naar stikstof en wensnatuur'. <https://www.furorteutonicus.eu/2019/12/04/van-heide-en-boeren-naar-stikstof-en-wensnatuur/>.
- . 2020. 'Rekenfout Mesdag, bug in OPS rekenprogramma van het RIVM, of gewoon een clusterfuck?' https://www.furorteutonicus.eu/wp-content/uploads/2020/03/clusterfuck_rekenfout.pdf.
- Neslen, Arthur. 2016. 'Air pollution from Europe's planes set to rise by nearly half'. *The Guardian*. The Guardian. <https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/29/air-pollution-from-europes-planes-set-to-rise-by-nearly-half>.
- Prashanth, Prakash, Raymond L. Speth, Sebastian D. Eastham, Jayant S. Sabnis, en Steven R. H. Barrett. 2021. 'Post-combustion emissions control in aero-gas turbine engines'. *Energy and Environmental Science* 14: 916–30. <https://doi.org/10.1039/D0EE02362K>.
- RIVM. 2022. 'Vragen en antwoorden over stikstof en ammoniak'. RIVM. <https://www.rivm.nl/stikstof/vragen-en-antwoorden-over-stikstof-en-ammoniak>.
- Zweers, H. 2020. 'Passende beoordeling & compensatieopgave stikstofdepositie: Tracébesluit A27/A12 Ring Utrecht 2020'. Royal HaskoningDHV; Rijkswaterstaat.

Bijlagen

1 Variabelen in de brondata en vliegdata

De emissie brondata voor OPS bevatten voor alle geaggregeerde vluchten samen en per hoogteniveau en per vierkante kilometer (□) de hoeveelheid NO_x op jaarbasis. Het aantal onderliggende vluchten zit niet in de brondata. Aannemelijk is dat de brondata op vrijwel complete vluchtgegevens gebaseerd zijn (dus een stuk completer dan de Donderdorpdata). Het is redelijk om uit te gaan van evenveel stijgers als landers in de emissieregistratie die tot de brondata geleid heeft.

Dat in de brondata de vluchtgegevens zijn geaggregeerd per geografische eenheid, en vervolgens in slechts negen hoogtecategorieën, wordt duidelijk met deze SQL query:

```
select count(*) from (
  select distinct h
  from nox);
→ 9
```

Een zgn. BRN (BRoN?) invoerbestand voor het OPS kan er zo uitzien:

```
! BRN-VERSION 1
! snr x(m) y(m) q(g/s) hc(MW) h(m) r(m) s(m) dv cat area ps component
2017 15500 370500 8.739E-03 0.340 15.0 1000 7.5 01 1100 528 00 NOx
2017 15500 378500 1.380E-03 0.340 15.0 1000 7.5 01 1100 528 00 NOx
2017 17500 376500 1.104E-02 0.340 15.0 1000 7.5 01 1100 528 00 NOx
2017 17500 377500 1.839E-03 0.340 15.0 1000 7.5 01 1100 528 00 NOx
```

De kolomkoppen of variabelen in de RIVM brondata ('Brondata stikstof' 2020 (2017)) zijn als volgt bekend:

```
snr    = source identification number (e.g. year)
x(m)   = x-coordinate (integer m RDM or decimal degrees longitude)
y(m)   = y-coordinate (integer m RDM or decimal degrees latitude)
q(g/s) = source strength (g/s)
hc(MW) = heat content (MW)
h(m)   = source height (m)
r(m)   = source ? radius ? (m)
s(m)   = vertical spread of source height(s) (m)
dv     = code for diurnal variation of emission
cat    = source category number (0-9999) (for administrative purposes only)
area   = country or area number (0-9999) (for administrative purposes only)
ps     = ?
psd    = particle-size distribution code
comp   = component: name of the substance or other info about this record
```

Het veld component (*comp*) is niet essentieel en zal niet gebruikt of gefilterd worden door OPS, zelfs al stelt de Excel validatietool (een VBA macro) het veld verplicht (Mouw 2020).

2 Stapsgewijs naar de vliegdata

De vliegdata moeten net zoals de brondata in BRN formaat aan OPS aangeboden worden. De invoervelden zijn voor het merendeel gemakkelijk van een waarde te voorzien.

```
snr      = 2018      ≡ Donderdorpdata
x(m)     = rd_x      ∈ Donderdorpdata
y(m)     = rd_y      ∈ Donderdorpdata
q(g/s)   = fq()     : zie noot α
hc(MW)   = 0.0      ≡ brondata
h(m)     = fh()     : zie noot β
r(m)     = 1000     : zie noot γ
s(m)     = 68       x̄ brondata (gemiddelde)
dv       = 0        ≡ brondata
cat      = 3611     = GCN code luchtvaart Schiphol)
area     = 528      ≡ brondata
ps       = 0        ≡ brondata
comp     = N0x
```

Noot α bij $q(g/s)$: De functie $f_q()$ zal hieronder ontwikkeld worden.

Noot β bij $h(m)$: Gemiddelde hoogte van de matchende kolom van Donderdorpdata – zie tabel 6 hieronder. Deze wordt met de op te stellen functie $f_h()$ toegewezen.

Noot γ bij $r(m)$: In de brondata: mode = 500; gemiddelde = 603; correlatie(h,r) = 0,7 dus hogere r bij hogere h . Omdat dit ingevuld moet worden voor grotere hoogten (h) ligt het voor de hand een hogere waarde dan die van het gemiddelde te kiezen. Een visuele inspectie laat bovendien vaak de waarde 1000 zien. Daarom is enigszins arbitrair gekozen voor de waarde 1000.

Met $f_h(k)$ de hoogte invullen

In de Donderdorpdata staan kolommen afzonderlijk voor starters en landers en voor die twee categorieën zijn de kolommen ook nog eens onderverdeeld in meerdere hoogtebereiken. Zie de tabel hieronder.

Tabel 6: Hoogtebereiken of -categorieën in de Donderdorpdata.

var_donderdorp	fase	h_min[ft]	h_max[ft]	h_avg[ft]
S_0000-1000	S	0	1000	500
S_1000-1500	S	1000	1500	1250
S_1500-2000	S	1500	2000	1750
S_2000-2500	S	2000	2500	2250
S_2500-3000	S	2500	3000	2750
S_3000-4000	S	3000	4000	3500
S_4000-6000	S	4000	6000	5000
S_6000-24500	S	6000	24500	15250
L_0000-1000	L	0	1000	500
L_1000-1500	L	1000	1500	1250
L_1500-2000	L	1500	2000	1750
L_2000-2500	L	2000	2500	2250

var_donderdorp	fase	h_min[ft]	h_max[ft]	h_avg[ft]
L_2500-3000	L	2500	3000	2750
L_3000-4000	L	3000	4000	3500
L_4000-6000	L	4000	6000	5000
L_6000-24500	L	6000	24500	15250

De functie $fh(k)$ heeft dan als invoer:

- kolomnaam (var-donderdorp), die eigenlijk samengesteld is uit:
 - fase $f \in \{S, L\}$
 - hoogtebereik in [voet-voet]

En als uitvoer:

- hoogte in [voet]

In feite is het heel simpel; pak het gemiddelde van het bereik (h_avg, de laatste kolom in tabel 6).

Met $fq(tot_e, tot_v, s, h)$ de emissie schatten

De functie $fq(tot_e, tot_v, s, stijgers, landers, h)$ heeft als invoer:

- totale hoeveelheid emissie (afkomstig uit extrapolatie van brondata), functie $extrapolatie(hoogte)$
- totale aantal vluchtsegmenten op deze hoogte (afkomstig uit Donderdorpdata)
- aantal **stijgers** in dit vakje
- aantal **landers** in dit vakje
- hoogte in [voet] <uitvoer van $fh(k, m)$ > (hoogtebereiken)

En als uitvoer:

- **q** source strength [g/s]

Dit is een meer gecompliceerde functie omdat hier twee databronnen gecombineerd worden.

Totale emissie <extrapolatie(hoogte)>

Voor elke hoogtecategorie in de Donderdorpdata moet de totale emissie uit de brondata geëxtrapoleerd worden.

3 Extrapolatie van de totale uitstoot per hoogte

De brondata kan verondersteld worden net zo volledig te zijn als de emissieregistratie, en evenwichtig het landen en stijgen te representeren. Echter de brondata gaat slechts tot een hoogte van 875 meter.

```
select h, count(q), sum(q) from nox
group by h;
```

Het resultaat hiervan is weergegeven in tabel 2.

Energieratio

Als een vliegtuig begint met opstijgen verbruikt het ca. 32 MW net boven de grondhoogte. Dat zakt af naar 14 MW aan het eind van de klimfase bij een hoogte van 9,5 km. Tijdens de kruisvlucht wordt nog 11 MW gebruikt en tijdens het dalen slechts constant 4 MW (Epstein en O'Flarity 2019). Zie ook afb. 4. Het verloop van energieverbruik tijdens het stijgen laat zich eenvoudig vertalen naar een lineaire functie.

Vraag is een lineaire functie wel een goede weergave geeft voor de verhouding tussen uitstoot en hoogte. Mogelijk is het verband non-lineair (Anoniem 2022). Voor de uitkomsten, gegeven toch ook veel onzekerheid, lijkt het niet veel uit te maken. De extrapolatiefunctie is al verdeeld in drie segmenten, voor de vluchtfasen landen, stijgen en kruisvlucht.

$$\text{energieverbruik} = a \cdot \text{hoogte} + b$$

.

$$32 = a \cdot 0.0 + b$$

$$b = 32$$

.

$$14 = a \cdot 9.5 + 32$$

$$0 = a \cdot 9.5 + 18$$

$$a = -1.89$$

$$\text{energieverbruik}(h) = -1.89 \cdot \text{hoogte [km]} + 32$$

Het energieverbruik als gedeelte of ratio van het hoge startverbruik (begin stijgingsfase op grondniveau) is dan:

$$\text{energieratio}(\text{hoogte [km]}) = \frac{\text{energieverbruik}(h)}{\text{grondniveau}} = \frac{-1.89 \cdot \text{hoogte [km]} + 32}{32}$$

Met als voorwaarden:

- Dat de hoogte niet groter is dan 9,5 km.
- Dat het een stijger betreft.

Het is handig deze energieratio te kunnen bepalen omdat in de brondata enkel de uitstoot op grondniveau en iets daarboven (de eerste 300 meter) goed is opgenomen. Ook mag verondersteld worden dat vliegtuigen onder de 300 meter niet in een *holding pattern* blijven maar vlot willen opstijgen.

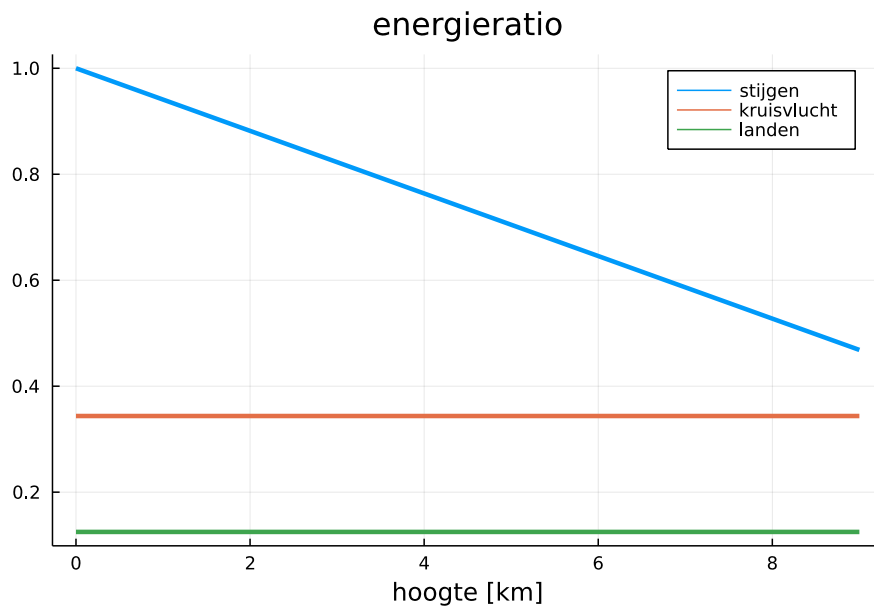
Dat levert voor elk van de drie vluchtfases een functie (ratio) op:

$$\text{stijgen}(h) = \text{energieratio}(\text{hoogte [km]}) = \frac{-1.89 \cdot h + 32}{32} = \frac{-1.89}{32} \cdot h + 1$$

$$\text{stijgen}(h) = -0.059 \cdot h + 1$$

$$\text{landen}(h) = \frac{4}{32} = 0.125$$

$$\text{kruisvlucht}(h) = \frac{11}{32} = 0.344$$



Afbeelding 7: Het energieverbruik voor de drie vluchtfases. Bij stijgen op grondniveau zit de ratio op 1,0 (maximaal) van 32MW voor een doorsnee vliegtuig.

Basiswaarde: GrondUitstoot (GU)

De basiswaarde, waar de energieratio gelijk is aan 1,0, wordt gesteld op de maximale uitstoot tijdens het opstijgen vanaf de grond. We nemen de totale uitstoot onder eerste 300 meter, verdelen dit over stijgers en landers, en gebruiken dit als de constante met de naam GrondUitstoot, afgekort tot GU.

```
select sum(q) from nox
where h < 300;
→ 40.5257789994399
```

(Eigenlijk moet enkel het gebied genomen worden dat overeenkomt met de Donderdorpdata; het toevoegen van $x > 58500$ and $y > 405500$ and $x < 179500$ and $y < 549500$ geeft echter precies hetzelfde resultaat.)

$$GrondUitstoot = GU = 40.5258$$

Correctie

Bij de grondhoogte is de factor $stijgen(h)$ 1,0 terwijl er ook nog $landen(h)$ van 0,125 bij komt; het totaal wordt dan te groot ($1,125 > 1,0$). Daarom voegen we een primitieve correctie toe door $landen(h)$ (een lage waarde die steeds constant blijft) weer af te trekken van $stijgen(h)$.

$$stijgen_{beperkt}(h) = stijgen(h) - landen(h)$$

Uitstoot per hoogte (hulpfunctie)

De uitstoot per hoogte is dan:

$$uitstoot(h) = stijgen_{beperkt}(h) \cdot GU + landen(h) \cdot GU$$

```

GU = 40.5258 # GrondUitstoot
landen(h) = 0.125
stijgen(h) = -0.059h + 1
stijgen_beperkt(h) = stijgen(h) - landen(h)
uitstoot(h) = stijgen_beperkt(h) * GU + landen(h) * GU
# controles
uitstoot(0) # moet ongeveer gelijk zijn aan de GU=40.5258
# → 40.5258
uitstoot(9) # moet ca. de helft bedragen van de GrondUitstoot
# → 19.0066

```

Een implementatie van deze code is gedaan in Julia. Zie het bestand `extrapolatie.jl`. Hiermee werd de werking succesvol getest.

De controles slagen goed, hoewel het lineaire verloop een aanname blijft.

Uitstoot per hoogtebereik

Merk op dat we in deze `uitstoot(h)` functie nog geen rekening hebben gehouden met een *hoogtebereik*. Om een idee te geven van de cumulatieve opbouw naar gelang de hoogte:

```

sqlite> select sum(q) from nox where h < 500;
→ 53.44
select sum(q) from nox where h < 1000;
→ 86.95

```

De hoge waarde (87) ontstaat mogelijk door *holding* en zal dus niet als indicatief worden beschouwd. Maar ook binnen een bereik van 1000 meter hoogte ontstaat dus al fors meer uitstoot dan onze terughoudende functie `uitstoot(h)` zou schatten.

Onderstaande functie berekent de totale uitstoot over een hoogtebereik.

```

function uitstoot_bereik(laag,hoog)
    # het verloop gaat lineair
    hoogteverschil = hoog - laag
    a = uitstoot(laag)
    b = uitstoot(hoog)
    gemiddeld = (a+b) / 2
    return hoogteverschil * gemiddeld
end

```

Een implementatie in Julia⁵ geeft onderstaande uitvoer. Merk op dat er nog geen spreiding heeft plaatsgevonden; alle uitstoot is naar hoogte berekend, maar niet aan een x-y coördinaat gekoppeld. Eventueel zou ermee getest kunnen worden door de uitstoot op de verschillende hoogten aan een enkele geografische coördinaat te koppelen.

⁵Zie `extrapolatie.jl`.

Tabel 7: Extrapolatie naar hoogtebereiken.

h[km]	sum(q)
1-2	36.9392667
2-3	34.5482444
3-4	32.1572222
4-5	29.7662001
5-6	27.3751779
6-7	24.9841557
7-8	22.5931335
8-9	20.2021113

Proefberekening met de puntbron extrapolatie

De gegevens uit tabel 3 zijn als invoer gebruikt voor een proefberekening met het OPS. Alleen de verwachte uitstoot boven 900 meter is meegenomen om zodoende de *extra* depositie veroorzaakt door de geëxtrapolerde uitstoot te berekenen.

```
! BRN-VERSION 1
! snr x(m) y(m) q(g/s) hc(MW) h(m) r(m) s(m) dv cat area ps comp
2018 109426 483094 11.575 0.0 1070.0 1000 68 0 3611 528 0 NOx
2018 109426 483094 22.483 0.0 1520.0 1000 68 0 3611 528 0 NOx
2018 109426 483094 165.848 0.0 4650.0 1000 68 0 3611 528 0 NOx
```

- Coördinaten emissiebron: RD 109426, 483094 (Schiphol)
- Coördinaten depositiedoel: RD 177772, 466068 (Stroe, Veluwe heide)

OPS versie: OPS-Pro 2021 L-5.0.1.3 (officiële Linux executable met bijbehorende data- en meteobe-standen.)

```
name x-coord y-coord conc. dry_dep. wet_dep. tot_dep.
- - - NOx NOy NOy NOy
- m m ug/m3_NO2 mol/ha/y mol/ha/y mol/ha/y
Stroe_heide 177772 466068 0.5604E-03 0.2453E-01 0.1032E+01 0.1057E+01

conc. conc. conc. dry_dep. dry_dep. wet_dep. wet_dep.
NO3+HN03 NO3_AER HN03 NOx NO3+HN03 NOx NO3+HN03
ug/m3 ug/m3 ug/m3 mol/ha/y mol/ha/y mol/ha/y mol/ha/y
0.1578E-03 0.1335E-03 0.2432E-04 0.2072E-01 0.3815E-02 0.4937E+00 0.5386E+00
```

Dit houdt in dat er in totaal **1,06 N mol/ha/jaar** extra neer kan slaan. Echter er is een puntbron gebruikt en er is dus nog geen rekening gehouden met het spreidingspatroon van de vliegtuigen.

Rekent OPS wel alles mee? Een simpele grep op de [OPS broncode](#) (v5.0.1.3) met als termen {900, 914, 3000, airplane, aviation} leverde geen resultaat op, wat suggereert dat OPS *geen* afkapping van de maximale emissiehoogte bevat. Dat stemt ook overeen met de resultaten van bovenstaande proefberekening.

4 Het spreidingspatroon afleiden

Doel: De totale emissie (extrapolatie) per hoogtebereik spreiden op basis van de Donderdorpdata.

Pseudocode voor het gebruikte algoritme:

```

vluchttype ∈ {landen, stijgen}
foreach hoogtebereik as h:
  totale_emissie[h] = uitstoot_bereik(laag,hoog)
  vluchten[type] = count kolom [type]
  function verdeelsleutel(vluchten, totale_emissie[h]) 'prototype
  foreach {vluchttype}:
    foreach {x, y}:
      foreach vluchtsegment:
        uitstoot += verdeelsleutel(vluchttype)
      writeln (h, x, y, uitstoot)

```

Om inzicht te krijgen in de geografische verspreiding wordt gebruik gemaakt van de Donderdorpdata. De kruisvlucht begint vanaf ca. 9,5 km hoogte (Hacobian 2018), terwijl de Donderdorpdata vluchtgegevens bevat tot maximaal 24,500 voet. Vrijwel alle vluchten in de Donderdorpdata zitten dus nog in de fase van landen of stijgen.

Elk vakje  in de Donderdorpdata heeft één of meer stijgers en/of landers; dat zijn vluchtsegmenten. De aantallen staan direct in de Donderdorpdata, maar om het totaal te verkrijgen moeten eerst alle vluchtsegmenten op dezelfde hoogte bij elkaar opgeteld worden.


Een lander heeft weinig uitstoot die ook nog eens constant is. Een stijger kent, vooral op lagere hoogte, veel meer uitstoot en die is bovendien lineair omgekeerd evenredig met de hoogte. Om de totale uitstoot in een hoogtebereik goed te kunnen verspreiden moet de hoeveelheid uitstoot die een lander krijgt dus lager zijn dan welke aan een stijger toebedeeld wordt. Bovendien moet rekening worden gehouden met het verschil tussen het aantal stijgers en landers.

Dit verdelen van de totale geëxtrapoleerde emissie op een hoogtebereik over de verschillende vluchten uit de Donderdorpdata wordt uiteindelijk gedaan door de functie `verdeelsleutel()` die is geïmplementeerd in Julia⁶. Een verkorte versie van de functie is hieronder weergegeven.

```

function verdeelsleutel(tot_emissie, tot_stijgers, tot_landers, gem_hoogte, vluchttype)
  landen(hoogte_km) = 0.125
  stijgen(hoogte_km) = -0.059 * hoogte + 1
  α = stijgen(gem_hoogte/1000)
  β = landen(gem_hoogte/1000)
  rα = α / (α + β)
  rβ = β / (α + β)
  subtotaal_stijgers = rα * tot_emissie
  subtotaal_landers = rβ * tot_emissie
  per_stijger = subtotaal_stijgers / tot_stijgers
  er_lander = subtotaal_landers / tot_landers

```

Met behulp van `spreiden.jl` worden twee bestanden gemaakt: `spreiding_S.tsv` (voor stijgers) en `spreiding_L.tsv` (voor landers). Deze bevatten voor elk  x,y-coördinaat de hoogte en de hoeveelheid emissie door vliegtuigen (q in g/s).

Ter controle zijn beide bestanden ingeladen in QGIS en op een OSM kaart geploteerd. Als selectie werd $hoogte = 3500$ genomen en een *heatmap* op basis van de emissie q werd voor de visualisatie benut (afb. 8).

⁶Zie het bestand `spreiden.jl`

Voor het berekenen van de depositie met het OPS model maakt het niet uit of het landers of stijgers zijn, dus de twee bestanden zijn samengevoegd m.b.v. shellscript⁷) en voor elk vakje □ met dezelfde hoogte zijn de q-waarden opgeteld. Het resulterende samengevoegde TSV bestand is daarna naar BRN-formaat geconverteerd t.b.v. de berekening met OPS.

Dat BRN bestand is daarna nog “getrimd” zodat hoogtes onder de 900 meter niet meegenomen worden, om zodoende enkel de *extra* depositie veroorzaakt door de geëxtrapoleerde uitstoot te berekenen.

⁷spreading_samenvoegen.sh

Berekening met de gespreide data

- Coördinaten emissiebron: RD 109426, 483094 (Schiphol)
- Coördinaten depositiedoel: RD 177772, 466068 (Stroe, Veluwe heide)

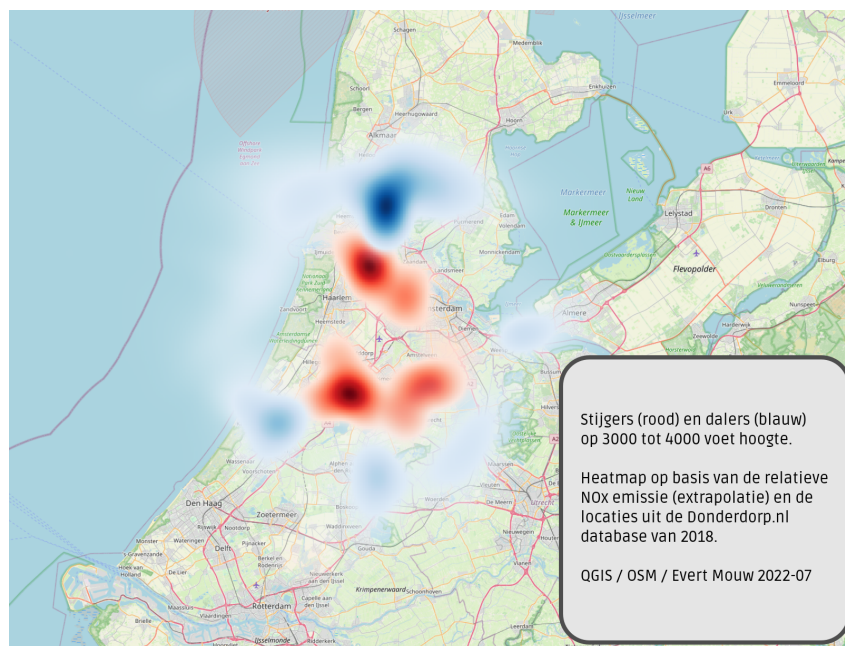
OPS versie: OPS-Pro 2021 L-5.0.1.3 (officiële Linux executable met bijbehorende data- en meteobe-standen.)

Resultaat:

name	x-coord	y-coord	conc.	dry_dep.	wet_dep.	tot_dep.
-	-	-	NOx	NOy	NOy	NOy
-	m	m	ug/m3_NO2	mol/ha/y	mol/ha/y	mol/ha/y
Stroe_heide	177772	466068	0.5346E-03	0.2307E-01	0.1607E+01	0.1630E+01

conc.	conc.	conc.	dry_dep.	dry_dep.	wet_dep.	wet_dep.
NO3+HN03	NO3_AER	HN03	NOx	NO3+HN03	NOx	NO3+HN03
ug/m3	ug/m3	ug/m3	mol/ha/y	mol/ha/y	mol/ha/y	mol/ha/y
0.1312E-03	0.1110E-03	0.2021E-04	0.1988E-01	0.3183E-02	0.9334E+00	0.6737E+00

Oftewel een totale jaarlijkse additional depositie (kolom tot_dep) van 1,63 mol/ha.



Afbeelding 8: Stijgers (rood) en dalers (blauw) op 3000 tot 4000 voet hoogte.

5 Implementatie en lijst van bestanden

Enkele procedures werden eerst geïmplementeerd in shellscript (Bash) waarbij naast standaard utilities als `bc`, `cut`, `head` e.d. ook gebruik gemaakt werd van de tool [Genius](#) van Jiří Lebl. Daarna zijn de meeste functies geïmplementeerd in Julia. Ook werd QGIS gebruikt om controleplots te maken. Hieronder een niet volledig overzicht van werkbestanden bij deze studie, die samen met dit verslag beschikbaar komen.

bestand	thema	omschrijving
stikvlieg.md	verslag	markdown broncode
stikvlieg.bib	verslag	biblatex bronnen
compileer.sh	verslag	pdf maken
energieratio_plot.jl	verslag	plot maken
extrapolatie.jl	extrapolatie	julia code
donderdorp.sh	extrapolatie	bash shellscript (probeersel)
spreiden.jl	spreiding	julia code
omrekenen.jl	hulpfuncties	julia code
donderdorpdata2018.*	dataset 1	Donderdorpdata
brondata2017_selectie.*	dataset 2	brondata
spreiding.*	dataset 3	vliegdata
spreiding_S.tsv	dataset 3	vliegdata: stijgers (x,y,h,q)
spreiding_L.tsv	dataset 3	vliegdata: landers (x,y,h,q)
spreiding_samenvoegen.sh	dataset 3	vliegdata naar brn voor ops
trim.sh	dataset 3	alleen h>900m – brn voor ops
controle.*	spreiding	qgis visuele controle
stroe_heide_puntbron.ctr	ops berekening	control file
stroe_heide_gespreid.ctr	ops berekening	control file
puntoel.rcp	ops berekening	RD coördinaten bij Stroe

S :Werkbestanden {#tbl:werkbestanden}

Free culture  Deze studie werd uitgevoerd in een XFCE omgeving onder Arch Linux, met software zoals met Geany, medit, [Gnumeric](#), vim, Viking, Firefox e.d., en voor de communicatie Thunderbird en [Telegram](#). Als typesetting systeem is gekozen voor Pandoc met \LaTeX

7 Een persoonlijke bespiegeling

Deze tekst hoort niet bij het eigenlijke verslag, en is van geheel andere aard. Zo kan het toch een andere hoek belichten van de materie, de auteur, en de context. Dit verhaal heb ik in juni geplaatst op mijn weblog.

De stikstoforen valt omver

In de St. Janskerk in Gouda bewonder ik de hoge bogen en het glas in lood waarop de tekeningen zo lichtend tot hun recht komen. Op Twitter zag ik een bericht van Rutger van den Noort, die in 2019 samen met anderen vragen stelde aan het RIVM over het stikstofverhaal. Hij zou als moderator fungeren voor een gesprek met [Pete Hoekstra](#), oud-ambassadeur van de VS. Op zo'n avond komen wel wat conservatieve mensen af – ik weet niet of ik daartoe behoor, maar respecteren doe ik ze wel. In de pauze spreek ik iemand die in Delft studeerde. Ammoniak vind hij een prachtige stof. Op weg naar de kerk krijg ik een microfoon onder mijn neus van omroep Ongehoord Nederland. Of ze dat fragment gebruikt hebben op TV? Eerlijk gezegd heb ik geen idee, ik kijk allang geen TV meer. Niet omdat ik conservatief ben, maar omdat ik niet conservatief genoeg ben.

Mijn interesse ging ooit uit naar kunstmatige intelligentie. De docent was, niet verwonderlijk, een fan van de bekende *science-fiction* auteur Douglas Adams. Het antwoord op een van zijn tentamenvragen was [42](#). Hoewel ik na het behalen van de propedeuse informatica al snel vertrokken was, om verder te gaan met een master *medical informatics* aan het AMC, koester ik goede herinneringen aan mijn tijd aan het LIACS, het *Leiden Institute for Advanced Computer Science*. Nog maar enkele dagen terug vierden ze hun 25-jarige bestaan in CORPUS. De opleiding is eigenlijk al een stuk ouder, maar toen viel het nog onder wiskunde. Het was leuk daar aanwezig te zijn.

Natuurlijk kwam het gesprek op rekenmodellen en stikstof. Een docent noemde enthousiast de naam Erisman, niet wetend dat “wetenschap” niet zo neutraal is als EenVandaag doet voorkomen; Erisman en de Strootman kregen van het ministerie een subsidie van 200.000 euro voor hun rapport, waar ook [ambtelijke invloed](#) op aanwezig was. In dezelfde zaal sprak ik iemand die veel betekenis heeft voor de wetenschappelijke ontwikkeling van het LIACS; zijn zoon werkt op een kantoor met econometristen en die hadden gehakt gemaakt van het corona rekenmodel van het RIVM. Met die rekenmodelletjes had hij weinig op...

Terug naar Gouda. Een man sprak me aan. Waar kwam ik vandaan? Ah, Elspeet, dat kende hij wel, maar ik zou zeker geen autochtoon zijn? Ik sprak immers zonder accent. Ik moest hem vertellen dat ik uit de oudste familie kom, nog van een van de zeven oorspronkelijke boerderijen. In 1290 kwam er een kerkje waar de archieven in opgeslagen werden; daarmee begint de kennis van mijn familielijn. Maar in Elspeet zou ik niet opgroeien. Hoewel mijn eerste levensjaren tussen schapen, koeien en honden plaatsvonden, brachten familieperikelen scheiding tussen mijn ouders. Veel later kwamen ze weer bij elkaar. Ze waren beide schaapherder. Mijn moeder overleed drie jaar nadat ze [niet meer bij de kudde](#) welkom was.

Nog steeds loop ik graag over de heidevelden. Mijn vader vertelde me ooit dat dit geen natuur was, maar cultuurgrond. Maar moderne stikstofdeskundigen, rekenmodellen, juristen en politici weten dat het zeker wel “natuur” is. Ook nog afgelopen week was ik in Speuld, bij een boer midden tussen de prachtige bossen daar. Volgens het rekenmodel heeft hij, zo beweerde hij, negen keer de totale depositie van de provincie Flevoland. Hij zit vlakbij een Natura 2000-gebied.

Als ik door Gouda loop, bedenk ik me dat mijn moeder hier met veel plezier op de Driestar zat, op de kweekschool. Zo kwam ze als onderwijzeres in Elspeet, en zo kwam van het een het ander. Haar vader, mijn opa, was onderwijzer en zendeling in Papoea-Nieuw-Guinea en daar heeft ze dan ook een deel van haar jonge jaren doorgebracht. Het is een christelijke wereld die onhoudbaar werd, ingehaald door nieuwe wetenschap en nieuwe ontwikkeling.

Een gevoel van instorting vindt synchroniciteit in het boek dat ik in de trein van Gouda terug naar de Veluwe lees, *De steppewolf* van Hermann Hesse. Het gaat over het burgerlijke leven, het democratische midden, de afgemetenheid, de ordelijke, angstige schijn. Misschien is dat wel het conservatieve. Maar herders, kunstenaars, boeren en hermetici kunnen zo niet zijn, niet echt.

Achter mij het verleden van minstens duizend jaar eigengeërfde vrije boeren, bosrichters en schaapherders. De klokken luiden – er zit een klok bij, geschonken door een verre voorvader. Voor mij de wereld van kunstmatige intelligentie, van gevaarlijke veelbelovende symbiose tussen mens en computer. Rondom mij de verlorenheid, de *tussenfase*, niet van een moment maar van misschien wel meerdere generaties. Wat mij nagelaten werd is al grotendeels vergaan, vermorzeld door de fiscus, door de moderniteit, door regels, door de vooruitgang. Een vooruitgang waarin ik niet kon participeren omdat ook in Nederland alles vastloopt, letterlijk volloopt ook, en het oude nog morele verantwoordelijkheden op mij legde. Het kan niet anders dan dat zo'n tussenfase het domein is van het absurde.

En dan komen we op het stikstofbeleid. Ja, dat is het domein van het absurde. Vijfentwintig miljard is gereserveerd om boeren uit te kopen als een, zoals een Kamerlid van GroenLinks het zegt, “reddingsplan Veluwe”. Die boer in Speuld, middenin de onveranderd prachtige natuur, had haar op bezoek. Ze vertelde hem dat ze toch echt rekening moest houden met wat haar kiezers wilden horen. De boer kreeg van de Provincie een voorstel, en dat zou kunnen leiden tot uitkoop, en tot de realisatie van een huizenblok. De natuur redden met huizenbouw en asfalt... Vijfentwintig miljard. Een speciale minister hebben ze er nu zelfs voor; ze studeerde HBO *facility management*.

Er valt veel te zeggen over stikstof, over de rekenmethoden, over het *beleid*, over *wensnatuur*, over het primaat van de juridisch-politieke *kunstmatige* wereld over de werkelijke wereld. Herbert Simon schreef *The Sciences of the Artificial* (1969) in de verwachting van mooie socio-technische ontwerpen, maar de opkomst van het absurde heeft hij niet voorzien.

Wat te doen? De stikstofnormen reëel maken. Alle uitstoot meeberekenen, ook die van *vliegtuigen* boven 914 meter. De Natura 2000-gebieden herorganiseren en herdefiniëren. De staat van de (wens)natuur door *veldwaarnemingen* laten bepalen in plaats van door modelberekeningen. Die modelberekeningen ook niet gebruiken voor heel lokale bepalingen, want daar zijn ze *niet geschikt voor*. Kortom, de echte wereld prioriteit geven boven de kunstmatige wereld; maar dat zou *te weinig* absurd zijn voor onze huidige tijd.

In de St. Janskerk zie ik hoe mensen ooit een heilige ruimte maakten. Kunstmatig is dat, kunstmatiger dan de heidense Germanen die de goden liever in de natuur eerden (zie de *Germania* door Tacitus). Mijn moeder zou nog zeggen, “Uw schepping is Uw kerk”. De stenen kerk, de stenen kunst was desondanks van een hogere orde, bracht aarde, mens en God bij elkaar, in het besef dat het mysterie en de inspiratie hoog boven het maakbare staan.

Ze maakten een kerk die stond, staat en nog zal staan, lang nadat de ongeïnspireerde maaksels van de tot bijna in de hemel torenbouwende cultus van het absurde weer zijn vergaan tot een spraakverwarring. Het is mijn hoop, misschien een ijdele hoop, dat ook onze boeren dan nog zullen staan.

Een maakbaarheidsdroom is al in scherven; de Oostvaardersplassen werd een drama voor grote grazers. Achter een hek werden de dieren gezet, nieuwe natuur volgens veelal linkse ecologen; als een boer zo zijn vee zou behandelen zou hij voor de rechter komen. Naar goede raad werd **slecht** geluisterd.

Stenen hoge torens – of dat nu christelijk leerstellingen zijn of rekenmodellen voor overheidsbeleid – zullen instorten. Ze missen niet alleen goede worteling in de aarde, maar missen ook de dynamiek die enkel door een onkenbare vonk in gang gezet wordt.

Elspeet, 7 juni 2022

Evert Mouw