

Het begrijpen van de koolstofkringloop

- **Koolstof kan worden opgeslagen in de atmosfeer, de oceaan, de bodem, de vegetatie en in de lithosfeer**
- **Dit is een gesloten systeem**
- **Om de temperatuurstijging te beperken, moet ook de hoeveelheid koolstof die is opgeslagen in de atmosfeer worden beperkt**
- **Dit kan door koolstof op te slaan ergens anders**



Georgette Boele
Senior Econoom Sustainability
georgette.boele@nl.abnamro.com

Inleiding

Het klimaatbeleid is vooral gericht op het verminderen van CO₂ in de atmosfeer, omdat een hogere concentratie CO₂ in de atmosfeer leidt tot hogere gemiddelde temperaturen op aarde. Dit komt doordat CO₂ en andere broeikasgassen de infrarode warmte van de aarde vasthouden. In deze analyse leggen we uit waar de koolstof is opgeslagen en hoe de stromen zijn (koolstofkringloop). Waarom is dit belangrijk? De dynamiek van de koolstofkringloop ligt aan de basis van mitigerende strategieën en technologieën die worden ingezet om in 2050 netto nul te zijn. In onze komende publicaties gaan we dieper in op deze technologieën met een link naar de koolstofcyclus. We eindigen met een conclusie.

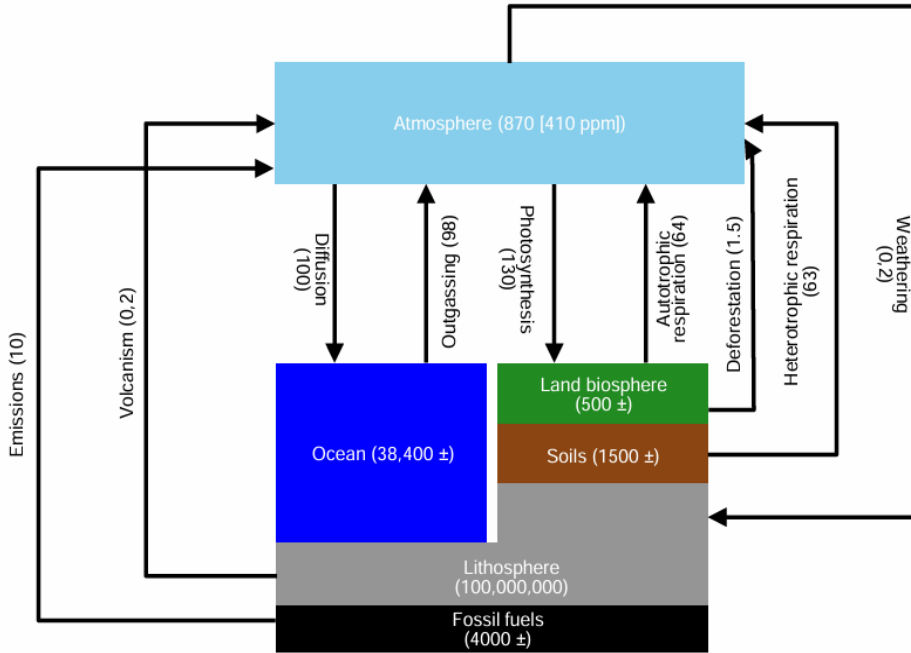
Koolstofkringloop

De koolstofkringloop is een gesloten systeem. Het is een systeem waar de koolstof is opgeslagen en laat de stromen zien. Koolstof kan worden opgeslagen in de atmosfeer, in de bodem, in planten, in de oceaan en in de lithosfeer. De lithosfeer bevat de aardkorst en het harde bovengedeelte van de mantel (inclusief fossiele brandstofvoorraden). Het diagram hieronder (uit 2018) laat zien waar de koolstof is opgeslagen en waar de veranderingen zijn (tussen haakjes). Om de getallen beter te begrijpen, leggen wij de basis uit aan de hand van het voorbeeld van de atmosfeer. Volgens de diagram was in 2018 in de atmosfeer is 870 gigaton (Gt) koolstof opgeslagen. Dit komt overeen met 410 delen per miljoen volume CO₂. Alle getallen zijn in Gt koolstof (GtC). Dit is niet hetzelfde als Gt CO₂. 1 Gt koolstof is 3,66 Gt CO₂.

In het klimaatbeleid richten we ons vooral op de CO₂-concentratie in de atmosfeer omdat een hogere concentratie leidt tot hogere gemiddelde temperaturen wereldwijd. De atmosfeer wordt koolstof opgeslagen in CO₂-gasmoleculen. De grootste voorraad koolstof op aarde is de lithosfeer waar 100.000.000 Gt koolstof in 2018 was opgeslagen, gevolgd door de oceaan waar 38.400 Gt koolstof was opgeslagen. Als alle koolstof die momenteel in de oceaan is opgeslagen in de atmosfeer terecht zou komen, zou deze 8-25° C warmer zijn. In de bodem was 1.500 Gt koolstof opgeslagen (in 2018).

Er is een grote interactie tussen de atmosfeer en de oceaan. Diffusie betekent dat de oceaan extra koolstof opneemt, terwijl uitgassing betekent dat de oceanen CO₂ teruggeven aan de atmosfeer. Netto nam de oceaan in 2018 2 Gt koolstof op (100-98). De biosfeer (planten) nam netto 64,5 Gt koolstof op (130-64-1,5), terwijl de afbraak van organisch bodemmateriaal en plantenafval door bodemmicroben leidt tot emissies van 63 Gt koolstof (heterotrofe ademhaling 63 in de grafiek hieronder) en de emissies van fossiele brandstoffen (10 GtC).

Wereldwijde koolstofkringloop

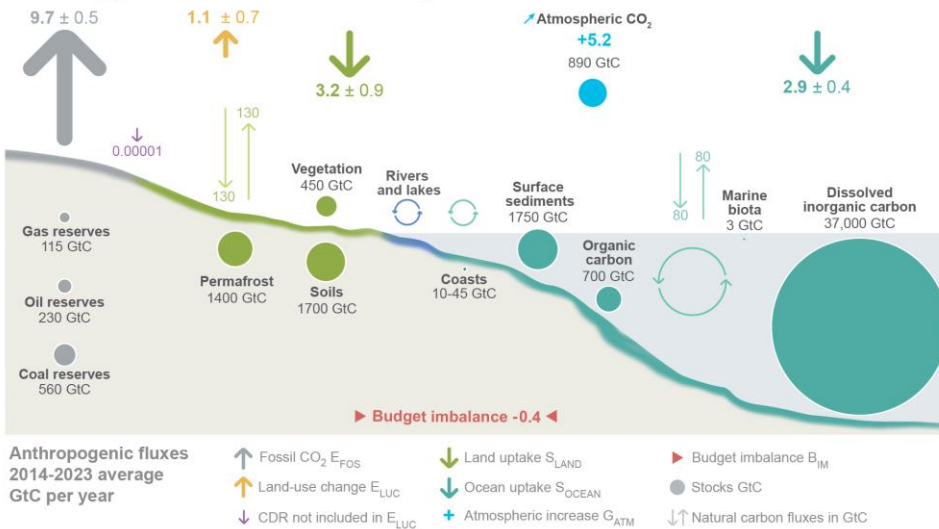


Bron: NOAA-GML, IPCC, Global Carbon Project, Global Carbon Project, diverse andere bronnen

De grafiek hieronder is een andere voorstelling van de koolstofkringloop. De getallen zijn het wereldwijde gemiddelde voor 2014-2023 in GtC. De cirkels stellen voor waar de koolstof is opgeslagen en de pijlen de jaarlijkse stromen in GtC. Het meeste is opgeslagen in de oceaan met 37.000 GtC. De grootste put van de lithosfeer wordt niet genoemd, maar olie, kolen- en gasreserves wel. Bovendien is er meer informatie over koolstof die is opgeslagen in de permafrost, namelijk 1.400 GtC.

Wereldwijde koolstofcyclus

The global carbon cycle



Bron: NOAA-GML, Friedling Bron: NOAA-GML; Friedlingstein et al 2024; Canadell et al 2021 (IPCC AR6 WG1 hoofdstuk 5); Global Carbon Project 2024

Koolstof opgeslagen in de atmosfeer

Wanneer energie van de zon de aarde bereikt, wordt een deel ervan door de aarde weerkaatst (albedo) en een deel ervan door de aarde geabsorbeerd. De aarde straalt deze energie terug als warmte (infrarood). Deze infrarode straling reist naar de atmosfeer waar het wordt geabsorbeerd door CO₂-moleculen en andere broeikasgasmoleculen. De moleculen gaan trillen en stralen de energie weer uit in alle richtingen. Ongeveer de helft hiervan gaat naar de ruimte en ongeveer de helft keert als warmte terug naar de aarde. Naarmate er meer koolstof in de atmosfeer terechtkomt, zijn er ook meer CO₂-moleculen in de atmosfeer die deze infrarode straling absorberen en weer uitzenden, wat resulteert in hogere gemiddelde

temperaturen op aarde. De CO₂-concentratie in de atmosfeer bepaalt dus het klimaat op aarde. De CO₂-concentratie in de atmosfeer 427 ppm (16 maart 2025) of 908 GtC.

Koolstof opgeslagen in de oceaan

Een hogere concentratie CO₂ in de atmosfeer leidt tot hogere gemiddelde temperaturen wereldwijd. Wat gebeurt er als de CO₂ zich niet in de atmosfeer bevindt, maar wordt opgenomen door de oceanen? Oceanen nemen elk jaar 25% van de CO₂-uitstoot op, dus dit verzacht de impact van CO₂ in de atmosfeer. De helft van de uitstoot blijft in de atmosfeer. Gassen zoals CO₂ worden opgenomen in zeewater. Kouder water neemt CO₂ beter op dan warmer water. Het CO₂-gas verandert in CO₂ in waterige vorm. De waterige vorm van CO₂ reageert snel nadat het is opgenomen in zeewater. Omdat CO₂ met water reageert en bicarbonaat en carbonaat vormt, is er minder CO₂ in het water. Daarom voegt de atmosfeer weer CO₂ toe aan de oceaan. Dit proces in de oceaan is de reden waarom oceanen zoveel CO₂ opnemen.

Er zijn twee evenwichten die belangrijk zijn. Om te beginnen het evenwicht tussen CO₂, bicarbonaat en carbonaat in het zeewater. De verhouding voor zeewater met een pH van 8 is 1:88:11 voor CO₂: bicarbonaat: carbonaat. Als het water van de oceaan zuurder is, is dit evenwicht anders dan wanneer er minder zuur is. Over het algemeen is er in zeewater met een lage pH (zuurder) meer CO₂ in waterige vorm aanwezig dan in zeewater met een hogere pH. Zuurder zeewater heeft een negatieve invloed op bijvoorbeeld koraalriffen. Een evenwicht met minder CO₂ in waterige vorm heeft dus de voorkeur.

Een ander belangrijk evenwicht is dat van de CO₂-concentratie in het zeewater ten opzichte van de CO₂-concentratie in de atmosfeer. Als één van beide toeneemt, leidt dit tot een CO₂-stroom naar de put met de laagste concentratie. Laten we een voorbeeld geven. Als de concentratie CO₂ (in waterige vorm) lager is dan de concentratie CO₂ in de atmosfeer, dan zal CO₂ uit de atmosfeer naar de oceaan stromen en vice versa. Als we erin slagen om de CO₂-uitstoot te verminderen en de CO₂-concentratie in de atmosfeer daalt, dan is de CO₂-concentratie in de atmosfeer lager dan de CO₂-concentratie in het zeewater. Als gevolg daarvan zal CO₂ zich binnen 1 jaar ook verplaatsen van de oceaan naar de atmosfeer. Dit is een belangrijke dynamiek om te begrijpen.

Hoe beïnvloedt de watertemperatuur de CO₂-concentratie in de oceaan? CO₂ maar ook andere gassen worden minder goed opgenomen in warmer zeewater. Als de temperatuur stijgt, is er namelijk minder ruimte voor CO₂. Hierdoor zal de oceaan CO₂ afgeven aan de atmosfeer. Dit is één van de redenen waarom zeewater rond de evenaar CO₂ afgeeft aan de atmosfeer.

Over het algemeen hebben oceanen dus veel meer capaciteit om koolstof en CO₂ op te slaan dan de atmosfeer, maar er zijn specifieke dynamieken die deze opslagcapaciteit beïnvloeden, zoals temperatuur, CO₂-concentratie in de atmosfeer en zuurgraad.

Koolstof opgeslagen op land

Naast de atmosfeer en de oceaan kan koolstof ook worden opgeslagen in levende planten en in de bodem. Tot de terrestrische koolstofvoorraden behoren bossen en planten, bodems, wetlands, permafrost en andere ecosystemen op het land. Planten gebruiken CO₂ uit de atmosfeer, water uit de bodem en energie van de zon om glucose en zuurstof te produceren. Zuurstof is een bijproduct. Vervolgens zetten planten de glucose weer om in energie en voor dit proces is weer zuurstof nodig. Van alle CO₂ die planten uit de atmosfeer halen voor fotosynthese, gaat de helft terug naar de atmosfeer als gevolg van plantenonderhoud (het maken van bladeren en stengels) in de vorm van ademhaling. Hoe actief planten zijn, hangt af van de hoeveelheid zonlicht, vocht in de bodem, CO₂-concentratie in de atmosfeer, voedingsstoffen in de bodem en de temperatuur. Over het algemeen geldt: hoe meer, hoe beter, met uitzondering van zeer hoge temperaturen en zeer natte omstandigheden. Als er meer planten zijn en/of planten actiever zijn, wordt er meer CO₂ aan de atmosfeer onttrokken. Maar de grootte van de koolstofopslag hangt af van of planten investeren in duurzamere structuren zoals stengels die moeilijker af te breken zijn als de plant sterft en hoe hoog de omloopsnelheid is. Een hogere temperatuur en meer vocht vormen de ideale omgeving om plantenmateriaal af te breken (hoge omloopsnelheid). In de tropen is de hoeveelheid levende biomassa hoog door veel fotosynthese en de afbraaksnelheid is ook hoog.

Naast planten is de bodem ook een belangrijke koolstofput. In de bodem breken microben organisch materiaal af en daarbij komt CO₂ vrij in de vorm van ademhaling. De afbraak van stengels duurt langer dan die van bladeren. De grootste voorraden dode biomassa onder de grond bevinden zich op hoge breedtegraden waar de fotosynthese laag is, de temperatuur koud, de vochtigheid laag en de afbraaksnelheid laag.

Wetlands en permafrostgebieden hebben ook veel koolstof opgeslagen. Als wetlands worden drooggelegd, worden de bodems blootgesteld aan zuurstof en komt er CO₂ vrij. In het geval van ontdooiende permafrost krijgen microben veel voedingsstoffen en door de beschikbaarheid van zuurstof worden deze bodems afgebroken waardoor CO₂ vrijkomt.

Koolstof opgeslagen in de lithosfeer

De laatste plaats waar koolstof wordt opgeslagen is de lithosfeer. Dit is de grootste koolstofput. De lithosfeer is het vaste, buitenste deel van de aarde. De opslag van koolstof in de lithosfeer vindt op een veel langere tijdschaal plaats dan de opslag op het land. In de lithosfeer wordt koolstof opgeslagen in sedimenten en rotsen. Fossiele brandstoffen maken ook deel uit van de lithosfeer. Fossiele brandstoffen worden gevormd door geologische processen die inwerken op de overblijfselen van oude fotosynthese. Steenkool is oorspronkelijk afkomstig van koolstof die is opgeslagen op het land, terwijl olie en gas oorspronkelijk afkomstig zijn van koolstof die is opgeslagen in de oceaan (zinken van oceaanbiomassa). Als fossiele brandstoffen uit de lithosfeer worden gehaald om te worden verbrand, komt de opgeslagen koolstof uit de lithosfeer in de atmosfeer terecht. Technologieën met een lage (of lagere) koolstofuitstoot, zoals elektrische voertuigen, alternatieve brandstoffen met een lage uitstoot en zonne-energie, proberen ons minder afhankelijk te maken van de verbranding van fossiele brandstoffen.

Aan de andere kant is de verwerking van gesteente een manier om koolstof op te slaan in de lithosfeer. CO₂ uit de atmosfeer reageert met water om koolzuur te vormen. Koolzuur reageert met bepaalde soorten gesteente zoals sedimentgesteente/koolwaterstofgesteente (kalksteen), vulkanisch gesteente (basalt), magnesiumrijk gesteente (serpentin) of magnesiumrijk en ijzerrijk gesteente (olivijn). Koolzuur lost het gesteente op. Meer verwerking van gesteente betekent minder CO₂ in de atmosfeer. Er bestaan koolstofvastleggingstechnieken die de natuurlijke manier van gesteenteverwerking versterken, zodat er meer koolstof in de lithosfeer kan worden opgeslagen (zie [hier](#) voor meer informatie).

Conclusie

Er zijn veel manieren om koolstof op te slaan. Koolstof kan worden opgeslagen in de atmosfeer in de vorm van CO₂-gasmoleculen. Maar een toenemende hoeveelheid koolstof in de atmosfeer leidt tot hogere wereldgemiddelde temperaturen en een veel hogere temperatuur is iets wat we willen vermijden. Het alternatief is koolstof elders opslaan, zoals in vegetatie, bodems, oceanen en de lithosfeer. Er zijn verschillende manieren om koolstof uit de atmosfeer op te slaan in een andere omgeving, zoals het planten van bomen, koolstofvastlegging en -opslag, verbeterde verwerking van gesteente en het opnieuw bevochtigen van wetlands. Koolstof opslaan is één ding, maar voorkomen dat deze putten koolstof afgeven aan de atmosfeer is iets anders. Eén manier om de CO₂-uitstoot te verminderen is door fossiele brandstoffen te vervangen door schonere energiebronnen. Andere manieren zijn om de permafrost bevroren te houden, om te voorkomen dat wetlands worden drooggelegd en om de koolstof opgeslagen te houden in de oceaan (voorkomen dat oceanen opwarmen). We willen ervoor zorgen dat de putten een put blijven en dat de stromen naar de atmosfeer worden beperkt.

DISCLAIMER

Dit document is opgesteld door ABN AMRO. Het is uitsluitend bedoeld om financiële en algemene informatie over economie te verstrekken. De informatie in dit document is strikt vertrouwelijk en wordt u uitsluitend ter informatie verstrekt. Het mag niet (geheel of gedeeltelijk) worden gereproduceerd, gedistribueerd of doorgegeven aan derden of worden gebruikt voor andere doeleinden dan hierboven vermeld. Dit document is informatief van aard en vormt geen aanbod van effecten aan het publiek, noch een uitnodiging tot het doen van een dergelijk aanbod.

Er mag voor geen enkel doel worden vertrouwd op de informatie, meningen, voorspellingen en veronderstellingen in het document of op de volledigheid, nauwkeurigheid of billijkheid ervan. Er wordt door of namens ABN AMRO, haar directeuren, functionarissen, agenten, gelieerde ondernemingen, groepsmaatschappijen of werknemers geen enkele expliciete of impliciete garantie gegeven met betrekking tot de juistheid of volledigheid van de informatie in dit document en er wordt geen aansprakelijkheid aanvaard voor enig verlies dat direct of indirect voortvloeit uit het gebruik van dergelijke informatie. De opvattingen en meningen in dit document kunnen op enig moment wijzigen en ABN AMRO is niet verplicht om de informatie in dit document na de datum van dit document te actualiseren.

Voordat u in een product van ABN AMRO Bank N.V. belegt, dient u informatie in te winnen over de verschillende financiële en andere risico's en mogelijke beperkingen waarmee u en uw beleggingsactiviteiten te maken kunnen krijgen op grond van toepasselijke wet- en regelgeving. Als u na het lezen van dit document overweegt om in een product te beleggen, wordt u geadviseerd om een dergelijke belegging te bespreken met uw relatiebeheerder of persoonlijke adviseur en na te gaan of het betreffende product - gezien de risico's - past binnen uw beleggingsactiviteiten. De waarde van uw beleggingen kan fluctueren. In het verleden behaalde resultaten bieden geen garantie voor de toekomst. ABN AMRO behoudt zich het recht voor om wijzigingen aan te brengen in dit materiaal.

© Copyright 2025 ABN AMRO Bank N.V. en gelieerde bedrijven ("ABN AMRO")