

SustainaWeekly

Hoe CO2 op te slaan?

- ▶ **Sector:** We hebben een trilogie gedaan over CCS. Onze eerste publicatie ging over de technologieën en technieken om koolstof af te vangen ([zie hier](#)). Daarna richtten we ons op het transport van CO2 ([zie hier](#)). In deze SustainaWeekly staat de vraag centraal hoe CO2 op te slaan? We beantwoorden in welke staat CO2 moet zijn om het op te kunnen slaan. Maar ook in welke geologische putten CO2 kan worden opgeslagen en welke vangmechanismen worden gebruikt. In de toekomst zullen we ons ook richten op CO2-gebruik, directe koolstofafvang en mobiele koolstofafvang.
- ▶ **ESG in cijfers:** In een vaste rubriek van deze publicatie, presenteren we een grafiekenboek over enkele van de belangrijkste indicatoren voor ESG-financiering en de energietransitie.

In deze Sustainaweekly gaan we verder met onze serie over koolstofafvang en -opslag door ons nu te richten op hoe de afgevangen CO2 moet worden opgeslagen.

Dit is de laatste SustainaWeekly van dit jaar. We wensen u fijne dagen en een gelukkig nieuwjaar. Veel leesplezier met deze editie en, zoals altijd, laat het ons weten als je feedback hebt!

Nick Kounis, Head Financial Markets and Sustainability Research | nick.kounis@nl.abnamro.com

Hoe CO2 op te slaan?

Georgette Boele – Senior Economist Sustainability | georgette.boele@nl.abnamro.com

- ▶ **Geologische of biologische depots kunnen CO2 opslaan**
- ▶ **Mogelijke geologische depots zijn olie- en gasreservoirs, zoutwaterformaties, niet-mijnbare kolenlagen, organisch-rijke schalie- en basaltformaties**
- ▶ **Maar de CO2 moet wel worden opgeslagen in de afzetting; er zijn vier mechanismen om dat te doen**
- ▶ **De kosten om CO2 op te slaan zijn afhankelijk van de geologische kenmerken, de schaal en de aannames ten aanzien van monitoring, financiën en andere modellering**

De opslag van CO2 betekent dat de opgevangen CO2 op wordt geslagen in een depot. Dit wordt ook wel sequestratie genoemd. Er zijn twee vormen van opslag, namelijk biologische CO2-opslag en geologische CO2-opslag. Biologische opslag verwijst naar de opslag van atmosferische koolstof in vegetatie, bodems, houtachtige producten en aquatische milieus. Geologische CO2-opslag is het proces waarbij CO2 wordt opgeslagen in ondergrondse geologische formaties. In deze notitie richten we ons op geologische CO2-opslag. CO2 kan ondergronds worden opgeslagen als superkritische vloeistof (zie onze notitie over [CO2-transport](#)). Het belangrijkste voordeel van het opslaan van CO2 in superkritische toestand is dat het vereiste opslagvolume aanzienlijk kleiner is dan wanneer de CO2 onder "standaard" (kamer)druk zou worden opgeslagen. De temperatuur neemt van nature toe met de diepte in de aardkorst, net als de druk van de vloeistoffen (pekels=zoutwater, olie of gas) in de formaties. Op een diepte van minder dan 800 meter liggen de natuurlijke temperatuur en vloeistofdruk boven het kritieke punt van CO2 voor de meeste plaatsen op aarde. Dit betekent dat CO2 die op deze diepte of dieper wordt geïnjecteerd in superkritische toestand zal blijven gezien de aanwezige temperaturen en drukken.

Geologische opslaglocaties

Sequestratietechnologieën slaan CO2 op in geologische formaties of via mineralisatie in reactief gesteente. Geologische opslag is een beproefde methode voor ondergrondse opslag van kooldioxide (CO2) waarbij CO2 diep onder de grond in diepe rotsformaties wordt geïnjecteerd voor opslag op lange termijn. Het grote voordeel van geologische opslag van CO2 is dat het een langdurige isolatie van de atmosfeer biedt via permanente insluiting van CO2 in het poreuze medium van het reservoir. Het gesteente die het afsluit is vaak dicht schaliegesteente met een lage permeabiliteit. Een belangrijke eigenschap van een rots in de aanwezigheid van twee niet-mengbare vloeistoffen (hier CO2 en pekels of zout water uit de formatie) is de voorkeur van de ene vloeistof boven de andere om in contact te komen met het oppervlak van de rots, een eigenschap die bevochtigbaarheid wordt genoemd. De bevochtigbaarheid heeft een directe invloed op de stroming van geïnjecteerd CO2 in de ondergrond en zal in het gesteente opgesloten blijven. De bevochtigbaarheid van een systeem bepaalt de stroming en de insluitingsefficiëntie tijdens de opslag van CO2 in geologische formaties.

Er zijn vijf potentiële geologische depots voor permanente CO2-opslag: actieve of uitgeputte olie- en gasformaties (zandstenen/koolwaterstoffen), diepe zoutwaterformaties, niet-mijnbare kolenlagen, organisch-rijke schalies en basaltformaties.

Olie- en gasreservoirs

Olie- en aardgasreservoirs zijn ideale geologische opslaglocaties omdat ze al duizenden tot miljoenen jaren koolwaterstoffen vasthouden en de omstandigheden geschikt zijn voor CO2-opslag. Het injecteren van CO2 kan ook de olieproductie verhogen door vloeistoffen naar producerende putten te stuwen via een proces dat *Enhanced Oil Recovery* (EOR) wordt genoemd. Koolwaterstofreservoirs hebben een beperkte opslagcapaciteit, maar er is een natuurlijke val door afdichting van het gesteente.

Zoutwaterformaties

Zoutwaterformaties zijn poreuze formaties gevuld met pekels, of zout water, en omvatten grote volumes diep onder de grond. Koolstofafvang en -opslag (CCS) richt zich op formaties die pekels bevatten met een totaal gehalte aan opgeloste vaste stoffen van meer dan 10.000 delen per miljoen. Studies tonen aan dat zoutwaterformaties het grootste potentiële volume hebben voor de opslag van CO2 over de hele wereld.

Steenkoollagen

Steenkoollagen die als niet-mijnbaar worden beschouwd omwille van geologische, technologische en economische factoren (meestal te diep, te dun of zonder interne continuïteit om economisch te kunnen worden ontgonnen) kunnen nog steeds

dienen als locaties om CO₂ op te slaan. Om in aanmerking te komen voor CO₂-opslag moet de ideale kolenlaag voldoende doorlatend zijn en als niet-mijnbaar worden beschouwd. Steenkoollagen kunnen ook methaan (CH₄) bevatten, dat kan worden geproduceerd in combinatie met CO₂-injectie in een proces dat verbeterde kolenbedmethaanterugwinning (ECBM) wordt genoemd. In kolenlagen kan de geïnjecteerde CO₂ chemisch worden ingesloten door adsorptie (of hechting) aan het oppervlak van de kolen, terwijl CH₄ vrijkomt en wordt geproduceerd. Adsorptie is de hechting van atomen, ionen of moleculen van een gas, vloeistof of opgeloste vaste stof aan een oppervlak. Dit vangmechanisme maakt permanente opslag van CO₂ mogelijk. Steenkoollagen liggen vaak dicht bij emissielocaties, maar injectie is extreem moeilijk.

Schalies

Sommige schalies hebben soortgelijke eigenschappen als steenkool en kunnen CO₂ vasthouden door adsorptie (hechting aan het oppervlak), waardoor methaan vrijkomt en ze potentieel aantrekkelijk zijn voor opslag. Ondanks hun lage vloeistofgeleiding kan CO₂ verspreiden in en reageren met schaliemineralen en mogelijk migreren om schalieporiën te vullen. Organisch-rijke schalies houden een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ permanent vast.

Basalt

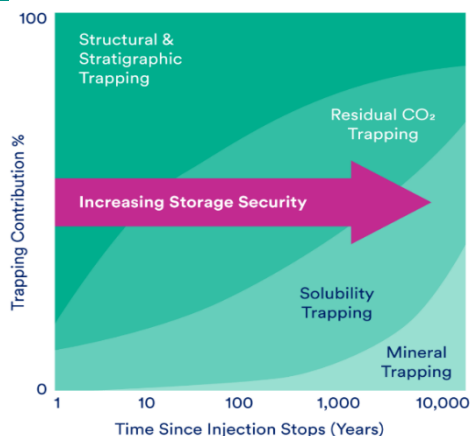
Basalt is een soort formatie die werd afgezet toen grote lavastromen uit vulkanen afkoelden en vervolgens stolden. In de loop der tijd werden dikke lagen basalt opgebouwd (met vaak lagen van andere formaties ertussen). De chemische en fysische eigenschappen van deze basaltlagen en de andere formaties tussen de basaltlagen maken ze goede kandidaten voor CO₂-opslag. Bij basalt kan geïnjecteerd CO₂ reageren met magnesium en calcium in het basalt om de stabiele carbonaatmineralen calciet en dolomiet te vormen. Dit mineralisatieproces kan een waardevol instrument zijn voor CO₂ opslag omdat het mineralisatieproces CO₂ permanent vastzet in de vaste minerale structuur. Dus de CO₂ permanent wordt vastgehouden. Het injecteren van CO₂ in poreus basaltgesteente is geïdentificeerd als één van de meest veelbelovende technieken voor CO₂-opslag. Er zijn drie factoren waarmee rekening moet worden gehouden. De eerste factor is de porositeit van het gesteente, die van invloed is op het oppervlak dat beschikbaar is voor de CO₂ om te reageren en te worden opgeslagen. Een andere cruciale factor voor efficiënte geologische opslag van CO₂ is de permeabiliteit van de formatie, die van grote invloed is op de injectiesnelheden. Een hogere permeabiliteit maakt hoge injectiesnelheden mogelijk. De derde factor is de reactiviteit van het gesteente. Deze gesteenten bestaan uit mineralen die tweewaardige metaalkationen bevatten. Als de kationen onstabiel zijn, zal de reactie sneller verlopen omdat de kationen zich ver van de evenwichtsconstante bevinden. Dit resulteert in snellere oplossnelheden in het meer reactieve gesteente en snelle mineralisatie (zie hier). Er zijn echter enkele uitdagingen. Om te beginnen is er veel water nodig voor het mineralisatieproces. Bovendien zijn basaltformaties heterogeen vanwege hun oorspronkelijke afzettingsmilieu. Bovendien kan het van begin tot eind duizenden jaren duren voordat alle koolstof gemineraliseerd is en op elk moment kan een verschuiving in het gesteente ervoor zorgen dat er wat koolstof ontsnapt.

Mechanisme om CO₂ in te sluiten

De CO₂ wordt veilig opgeslagen in de afzettingen via vier vangmechanismen (zie hier). Deze mechanismen voorkomen opwaartse migratie en lekkage van CO₂.

1. Structurele insluiting
2. Residuele insluiting
3. Insluiting door oplosbaarheid
4. Minerale insluiting

Mechanismen om CO₂ in te sluiten



Bron: IPCC, 2005

Structurele insluiting

Structurele insluiting is de fysieke insluiting van CO₂ in het gesteente en is het mechanisme dat de grootste hoeveelheid CO₂ insluit. Structurele insluiting betekent het afsluiten van CO₂ door een deklaag. Eenmaal geïnjecteerd kan superkritisch CO₂ een groter drijfvermogen hebben dan andere vloeistoffen in de omringende poriënruimte. Daarom zal de CO₂ omhoog migreren door het poreuze gesteente totdat het een ondoordringbare laag afdichtingsgesteente bereikt (en wordt ingesloten). Afdichtingsgesteente is een extreem laag doorlatend gesteente dat de stroming van de CO₂ pluim verhindert. Deze rotslaag kan honderden meters dik zijn en houdt de CO₂ veilig ingesloten. De gesteentelagen en breuken binnen en boven de opslagformatie waar CO₂ wordt geïnjecteerd werken als afdichtingen en voorkomen dat CO₂ uit de opslagformatie stroomt.

Residuele insluiting

Residu-insluiting verwijst naar de CO₂ die opgesloten blijft in de poriën tussen de gesteentekorrels terwijl de CO₂-pluim door het gesteente migreert. Het bestaande poreuze gesteente werkt als een stijve spons. Wanneer superkritisch CO₂ in de formatie wordt geïnjecteerd, verdringt het de bestaande vloeistof terwijl het door het poreuze gesteente beweegt. Terwijl de CO₂ blijft bewegen, kunnen kleine delen van de CO₂ achterblijven als losgekoppelde, of resterende, druppels in de poriënruimten die in wezen immobiel zijn, net als water in een spons. Deze reservoirs zijn niet groot. Wanneer residuele insluiting optreedt, wordt de CO₂ ingesloten.

Insluiting door oplosbaarheid

Bij *solubility trapping* zal een deel van het geïnjecteerde CO₂ oplossen in het pekelwater dat aanwezig is in de poriënruimtes in het gesteente. De CO₂ heeft een interactie met het pekelwater, wat leidt tot insluiting door oplosbaarheid. Op het grensvlak tussen CO₂ en pekelwater lossen sommige CO₂-moleculen op in het pekelwater in de poriënruimte van het gesteente. Een deel van dat opgeloste CO₂ combineert dan met beschikbare waterstofatomen om HCO₃⁻ te vormen. Door deze oplossing neemt de dichtheid van pekelwater toe, waardoor het nog lager in de formatie zinkt en de opwaartse migratie van CO₂ wordt beperkt.

Minerale insluiting

Bij minerale insluiting treedt er op moleculair niveau interactie op tussen CO₂ en mineralen die aanwezig zijn in de rotsformatie via een reeks geochemische reacties. Deze reacties resulteren in de vorming van nieuwe, vaste en stabiele carbonaatmineralen. De CO₂ wordt in feite onderdeel van het gesteente.

Opslagkosten

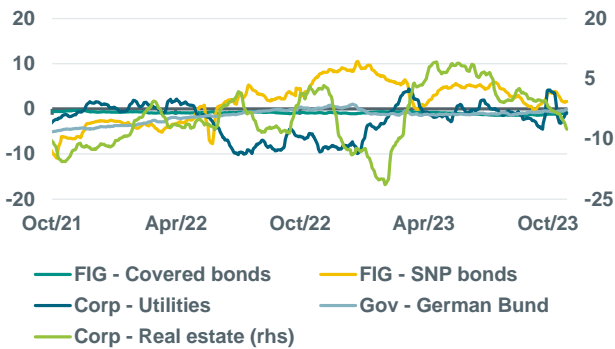
Het overgrote deel van het CO₂-opslagpotentieel wereldwijd bevindt zich in onshore en offshore zoutwaterformaties (USGS, 2013). De kosten van CO₂-opslag zijn sterk afhankelijk van de locatie, omdat de geologische kenmerken van locatie tot locatie verschillen en de injectie-, arbeids-, boor-, kapitaal- en andere kosten regionaal verschillen. Net als offshore pijpleidingen is offshore CO₂-opslag over het algemeen duurder dan onshore-opslag. Voor CO₂-opslag in zoutwaterformaties moeten verschillende types putten worden geboord (exploratie, injectie en monitoring) die een groot deel van de totale opslagkosten vertegenwoordigen.

Eerdere studies hebben gesuggereerd dat de kosten van CO₂-opslag in uitgeputte olie- en gasvelden lager zijn dan in zoutwaterformaties omdat de olie- en gasvelden al onderzocht zijn en de mogelijkheid bieden om bestaande infrastructuur te hergebruiken. De infrastructuur moet echter CO₂ kunnen transporteren, dat andere eigenschappen heeft dan andere gassen of vloeistoffen. Daarom moet de integriteit van de infrastructuur worden gecontroleerd en bewaakt. Er zijn kosten verbonden aan het controleren van de infrastructuur en er zijn ook kosten verbonden aan het aanpassen van de infrastructuur voor CO₂-transport. Deze kosten kunnen eventuele kostenbesparingen tenietdoen. De kosten van CO₂-opslag hangen af van drie belangrijke bronnen van variabiliteit: 1) geologische kenmerken; 2) schaal (d.w.z. de hoeveelheid opgeslagen CO₂); en 3) aannames met betrekking tot monitoring, financiën en andere modellering. Een handvol geologische parameters bepaalt in de eerste plaats of een reservoir gunstig is voor CO₂-opslag: permeabiliteit, dikte, diepte, porositeit en laterale continuïteit.

ESG in figures

ABN AMRO Secondary Greenium Indicator

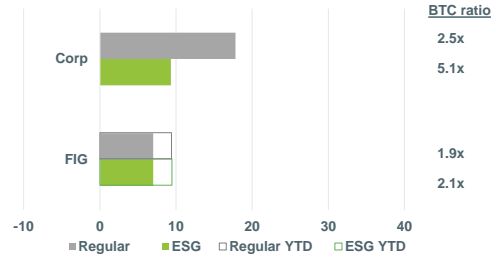
Delta (green I-spread – regular I-spread)



Note: Secondary Greenium indicator for Corp and FIG considers at least five pairs of bonds from the same issuer and same maturity year (except for Corp real estate, where only 3 pairs were identified). German Bund takes into account the 2030s and 2031s green and regular bonds. Delta refers to the 5-day moving average between green and regular I-spread. Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

ABN AMRO Weekly Primary Greenium Indicator

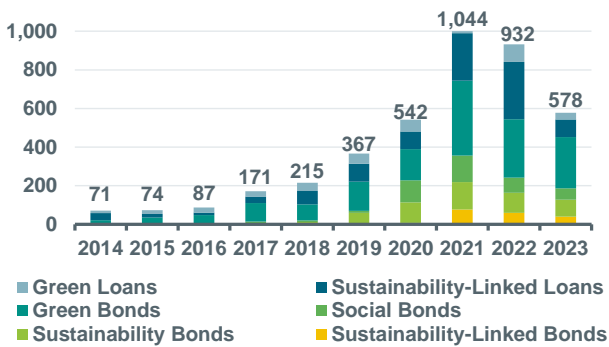
NIP in bps



Note: Data until 11-10-23. BTC = Bid-to-cover orderbook ratio. Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

Sustainable debt market overview

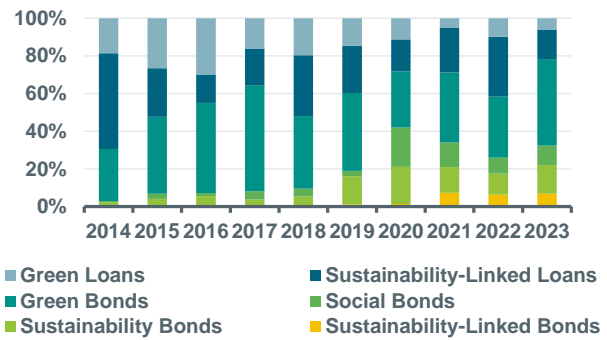
EUR bn



Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

Breakdown of sustainable debt by type

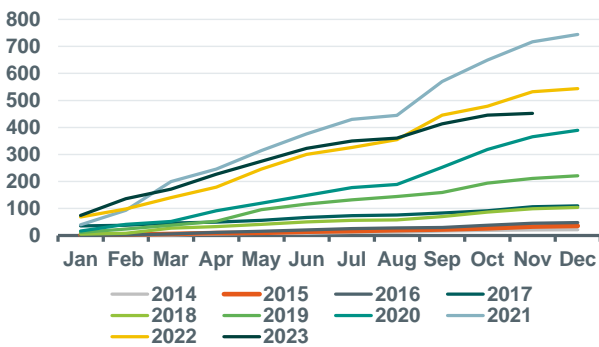
% of total



Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

YTD ESG bond issuance

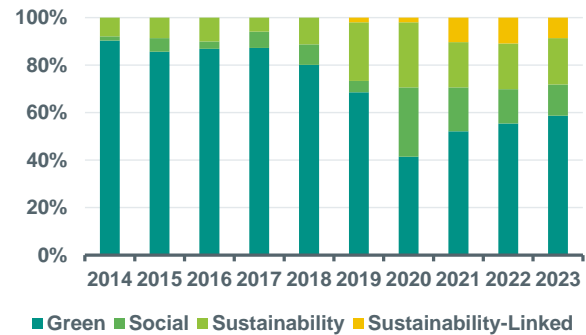
EUR bn (cumulative)



Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

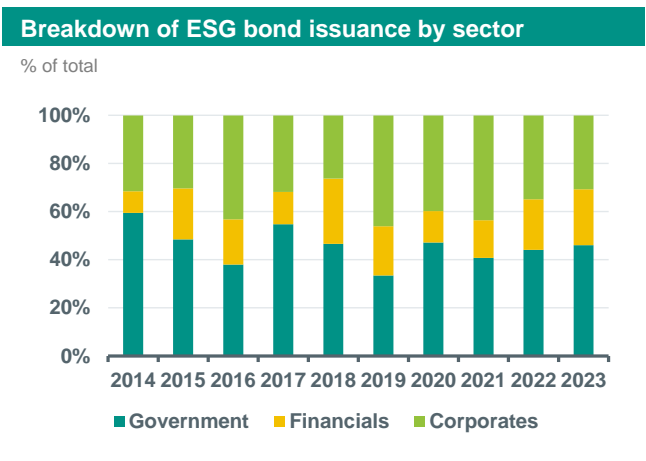
Breakdown of ESG bond issuance by type

% of total

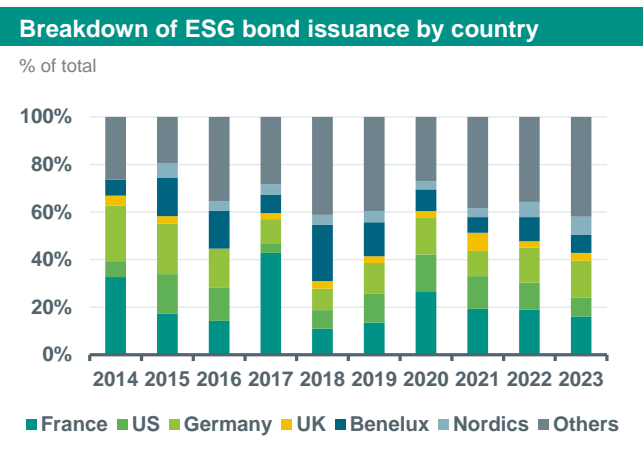


Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

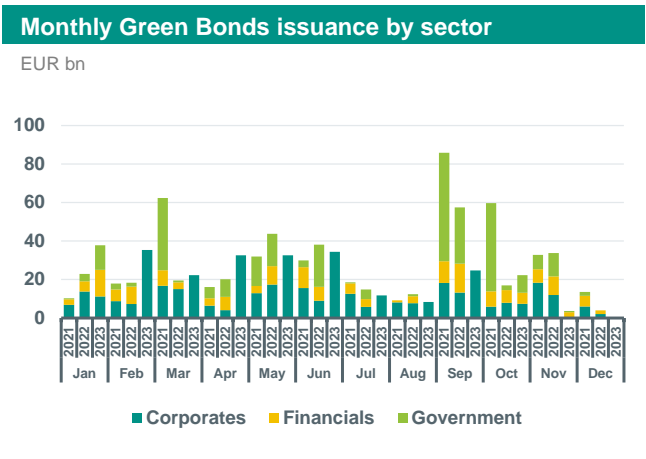
Figures hereby presented take into account only issuances larger than EUR 250m and in the following currencies: EUR, USD and GBP.



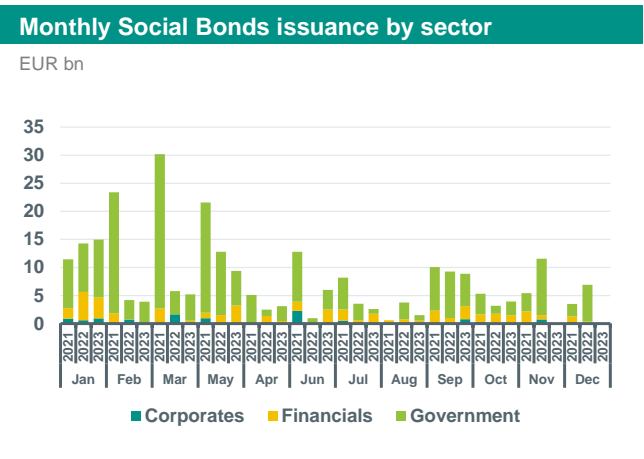
Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics



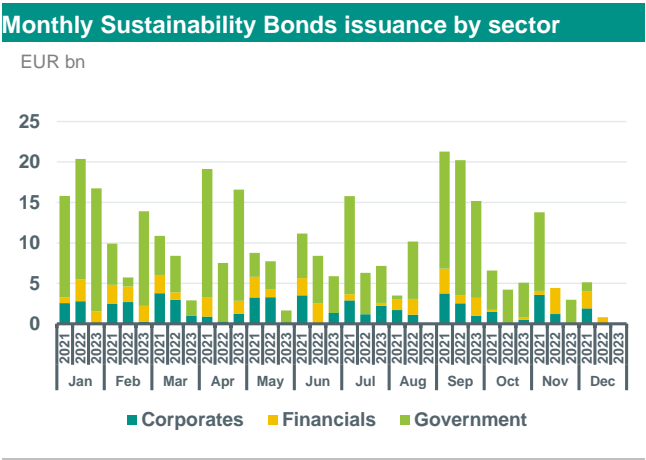
Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics



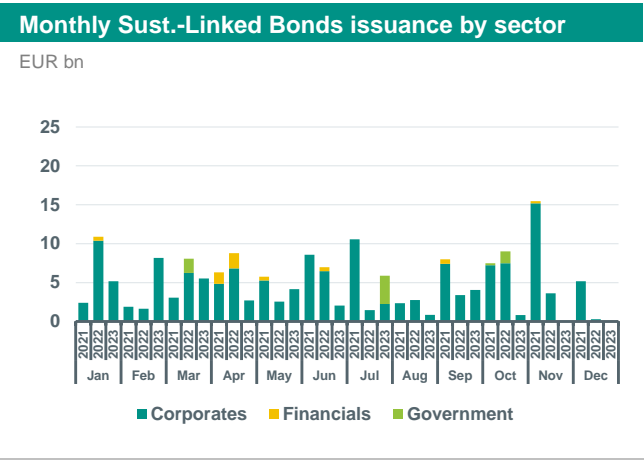
Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics



Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics



Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics



Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

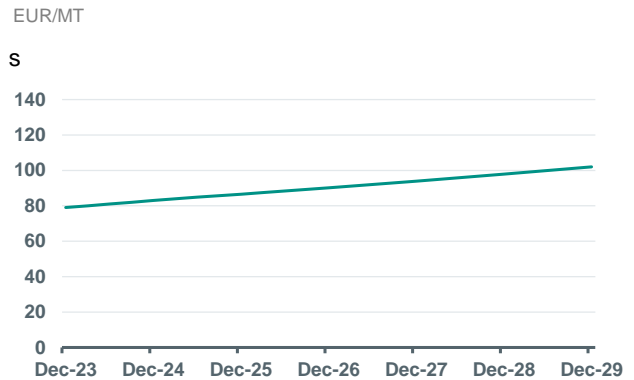
Figures hereby presented take into account only issuances larger than EUR 250m and in the following currencies: EUR, USD and GBP.

Carbon contract current prices (EU Allowance)



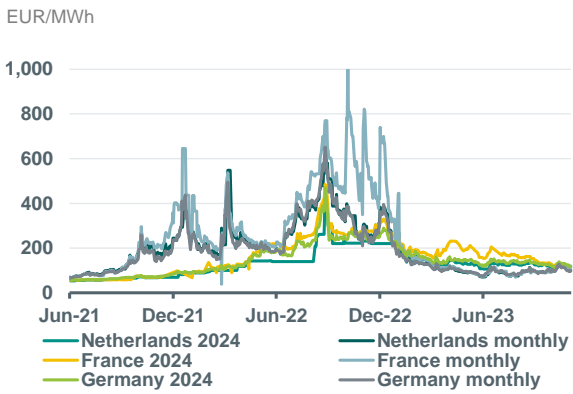
Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

Carbon contract futures curve (EU Allowance)



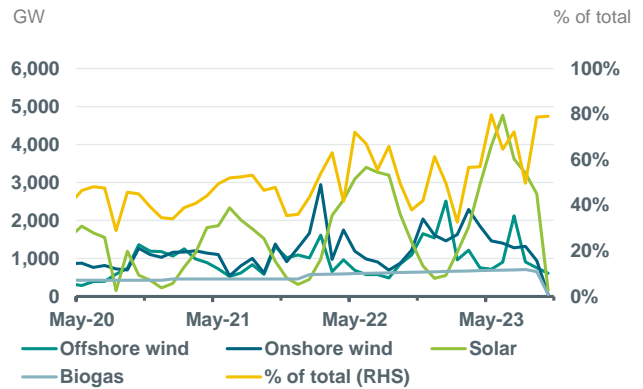
Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

Electricity power prices (monthly & cal+1 contracts)



Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics. Note: 2024 contracts refer to cal+1

Electricity generation from renewable sources (NL)



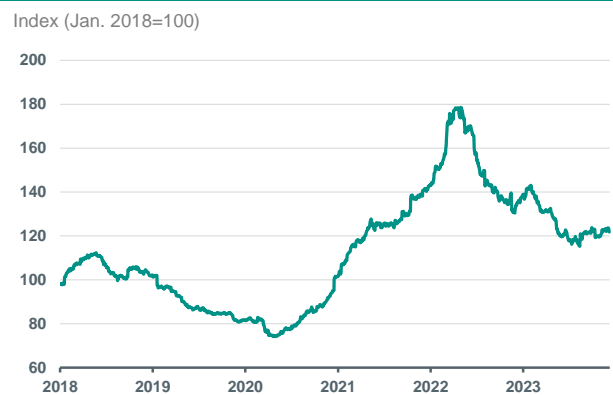
Source: Energieopwek (Klimaat-akkoord), ABN AMRO Group Economics

TTF Natgas prices



Source: Bloomberg, ABN AMRO Group Economics

Transition Commodities Price Index



Note: Average price trend of 'transition' commodities, such as: corn, sugar, aluminium, copper, nickel, zinc, cobalt, lead, lithium, manganese, gallium, indium, tellurium, steel, steel scrap, chromium, vanadium, molybdenum, silver and titanium. Source: Refinitiv, ABN AMRO Group Economics

DISCLAIMER

ABN AMRO Bank
Gustav Mahlerlaan 10 (visiting address)
P.O. Box 283
1000 EA Amsterdam
The Netherlands

This material has been generated and produced by a Fixed Income Strategist ("Strategists"). Strategists prepare and produce trade commentary, trade ideas, and other analysis to support the Fixed Income sales and trading desks. The information in these reports has been obtained or derived from public available sources; ABN AMRO Bank NV makes no representations as to its accuracy or completeness. The analysis of the Strategists is subject to change and subsequent analysis may be inconsistent with information previously provided to you. Strategists are not part of any department conducting 'Investment Research' and do not have a direct reporting line to the Head of Fixed Income Trading or the Head of Fixed Income Sales. The view of the Strategists may differ (materially) from the views of the Fixed Income Trading and sales desks or from the view of the Departments conducting 'Investment Research' or other divisions

This marketing communication has been prepared by ABN AMRO Bank N.V. or an affiliated company ('ABN AMRO') and for the purposes of Directive 2004/39/EC has not been prepared in accordance with the legal and regulatory requirements designed to promote the independence of research. As such regulatory restrictions on ABN AMRO dealing in any financial instruments mentioned in this marketing communication at any time before it is distributed to you do not apply.

This marketing communication is for your private information only and does not constitute an analysis of all potentially material issues nor does it constitute an offer to buy or sell any investment. Prior to entering into any transaction with ABN AMRO, you should consider the relevance of the information contained herein to your decision given your own investment objectives, experience, financial and operational resources and any other relevant circumstances. Views expressed herein are not intended to be and should not be viewed as advice or as a recommendation. You should take independent advice on issues that are of concern to you.

Neither ABN AMRO nor other persons shall be liable for any direct, indirect, special, incidental, consequential, punitive or exemplary damages, including lost profits arising in any way from the information contained in this communication.

Any views or opinions expressed herein might conflict with investment research produced by ABN AMRO.

ABN AMRO and its affiliated companies may from time to time have long or short positions in, buy or sell (on a principal basis or otherwise), make markets in the securities or derivatives of, and provide or have provided, investment banking, commercial banking or other services to any company or issuer named herein.

Any price(s) or value(s) are provided as of the date or time indicated and no representation is made that any trade can be executed at these prices or values. In addition, ABN AMRO has no obligation to update any information contained herein.

This marketing communication is not intended for distribution to retail clients under any circumstances.

This presentation is not intended for distribution to, or use by any person or entity in any jurisdiction where such distribution or use would be contrary to local law or regulation. In particular, this presentation must not be distributed to any person in the United States or to or for the account of any "US persons" as defined in Regulation S of the United States Securities Act of 1933, as amended.

CONFLICTS OF INTEREST/ DISCLOSURES

This report contains the views, opinions and recommendations of ABN AMRO (AA) strategists. Strategists routinely consult with AA sales and trading desk personnel regarding market information including, but not limited to, pricing, spread levels and trading activity of a specific fixed income security or financial instrument, sector or other asset class. AA is a primary dealer for the Dutch state and is a recognized dealer for the German state. To the extent that this report contains trade ideas based on macro views of economic market conditions or relative value, it may differ from the fundamental credit opinions and recommendations contained in credit sector or company research reports and from the views and opinions of other departments of AA and its affiliates. Trading desks may trade, or have traded, as principal on the basis of the research analyst(s) views and reports. In addition, strategists receive compensation based, in part, on the quality and accuracy of their analysis, client feedback, trading desk and firm revenues and competitive factors. As a general matter, AA and/or its affiliates normally make a market and trade as principal in securities discussed in marketing communications.

ABN AMRO is authorised by De Nederlandsche Bank and regulated by the Financial Services Authority; regulated by the AFM for the conduct of business in the Netherlands and the Financial Services Authority for the conduct of UK business.

Copyright 2023 ABN AMRO. All rights reserved. This communication is for the use of intended recipients only and the contents may not be reproduced, redistributed, or copied in whole or in part for any purpose without ABN AMRO's prior express consent.