

# Evolutie van de koolstofspans in tropische bossen

1 december 2020 om 17:00 door Wannes Hubau, Simon Lewis, Corneille Ewango, Benjamin Toirambe, Hans Beeckman



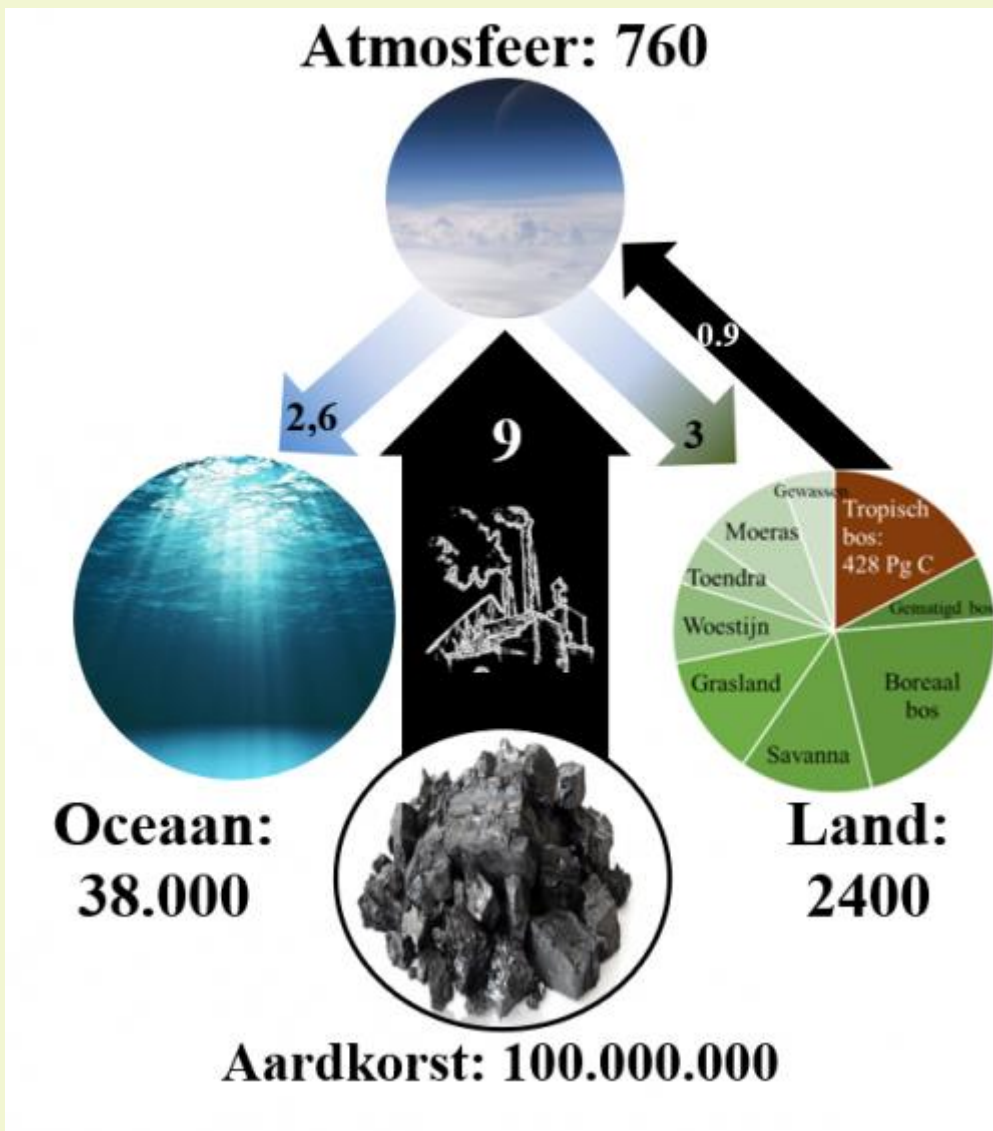
Intacte tropische bossen staan bekend als een cruciale koolstofspans, die de klimaatverandering op aarde vertraagt door koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ) uit de atmosfeer te verwijderen en op te slaan in biomassa (voornamelijk in boomstammen). De meeste wereldwijd toegepaste klimaatmodellen voorspellen dat deze tropische koolstofspans nog tientallen jaren op topcapaciteit zal blijven werken. Wetenschappers van het Koninklijk Museum voor Midden-Afrika, Leeds University (UK) en een internationaal consortium van onderzoeksinstituten ontdekten dat deze voorspelling niet correct is. De koolstofspans in intacte tropische bossen heeft een piek bereikt in de jaren negentig en neemt nu snel af. Deze alarmerende resultaten suggereren dat de koolstofdioxide-uitstoot nog sneller tot nul teruggebracht moet worden dan gepland. Eén van de beste maatregelen hiervoor is herbebossing in tropische regio's.

## De globale koolstofcyclus

Om het belang van de resultaten goed te begrijpen, schetsen we kort het mechanisme van de globale koolstofcyclus (Fig. 1). Onze planeet herbergt vier belangrijke koolstofreservoirs: de atmosfeer, de begroeiing op het land, de aardkorst en de oceanen. De hoeveelheid koolstof in deze reservoirs is uitgedrukt in de eenheid petagram (Pg), waarbij één petagram gelijk is aan een miljard ton ( $10^{15}$  g). Drie van die reservoirs wisselen constant koolstof uit met elkaar (Fig. 1; Le Quéré et al. 2015). Er is intensieve uitwisseling tussen de atmosfeer enerzijds en de oceanen en de vegetatie op land

anderzijds. Hierbij is fotosynthese een belangrijk proces: planten nemen koolstof (in de vorm van koolstofdioxide of CO<sub>2</sub>) op uit de atmosfeer, ze gebruiken koolstof (C) voor hun eigen weefselopbouw (voornamelijk hout) en geven zuurstof (O<sub>2</sub>) terug af aan de atmosfeer. Een omgekeerd proces is respiratie: organismen (zowel planten als dieren) nemen zuurstof uit de atmosfeer op en geven koolstofdioxide terug af. Fotosynthese en respiratie waren sinds het einde van de laatste ijstijd in balans en de koolstofreservoirs bleven gedurende duizenden jaren nagenoeg onveranderd. Daar bracht de Industriële Revolutie drastisch verandering in.

Door het verbranden van fossiele brandstoffen kwam er de laatste 250 jaar extra koolstof in de atmosfeer terecht onder de vorm van CO<sub>2</sub>. In 2010 bedroegen deze emissies wereldwijd ongeveer 9 miljard ton koolstof per jaar (Fig. 1). Daarbovenop kwam nog ongeveer 0,9 miljard ton per jaar door bosvernietiging en bosdegradatie. Maar waar gaan deze emissies heen? Extra CO<sub>2</sub> in de atmosfeer kan beschouwd worden als een soort van bemesting, waardoor planten sneller groeien en dus meer CO<sub>2</sub> verbruiken. Daardoor doen de oceanen en het landoppervlak ook dienst als koolstofspons, gekend als 'sink' onder klimaatwetenschappers. Beide reservoirs absorberen samen ongeveer 5,6 miljard ton koolstof per jaar (2,6 ton in de oceanen en 3 ton in het landoppervlak; Fig. 1). Jammer genoeg zijn deze koolstofsponzen niet voldoende om alle emissies op te vangen: netto krijgt de atmosfeer er jaarlijks 4,3 miljard ton koolstof bij ( $9+0,9-3-2,6 = 4,3$ ). Sinds het begin van de Industriële Revolutie is het koolstofreservoir in de atmosfeer al met meer dan 40% toegenomen (vergeleken met het referentiejaar 1750). Dit is problematisch aangezien CO<sub>2</sub> in de atmosfeer zorgt dat invallende zonnewarmte na weerkaatsing op het aardoppervlak niet meer naar het heelal terug kan keren. Daardoor warmt het aardoppervlak geleidelijk op.



*Figuur 1: Cirkels vertegenwoordigen de vier koolstofreservoirs van de planeet (in Pg C; IPCC 2000). Pijlen vertegenwoordigen de versterking van deze reservoirs, veroorzaakt door menselijke activiteiten. Dit zijn: emissies van fossiele brandstoffen en industrie ( $9,0 \pm 0,5 \text{ Pg C ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ ); emissies als gevolg van ontbossing en andere veranderingen in landgebruik ( $0,9 \pm 0,5 \text{ Pg C ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ ); en de koolstofspons in de oceanen ( $2,6 \pm 0,5 \text{ Pg C ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ ) en in het landoppervlak ( $3,0 \pm 0,8 \text{ Pg C ha}^{-1} \text{ jr}^{-1}$ ). Cijfers gelden voor de periode 2005–2014 (Le Quéré et al. 2015).*

Het internationale klimaatverdrag van Parijs heeft tot doel om de wereldwijde temperatuurstijging deze eeuw te beperken tot 1,5 °C. Daarvoor moeten de CO<sub>2</sub>-emissies drastisch teruggedrongen worden. Het IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) gebruikt wiskundige modellen om de impact van mogelijke maatregelen te berekenen. Er hangt veel af van deze modellen, maar de vraag is in hoeverre ze betrouwbaar zijn. Om de resultaten van deze mathematische modellen te testen, zijn er degelijke meetgegevens nodig. Het opmeten van het koolstofreservoir in tropische bossen en de grootte van hun werking als ‘koolstofspons’, is één van de grootste uitdagingen bij het correct berekenen van de globale koolstofbalans.

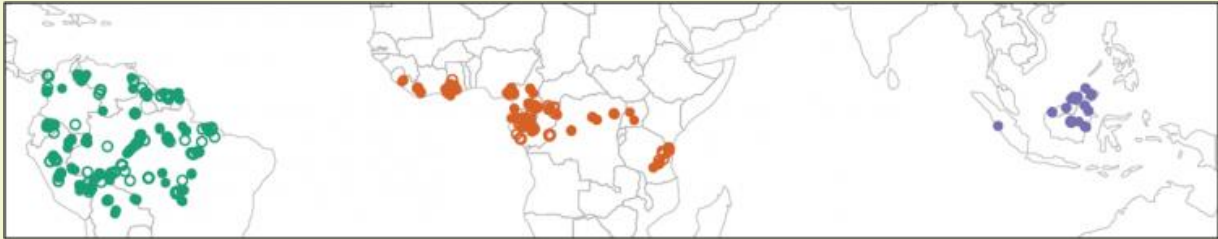
## Inventarisatiepercelen in tropische bossen

Tropische bossen zijn gekend als een belangrijk koolstofreservoir. Ze bevatten ~428 miljard ton koolstof in biomassa en bodem. Dat is ongeveer 18% van het totale koolstofreservoir op het landoppervlak en ongeveer drie keer zoveel als het reservoir in gematigde bossen (Fig. 1). Wanneer we enkel de bovengrondse biomassa in rekening brengen, loopt dit aandeel op tot nagenoeg 50%: tropische bossen hebben relatief weinig koolstof in de bodem maar buitengewoon veel koolstof bovengronds door de kolossale afmetingen van sommige bomen.

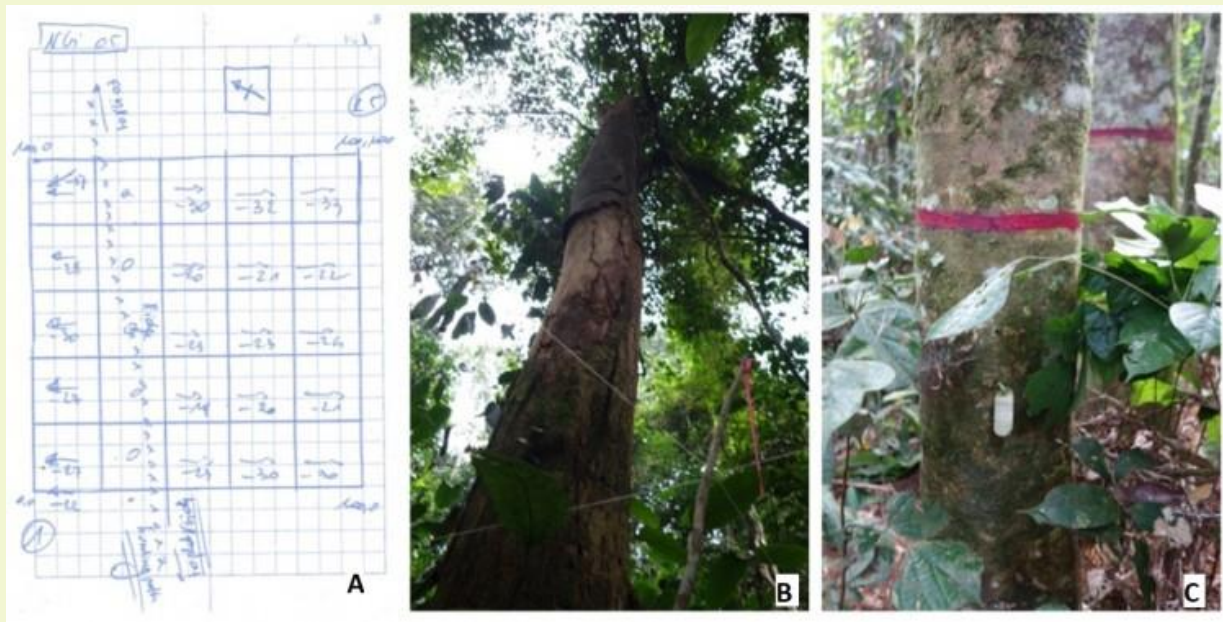
Om het koolstofreservoir in tropische bossen op te meten, gebruiken wetenschappers een ogenschijnlijk ouderwetse maar efficiënte techniek: bosinventarisatie en dendrometrie. Sinds de jaren 1940 werden honderden bosinventarisatiepercelen (hierna 'plots' genoemd) aangelegd in elk van de drie continenten die een groot tropisch regenwoudgebied bevatten: Zuid-Amerika, centraal Afrika en Zuidoost-Azië (Tabel 1 en Fig. 2). Een plot is gemiddeld 1 hectare groot en heeft meestal een vierkante vorm (100 m x 100 m). Van elke plot wordt de totale hoeveelheid koolstof berekend (voor details, zie Hubau et al. 2020). Hiervoor wordt van elke boom de soort genoteerd, de houtdensiteit bepaald (in kg per m<sup>3</sup>), de diameter opgemeten (Fig. 3) en de boomhoogte berekend. Diameter en hoogte worden gebruikt om het totale houtvolume te berekenen (in m<sup>3</sup>). Volume vermenigvuldigd met houtdensiteit levert dan het totale gewicht of biomassa op van een boom (in ton of Mg; Fig. 4). Ongeveer de helft van deze biomassa is koolstof. Het koolstofreservoir van alle bomen in een plot wordt bij elkaar opgeteld en gedeeld door de plot-oppervlakte (in hectare). Vervolgens wordt het gemiddelde berekend van alle plots in een continent, uitgedrukt in Mg C ha<sup>-1</sup> (megagram of ton koolstof per hectare). Ten slotte wordt dit gemiddelde vermenigvuldigd met een factor om de ondergrondse biomassa in rekening te brengen. Hieruit blijkt dat tropische bossen gemiddeld 230 Mg C ha<sup>-1</sup> bevatten (Tabel 1), met maxima tot 800 Mg C ha<sup>-1</sup>. Ter vergelijking: gematigde bossen bevatten gemiddeld 147 Mg C ha<sup>-1</sup> (Pan et al. 2011), terwijl een gemiddeld oud beukenbos (>140 jaar) in België ongeveer 272 Mg C ha<sup>-1</sup> bevat (Neumann et al. 2016).

*Tabel 1: Koolstofreservoir en koolstofspans per continent voor het decennium 2000-2010. Deze tabel toont per continent met tropisch bos het aantal opgemeten plots en bomen, het gemiddelde koolstofreservoir, de gemiddelde grootte van de koolstofspans (koolstofopname door boomgroei verminderd met koolstofverliezen door boomsterfte), de intacte bosoppervlakte en de totale koolstofspans (koolstofspans vermenigvuldigd met bosoppervlakte). Er is rekening gehouden met koolstof in zowel bovengrondse als ondergrondse biomassa. Eenheden: Mg C ha<sup>-1</sup> = ton per hectare per jaar; Mha=miljoen hectare; Pg C jr<sup>-1</sup> = miljard ton koolstof per jaar. Deze gegevens zijn afkomstig van Brienen et al. (2015; Zuid-Amerika), Hubau et al. (2020; Afrika) en Qie et al. (2017; Zuidoost-Azië).*

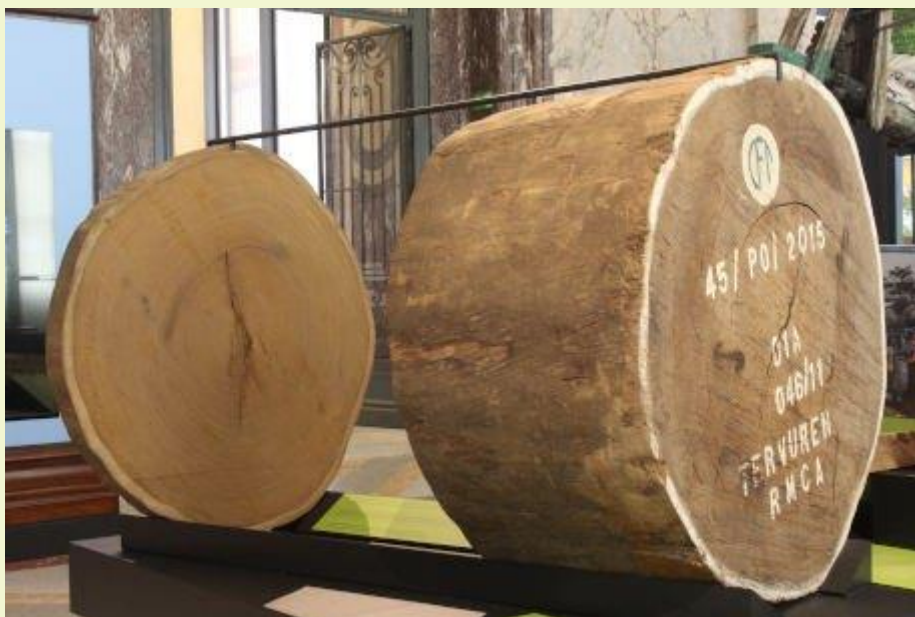
Continent	Aantal plots	Aantal bomen	Koolstof-reservoir (Mg C ha <sup>-1</sup> )	Koolstof-Intacte bos-spons oppervlakte (Mg C ha <sup>-1</sup> jr <sup>-1</sup> )	Intacte bos-oppervlakte (Mha)	Totale koolstof-spons (Pg C jr <sup>-1</sup> )
Zuid-Amerika	321	165.000	224,2	0,57 ± 0,18	786,8	0,45 ± 0,13
Afrika	244	135.000	232,6	0,92 ± 0,20	504,8	0,46 ± 0,09
Zuidoost-Azië	71	67.000	232,8	0,58 ± 0,38	127,7	0,07 ± 0,04



*Figuur 2: De distributie van de 636 permanente bosinventarisatieplots (volle cirkels) in de drie tropische continenten (uit: Sullivan et al. 2020). Permanente plots worden herhaaldelijk opgemeten en kunnen gebruikt worden voor het berekenen van zowel het koolstofreservoir als de koolstofspans. Open cirkels representeren plots die éénmalig opgemeten zijn en slechts kunnen gebruikt worden voor het berekenen van het koolstofreservoir.*



*Figuur 3: Hoe ziet een permanente bosinventarisatieplot eruit? (A) een terreinkaart van een typische plot van 1 ha (100 m x 100 m), met enkele topografische gegevens (helling en bospaadje) en de opdeling in 'subplots' van 20 m x 20 m die op terrein afgebakend worden met touwen (B); (C) elke boom krijgt een aluminium nummerplaatje en een streep verf op de hoogte waar de diameter gemiddeld om de 4 jaar opgemeten wordt.*



*Figuur 4: Deze stamstukken zijn afkomstig van een woudreus van de soort *Afrormosia* (*Pericopsis elata*, uit de Democratische Republiek Congo. Deze boom had een diameter van ongeveer 1,5 m, was meer dan 50 m hoog en had meer dan 15 ton koolstof opgeslagen. Hij maakte deel uit van een concessie beheerd door de Compagnie Forestière de Transformation (CFT), het enige Congolese bedrijf dat in de voorbije 10 jaar internationale certificering verkreeg voor hun bosbeheer. Deze boom werd in 2015 gekapt voor commerciële doeleinden. Het onderste gedeelte van de stam heeft een volume van exact 1 m<sup>3</sup> hout en bevat ongeveer 360 kg koolstof. Dit stamstuk werd geschonken aan het Koninklijk Museum voor Midden-Afrika voor educatieve doeleinden.*

## Koolstofspans = balans tussen koolstofopname en koolstofverlies

Tropische bossen zorgen voor ~ 33% van de jaarlijkse koolstofspans op het land, terwijl ze amper 10% van het landoppervlak innemen. In het decennium 2000-2010 werd ~0,99 miljard ton koolstof per jaar vastgelegd in biomassa en bodem van tropische bossen (Tabel 1). Om de grootte van deze koolstofspans te berekenen, wordt beroep gedaan op permanente inventarisatieplots die herhaaldelijk opnieuw opgemeten worden. Elke boom in een permanente plot draagt een nummerplaatje, waardoor individuele bomen gemakkelijker teruggevonden kunnen worden (Fig. 3). Bovendien wordt de plaats waar de diameter gemeten wordt, gemarkeerd door een smalle streep verf, waardoor men de boom op exact dezelfde plaats terug kan opmeten.

Voor elke boom en voor elke diametermeting wordt het koolstofreservoir berekend. Het verschil in koolstofreservoir tussen twee opeenvolgende diametermetingen, gedeeld door de tijd tussen de metingen, geeft de jaarlijkse koolstofopname per boom. De som van de opname van alle bomen, gedeeld door de plot-oppervlakte (in hectare), geeft de totale koolstofopname in een plot (in Mg C ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>). Ook hier wordt rekening gehouden met de ondergrondse biomassa door de koolstofopname te vermenigvuldigen met een continent-specifieke factor. Deze berekening wordt herhaald voor alle opeenvolgende tijdsintervallen. Terreinbezoeken zijn gemiddeld om de vier jaar ingepland, maar sommige plots worden regelmatig (bijvoorbeeld jaarlijks) bezocht, terwijl andere soms lange tijd ontoegankelijk zijn (bijvoorbeeld door oorlog).

Voor elk tijdsinterval wordt het koolstofverlies door boomsterfte berekend. Hiervoor wordt de som van de koolstofhoeveelheid van de bomen die gestorven zijn tijdens het interval, gedeeld door de tijdsperiode van het interval en door de plot-oppervlakte. In tropische gebieden rot een afgestorven boom zeer snel weg en het grootste deel van zijn biomassa wordt aan de atmosfeer vrijgegeven als CO<sub>2</sub> (ongeveer 85% wordt vrijgegeven binnen de eerste 10 jaar na sterfte). Koolstofverliezen door boomsterfte worden, net zoals koolstofopname door boomgroei, uitgedrukt in Mg C ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup> (ton per ha en per jaar). Ten slotte wordt de netto balans berekend door de koolstofverliezen af te trekken van de koolstofopname. Als de balans positief is (door overwegende boomgroei), doet een plot dienst als koolstofspons of 'sink'. Als de balans negatief is (door overwegende sterfte) stoot een plot netto koolstof uit, dan wordt het een 'koolstofbron' of 'source'.

Tijdens de voorbije 50 jaar werden 365.000 tropische bomen opgevolgd in 636 permanente plots (Tabel 1 en Fig. 2) in intacte tropische bossen. In het totaal werden meer dan een miljoen diametermetingen uitgevoerd door meer dan 300 wetenschappers. Het samenbrengen van deze data is lange tijd een quasi onmogelijke taak geweest. Daarin is sinds de jaren 1990 verandering gekomen door het oprichten van internationale netwerken zoals RAINFOR (Zuid-Amerika; Brienen et al. 2015), AfriTRON (centraal Afrika; Hubau et al. 2020) en T-FORCES (Zuidoost-Azië; Qie et al. 2017). Deze data zijn geïntegreerd via ForestPlots.net, dat collega's uit 53 landen verbindt.

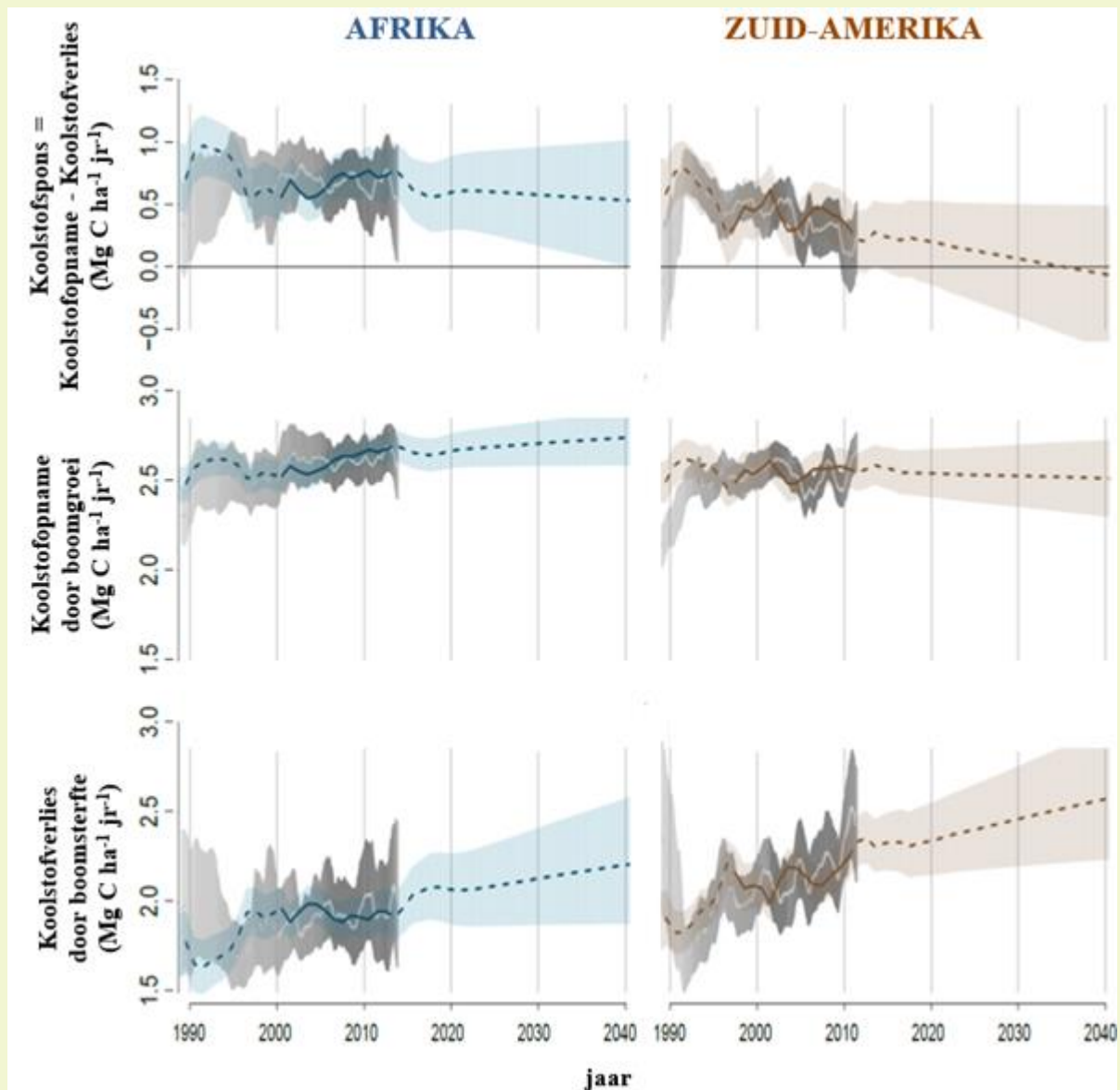
Van elk tropisch continent konden we de grootte van de koolstofspons in intacte bossen berekenen. In de jaren 2000-2010 (het decennium met de meeste meetgegevens) waren intacte tropische bossen in centraal Afrika de grootste koolstofspons ( $0.92 \pm 0.2$  Mg C ha<sup>-1</sup> jr<sup>-1</sup>), gevolgd door Zuid-Amerika ( $0.57 \pm 0.18$ ) en Zuidoost-Azië ( $0.58 \pm 0.38$ ) (Tabel 1). Een belangrijke vraag is echter: Hoe evolueerde deze balans op de lange termijn en zal ze in de toekomst positief blijven? Om deze vraag te beantwoorden, gebruikten we alle meetgegevens van 1990 tot 2015 in Afrika en Zuid-Amerika. We berekenden de koolstofopname, de koolstofverliezen en de koolstofspons voor elk jaar per continent en we gebruikten deze gegevens om een predictie te maken van de koolstofspons voor de komende decennia (tot 2040).

## Afname van de tropische koolstofspons

De grootte van de koolstofspons in Afrikaanse en Zuid-Amerikaanse intacte tropische bossen neemt af (Fig. 5). De hoofdoorzaak is toenemende boomsterfte (Fig. 5, onderste panelen), die het resultaat is van verschillende, complexe factoren. In de eerste plaats is de boomsterfte in de decennia 2000 en 2010 een vertraagd effect van de sterke boomgroei die de regenwouden kenden in de decennia 1980 en 1990 (Fig. 5, middelste panelen). Deze versnelde boomgroei was het resultaat van de zogenaamde 'koolstofbemesting': stijgende CO<sub>2</sub>-concentraties in de lucht hebben een vergelijkbaar effect op bomen als het toenemen van een voedselbron bij dieren. Aanvankelijk kan dit niet veel kwaad, maar als de boomgroei overdreven versnelt, kan het resultaat op lange termijn catastrofaal zijn. Bij dieren leidt overvoeding ook tot gezondheidsproblemen. Bovendien zijn er ook grenzen aan de boomgroei zelf: de verhoogde atmosferische CO<sub>2</sub> leidt tot systematisch hogere temperaturen. Bomen hebben een limiettemperatuur, waarbij hun groei afneemt eenmaal deze limiet bereikt wordt.

De koolstofbemesting heeft geleid tot een versnelde en intensievere dynamiek in intacte tropische bossen: de cyclus van boomgroei, boomsterfte en regeneratie, die van nature voorkomt in elk bos, is intensiever geworden en versneld. Op de lange termijn zullen tropische bossen hier niet meer van kunnen herstellen. Wetenschappelijk onderzoek toonde aan dat sommige bossen in Afrika (Aguirre-Gutiérrez et al. 2020) en Zuid-Amerika (Esquivel-Muelbert et al. 2018) evolueren naar drogere

bostypes die beter tegen het nieuwe klimaat kunnen, maar een kleiner koolstofreservoir hebben. De diverse en koolstofrijke regenwouden van vroeger zijn dus stilletjes aan het verdwijnen.



Figuur 5: De evolutie van de koolstofspans in Afrikaanse (blauw) en Zuid-Amerikaanse (bruin) intacte tropische bossen (bovenste panelen), berekend als de balans tussen koolstofopname door boomgroei (middelste panelen) en koolstofverlies door boomsterfte (onderste panelen). De koolstofspans neemt af in beide continenten en de daling is het grootst in Zuid-Amerika, voornamelijk door grotere koolstofverliezen. De figuur toont metingen van 1990 tot en met 2015 in 565 plots (grijze lijnen) en voorspellingen van 1990 tot en met 2040 op basis van een model (gekleurde lijnen). Grijze en gekleurde zones rond de lijnen tonen de onzekerheid op de metingen en de voorspellingen (uit: Hubau et al. 2020)

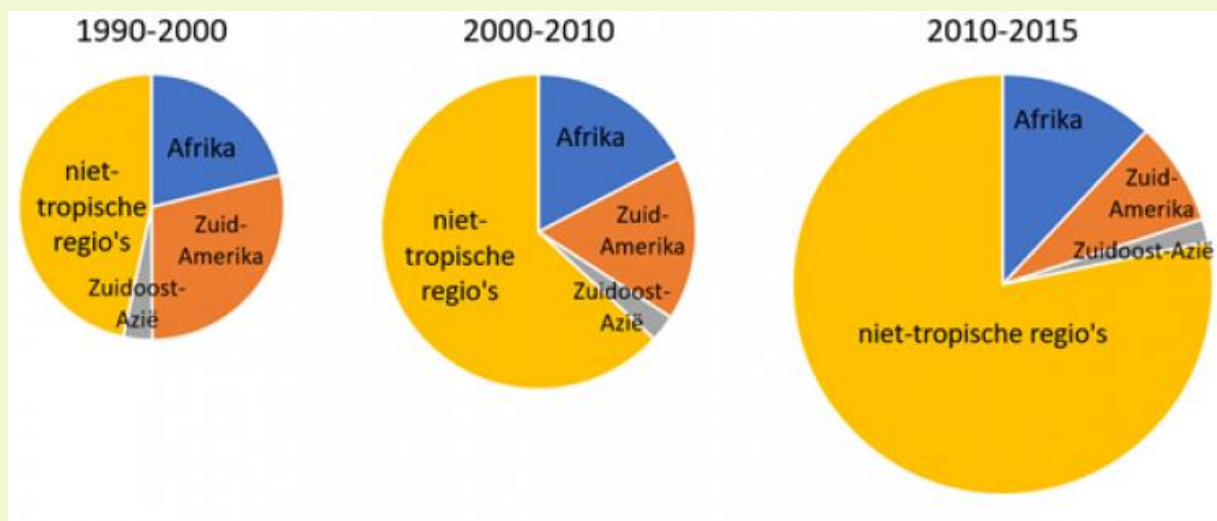
Naast het afnemen van de koolstofspans in de overgebleven intacte tropische bossen (een reductie van 33% sinds de jaren 1990; Fig. 5), is de bosvernietiging enorm (19% van de tropische bosoppervlakte ingenomen door landbouw, bewoning of mijnbouw sinds 1990). Daardoor is de totale koolstofspans in tropische bossen bijna gehalveerd over 30 jaar tijd: van  $1.26 \pm 0.37 \text{ Pg C jr}^{-1}$  in 1990-2000 naar  $0.68 \pm 0.50 \text{ Pg C jr}^{-1}$  in 2010-2015 (Hubau et al. 2020). Gelukkig neemt de koolstofspans in niet-tropische ecosystemen toe, waardoor de globale terrestrische koolstofspans toegenomen is van  $2.36 \text{ Pg C jr}^{-1}$  in



1990-2000 naar  $3.36 \text{ Pg C jr}^{-1}$  in 2010-2015 (Fig. 6; Friedlingstein et al. 2019). Toch kan de toenemende globale koolstofspoon de koolstofemissies niet compenseren. Bovendien bestaat de vrees dat de niet-tropische koolstofspoon ook zijn grenzen kent. Op termijn zullen bosccosystemen wereldwijd lijden onder de opwarming van de aarde. Een alarmerende recente studie toonde aan dat de meeste bomen die vandaag leven, niet zullen kunnen overleven in het verwachte klimaat over 40 jaar (Brodribb et al. 2020). De negatieve effecten van opwarming en droogte overtreffen het bemestingseffect van verhoogde koolstofconcentraties in de atmosfeer. Als de niet-tropische koolstofspoon ook verzadigt en begint af te nemen, zou de aarde in een op hol geslagen broeikas-effectscenario kunnen treden (Steffen et al. 2018).

## Conclusie: investeer in tropische bosbescherming en herbebossing

Tropische bossen zijn nog steeds enorme koolstofreservoirs, met in hun bomen alleen al 250 miljard ton koolstof. Deze hoeveelheid staat gelijk aan 27 jaar hedendaagse  $\text{CO}_2$ -uitstoot afkomstig van fossiele brandstoffen. Verder nemen tropische bossen nog steeds meer dan 20% van de terrestrische koolstofspoon voor hun rekening (Fig. 6). Bossen blijven de beste koolstofspoon. Door de grootschaligheid van de emissieproblematiek, bestaan er geen machines die op een kosten- en energie-efficiënte manier hetzelfde kunnen bewerkstelligen. Daarom moeten intacte tropische bossen beschermd worden en goed beheerd worden zodat gebruik ervan niet leidt tot degradatie of bosvernietiging.



*Figuur 6: De wereldwijde terrestrische koolstofspoon in de jaren 1990, 2000 en 2010 voor niet-tropische ecosystemen vergeleken met Afrikaanse, Zuid-Amerikaanse en Zuidoost-Aziatische tropische bossen. Terwijl de wereldwijde terrestrische koolstofspoon toeneemt ( $2.36 \text{ pg C jr}^{-1}$  in 1990-2000,  $2.68$  in 2000-2010,  $3.36$  in 2010-2015; Friedlingstein et al. 2019), is het aandeel van de tropische bossen achteruitgegaan (53% in 1990-2000, 37% in 2000-2010, 22% in 2010-2015). Dit komt vooral door een snel afnemende koolstofspoon in Zuid-Amerikaanse bossen (Brienen et al. 2015; zie Figuur 5).*

Naast bosbehoud is het stabiliseren van het klimaat op aarde noodzakelijk om de globale koolstofbalans te stabiliseren. Om te voorkomen dat de grootte van de koolstofspoon in intacte tropische bossen nog verder afneemt of zelfs volledig wegvalt, moet de  $\text{CO}_2$ -uitstoot nóg sneller naar nul gebracht worden dan momenteel wordt voorgeschreven sinds het klimaatverdrag van Parijs.

Verder kan de totale koolstofspons van tropische regio's aanzienlijk opgekrikt worden door herbebossing. Tot nu toe hebben 43 tropische landen beloofd om 292 miljoen ha te herbebossen tegen 2030 (o.a. via de 'Bonn challenge'). Indien dit 'beloofde land' bestemd zou zijn voor herstel van intact bos, zou het een extra koolstofspons van gemiddeld 0,42 miljard ton koolstof per jaar kunnen presteren tot 2100 (Lewis et al. 2019). In de realiteit is een groot deel van de oppervlakte bestemd voor industriële plantages van 'cash-crops' zoals cacao, rubber of mango; waardoor die extra koolstofspons met een tienvoud verminderd zou worden. Het is de taak van het internationale beleid om tropische landen te motiveren om in te zetten op herbebossing tot intact woud.

## Referenties

Aguirre-Gutiérrez, J., et al. (2020). Long-term droughts may drive drier tropical forests towards increased functional, taxonomic and phylogenetic homogeneity. *Nature Communications*, 11, 3346. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16973-4>

Brienen, R., et al., (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519, 344–348. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14283>

Brodribb, T.J., et al. (2020). Hanging by a thread? Forests and drought. *Science*, 368, 261-266. DOI: 10.1126/science.aat7631

Esquivel-Muelbert, A., et al. (2018). Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, 25, 39-56. DOI: 10.1111/gcb.14413

Friedlingstein, P., et al. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 11, 1783–1838. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>

Hubau, W., et al. (2020). Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature*, 579, 80–87. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>

Le Quéré, C., et al. (2015). Global Carbon Budget 2015. *Earth System Science Data*, 7, 349–396. DOI: [www.earth-syst-sci-data.net/7/349/2015/](http://www.earth-syst-sci-data.net/7/349/2015/).

Lewis, S.L., et al. (2019). Regenerate natural forests to store carbon. *Nature*, 568, 25-28. DOI: 10.1038/d41586-019-01026-8

Neumann, M., et al. (2016). Comparison of carbon estimation methods for European forests. *Forest Ecology and Management*, 361 (2016), 397–420. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.0160378-1127>

Pan, Y., et al. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333, 988. DOI: 10.1126/science.1201609

Qie, L., et al. (2017). Long-term carbon sink in Borneo's forests halted by drought and vulnerable to edge effects. *Nature Communications*, 8, 1966. DOI: 10.1038/s41467-017-01997-0

Steffen, W., et al. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *PNAS*, 115(33), 8252–8259. DOI: [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1810141115](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1810141115).

Sullivan, M.J.P., et al. (2020). Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. *Science*, 368, 869–874. DOI: 10.1126/science.aaw7578

Gelieve als volgt citeren:

Wannes Hubau, Simon Lewis, Corneille Ewango, Benjamin Toirambe, Hans Beeckman (2020) Evolutie van de koolstofspons in tropische bossen. *Bosrevue* 89a, 1-11.