

## Klimaatverandering en de uit- en afspoeling van nutriënten

*Marleen Ursem, Marloes van der Kamp, Willem Hendriks, Sebastiaan Schep (Witteveen+Bos)*

**Met een verkennende literatuurstudie zijn de effecten van klimaatverandering op de uit- en afspoeling van nutriënten uit landbouwgronden in beeld gebracht. Door een verhoogde temperatuur en een grilliger neerslagpatroon neemt de uit- en afspoeling van nutriënten zeer waarschijnlijk toe. Zonder mitigerende maatregelen leidt dit tot verslechtering van de waterkwaliteit. Desondanks blijft de nutriëntenhuishouding van een bodem complex en is het niet eenvoudig om de effecten van klimaatverandering te voorspellen.**

Een goede bodemkwaliteit is essentieel voor het watersysteem en een vitale bodem kan bijdragen aan het behalen van de Kaderrichtlijn Water (KRW)-doelen, bijvoorbeeld vanwege verminderde oppervlakkige afstroming van nutriënten. Door klimaatverandering ontstaan er echter steeds vaker problemen. Om te anticiperen op de gevolgen van klimaatverandering en om schade te beperken is het Deltaplan Ruimtelijke Adaptatie opgesteld [1]. Kwetsbaarheden in het systeem in beeld brengen is één van de zeven ambities. Hierbij worden stresstesten gebruikt om kwalitatief en kwantitatief de effecten van klimaatverandering op het systeem te beschrijven en te bepalen waar, wanneer en welke knelpunten ontstaan. Ook de waterkwaliteit komt onder druk te staan. Om de gevolgen van klimaatverandering op de waterkwaliteit kwantitatief in kaart te brengen is een prototype waterkwaliteitsstresstest ontwikkeld [2]. Deze stresstest bouwt voort op de methodiek van de Ecologische Sleutelfactoren (ESF) [3].

Een belangrijk onderdeel van de waterkwaliteitsstresstest is de mate van uit- en afspoeling van nutriënten uit de bodem. De invloed van het klimaat op deze uit- en afspoeling is nog onbekend, omdat een goed beeld van de veranderingen in, water- en nutriëntentransportgerelateerde, bodemprocessen ontbreekt. Het is van belang om meer grip te krijgen op de effecten van klimaatverandering op de bodem, omdat verwacht wordt dat de processen in de bodem zullen veranderen als gevolg van klimaatverandering en dat dit een negatieve invloed heeft op de waterkwaliteit.

Dit artikel beschrijft de resultaten van een verkennende literatuurstudie naar de effecten van klimaatverandering op bodemprocessen en de relatie tot waterkwaliteit. De focus ligt op het landelijk gebied, omdat meer dan 60 procent van het Nederlandse landoppervlak een agrarische functie heeft [4] en in veel landbouwgebieden (kunst)mest gebruikt wordt waardoor concentraties van nutriënten in bodem, water en lucht toenemen. Het accent in dit artikel ligt op de koolstof-, stikstof- en fosfaatkringloop, omdat deze nutriënten direct en indirect een significante invloed hebben op de waterkwaliteit van oppervlaktewateren [5]. Het kwantitatief inschatten van het effect van klimaatverandering op het uit- en afspoelen van deze nutriënten is het uiteindelijke doel.

### **Bodemfuncties en nutriënten**

De bodem kent vele functies die van belang zijn in relatie tot nutriënten en de uit- en afspoeling ervan. Veel stoffen, zoals nutriënten, passeren in de loop van de tijd de bodem, maar de bodem is geen passief doorgeefluik; bodemdieren, microben en planten zijn betrokken bij vele omzettingen en kringlopen. De bodem speelt ook een belangrijke rol in het reguleren van de samenstelling van het bodemvocht

en het door de bodem stromende water. Dit heet de biogeochemische functie van de bodem, waarbij drie deelfuncties onderscheiden worden: (i) de bufferfunctie, regulatie van de chemische omstandigheden in het bodemvocht en percolerend water, (ii) de regeneratie-functie, het vrijmaken van nutriënten via afbraak van plantenresten, dieren en hun afvalstoffen en (iii) de filterfunctie, het filteren van het door de bodem stromende water.

### **Nutriëntenkringlopen en -transport**

Eutrofiëring van oppervlaktewater ontstaat door nutriënten die met het door de bodem stromende water uitspoelen en afspoelen bij erosie van bodemdeeltjes. Bij het transport van nutriënten zijn omzettingen van de nutriënten in andere vormen van belang. Deze omzettingen vinden plaats in kringlopen, waarbij nitraat bijvoorbeeld wordt omgezet in ammoniak. Naast deze omzettingen zijn de hoeveelheid aanwezige organische stof en de lokale hydrologie van belang bij het transport van nutriënten van bodem naar water.

### ***Organische stof van belang voor nutriëntenkringlopen***

In de bodem is organische stof van groot belang, het stuurt veel bodemfuncties aan en zorgt voor biologische activiteit en bodemvruchtbaarheid. Afbraak van organische stof leidt tot een toename in nutriëntentransport naar het oppervlaktewater vanwege een afnemende bufferwerking van de bodem, waardoor er meer watertransport kan plaatsvinden. Daarnaast komen er bij afbraak van organische stof nutriënten vrij die opgeslagen waren in de organische stof.

#### **Organische stof in de bodem**

Organische stof verbetert de bodemstructuur, het productievermogen en het watervasthoudend vermogen van de bodem. De snelheid waarmee organische stof afgebroken wordt is afhankelijk van de samenstelling van de organische stof en van milieucondities zoals temperatuur en vochtgehalte.

### ***Belangrijke nutriëntenkringlopen***

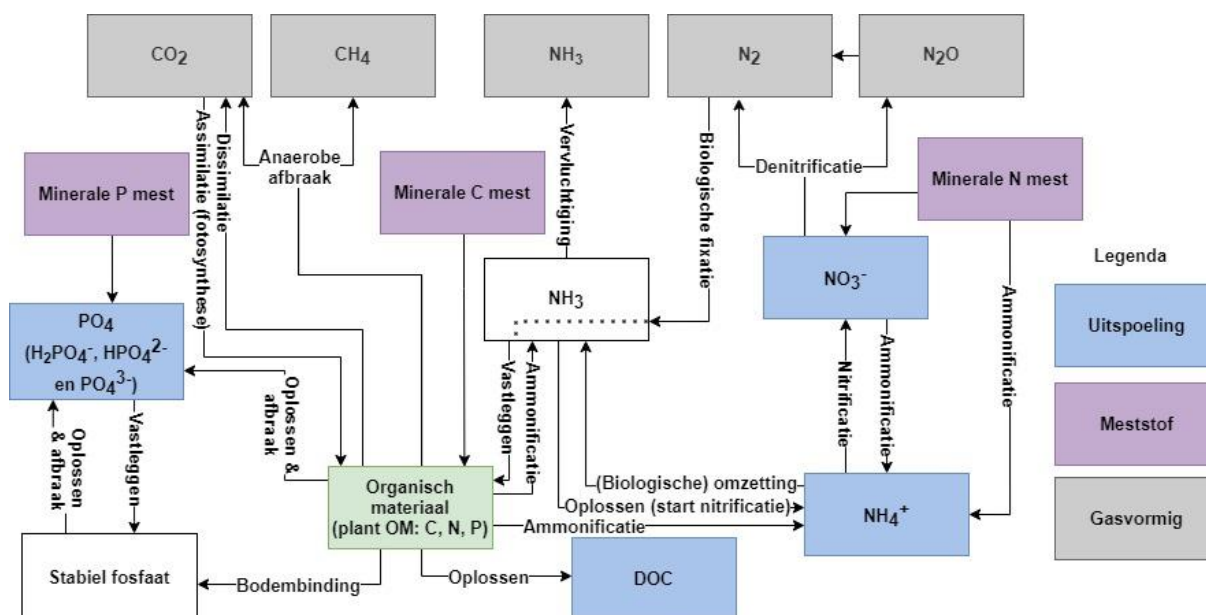
Organische stof bevat veel koolstof en de koolstofkringloop kent een langzame en een snelle kringloop, die gestuurd worden door biologische en chemische omzettingen. Bij de langzame kringloop wordt koolstof voor langere tijd opgeslagen, zoals in veen. In de snelle kringloop is de vastlegging van koolstofdioxide uit de atmosfeer in plantorganische stof een van de vele processen. Dit wordt koolstofassimilatie genoemd (zie afbeelding 1).

De stikstofkringloop kent ook vele processen, zoals ammonificatie (mineralisatie), nitrificatie en denitrificatie. In de bodem komt stikstof in twee hoofdvormen voor; in minerale en in organische vorm (zie het kader voor meer informatie over deze kringloop).

## Stikstof in de bodem

Planten gebruiken stikstof voor de opbouw van eiwitten. In de stikstofkringloop vinden veel omzettingen plaats, zoals de omzetting van nitraat uit mest naar ammonium en andersom (zie afbeelding 1). Nitraat is in de bodem mobieler dan ammonium, maar onder anaerobe condities kan er vanwege vertraagde nitrificatie diffuus transport van ammonium plaatsvinden (transport door het willekeurig bewegen van deeltjes). Onder anaerobe omstandigheden verdwijnt nitraat door denitrificatie als lachgas (N<sub>2</sub>O) en stikstofgas (N<sub>2</sub>) uit de bodem.

Fosfor komt in het milieu voornamelijk voor als fosfaat(zout), waarvan het grootste deel gefixeerd is aan bodemdeeltjes. Een klein deel hiervan kan oplossen en daardoor beschikbaar komen. Fosfor komt niet voor in de lucht, maar circuleert alleen door water, bodem en sediment.



Afbeelding 1. Vereenvoudigde weergaven van de interacties in en tussen de stikstof-, koolstof- en fosfaatkringloop die van belang zijn bij uitspoeling (blauw), en de meststoffen (paars) en de gasvormige stoffen (grijs). Gemaakt met de software Draw.io

## Nutriëntentransport

De verliezen van organische koolstof via uitspoeling zijn klein omdat veel bodemkoolstof opgeslagen is in organische stof. Toch kan uitspoeling van nutriënten door afbraak van organische stof significant zijn. Voor koolstof is opgeloste organische koolstof (Dissolved Organic Carbon; DOC) een belangrijke vorm die uit de bodem kan spoelen. Uitspoeling van stikstof vindt vooral plaats via nitraat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), waarbij de uitspoeling afhangt van de hoeveelheid neerslag die valt en van de hoeveelheid nitraat die na het groeiseizoen achterblijft in de bodem. Voor fosfaat zijn sorptie-desorptie en neerslaan-oplossen de belangrijkste mechanismen. Fosfor kan via oppervlakkige afspoeling en via diepere stroomroutes getransporteerd worden, waarbij bodemstructuur, ontwatering van de bodem en chemische bodemsamenstelling sterk bepalend zijn.

### **Effect klimaatverandering**

Om meer inzicht te krijgen in de veranderingen in het klimaat heeft het KNMI verschillende klimaatscenario's opgesteld [6]. Deze scenario's gaan uit van een hogere temperatuur, langere droge perioden (voornamelijk in de zomer), meer neerslag in de winter en extremere neerslag in zomer en winter. Deze veranderingen zullen zeer waarschijnlijk tot veranderingen leiden in de bodemprocessen, omdat door klimaatverandering bijvoorbeeld de bodemtemperatuur en het verloop van de grondwaterstand door het jaar heen verandert. Deze veranderingen hebben uiteindelijk ook effect op het transport en de uit- en afspoeling van nutriënten.

### ***Afbraak organische stof***

Klimaatverandering heeft effect op de hoeveelheid én de kwaliteit van bodemorganische stof. Veranderingen in temperatuur en vochtgehalte hebben, via biologische activiteit, invloed op de productie en afbraak van organische stof. Bij een lagere grondwaterstand vindt er bijvoorbeeld snellere (aerobe) afbraak van organische stof plaats dan bij een hogere grondwaterstand (langzamere anaerobe afbraak). Bij een lagere grondwaterstand kunnen er dus meer nutriënten beschikbaar komen die, in combinatie met hogere temperaturen en afwisseling tussen nattere en drogere perioden, versnelt tot uitspoeling kunnen komen.

### ***Stikstof***

Door klimaatverandering zullen processen in de stikstofkringloop veranderen, want denitrificatie, ammonificatie en nitrificatie reageren op temperatuur- en vochtgehalteveranderingen. Bij droogte en hogere temperaturen neemt de ammonificatie toe, waardoor er meer ammonium beschikbaar komt. Ook de nitrificatiesnelheid neemt toe, waardoor de bodemnitraatconcentratie toeneemt. Bij droogte neemt de denitrificatiesnelheid af door verminderde biologische activiteit, waardoor de bodemnitraatconcentratie verder toeneemt.

In natte perioden neemt de nitraatbeschikbaarheid af, vanwege een lagere denitrificatiesnelheid. Ondanks de lagere nitraatbeschikbaarheid kan de stikstoftoevoer naar het oppervlaktewater bij hevige neerslag hoog zijn vanwege opgebouwde nitraat- en ammoniumgehalten tijdens droogte en hogere temperaturen.

Via nitrificatie kan ook stikstofdepositie - in 2018 voor 46 procent veroorzaakt door de landbouw [7] - bij neerslag tot verhoogde nitraatuitspoeling zorgen.

### ***Fosfor***

Hogere temperaturen door klimaatverandering leiden tot een hogere beschikbaarheid van fosfaat vanwege een hogere diffusiesnelheid (de verplaatsing van stoffen vanwege het willekeurig bewegen van deeltjes). Deze hogere beschikbaarheid leidt in combinatie met neerslag tot verhoogde oplosbaarheid en uiteindelijk tot verhoogde fosfaatuitspoeling.

### **Opties voor modelstudies**

Er is een aantal modellen beschikbaar om een inschatting te maken van de uit- en afspoeling van nutriënten. Deze zijn echter nog niet 'klimaatproof'. Het kwantitatief bepalen van de uit- en afspoeling is van belang bij het inschatten van de omvang van het probleem en bij het klimaatrobuuster maken van het bodem- en watersysteem, omdat de effecten van maatregelen dan te voorspellen zijn. Met

behulp van bijvoorbeeld een waterbalans [8] worden de routes van water en de hoeveelheid water in een watersysteem in beeld gebracht. Ook is de waterbalans de basis voor het opstellen van een stoffenbalans, waarbij nu met vaste concentraties nutriënten in het uit- en afspoelende water gerekend wordt. Deze getallen zijn op dit moment al lastig in te schatten vanwege vele interacties en processen in de bodem, maar door klimaatverandering neemt deze onzekerheid nog verder toe. Hieronder worden drie aanpassingen in de methodiek van de waterbalans voorgesteld, om de verwachte veranderingen in het transport van nutriënten door klimaatveranderingen in te schatten. Er moet gezocht worden naar de dominante factoren die invloed hebben op de nutriëntuitspoeling, zoals de neerslagverdeling over het jaar.

### ***Temperatuur en neerslag afhankelijke uitspoeling***

Zoals hiervoor besproken neemt de afbraak van organische stof toe bij hogere temperaturen en droogte en komen hier nutriënten bij beschikbaar. Als de uitspoeling van nutriënten afhankelijk gemaakt wordt van temperatuur en neerslag, wordt het effect van deze twee factoren op de afbraak van organische stof meegenomen in de inschatting van de nutriëntenuitspoeling in de waterbalans. Concreet betekent dit dat de concentratie nutriënten die kan uitspoelen toeneemt, afhankelijk van de temperatuur en het aantal droge dagen. Neerslag leidt na implementatie van deze relaties tot een verhoogde concentratie uitspoelende nutriënten, waarna het systeem gereset wordt en de concentratieopbouw opnieuw begint.

### ***Grondwaterstandberekeningen***

Grondwaterstanden zullen ook gaan veranderen door klimaatverandering. In de waterbalans kunnen, met behulp van de KNMI-klimaatsscenario's, grondwaterstanden berekend worden onder toekomstige klimaatcondities. Als deze berekende grondwaterstanden gerelateerd kunnen worden aan de afbraak van organische stof, kan de uitspoeling van nutriënten onder klimaatverandering beter ingeschat worden.

### ***ANIMO-model***

Als laatste aanpassing zouden er in samenwerking met Wageningen Environmental Research (WENR), met het ANIMO-model [9] reeksen voor stikstof en fosfor in de bodem berekend kunnen worden. Als deze stofconcentraties onder klimaatverandering bepaald kunnen worden door gebruik te maken van KNMI-klimaatsscenario's, kunnen deze reeksen opgenomen worden in de waterbalans en kan de uit- en afspoeling van nutriënten ingeschat worden.

### **Conclusie**

Deze verkennende literatuurstudie biedt inzicht in het effect van klimaatverandering op de bodemprocessen en het transport van nutriënten. Het gedrag van stoffen in de bodem hangt sterk samen met bodemeigenschappen, stofeigenschappen en het gehalte van de stof in de bodem. Bodembuffering speelt een grote rol en wordt sterk beïnvloed door de organische stof in de bodem. De omzettingen in de stofkringlopen en bodemprocessen hebben vaak (indirect) invloed op het transport van nutriënten. Hieronder worden de belangrijkste effecten kort weergegeven (zie ook tabel 1).

### **Effect klimaatverandering op de bodem**

1. Koolstof: een hogere temperatuur leidt tot verhoogde productie én afbraak van organische stof. Bij lage grondwaterstanden komen er door aerobe afbraak van organische stof nutriënten vrij.
2. Stikstof: droogte en hogere temperaturen leiden tot meer ammonificatie en nitrificatie, waardoor de ammonium- en nitraatconcentraties in de bodem toenemen. Droogte zorgt voor een lagere denitrificatiesnelheid, waardoor de bodemnitraatconcentratie verder toeneemt.
3. Fosfor: temperatuurstijging zorgt voor een verhoogde beschikbaarheid van fosfaat.

### **Effect klimaatverandering op (oppervlakte)water**

1. Koolstof: de beschikbaar gekomen DOC, door hogere temperaturen en drogere omstandigheden, leidt bij neerslag zeer waarschijnlijk tot een toename in uit- en afspoeling van nutriënten.
2. Stikstof: de verhoogde nitraat- en ammoniumbeschikbaarheid door droogte en warme perioden leidt bij de verwachte extremere neerslag tot uitspoeling van nitraat en, in mindere mate, ammonium.
3. Fosfaat: naast de verhoogde beschikbaarheid van fosfaat bij een hogere temperatuur neemt de oplosbaarheid toe bij neerslag. Dit leidt zeer waarschijnlijk tot verhoogde fosfaatuitspoeling.

Tabel 1. Effecten van klimaatverandering op de bodemprocessen en de waterkwaliteit, weergegeven per stof uit deze studie

Stof	Vorm uit- en afspoeling	Klimaat effect op bodemprocessen	Effect op de waterkwaliteit
Koolstof	Organische stof en DOC	↑ temp = ↑ productie en afbraak organische stof	↑ beschikbaarheid DOC ↑ uit- en afspoeling DOC
		↓ grondwaterstand = ↑ afbraak organische stof	↑ beschikbaarheid DOC en andere nutriënten ↑ uit- en afspoeling nutriënten bij neerslag
Stikstof	Nitraat en ammonium	↑ temp & droogte = ↑ ammonificatie en nitrificatie	↑ beschikbaarheid nitraat en ammonium ↑ uit- en afspoeling nitraat
		↑ temp & droogte = ↓ denitrificatie	↑ beschikbaarheid nitraat ↑ uitspoeling nitraat
Fosfor	Fosfaat	↑ temp = ↑ diffusiesnelheid	↑ beschikbaarheid fosfaat
		↑ neerslag = ↑ oplosbaarheid fosfaat	↑ uit- en afspoeling fosfaat

### ***Toename in uit- en afspoeling***

Uit deze studie blijkt dat er de komende jaren rekening gehouden moet worden met een toename in de uit- en afspoeling van nutriënten. Voornamelijk de verhoogde beschikbaarheid, oplosbaarheid en diffusiesnelheid zorgen voor deze toename. Bij hevige neerslag kunnen deze nutriënten uit- en afspoelen. Modelstudies zoals studies met de waterbalans zijn nodig om de effecten te kwantificeren en er zijn meerdere mogelijkheden om dit de komende jaren daadwerkelijk toe te passen.

### **Aanbevelingen**

Deze studie is een aanzet om tot een betere verbinding tussen de bodem en waterwereld te komen en biedt een basis voor vervolgonderzoek naar veranderingen in bodem- en waterkwaliteit door klimaatverandering. Het is noodzakelijk om het probleem van de verwachte toename in uitspoeling van nutriënten aan te pakken.

Het verminderen van de uit- en afspoeling van nutriënten hangt samen met goed bodembeheer, waarbij het verhogen van organische stof en het verminderen van bodemdaling twee belangrijke factoren zijn. Het verhogen van de voorraad bodemorganische stof zorgt voor een vitalere bodem en een verminderde uitspoeling van nutriënten. Een hoger gehalte organische stof verbetert namelijk de bodemstructuur, waardoor planten beter wortelen en meer nutriënten opnemen. Organische stof verhoogt ook het watervasthoudende vermogen van de bodem, waardoor er minder water uitspoelt. Het organische stofgehalte kan verhoogd worden door minder te ploegen, de transitie naar een kringlooplandbouw en het verhogen van de grondwaterstand. De organische stof wordt dan langzamer afgebroken, waardoor er minder organische stof verloren gaat en er minder nutriënten beschikbaar komen die kunnen uitspoelen.

Bij afbraak van veen tijdens lange droge perioden en een dalende grondwaterstand komen er nutriënten vrij, die tijdens de verwachte extremere buien zullen uitspoelen. Ook oppervlakkige afspoeling neemt toe vanwege de bodemdaling, waarbij nutriënten mee afspoelen.

Bij vervolgonderzoek naar uit- en afspoeling van nutriënten moet er rekening gehouden worden met verschillen tussen bodemtypen. Door verschillende dominante bodemprocessen is het effect van klimaatverandering per bodemtypen anders. Het is bijvoorbeeld bekend dat zandgronden een groter risico op nitraatuitspoeling kennen dan kleigronden.

Daarnaast is er ook aandacht nodig voor andere nutriënten, zoals opgeloste organische stikstof (DON) en sulfaat. De effecten van klimaatverandering op deze nutriënten zijn in dit artikel niet meegenomen. Het is bekend dat DON en sulfaat effect hebben op de waterkwaliteit en dat de uit- en afspoeling van deze stoffen beïnvloed kan worden door klimaatverandering. De relatie tussen koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>)-gehalten en plantengroei is niet opgenomen in dit artikel, maar een eerste inventarisatie is opgenomen in de literatuurstudie. CO<sub>2</sub> is voor planten belangrijk voor de groei; een hoger CO<sub>2</sub>-gehalte leidt tot een sterkere plantengroei.

## Referenties

1. Deltaprogramma Ruimtelijke Adaptatie. (2020). *Doorwerken aan de delta: nuchter, alert en voorbereid*.
2. Kamp, M. van der, Cals., T., Ouboter, M., Schep, S. (2021). 'Waterkwaliteitstresstest: gevolgen van klimaatverandering op sleutelfactoren gekwantificeerd'. *H2O-Online*, 10 februari 2021.
3. Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer. (2015). *Ecologische sleutelfactoren in het kort*. STOWA-rapport 2015-31.
4. Centraal Bureau voor de Statistiek. (2020). *Kaart bodemgebruik van Nederland, 2015*. [www.clo.nl/nl006111](http://www.clo.nl/nl006111).
5. Gulati, R. D., & Donk, E. van (2002). 'Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state-of-the-art review'. In *Ecological Restoration of Aquatic and Semi-Aquatic Ecosystems in the Netherlands (NW Europe)*. (pp. 73-106). Springer, Dordrecht.
6. Klein Tank, A., Beersma, J., Bessembinder, J., Hurk, B. van den, & Lenderink, G. (2014). *KNMI'14: Klimaatscenario's voor Nederland*. KNMI-publicatie.
7. Compendium voor de Leefomgeving. (2019). *Herkomst stikstofdepositie, 2018*. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0507-herkomst-stikstofdepositie>, Geraadpleegd op 8 december 2020.
8. Tanis, H.R., Schep, S.A. & Dijk, A. van (2018). *Waterstromen in beeld. Handleiding bij de Excelrekening Waterbalans*. STOWA rapportnummer 2018-74.
9. WUR Research Results. (z.d.). *Examples of the ANIMO model*. <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Research-Institutes/Environmental-Research/Facilities-Tools/Software-models-and-databases/ANIMO/Examples-of-the-ANIMO-model.htm>, geraadpleegd op 12 november 2020.