

# De digitale voetafdruk

## Emissies van de digitale sector in Nederland in (toekomst)perspectief

**Ir. Tommy van der Vorst, Marenne Massop MSc, Adriaan Smeitink MSc,  
ir. Sonja Kleter**

**Opdrachtgever:**  
Ministerie van Economische  
Zaken en Klimaat

**Publicatienummer:**  
2023.043.2325 v1.1.6

**Datum:**  
13 september 2023



# Inhoudsopgave

<b>Managementsamenvatting .....</b>	<b>5</b>
Beantwoording onderzoeksvragen .....	5
Beperkingen van het onderzoek .....	6
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>7</b>
1.1 Aanleiding.....	7
1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen .....	7
1.3 Aanpak.....	8
1.4 Leeswijzer .....	9
<b>2 Analytisch kader .....</b>	<b>11</b>
2.1 De digitale sector en keten .....	11
2.2 Emissiescopes en het maatschappelijke niveau.....	14
2.3 Geografische versus causale afbakening .....	17
<b>3 Methodologie .....</b>	<b>20</b>
3.1 Elektriciteitsverbruik digitale componenten .....	21
3.2 Energiemix en uitstoot .....	28
3.3 Scope 1-emissies.....	33
<b>4 Resultaten.....</b>	<b>36</b>
4.1 Scope 1 .....	36
4.2 Scope 2.....	37
4.3 Gevoeligheidsanalyse model.....	39
4.4 Triangulatie.....	40
<b>5 Scenarioanalyse .....</b>	<b>43</b>
5.1 Algemene trends .....	43
5.2 Scenario's efficiëntie digitale technologie vs. behoeftegroei .....	44
5.3 Ontwikkelingen in de energiemix .....	49
5.4 Besparingsopties .....	55
<b>6 Conclusies .....</b>	<b>60</b>
6.1 Beantwoording hoofdvragen.....	60
6.2 Beantwoording deelvragen.....	62
6.3 Beperkingen van het onderzoek.....	65
<b>7 Verwijzingen.....</b>	<b>67</b>

Citeren als: Dialogic, van der Vorst, T., Smeitink, A., Kleter, S., & Massop, M. (2023). *De digitale voetafdruk: Emissies van de digitale sector in Nederland in (toekomst)perspectief*. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Den Haag.

Met medewerking van Michiel Bijlsma en Derck Stähler (SEO Economische Onderzoek).



# Managementsamenvatting

In dit onderzoek analyseren we de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de digitale sector in scope 1 en scope 2, de onderliggende mechanismen en trends, en scenario's voor de toekomst.

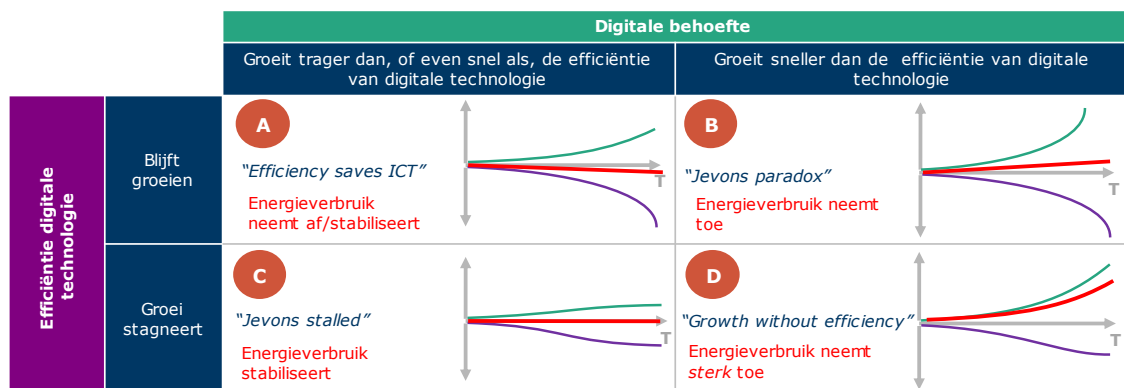
Om de onderzoeksvragen te beantwoorden hebben we het energieverbruik (elektriciteit) van verschillende componenten van de digitale sector van onderaf gemodelleerd. Deze inschatting vertalen we op basis van een model van de energiemix naar emissies. Met het model is vervolgens een aantal toekomstscenario's doorgerekend, waarbij rekening wordt gehouden met algemene trends, ontwikkelingen in de energiemix, efficiëntiegroei van digitale technologie en groeiende vraag naar digitale diensten.

## Beantwoording onderzoeksvragen

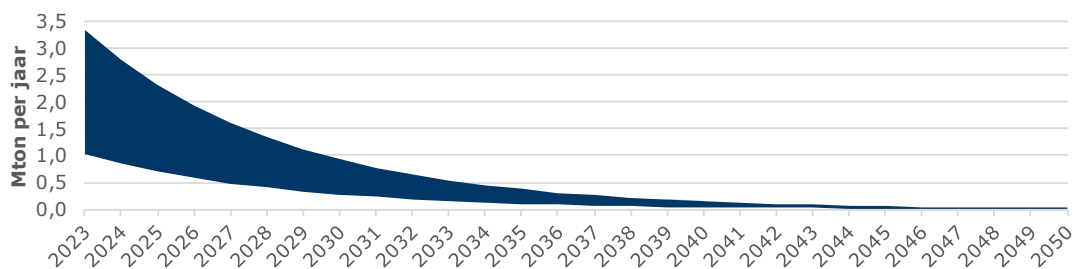
### 1. Wat is de bijdrage van de digitale sector aan het ontstaan van emissies?

Scope 2-emissies van de digitale sector hangen volledig samen met het elektriciteitsverbruik van digitale apparatuur. In dit onderzoek is gekeken naar het energieverbruik van eindgebruikersapparaten (zoals smartphones, tablets, desktops en TV's), vaste en mobiele netwerken, en datacenters. De totale geschatte uitstoot hiervan bedroeg in 2023 naar schatting maximaal 3,33 Mton CO<sub>2</sub> (gebaseerd op emissiefactoren op systeemniveau) en minimaal 1,04 Mton CO<sub>2</sub> (wanneer voor ingekochte groene stroom lage emissiefactoren worden gerekend). Daarvan is ongeveer 50% toe te wijzen aan eindgebruikersapparaten en TV's, 12% aan netwerken en 38% aan datacenters.

In de toekomst hangt de uitstoot af van een aantal factoren. Allereerst zijn er algemene trends (zoals bevolkingsgroei). Daarnaast is van belang in hoeverre de vraag naar digitale diensten blijft groeien, en hoe deze groei zich verhoudt tot het voortdurend efficiënter worden van digitale technologieën. Voor dit laatste zijn vier scenario's gehanteerd:



Onderstaande figuur toont de onder- en bovengrens voor de verwachte CO<sub>2</sub>-uitstoot in scope 2 op basis van alle verschillende scenario's:



Omdat de scope 2-emissies van de digitale sector voortkomen uit elektriciteitsverbruik is de emissiefactor van elektriciteit sterk bepalend voor de omvang van de emissies. Wanneer het doel om de elektriciteitsproductie per 2050 CO<sub>2</sub>-neutraal te laten zijn wordt gehaald, zal ook de emissie van de digitale sector dan zijn gereduceerd tot nul (en als gevolg liggen de uitkomsten van de verschillende scenario's ook zeer dicht bij elkaar). Vertragingen bij het halen van de doelen (zeker in combinatie met een van de minder gunstige scenario's) zou kunnen leiden tot substantieel hogere uitstoot.

## 2. **Wat zijn, gelet op deze analyse, de prioritaire acties voor EZK om de duurzaamingsopgave van de digitale sector te ondersteunen?**

Allereerst adviseren we de vinger aan de pols te houden voor wat betreft de besproken scenario's. Als de efficiencygroei van digitale technologie (vroegtijdig) stagneert, zou immers een forse stijging van de uitstoot kunnen volgen. Daarnaast levert het *niet* halen van de doelen rondom de emissiefactoren van elektriciteitsproductie snel tot hogere uitstoot vanuit de digitale sector (bijna een verdubbeling bij een vertraging van vijf jaar).

In de huidige situatie en die op korte termijn zien we enkele mogelijkheden om het elektriciteitsverbruik van de digitale sector (en daarmee emissies) terug te dringen, gerelateerd aan (bijvoorbeeld) het stand-byverbruik. Een aantal van deze besparingsmogelijkheden is gekwantificeerd op basis van het model dat in dit onderzoek is ontwikkeld.

Fundamenteel gezien zijn er twee routes voor het terugdringen van het stroomverbruik, en daarmee emissies, van de digitale sector: het beïnvloeden van de vraag en het verhogen van de efficiëntie van digitale technologie (c.q. versnellen van de efficiëntiegroei). Het afremmen van de vraag heeft wellicht negatieve economische consequenties die hier niet in beeld zijn gebracht. Dat hoeft echter niet per definitie te gelden voor het *sturen* van de vraag, zodanig dat in hogere mate gebruik kan worden gemaakt van duurzame energiebronnen. Dit zou kunnen worden vormgegeven op basis van dynamische elektriciteitsstarieven in combinatie met slimmere logica voor wat betreft de timing van (bijvoorbeeld) het opladen van apparaten.

## **Beperkingen van het onderzoek**

Dit onderzoek kent, als gevolg van de opzet, een aantal belangrijke beperkingen.

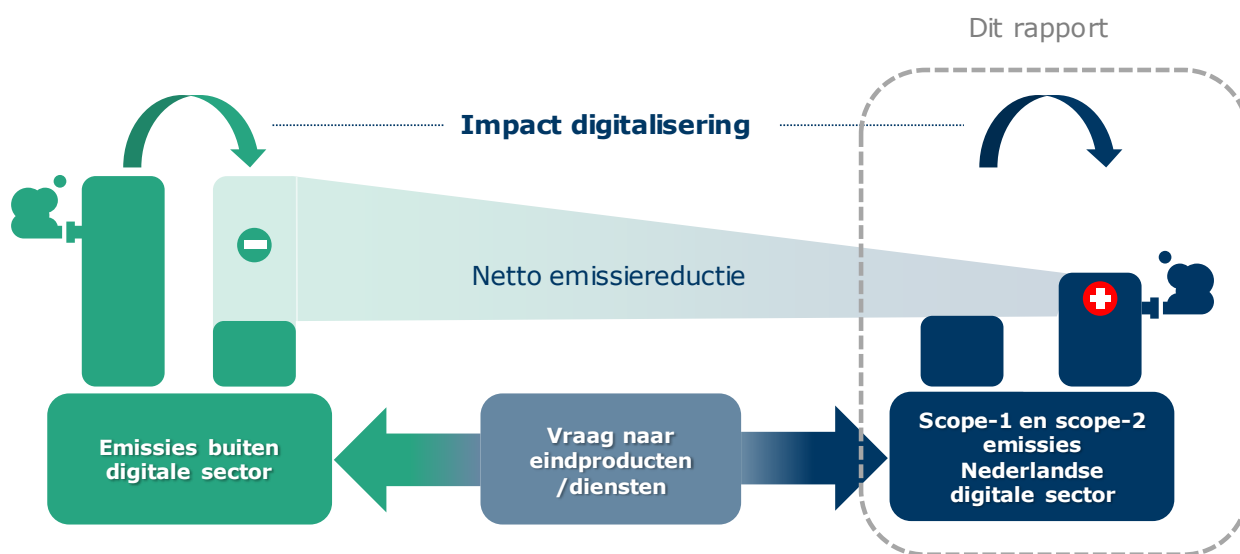
- In dit onderzoek is een specifieke afbakening gehanteerd van de digitale sector. Een andere afbakening leidt tot andere resultaten. Het is van belang om de verschillen in afbakeningen mee te nemen wanneer wordt vergeleken tussen studies.
- Er bestaan (in de literatuur) verschillende verwachtingen ten aanzien van efficiëntie- en vraaggroei in de digitale sector. De keuze voor deze scenarioparameters beïnvloeden de resultaten sterk.
- In dit onderzoek worden alleen scope 1- en scope 2-emissies meegenomen. Vanuit literatuur is bekend dat scope 3-emissies een groot aandeel hebben in de digitale sector.
- In dit onderzoek zijn alleen emissies meegenomen die zich binnen Nederland voordoen, terwijl ook zou kunnen worden gekeken naar emissies die causaal verband houden met vraag naar digitale diensten vanuit Nederland (c.q. vanuit het buitenland en in Nederland geproduceerd).

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Digitalisering heeft vanuit verduurzamingsperspectief twee gezichten. Enerzijds leidt de inzet van digitale technieken tot emissie van broeikasgassen. Door de snelle groei van de digitale sector neemt de bijdrage aan emissies vanuit deze sector in de toekomst mogelijk toe. Anderzijds kan digitalisering juist bijdragen aan *emissiereductie*. Digitalisering biedt diverse mogelijkheden voor (onder andere) efficiënter gebruik van energie, minder grondstoffengebruik in productieketens, efficiënter energieverbruik van apparatuur en gebouwen, beter management van de levenscyclus van een product en betere monitoring van de staat van de natuur.

De directie Digitale Economie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft twee onderzoekspereelen geformuleerd, die aansluiten bij bovengenoemde twee gezichten van digitalisering en duurzaamheid. Onderstaande Figuur 1 vat deze perspectieven schematisch samen. In het eerste perceel, in de figuur rechts afgebeeld, wordt onderzocht hoe groot de uitstoot van de digitale sector is, en hoe dit zich de komende jaren (tot en met 2050) zou kunnen gaan ontwikkelen in verschillende scenario's. **Dit rapport betreft dit eerste perceel.** Links afgebeeld is het tweede onderzoekspereel, waarin reductie door digitalisering centraal staat. Uiteindelijk is het doel om in te zetten op een zodanige mix van digitaliseringsoplossingen dat er een netto emissiereductie ontstaat.



Figuur 1 Digitalisering als bron en oplossing voor emissie van broeikasgassen. De twee gezichten c.q. onderzoekspereelen en relatie daartussen. (bron: Dialogic)

## 1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

In dit onderzoekspereel staan de volgende hoofdvragen centraal:

- Wat is de bijdrage van de digitale sector aan het ontstaan van emissies?
- Wat zijn, gelet op deze analyse, de prioritaire acties voor EZK om de verduurzamingsopgave van de digitale sector te ondersteunen?

Daarbij zijn de volgende deelvragen geformuleerd:

1. Wat is in 2030, 2040 en 2050 de bijdrage van de digitale sector aan het energieverbruik en de CO<sub>2</sub>- en eventueel andere broeikasgasemissies?
2. Wat is het relatieve aandeel van verschillende soorten ICT-goederen/gebruikers in de digitale sector?
3. Welke meerjarige trends zijn er in het energieverbruik van ICT-goederen in de digitale sector Nederland?
4. Welke opties (huidige en mogelijke initiatieven) zijn er voor EZK om de initiatieven van de digitale sector ten aanzien van hun verduurzamingsopgave te ondersteunen, beprijzen en normeren?
5. Welke van de door u gevonden opties hebben de meeste impact en zouden prioriteit moeten hebben?

Om de vragen te kunnen beantwoorden, ontwikkelen we in dit onderzoek een model waarmee de emissies van de Nederlandse digitale sector kunnen worden bepaald. Het model kan vervolgens worden gebruikt om conclusies te trekken op basis van verschillende *scenario's* (de effecten van trends en wijzigingen daarin) en eventueel beleidsopties.

Het te ontwikkelen model is nadrukkelijk geen doel op zichzelf in dit onderzoek. Er is al zeer veel wetenschappelijke en andere literatuur beschikbaar waarin schattingen worden gemaakt van emissies die voortkomen uit de digitale sector. Het voorliggende onderzoek heeft niet tot (hoofd)doel om een *preciezer* schatting te maken dan wat tot op heden beschikbaar is. Zoals we in het vervolg van dit rapport zullen zien lopen de diverse schattingen sterk uiteen als gevolg van de gehanteerde definities – onze resultaten zouden een zoveelste datapunt zijn.

We zien het nadrukkelijk wél als doel van dit onderzoek om deze verschillen en keuzes te duiden. Daarnaast maken we gefundeerde keuzes voor afbakeningen (gegeven het doel van het onderzoek) en komen we tot schattingen die bruikbaar zijn voor het maken van beleidskeuzes. Anders gezegd is de absolute uitkomst in dit onderzoek minder van belang dan de *afgeleide* daarvan: wat is de (relatieve) impact van verschillende parameters in de Nederlandse context, en wat betekent dit voor beleid?

### 1.3 Aanpak

Om bovenstaande onderzoeksvragen te beantwoorden hebben we het energieverbruik (elektriciteit) van verschillende componenten van de digitale sector gemodelleerd. Deze vertalen we met een model van de energiemix naar emissies. Separaat kijken we naar een aantal vormen van scope 1-emissies. Digitale technologie werkt primair op basis van elektriciteit. Enkele uitzonderingen daargelaten (denk aan noodaggregaten bij datacenters en koelsystemen) voorzien we dan ook een relatief klein aandeel van scope 1-emissies. In het onderzoek kijken we daarom primair naar scope 2-emissies als gevolg van elektriciteitsverbruik. Voor de scope 1-emissies maken en behandelen we separaat schattingen. Om de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de digitale sector te berekenen hebben we een afbakening toegepast van onderdelen van de digitale sector en een geografische afbakening. Ook kijken we vooruit naar het verwachte elektriciteitsverbruik en de scope 2 CO<sub>2</sub>-emissies van de digitale sector in de toekomst, op basis van trends en scenario's (die variabelen in het model beïnvloeden).

Naast de hierboven genoemde onderzoekspercelen is parallel onderzoek uitgevoerd door Ecorys, waarin eveneens (onder andere) de uitstoot van de digitale sector werd bepaald. De afbakeningen die in dat onderzoek worden gehanteerd komen op hoofdlijnen overeen met het voorliggende onderzoek. Er zijn twee belangrijke verschillen:



- Onze categorieën “eindgebruikersapparaten” en “TV’s” vallen buiten de scope van het onderzoek van Ecorys.
- In onze categorie “Netwerken” worden modems en andere netwerkapparaten aan zijde van de consument (CPE’s) meegenomen, waar Ecorys deze buiten beschouwing laat.

In de eindfase van beide onderzoeken zijn voorlopige resultaten gedeeld en verschillen tussen beide nader geduid.

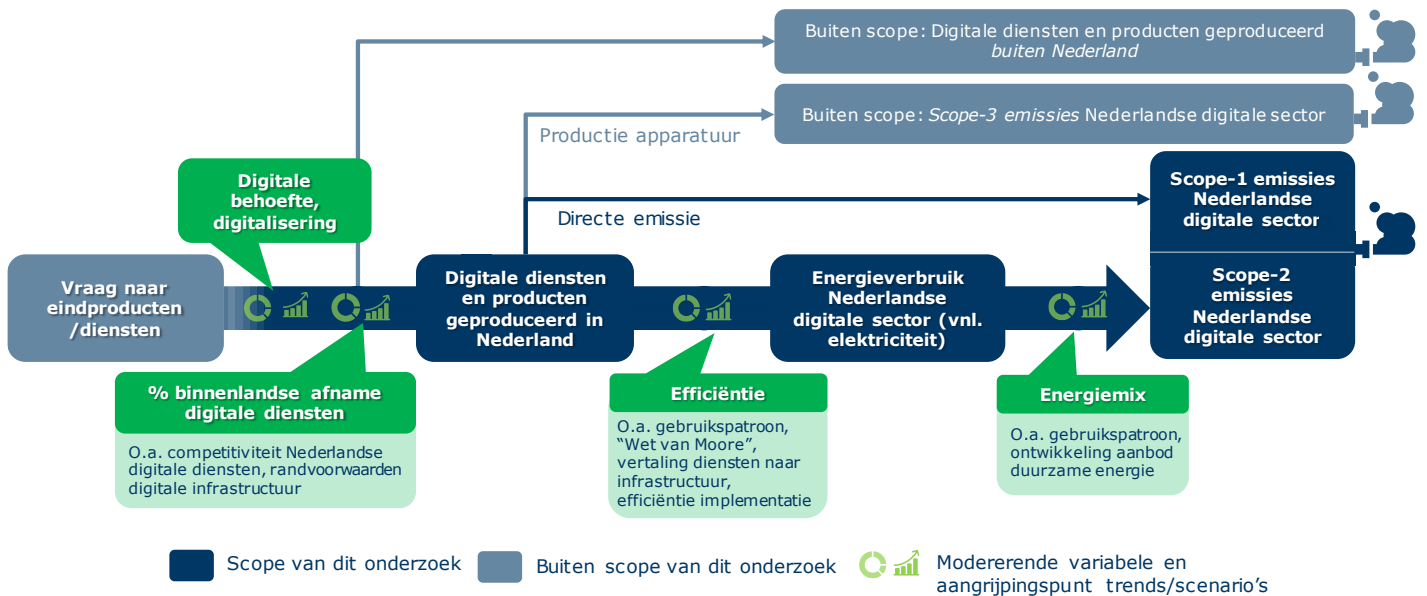
## 1.4 Leeswijzer

Allereerst zullen we in hoofdstuk 2 het analytisch kader bespreken dat aan de basis ligt van dit onderzoek. Hierin bespreken we de afbakening van het onderzoek in termen van onderdelen van de digitale sector, emissie en geografie. In hoofdstuk 3 wordt de methodologie van het onderzoek toegelicht, waarbij we stilstaan bij de selectie van componenten van de digitale sector die worden meegenomen bij het berekenen van de bijdrage aan CO<sub>2</sub>-emissies. Ook bespreken we hoe het elektriciteitsverbruik en de (bijbehorende) uitstoot van de verschillende componenten van de digitale sector wordt berekend. Vervolgens presenteren we in hoofdstuk 4 de resultaten: de scope 1- en scope 2-emissies van de digitale sector in Nederland en triangulatie met andere studies. In hoofdstuk 5 bevat voorspellingen voor het elektriciteitsverbruik en de scope 2 CO<sub>2</sub>-emissies van de digitale sector in de toekomst. We definiëren een viertal scenario’s die voortkomen uit verschillende paden waarlangs de vraag naar digitale diensten enerzijds en de efficiëntie van digitale diensten anderzijds zich zou kunnen gaan ontwikkelen. Hierna bespreken we scenario’s op het gebied van de energiemix (de mate waarin elektriciteitsproductie CO<sub>2</sub> uitstoot) en gaan we in op een aantal concrete besparingsopties. Tenslotte wordt er afgesloten met een conclusiehoofdstuk waarin de onderzoeksvragen worden beantwoord.



## 2 Analytisch kader

Aan de basis van dit onderzoek ligt het analytische kader dat schematisch wordt weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Analytisch kader modellering impact sectorvraag naar digitale diensten op emissies (bron: Dialogic)

Het uitgangspunt van het kader is dat de digitale sector wordt beschouwd als leverancier van digitale diensten en producten die noodzakelijk zijn voor het voldoen aan een bepaalde vraag naar producten en diensten van eindgebruikers (consumenten). Een consument zal immers over het algemeen zelf geen vraag hebben naar datacentercapaciteit, maar wel naar een smartphone, elektriciteit om deze op te laden, en bijvoorbeeld een streamingdienst.

In het vervolg van dit hoofdstuk werken we de afbakening van de verschillende onderdelen nader uit. In het volgende hoofdstuk gaan we in op de wijze waarop we dit uitwerken in de modellering.

### 2.1 De digitale sector en keten

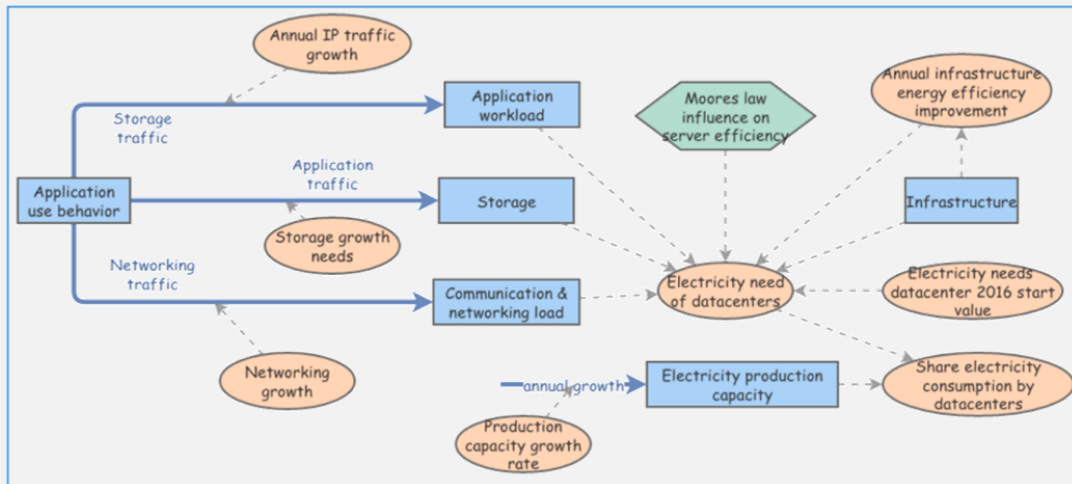
De digitale sector is te zien als een keten van diensten. Om tot inschattingen van energieverbruik en emissies te kunnen komen, is het noodzakelijk deze keten een slag verder uit te diepen. Op de 'routekaart' die door de SDI Alliance is opgesteld, wordt de keten weergegeven als in Figuur 3 (dezelfde routekaart geeft voor iedere schakel een lijst met prioriteiten voor verduurzaming).



Figuur 3 Digitale keten zoals weergegeven op de 'routekaart' van de SDI Alliance (bron: [1])

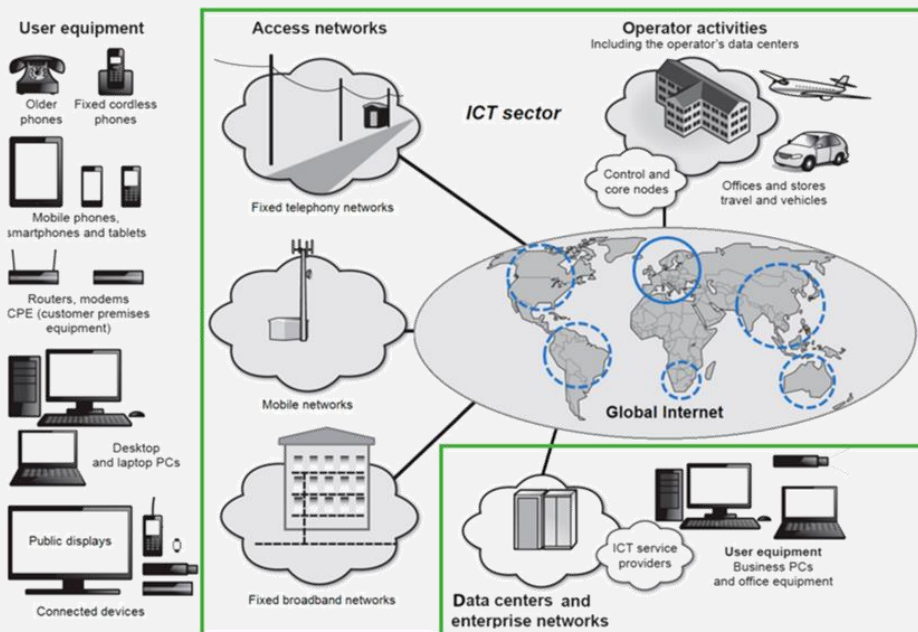
### Vergelijking met de kadering in andere studies

Soortgelijke modellen en uitsplitsingen zien we in de literatuur. Figuur 4 toont een voorbeeld van een model voor het bepalen van energiebehoefte en CO<sub>2</sub>-uitstoot als gevolg van het gebruik van digitale applicaties. Er wordt een duidelijk onderscheid gemaakt tussen opslag, verwerking ('application workload') en transmissie van gegevens. Factoren die worden meegenomen zijn onder andere de efficiëntieontwikkeling in de digitale sector ('server efficiency') en de elektriciteitssector ('energy efficiency improvement').



Figuur 4 Een model uit de literatuur voor het bepalen van de energiebehoefte en CO<sub>2</sub>-uitstoot voor het gebruik van digitale applicaties (bron: [2, p. Fig. 1], hier geplaatst onder CC-BY-4.0-licentie)

In de meeste onderzoeken wordt daarnaast een uitsplitsing gemaakt tussen eindgebruikersapparaten, netwerken, en datacenters. [3] [4]



Figuur 5 Indeling zoals gehanteerd door Lundén & Malmödin (specifiek gericht op netwerken) (bron: [5]. Figuur geplaatst onder CC-BY-4.0-licentie.)

### 2.1.1 Selectiekader onderdelen

In eerdere onderzoeken naar de uitstoot van de ICT-sector wordt een uitsplitsing gemaakt tussen vier hoofdcategorieën die samen de sector omhelzen:<sup>1</sup>

1. *Eindgebruikersapparaten*. Er zijn veel mogelijke relevante eindgebruikersapparaten die tot de digitale sector kunnen worden gerekend (zoals smartphones, laptops, tablets etc.)
2. *Netwerken*. Hierbij gaat het om de grootste typen netwerken (vaste telefoons, mobiele netwerken, breedband netwerken)
3. *Datacenters en servers*. Er zijn verschillende typen datacenters die verschillen in grootte (on-premises bij grotere ondernemingen, colocatie en hyperscale<sup>2</sup>). Daarnaast spelen ook de dieselaggregaten en koeling systemen een rol in de uitstoot bij datacenters.
4. *TV's, TV-randapparatuur en TV-distributienetwerken*.<sup>3</sup> Hierbij gaat het om de fysieke TV's, randapparatuur en distributienetwerken.<sup>4</sup>

De vier hoofdcategorieën vallen uiteen in verschillende componenten die deel uitmaken van de digitale sector. Binnen de scope van dit onderzoek is gekozen voor een afbakening van componenten, op basis van de volgende criteria:

- De component wordt meegenomen in meerdere van de bekeken studies naar de uitstoot van de ICT-sector;
- De component heeft een meer dan marginale of een groeiende CO<sub>2</sub>-uitstoot;
- De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de component is praktisch te meten/schatten (mocht als enige niet aan dit criterium worden voldaan, dan verdient de component een kwalitatieve analyse).

Daarnaast hebben we op basis van eigen inzicht en recente ontwikkelingen een aantal componenten toegevoegd aan de lijst van componenten die uit de literatuur naar voren komt. In paragraaf 3.1.1 gaan we verder in op de uiteindelijke selectie van de componenten die worden meegenomen bij de berekening van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de digitale sector.

---

<sup>1</sup> Gebaseerd op de review study van Freitag et al. [9] en onderliggende studies: [77] [39] en [3].

<sup>2</sup> Een *on-premises* datacenter is een (meestal relatief kleinschalig) datacenter op de locatie van een grotere onderneming, die de enige gebruiker is. Denk bijvoorbeeld aan een datacenterruimte in een kantoorgebouw. Een *colocatie*-datacenter verhuurt ruimte voor servers en andere apparatuur aan verschillende partijen. Een colocatie-datacenter voorziet in basisvoorzieningen (zoals een rack of kooi, elektriciteit en koeling) en kan een grote variëteit aan apparatuur bevatten. Hyperscalers tot slot zijn zeer grote datacenters, die integraal worden ontworpen en beheerd door één organisatie, meestal aanbieder van clouddiensten of grotere internetdiensten (denk bijvoorbeeld aan Google, Microsoft, Amazon en Meta). Doordat de datacenters een grote schaal kennen en integraal worden ontworpen, is veelal een hogere efficiëntie haalbaar dan bij de andere varianten.

<sup>3</sup> In sommige studies wordt deze categorie niet meegenomen.

<sup>4</sup> De TV-distributienetwerken vallen in Nederland grotendeels samen met internet-aansluitnetwerken (coax, koper en glasvezel). Deze worden meegenomen in de categorie *netwerken* (bij koper/glas is het IPTV; bij coax zou kunnen worden gekeken naar het specifieke energieverbruik voor TV omdat hier los van het internetsignaal een DVB-C-signaal wordt verspreid over dezelfde kabel.). Daarnaast zijn alleen satelliettelevisie (DVB-S) en Digitenne (DVB-T2) mogelijk relevant (maar in de marge). In de weergave van de resultaten voegen we eindgebruikersapparaten en TV's samen.

## 2.2 Emissiescopes en het maatschappelijke niveau

Het Greenhouse Gas (GHG) Protocol ontwikkelt standaarden voor het meten en mitigeren van broeikasgasemissies door overheden en bedrijven. In het GHG Protocol worden drie *scopes* gedefinieerd om emissies van organisaties te categoriseren en rapporteren. Onderstaande Figuur 6 toont de scopes schematisch vanuit het perspectief van één individuele organisatie.



Figuur 6 Schematische weergave van emissiescopes volgens het GHG-protocol vanuit het perspectief van een individuele organisatie. (bron: Dialogic)

De drie scopes zijn als volgt gedefinieerd: [6]

- **Scope 1.** Directe emissies die voortkomen uit activiteiten of activa die eigendom zijn van en/of onder directe controle staan van de organisatie.

*Voorbeeld: emissies van een vrachtwagen die diesel verbrandt worden gezien als scope 1-emissies van een logistiek bedrijf (ook wanneer de vrachtwagen door dit bedrijf wordt released).*

- **Scope 2.** Indirecte emissies die voortkomen uit het produceren van ingekochte energie.

*Voorbeeld: de elektriciteit die een fabriek inkoopt om machines te laten werken, wordt deels opgewekt op basis van steenkool. De emissies die hierbij vrijkomen worden gezien als scope 2-emissies.<sup>5</sup>*

- **Scope 3:** alle indirecte emissies die niet opgenomen zijn in scope 2 en die voorkomen in de waardeketen van een organisatie.

<sup>5</sup> Bij de productie van elektriciteit kunnen de energieproducent en -leverancier ook andere emissies veroorzaken: denk aan de emissies van benzineauto's waar monteurs in rondrijden, transportverliezen in het energienetwerk, et cetera. Deze emissies vallen volgens het GHG Protocol onder Scope 3, categorie 3 ("fuel- and energy-related emissions not included in scope 1 or scope 2"). Deze emissies zijn in dit onderzoek dan ook niet meegenomen. [18, p. 34]

*Voorbeeld: de machines die een fabriek nodig heeft, koopt het in bij een machineleverancier. De productie, het transport, onderhoud, recycling, et cetera van de machines leidt tot emissies, die worden gezien als scope 3-emissies van de organisatie.*

Merk op dat de bovenstaande definities het perspectief van een individuele organisatie als vertrekpunt hebben. Scope 2- en scope 3-emissies van de ene organisatie kunnen tegelijkertijd worden gezien als scope 1- en/of scope 2-emissies door een andere organisatie.

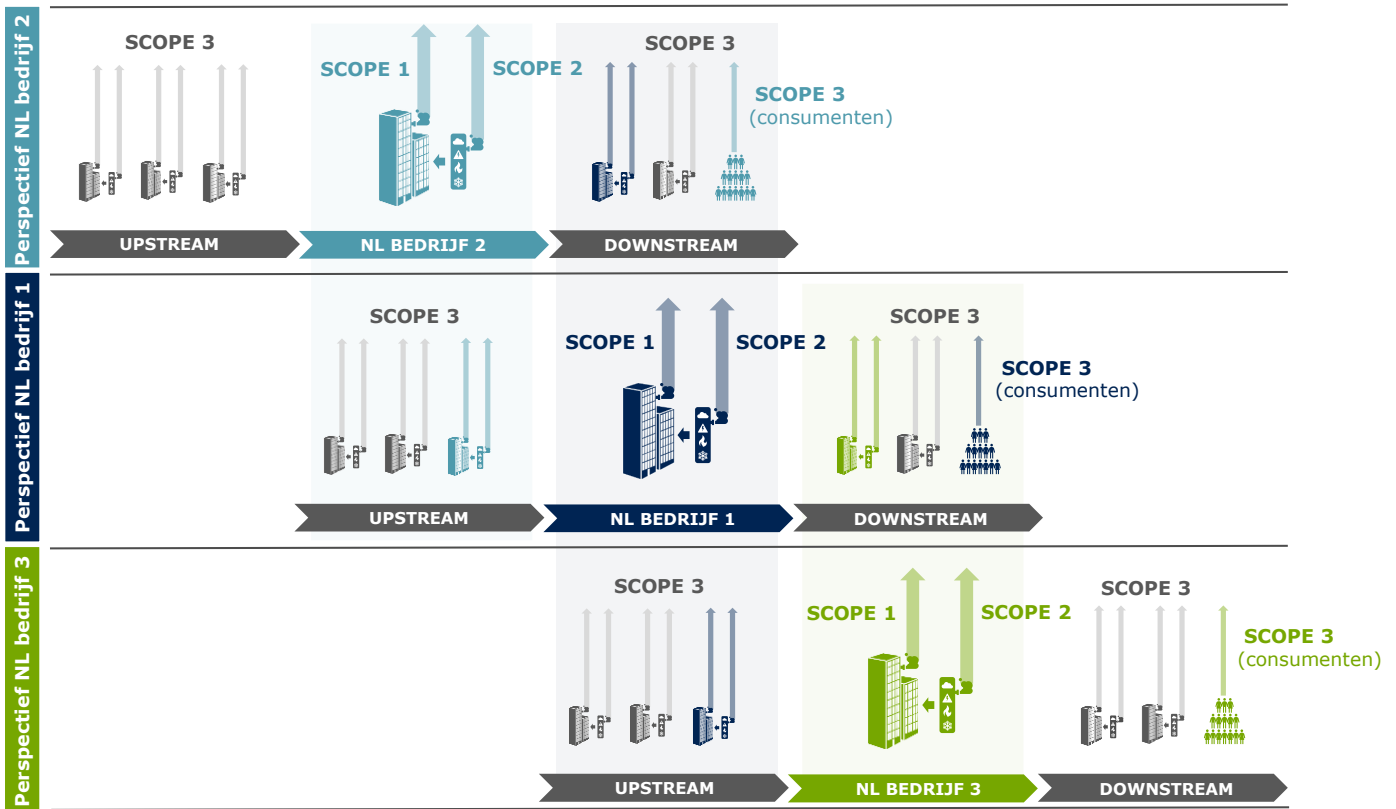
### 2.2.1 Vertaling naar het sectorniveau

In dit onderzoek is het vertrekpunt de digitale sector als geheel en kijken we uitsluitend naar scope 1- en scope 2-emissies van deze sector. Aangezien scope 1- en scope 2-emissies van de ene organisatie kunnen worden gezien als scope 3-emissies van een andere organisatie, leidt tot de vraag wat we zien als scope 1- en scope 2-emissies *van de sector als geheel*. Omdat scope 3-emissies in dit onderzoek buiten beschouwing worden gelaten is het valide om de scope 1- en scope 2-emissies van organisaties in de digitale sector – voor zover gerelateerd aan digitale diensten en producten – simpelweg te sommeren.

In aanvulling op de scope 1- en scope 2-emissies van de sector kijken we naar de emissies die vrijkomen bij het gebruik van digitale producten en diensten door eindgebruikers, veroorzaakt door hun elektriciteitsverbruik. Vanuit het perspectief van de bedrijven in de digitale sector zijn dit (downstream) scope 3-emissies.

Scope 3 emissies (anders dan hierboven genoemd) vallen niet binnen de scope van het onderzoek. Dit gaat onder meer over Nederlandse toeleveranciers die *niet* onderdeel zijn van de digitale economie (bijv. toeleveranciers van materialen). Ook alle bedrijfsactiviteiten die in het buitenland plaatsvinden behoren niet tot de scope van het onderzoek. Zo valt de productie van digitale apparatuur (bijv. telefoons) buiten de scope, omdat dit veelal in het buitenland plaatsvindt.

Figuur 7 visualiseert de scope van het onderzoek vanuit het perspectief van drie bedrijven in de digitale sector. Bedrijf 2 is een bedrijf dat digitale producten en/of diensten toelevert aan bedrijf 1. De scope 1- en scope 2-emissies van bedrijf 2 zijn de upstream scope 3-emissies van bedrijf 1. Bedrijf 3 is ook een producent van digitale producten en/of diensten en is afnemer van bedrijf 1. De scope 1- en scope 2-emissies van bedrijf 3 zijn daarmee de downstream scope 3-emissies van bedrijf 1. Door de scope 1- en scope 2-emissies van deze drie bedrijven te sommeren wordt voorkomen dat emissies in de sector dubbel gerekend worden. De figuur laat ook zien dat de emissies veroorzaakt door eindgebruikers van ieder bedrijf (downstream scope 3-emissies) ook onderdeel zijn van de scope.



Figuur 7 Visuele weergave van de scope van het onderzoek. Alle gekleurde onderdelen (scope 1-, scope 2-, en scope 3-emissies veroorzaakt door eindgebruikers) vallen binnen de scope van het onderzoek. Alle grijze onderdelen (overige scope 3-emissies) vallen buiten de scope. (bron: Dialogic)

### Buiten de scope

Scope 3-emissies (anders dan hierboven genoemd) vallen niet binnen de scope van het onderzoek. Dit gaat onder meer over Nederlandse toeleveranciers die *niet* onderdeel zijn van de digitale economie (bijv. toeleveranciers van materialen). Zoals hierboven toegelicht vallen ook emissies die bij de productie van elektriciteit niet direct bij de opwek plaatsvinden, buiten deze scope.

Ook alle bedrijfsactiviteiten die in het buitenland plaatsvinden behoren niet tot de scope van het onderzoek. Zo valt de productie van digitale apparatuur (bijv. telefoons) buiten de scope, omdat dit veelal in het buitenland plaatsvindt.

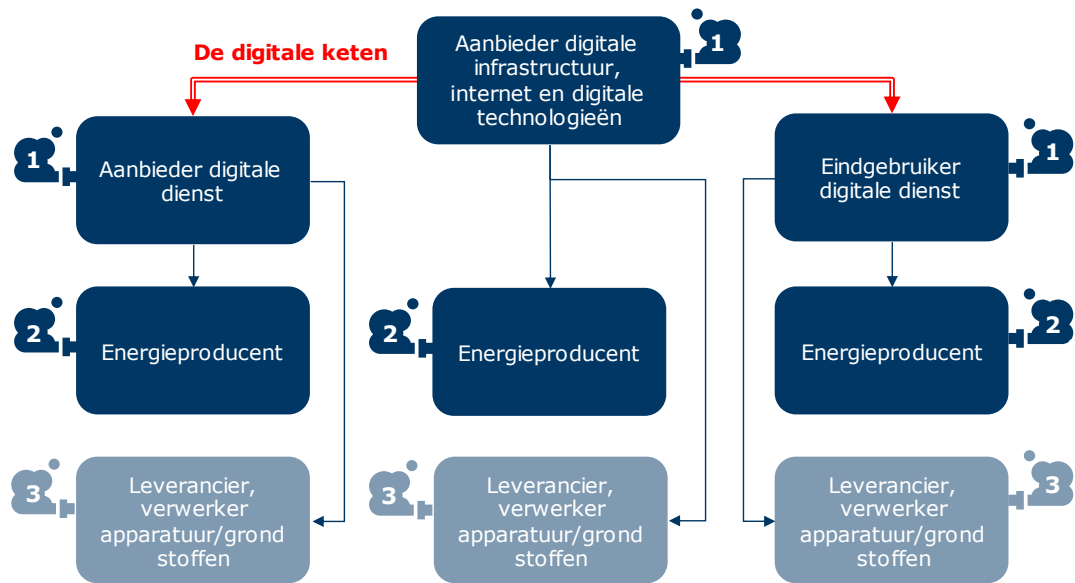
## 2.2.2 Toepassing op de digitale sector

Digitale technologie werkt primair op basis van elektriciteit. Enkele uitzonderingen daargelaten (denk aan noodaggregaten bij datacenters en koelsystemen) voorzien we dan ook een relatief klein aandeel van scope 1-emissies. Bij scope 2-emissies zal het daarnaast primair gaan om *elektriciteitsverbruik*. In het onderzoek kijken we daarom primair naar scope 2-emissies als gevolg van elektriciteitsverbruik. Voor de scope 1-emissies maken en behandelen we separaat schattingen.

Passen we dit en de eerder toegelichte afbakening toe op de digitale sector, dan ontstaat het beeld zoals geschetst in Figuur 8 hieronder. In dit onderzoek kiezen we ervoor om ongeacht categorie de scope 2-emissies mee te nemen die voortkomen uit het elektriciteitsverbruik.



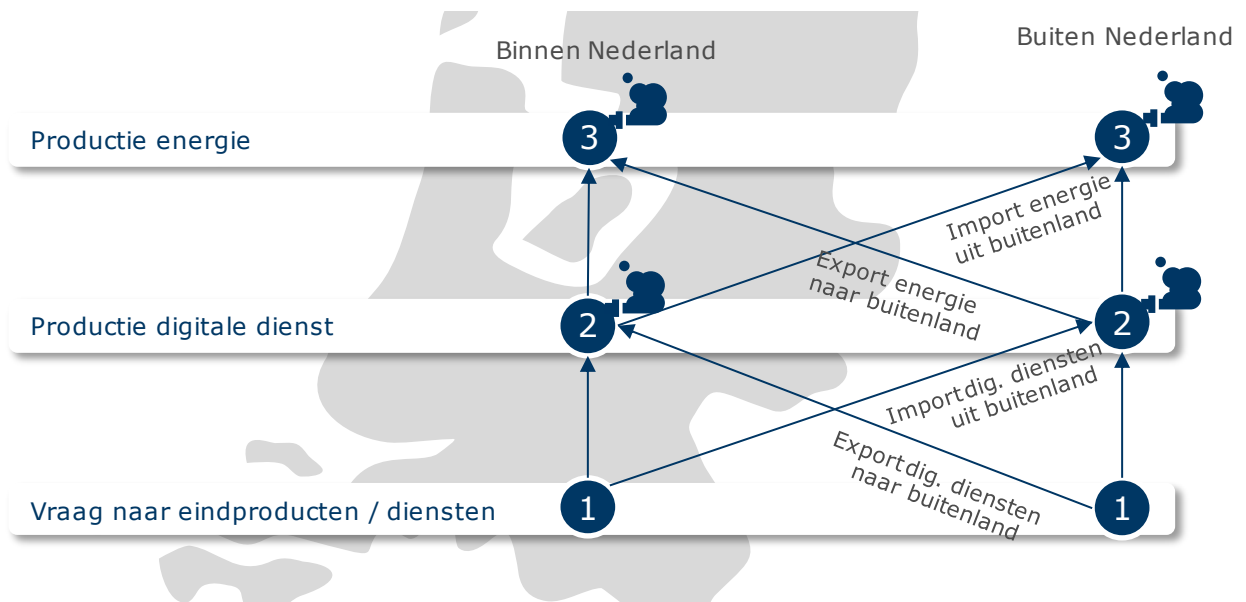
Rechtstreekse (scope 1-)emissies idem, maar deze zien we niet zozeer bij de eindgebruikers en de netwerkaanbieders (wel bij de aanbieders van digitale diensten, zie verderop).



Figuur 8 Afbakening scopes en de digitale sector (bron: Dialogic)

### 2.3 Geografische versus causale afbakening

De digitale sector is in hoge mate geglobaliseerd – digitale producten en diensten kunnen relatief eenvoudig uit het buitenland worden geïmporteerd, en zijn ook exportproducten van Nederland. Hetzelfde geldt tot op zekere hoogte voor energie – Nederland heeft verbindingen met al haar buurlanden om energie (elektriciteit en gas) uit te wisselen. De plaats waar de emissies plaatsvinden als gevolg van de productie van deze diensten c.q. energie is afhankelijk van de mate waarin de diensten worden geïmporteerd en geëxporteerd.

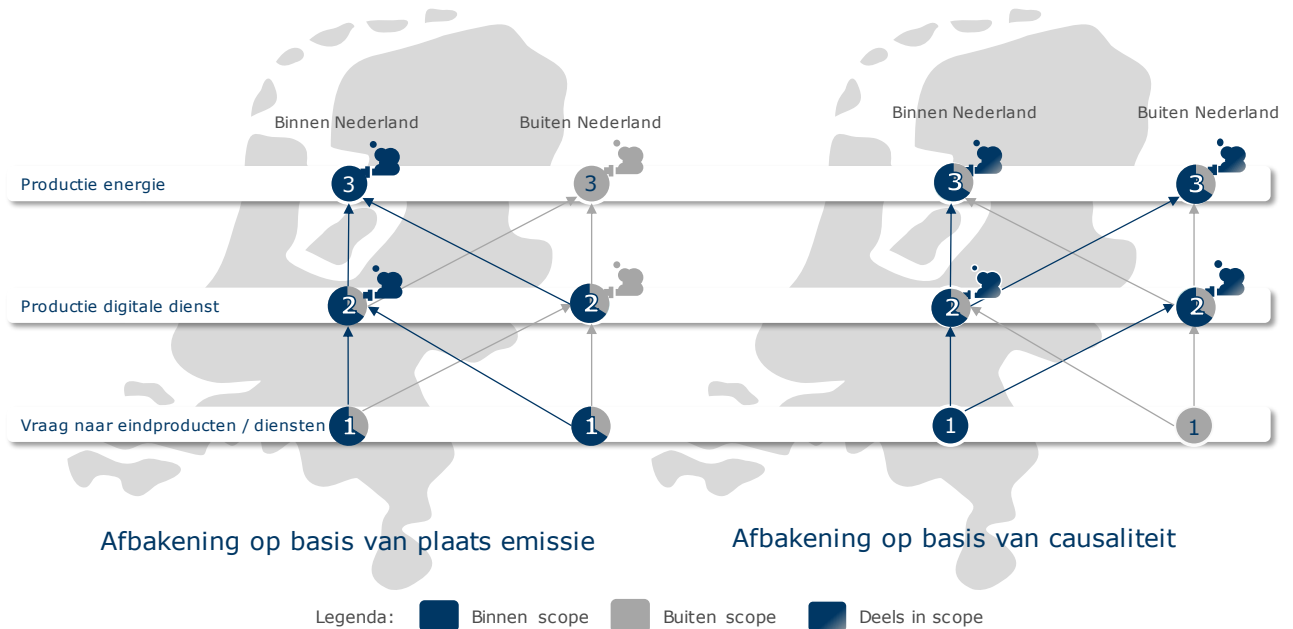


Figuur 9 Schematische weergave van de relatie tussen het analytisch model zoals gehanteerd in dit onderzoek en de landsgrenzen (bron: Dialogic)

Figuur 9 toont bovenstaande schematisch. In het meest 'eenvoudige' geval bestaan de vraag naar een eindproduct, de productie van de daarvoor benodigde digitale dienst, en de daarvoor benodigde energie allemaal in Nederland plaats. Het is in dat scenario evident dat de emissies die hierbij plaatsvinden, binnen de afbakening van het onderzoek vallen. Het is echter ook denkbaar dat een vraag naar digitale diensten en/of energie uit het buitenland komt, en dat Nederland vice-versa digitale diensten en energie uit het buitenland importeert.

Op hoofdlijnen zijn er twee logische invalshoeken voor het bepalen van emissies:

- Redeneren vanuit de **plaats waar de emissies daadwerkelijk plaatsvinden**. Alle emissies die *in Nederland* plaatsvinden (ongeacht waar de vraag vandaan komt) tellen mee.
- Redeneren op basis van **causaliteit: alle 'door Nederland' veroorzaakte emissies** tellen mee. In dat geval is het startpunt de vraag naar eindproducten/diensten binnen Nederland en tellen alle emissies die vanuit dat startpunt worden veroorzaakt (zie de pijlen in Figuur 9).



Figuur 10 Schematische weergave van de twee manieren waarop analyse van emissies van de digitale sector kunnen worden bepaald (bron: Dialogic)

Beide redeneringen hebben vanuit beleidsperspectief voor- en nadelen. Een redenering op basis van causaliteit voorkomt het 'waterbedeffect' waarbij productie van digitale diensten c.q. energie naar het buitenland verplaatst – op papier is er dan een reductie van emissie op Nederlands grondgebied maar op mondiaal niveau uiteraard niet. Het nadeel is dat deze emissies lastig in beeld te brengen zijn. Daarnaast blijven alle emissies die in Nederland plaatsvinden als gevolg van buitenlandse vraag juist *buiten* beeld, terwijl deze wel relevant zijn in de maatschappelijke discussie (rondom bijvoorbeeld datacenters).

Merk daarbij op dat de onzekerheid bij het bepalen van emissies in een model op basis van causaliteit groter is dan bij een model op basis van plaats. In de op causaliteit gebaseerde analyse moet bij alle concrete emissies immers worden gecorrigeerd voor het deel dat causaal verband houdt met Nederlandse vraag. In de afbakening op basis van plaats wordt een concrete emissie ofwel volledig ofwel geheel niet meegenomen.

In dit onderzoek hanteren we de afbakening op basis van de *plaats van de emissie* (links in Figuur 10). Om daarnaast iets te kunnen zeggen over de *causale emissies* kijken we naar gegevens over (bijvoorbeeld) de energiebalans.

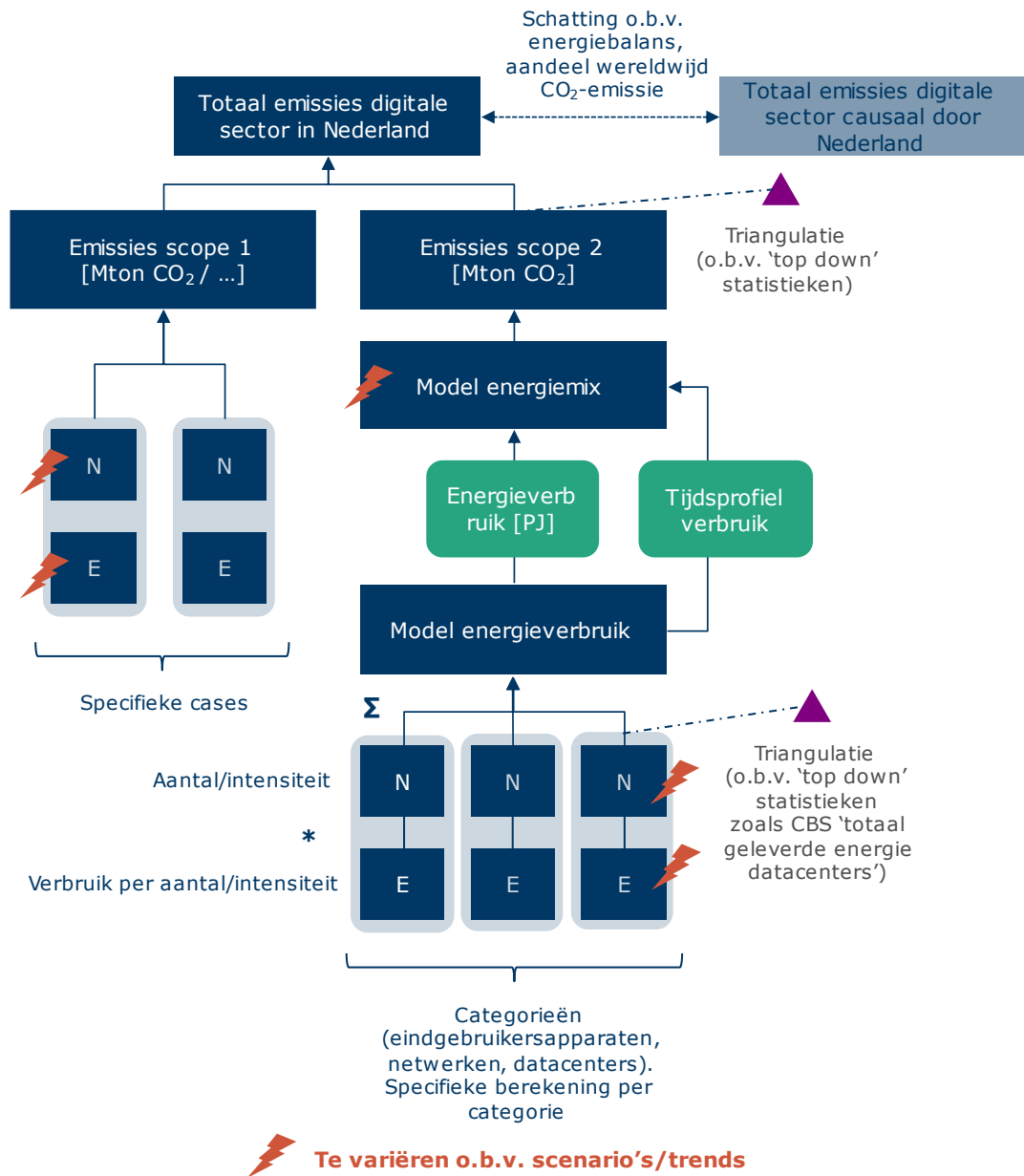
In Figuur 11 is te zien dat de invoer en uitvoer van elektriciteit de afgelopen vier jaar dicht bij elkaar ligt. In sommige periodes wordt er meer geëxporteerd en in andere periodes wordt er meer elektriciteit geïmporteerd. Over de gehele periode van 2019 t/m april 2023 werd er gemiddeld 1.663 miljoen kWh ingevoerd en 1.805 miljoen kWh uitgevoerd. Het afgelopen jaar (sinds april 2022) is er meer elektriciteit uitgevoerd dan ingevoerd.



Figuur 11 Totaal invoer en uitvoer elektriciteit 2019-2023 (april). Cijfers vanaf 2021 zijn voorlopige cijfers. (bron: [7])

### 3 Methodologie

In dit hoofdstuk lichten we toe hoe we de emissies van de digitale sector modelleren en schatten, gegeven de in het vorige hoofdstuk beschreven afbakening. Figuur 12 toont schematisch de opzet van het model. De basis wordt gevormd door de modellering van het energieverbruik (elektriciteit) van verschillende componenten in de digitale sector. Deze vertalen we met een model van de energiemix naar emissies. Separaat kijken we naar een aantal vormen van scope 1-emissies (links in de figuur).



Figuur 12 Schematisch overzicht van de in dit onderzoek gehanteerde methodologie (opbouw model Dialogic)

## 3.1 Elektriciteitsverbruik digitale componenten

### 3.1.1 Selectie

Zoals eerder toegelicht in paragraaf 2.1.1, hebben we een selectie gemaakt van componenten van de digitale sector die onder de 4 hoofdcategorieën vallen (eindgebruikersapparaten, netwerken, datacenters en servers, TV's, TV-randapparatuur en TV-distributienetwerken). De selectie is gemaakt op basis van een aantal criteria:

- De component wordt geïncludeerd in meerdere van de bekeken studies naar de uitstoot van de ICT-sector;
- De component heeft een meer dan marginale of een groeiende CO<sub>2</sub>-uitstoot;
- De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de component is praktisch te meten/schatten.

Daarnaast hebben we op basis van eigen inzicht en recente ontwikkelingen een aantal componenten toegevoegd aan de lijst van componenten: smart home apparaten, VR/AR-apparaten en TV-streamingapparaten (o.a. Google Chromecast en Apple TV). Deze apparaten worden steeds populairder en hebben daarmee een groeiende impact op het energieverbruik van de digitale sector.

In Tabel 1 wordt een aantal voorbeelden gegeven van componenten van de digitale sector die al dan niet zijn meegenomen in de afbakening van dit onderzoek. Per component wordt aangegeven in welke eerdere studies het is geïncludeerd, of het wordt meegenomen in dit onderzoek van Dialogic en SEO en wat de redenering is om de component wel of niet te includeren.

Tabel 1 Per hoofdcategorie een aantal voorbeelden van componenten van de digitale sector die wel en niet zijn meegenomen in de afbakening van dit onderzoek (bron: Dialogic)

Categorie	Component	Andrae & Edler (2015)	Belkhir & Elmegli (2018)	Malmodin & Lundén (2018)	Dialogic / SEO	Redenering
<b>Eindgebruikersapparaten</b>	Smartphones	✓	✓	✓	✓	Grote impact, 3 studies
	Phablets	✓	✓	✗	✗	Kleine impact, smartphones en tablets al meegenomen
	Draagbare mediaspelers (bijv. iPods)	✗	✗	✓	✗	Afnemende impact, slechts 1 studie
<b>Netwerken</b>	Mobiele netwerken	✓	✓	✓	✓	Grote impact, 3 studies
	Kabelnetwerken	✓	✓	✓	✓	Grote impact, 3 studies
	Netwerk met lager vermogen	✗	✗	✗	✗	Door geen studie geïncludeerd
<b>Datacenters en servers</b>	Servers	✓	✓	✓	✓	Grote impact, 3 studies
	Noodstroomvoorzieningen	✗	✓	✓	✓	Scope 1, door 2 studies meegenomen
	Operationele activiteiten (kantoor, zakenreizen, onderhoud)	✗	✗	✓	✗	Scope 3
<b>TV's, TV-randapparatuur en TV-distributie</b>	(smart) TV's	✓	✗	✓	✓	Grote impact, 2 studies
	Set top boxes	✓	✗	✓	✓	Grote impact, 2 studies
	Dvd-spelers	✓	✗	✓	✗	Afnemende impact

De uiteindelijke selectie van componenten van de digitale sector die worden meegenomen in dit onderzoek, is weergegeven in Tabel 2. Dit is weergegeven per hoofdcategorie.

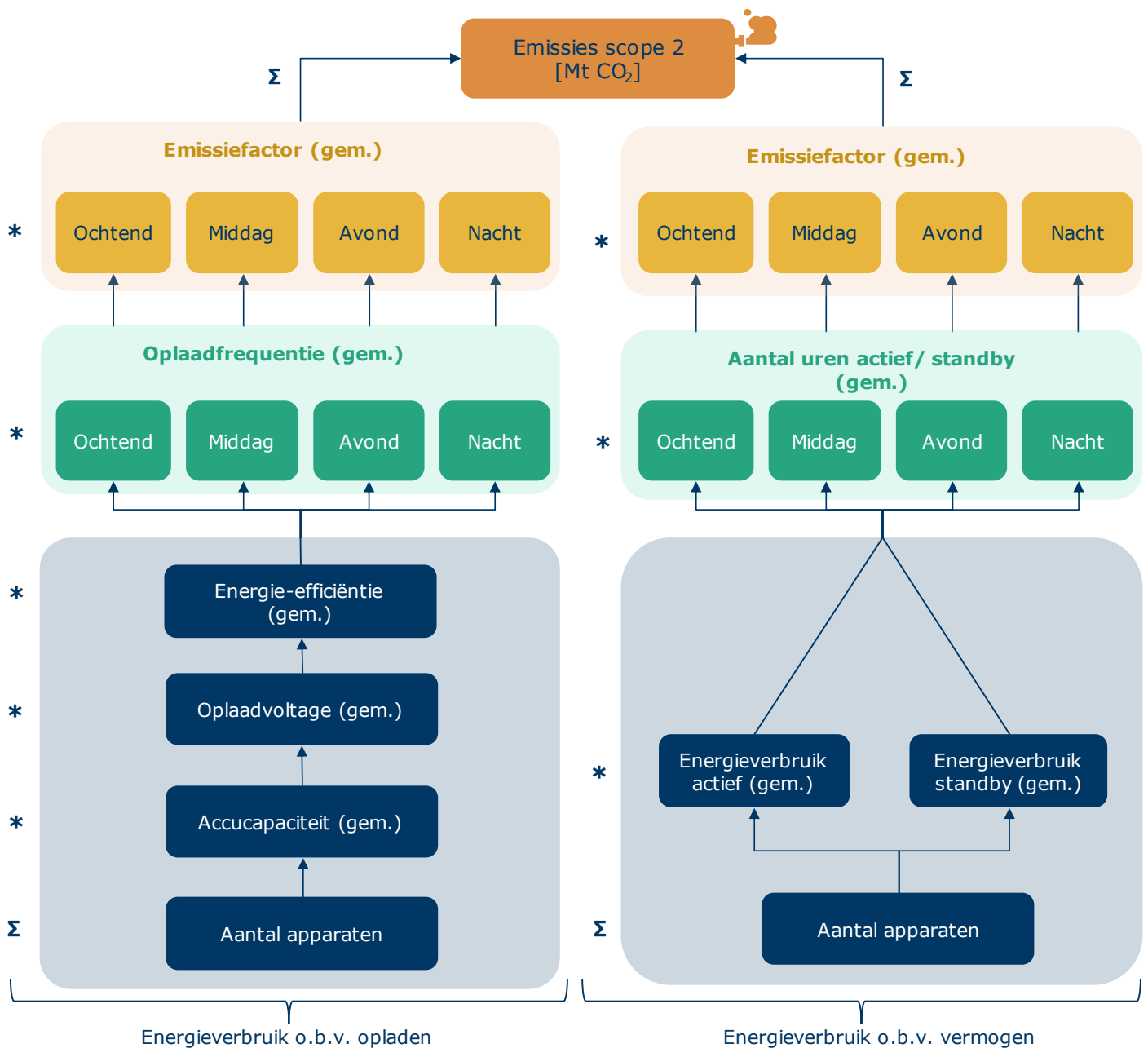
Tabel 2 Selectie van componenten van de digitale sector die zijn meegenomen in dit onderzoek (bron: Dialogic)

Categorie	Component digitale sector
<b>Eindgebruikersapparaten</b>	Smartphones
	Tablets
	Laptops/notebooks
	Desktop PCs
	Monitoren
	Smart watches/fitness trackers
	Game consoles
	Smart home devices (o.a. smart speakers, slimme verlichting)
	VR/AR devices
<b>Netwerken</b>	<i>Datatransport:</i>
	Mobiele aansluitnetwerken (2G t/m 4G, 5G)
	Vaste aansluitnetwerken (glasvezel, koper, coax)
	Modems, routers, NTU's, Wi-Fi-versterkers (CPE)
<b>Datacenters en servers</b>	Servers (hyperscale, colocatie, enterprise)
	Koeling (koelstoffen)
	Noodstroomvoorzieningen (noodaggregaten)
<b>TV's, TV-randapparatuur en TV-distributie<sup>6</sup></b>	TV's
	Set top boxes (o.a. kastjes voor ontvangst digitale televisie)
	TV-decoder
	TV-streamingapparatuur (o.a. Chromecast, Apple TV)

### 3.1.2 Eindgebruikersapparaten

Het energieverbruik van eindgebruikersapparaten hebben we systematisch geschat op basis van de methodiek zoals geschetst in Figuur 13.

<sup>6</sup> Zoals hierboven opgemerkt worden de distributienetwerken voor televisie meegenomen onder 'netwerken'. In de resultaten wordt de categorie "TV's, TV-randapparatuur en TV-distributie" gecombineerd met "Eindgebruikersapparaten" weergegeven.



Figuur 13 Methode berekenen emissies van eindgebruikersapparaten (bron: Dialogic)

Op basis van literatuur is het totaal aantal apparaten per onderdeel geschat. Er wordt vervolgens een onderscheid gemaakt tussen apparaten die worden opgeladen en apparaten die netstroom gebruiken. Voor de oplaadbare apparaten schatten we de gemiddelde accucapaciteit, de oplaadfrequentie en moment van de dag waarop wordt opgeladen. Met behulp van het oplaadvoltage en de energie efficiëntie (er gaat energie verloren bij het opladen in de vorm van warmte), is vervolgens het energieverbruik per apparaat per dagdeel berekend.

Voor de apparaten op netstroom maken we per categorie een schatting van het gemiddelde stroomverbruik. Deze wordt vermenigvuldigd met de gemiddelde gebruiksduur per dagdeel (ochtend/middag/avond/nacht).

Tot slot is met een berekende gemiddelde emissiefactor per dagdeel de CO<sub>2</sub>-uitstoot per dagdeel berekend en is dit bij elkaar opgeteld.

### 3.1.3 Netwerken

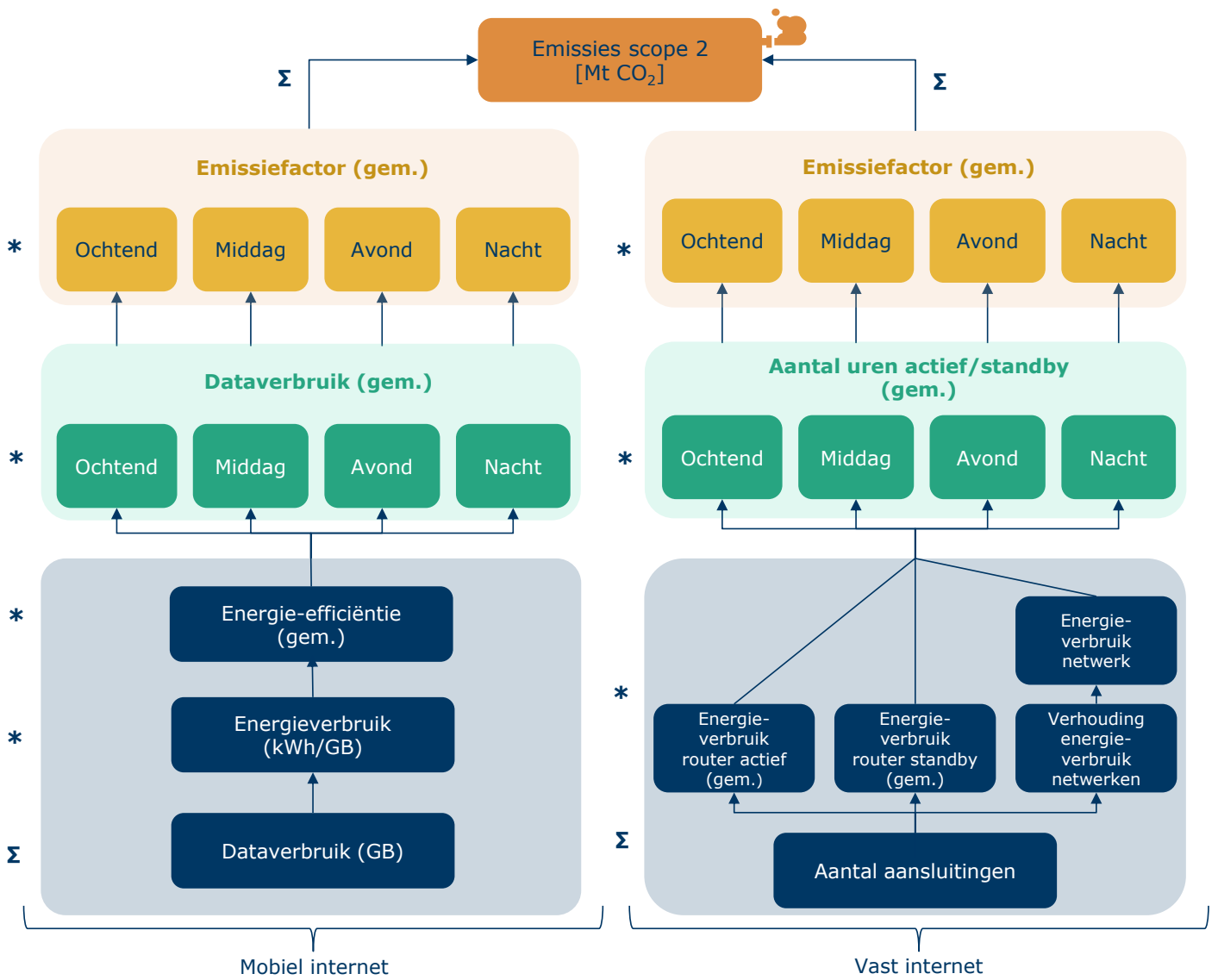
Het energieverbruik van netwerken hebben we systematisch geschat op basis van de methodiek zoals geschetst in Figuur 14. Bij de vaste netwerken kijken we naar de netwerkinfrastructuren op basis van koper, coax en glasvezel.<sup>7</sup> Bij de vaste netwerken rekenen we op basis van een energieverbruik per aansluiting (uitgesplitst naar een stand-by- en actief stroomverbruik en het verbruik van het netwerk). Bij mobiele netwerken is gerekend op basis van het energieverbruik per overgebrachte hoeveelheid data. De reden hiervoor is dat in de literatuur schattingen van energieverbruik voor vaste netwerken overwegend vindbaar zijn per aansluiting en voor mobiele netwerken overwegend per hoeveelheid overgebrachte gegevens.

Met behulp van bronnen is het totaal aantal aansluitingen per type vaste internetaansluiting en het gemiddelde (stand-by) stroomverbruik achterhaald. Per aansluiting is vervolgens de gemiddelde gebruiksduur per dagdeel (ochtend/middag/avond/nacht) geschat. Op basis van het aantal aansluitingen per type vaste internetaansluiting en de verhouding van het energieverbruik van de netwerken is het verbruik per type netwerk berekend. Voor mobiel internet is het totale dataverbruik geschat en op basis hiervan is het energieverbruik per dagdeel berekend. Tot slot is met een berekende gemiddelde emissiefactor per dagdeel de CO<sub>2</sub>-uitstoot per dagdeel berekend en is dit vervolgens bij elkaar opgeteld.

---

<sup>7</sup> Deze netwerktypen vertegenwoordigen het overgrote deel van de Nederlandse vaste aansluitingen. Daarbij speelt dat het kopernetwerk (DSL) langzaam maar zeker wordt vervangen door glasvezel en in de nabije toekomst waarschijnlijk zal worden uitgeschakeld. Naast deze vormen is er een zeer beperkt aantal aansluitingen op basis van vast-draadloze technologie (FWA) en satellieten (StarLink). Met name de laatste kent per aansluiting overigens wel een substantieel hoger energieverbruik dan reguliere vaste aansluitingen (een StarLink-modem verbruikt continu tussen de 50 en 75 Watt).

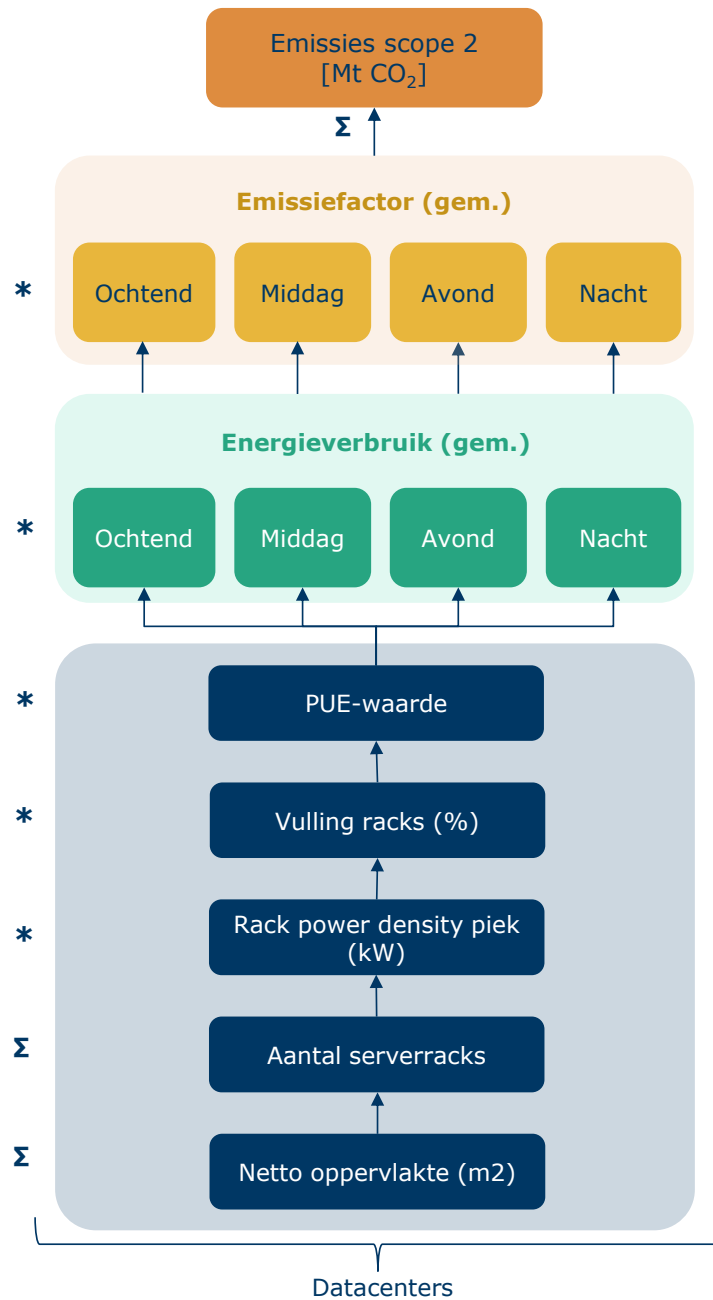




Figuur 14 Methode berekenen emissies van netwerken (bron: Dialogic)

### 3.1.4 Datacenters en servers

Het energieverbruik van datacenters hebben we systematisch geschat op basis van de methodiek zoals geschetst in Figuur 15.



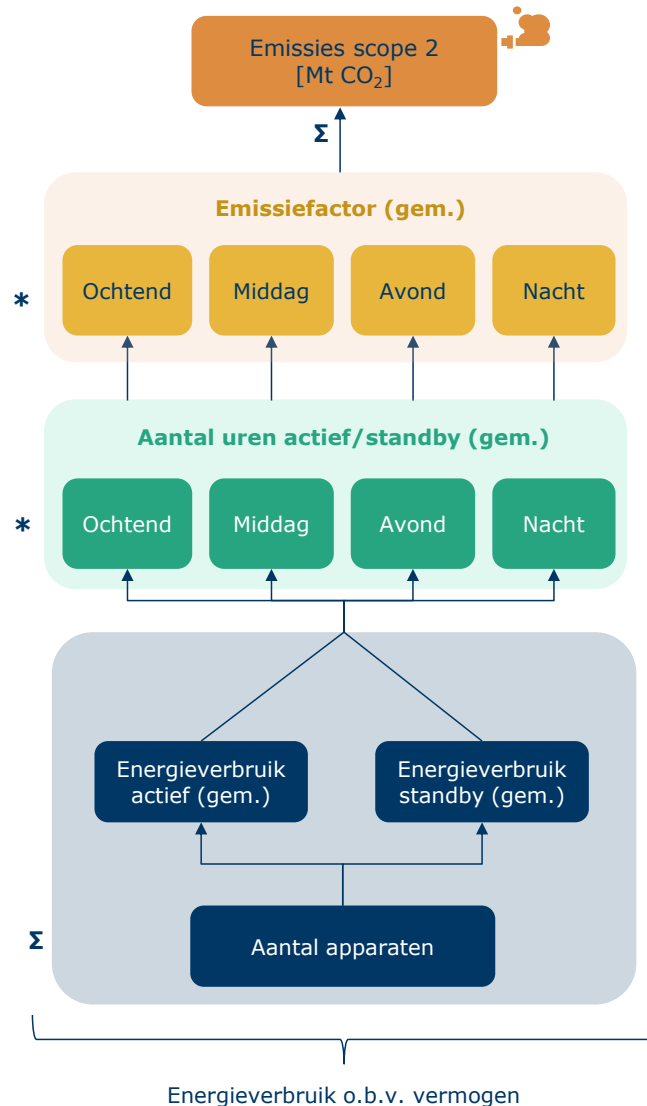
Figuur 15 Methode berekenen emissies van datacenters (bron: Dialogic)

Op basis van [8] is het netto datavloer-oppervlakte en het aantal serverracks per type datacenter (on-premises, colocatie, hyperscaler) geschat. Met behulp van de vermogensdichtheid van een rack en de vulling per serverrack is het (maximale en vervolgens realistische) vermogen van alle servers berekend. Om het totale verbruik van datacenters te berekenen is dit vermenigvuldigd met een (op basis van literatuur) geschatte PUE-waarde per type datacenter. Het energieverbruik per dagdeel is berekend op basis van

een schatting van de datavraag (percentage 'utilization' van de apparatuur) en de emissiefactor per dagdeel, en dit is vervolgens gesommeerd.

### 3.1.5 TV's en randapparatuur

Het energieverbruik van TV's en randapparatuur hebben we systematisch geschat op basis van de methodiek zoals geschetst in Figuur 16 en is vergelijkbaar met de methodiek gebruikt voor eindgebruikersapparaten op basis van vermogen.



Figuur 16 Methode berekenen emissies van TV's en randapparatuur (bron: Dialogic)

Op basis van literatuur is het totaal aantal apparaten per component en het gemiddeld stroomverbruik achterhaald. Per component is vervolgens de gemiddelde gebruiksduur per dagdeel (ochtend/middag/avond/nacht) geschat en is het energieverbruik per apparaat per dagdeel berekend. Tot slot is met een berekende gemiddelde emissiefactor per dagdeel de CO<sub>2</sub>-uitstoot per dagdeel berekend en is dit vervolgens bij elkaar opgeteld.

Televisie wordt in Nederland grotendeels gedistribueerd via dezelfde fysieke netwerken die ook dienen voor vaste internetaansluitingen (via de kabel, het kopernetwerk, of glasvezel).<sup>8</sup> Het energieverbruik van deze netwerken is zodoende al meegenomen in de categorie 'netwerken'.<sup>9</sup>

### **Triangulatie**

Voor wat betreft de methode zelf is goed gekeken naar wat in de bestaande (wetenschappelijke) literatuur is gehanteerd. Met name de studies van Freitag et al. [9], de diverse publicaties van Jens Malmodín [10] [11] [3] en het werk van Koot & Wijnhoven [2] is de inspiratie geweest voor onze methodologie. Het vergelijken van de uitkomsten van deze werken met onze studie is niet altijd goed mogelijk, veelal omdat ze enkele jaren oud of bijvoorbeeld op mondiaal niveau zijn.

De schattingen worden per categorie getrianguleerd. Hiervoor zijn (onder andere) gegevens beschikbaar van het CBS [12], Milieudefensie [13] en de ACM Telecommonitor [14]. Deze bronnen geven primair geaggregeerde cijfers (bijvoorbeeld: de totale hoeveelheid elektriciteit geleverd aan de datacentersector per jaar). Omdat de verschillende bronnen onvermijdelijk andere afbakeningën hanteren dan ons onderzoek, is de primaire vraag die bij triangulatie beantwoord wordt, hoe eventuele verschillen verklaard kunnen worden.

## **3.2 Energiemix en uitstoot**

### *3.2.1 Energieverbruik naar emissies*

Zoals aangegeven in paragraaf 2.2.2 en 3.1 is digitale economie sterk afhankelijk van elektriciteit. De productie van elektriciteit leidt tot CO<sub>2</sub>-emissies, omdat in veel gevallen (nog) gebruik wordt gemaakt van fossiele brandstoffen. Zelfs wanneer veel van de elektriciteit wordt opgewekt uit duurzame bronnen, zoals wind- of zonne-energie, is elektriciteitsproductie op basis van fossiele brandstoffen op dit moment nodig om het elektriciteitsnet in balans te kunnen houden op momenten dat er tijdelijk minder wind- of zonnestroom beschikbaar is.

De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die wordt uitgestoten bij de productie van elektriciteit is afhankelijk van de **energiemix**. De energiemix omschrijft de verhouding tussen verschillende primaire energiebronnen die gebruikt worden om elektriciteit te produceren. Deze energiemix varieert continu afhankelijk van de beschikbaarheid van duurzame energiebronnen en de vraag naar elektriciteit. Zo zijn duurzame energiebronnen zoals zon en wind niet altijd (voldoende) beschikbaar. Als het aanbod van duurzame elektriciteit niet kan voldoen aan de vraag, dan moet het elektriciteitsaanbod worden aangevuld met elektriciteit uit fossiele bronnen.

Iedere energiebron heeft een eigen uitstootwaarde of **emissiefactor**. Deze emissiefactor beschrijft de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die wordt uitgestoten bij de conversie naar elektriciteit en

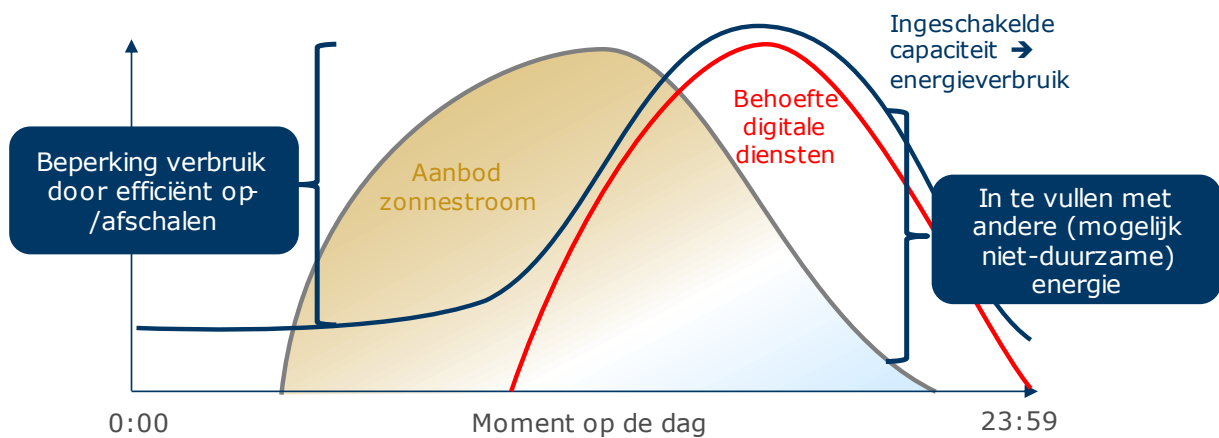
---

<sup>8</sup> Naast deze distributievormen zijn in Nederland ook satelliettelevisie (DVB-S) en Digitenne (DVB-T2) beschikbaar. Deze voorzien in een beperkt aantal aansluitingen en zijn daarom niet meegenomen.

<sup>9</sup> In geval van koper- en glasvezelnetwerken wordt veelal gebruik gemaakt van IPTV, wat qua energieverbruik vergelijkbaar is met een streamingdienst die over dezelfde internetaansluiting zou verlopen. Bij coaxnetwerken wordt er naast het internetsignaal gebruik gemaakt van een specifiek digitaal televisiesignaal (DVB-C). Hiervoor is separate apparatuur nodig – het energieverbruik hiervan ligt dan ook iets hoger.

wordt gemiddeld in kilogram CO<sub>2</sub> per opgewekte kilowattuur aan stroom (kg<sub>CO2</sub>/kWh). De emissiefactor van onze volledige stroomvoorziening kan op ieder moment worden berekend als een gewogen gemiddelde emissiefactor van alle energiebronnen die dat moment elektriciteit produceren. Gedurende één dag is de emissiefactor het laagst op de momenten dat de zon schijnt, omdat er op dat moment relatief veel duurzame elektriciteit wordt geproduceerd. Als gevolg hiervan is de emissiefactor ook lager in de zomer dan in de winter, doordat er meer zonuren zijn per dag.

De uitstoot die wordt veroorzaakt door het gebruik van digitale technologieën en diensten hangt dus samen met het moment waarop deze elektriciteit verbruiken. Wanneer het gebruik plaatsvindt op momenten dat veel duurzame energie beschikbaar is, zal de uitstoot het laagst zijn. Wanneer er minder duurzame elektriciteit is, bijvoorbeeld in de avond of nacht, is de uitstoot het hoogst. Figuur 17 geeft een visueel voorbeeld van samenhang tussen het aanbod van duurzame stroom en de vraag naar digitale diensten.



Figuur 17 Schematische weergave van de relatie tussen het aanbod van groene stroom, de behoefte naar digitale diensten en de ingeschakelde digitale capaciteit. Wanneer het verbruik samenvalt met productie van duurzame energie, is minder niet-duurzame energie nodig. (bron: Dialogic)

### 3.2.2 Uitstoot energiemix

In paragraaf 3.1 is een methodologie gepresenteerd om het elektriciteitsverbruik van digitale technologieën en diensten in kaart te brengen. Om het elektriciteitsverbruik vervolgens te vertalen naar emissies is historische data nodig met betrekking tot de emissiefactor van stroom in Nederland. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van data van [co2monitor.nl](https://co2monitor.nl). De website [co2monitor.nl](https://co2monitor.nl) geeft actueel inzicht in de emissiefactor<sup>10</sup> van stroom en heeft historische data vanaf 2021. [15] Voor de jaren 2021, 2022 en 2023 is de gemiddelde emissiefactor berekend per maand, uitgesplitst naar de 24 uur die in een dag zitten. Zo is er een gemiddelde emissiefactor berekend voor elk uur van de dag en voor de vier dagdelen waarnaar werd verwezen in paragraaf 3.1 (nacht, ochtend, middag en avond).

Tabel 3 laat de gemiddelde CO<sub>2</sub>-emissiefactor per dagdeel zien in gram CO<sub>2</sub> per kilowattuur (g CO<sub>2</sub>/kWh). Deze cijfers laten zien dat de emissiefactor het laagste is in de middag, als er meer energie uit hernieuwbare bronnen beschikbaar is en dat de emissiefactor hoger is in

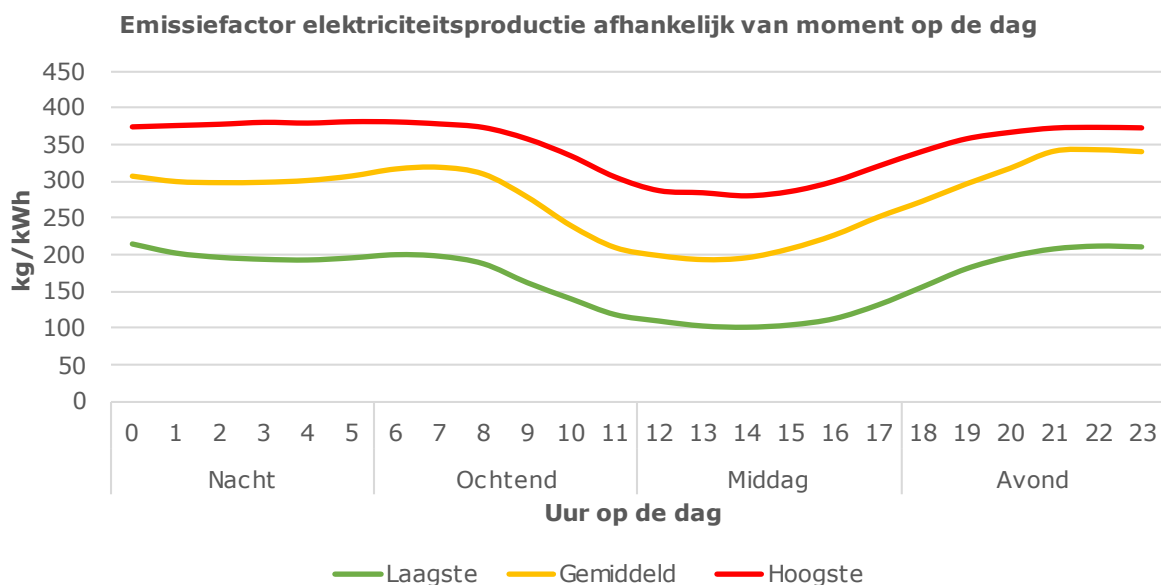
<sup>10</sup> De CO<sub>2</sub> monitor berekent de emissiefactor van stroom door een gewogen gemiddelde te nemen van de emissiefactoren van individuele energiebronnen. De emissiefactoren van individuele energiebronnen zijn oorspronkelijk door CE Delft berekend door de CO<sub>2</sub>-factor hiervan te delen door het rendement van de elektriciteitsopwekking. [79] Scope 3, categorie 3-emissies ("fuel- and energy-related emissions not included in scope 1 or scope 2") zijn dus niet meegenomen in deze cijfers.

de avond en nacht, wanneer er meer afhankelijkheid is van fossiele energiebronnen. Deze emissiefactoren hebben we gebruikt in het model voor de vertaling van het huidige energieverbruik van de digitale sector naar CO<sub>2</sub>-uitstoot.

Tabel 3: Gemiddelde CO<sub>2</sub>-emissiefactor per dagdeel. (bron: [co2monitor.nl](https://co2monitor.nl), verwerkt door Dialogic)

	Nacht	Ochtend	Middag	Avond
Emissiefactor (g CO <sub>2</sub> /kWh)	301	279	212	318

De data van [co2monitor.nl](https://co2monitor.nl) is ook gebruikt om een minimale en maximale emissiefactor te identificeren voor de sensitiviteitsanalyse. Figuur 18 toont de minimale, gemiddelde en maximale CO<sub>2</sub>-emissiefactor per uur in 2022 (g/kWh). De maximale emissiefactor representeert de 'slechtste' dagen van het jaar, waarop ons energieverbruik hoog is en er weinig tot geen duurzame energie beschikbaar is. De minimale emissiefactor representeert daarentegen de 'beste' dagen, waarop ons energieverbruik zo laag is dat het aanbod van duurzame elektriciteit voor een groot deel aan kan voldoen aan de vraag. Uit de figuur blijkt dat de minimale en maximale emissiefactor behoorlijk afwijken van het gemiddelde.



Figuur 18 Minimale, gemiddelde en maximale CO<sub>2</sub>-emissiefactor per uur in 2022 (g/kWh). (bron: [co2monitor.nl](https://co2monitor.nl), verwerkt door Dialogic)

Tot slot is de emissiefactor per dagdeel ook voor de vier seizoenen (winter, lente, zomer, herfst) berekend. Hierin is zichtbaar dat het de emissiefactor aanzienlijk lager is in de zomer. Echter, aangezien we uitgaan van een relatief constant energieverbruik van de digitale sector in het jaar, gebruiken we de gemiddeldes in Tabel 3 en splitsen we dit niet verder uit in seizoenen.

### 3.2.3 Groene stroom

De digitale sector werkt op verschillende manieren aan verduurzaming. [16] Een daarvan is door (uitsluitend of grotendeels) groene stroom in te kopen. Van groene stroom bestaat een aantal vormen, maar kenmerkend is dat er uiteindelijk evenveel of meer stroom uit

duurzame bron is opgewekt dan er is verbruikt, en dat dezelfde geleverde groene stroom slechts bij één afnemer wordt meegeteld (additioneel is). [17]

Het *Greenhouse Gas Protocol* benoemt twee perspectieven in haar accounting-richtlijnen voor het bepalen van scope 2-emissies: het *marktgebaseerde* en het *locatiegebaseerde* perspectief. [18] Het eerste perspectief komt op hoofdlijnen overeen met het optellen van de emissies bij de opwek van *uitsluitend* de ingekochte energie (en die zou nul zijn voor zover er groene stroom wordt ingekocht met emissiefactor nul), en dus het perspectief van de digitale dienstverleners. In het *locatiegebaseerde* perspectief worden de *netto* energiemix en emissiefactoren voor de elektriciteitsproductie op het *relevante elektriciteitsnet* aangehouden. Daarbij merkt GHG op dat het locatiegebaseerde perspectief het meest passend is wanneer wordt gekeken naar de totale emissies van een energie-intensieve sector als geheel. [18, pp. 26, Table 4.1]. Dit perspectief hanteren we dan ook primair in dit rapport.

Het marktgebaseerde perspectief leidt tot een lagere inschatting van CO<sub>2</sub>-emissies dan het locatiegebaseerde perspectief. Vanuit individueel perspectief van een afnemer van groene stroom is er weliswaar geen CO<sub>2</sub>-uitstoot, maar op hoger aggregatieniveau is die er wel. Om groene stroom te kunnen leveren is er tot op heden immers nog een bepaalde productie op basis van fossiele brandstoffen nodig (om te voorzien in gevallen waarin er niet afdoende stroom uit duurzame bron beschikbaar is, en om het elektriciteitsnet in balans te houden). Daar staat tegenover dat er uiteindelijk wel zoveel stroom uit hernieuwbare bron wordt geproduceerd als er 'groen' is afgenomen (op andere momenten in de tijd is er dus mogelijk een *overschot* van groene stroom, wat dan alsnog kan leiden tot een reductie van productie van niet-fossiele elektriciteit). Er zijn kortom (vooral nog, en afnemende) emissies die niet volledig, maar op zijn minst voor een *deel* zouden moeten worden toegerekend aan afnemers van groene stroom. Om deze reden kiezen we ervoor om naast de uitkomsten op basis van het locatiegebaseerde perspectief ook de (lagere) uitkomsten op basis van het marktgebaseerde perspectief weer te geven. Daarbij kan de eerstgenoemde worden beschouwd als bovengrens en de laatstgenoemde als ondergrens.

### **Rekenmethode**

Tabel 4 toont per categorie het percentage van het elektriciteitsverbruik dat op basis van groene stroom plaatsvindt. Voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het elektriciteitsverbruik wordt de bovengrens bepaald door het elektriciteitsverbruik te vermenigvuldigen met de emissiefactoren (op systeemniveau, zie boven). De ondergrens wordt bepaald door het elektriciteitsverbruik voorafgaand te vermenigvuldigen met de percentages niet-groene stroom uit Tabel 4. De onder- en bovengrens convergeren in de toekomst uiteraard beide naar nul naarmate de emissiefactor op systeemniveau verder naar nul daalt.

Tabel 4 Percentage elektriciteitsverbruik op basis van groene stroom per categorie

	Percentage groene stroom	Gehanteerde emissiefactor voor het deel groene stroom ( <i>alleen in berekening ondergrens</i> )	Bron
<b>Eindgebruikersapparaten</b>	78%	0 g CO <sub>2</sub> /kWh	[19]
<b>TV's en randapparatuur</b>	78%	0 g CO <sub>2</sub> /kWh	[19]
<b>Netwerken</b>	100% <sup>11</sup>	0 g CO <sub>2</sub> /kWh	[20] [21] [22]
<b>Datacenters en servers</b>	88%	0 g CO <sub>2</sub> /kWh	[23]

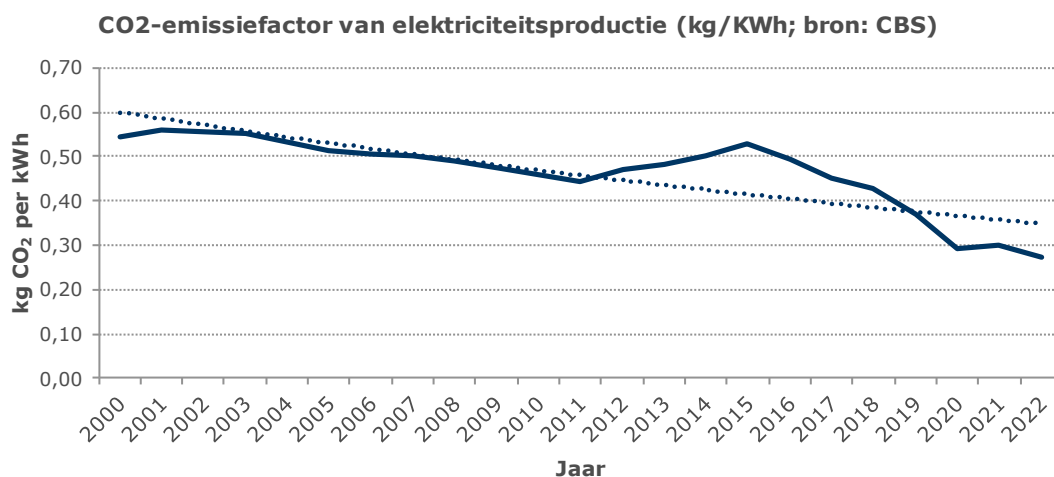
### 3.2.4 Triangulatie

Om de gehanteerde emissiefactor in ons onderzoek te trianguleren, kijken we naar cijfers van het CBS. Het CBS bepaalt elk jaar cijfers over de CO<sub>2</sub>-uitstoot van elektriciteitsproductie. Bij de berekening hiervan wordt uitgegaan van de hernieuwbare en niet-hernieuwbare energieproductie in verhouding tot het aan elektriciteit toegerekende gebruik van aardgas, kolen en kernenergie. Momenteel is aardgas een grote energiedrager voor elektriciteitsproductie. De productie van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen (wind, zon, waterkracht) en biomassa is wel toegenomen de laatste jaren. De afgelopen jaren is de CO<sub>2</sub>-emissiefactor (kg CO<sub>2</sub> per kWh) afgenomen van 0,53 kg/kWh in 2015 naar 0,29 kg/kWh in 2020 (zie de figuur hieronder). Dit komt door de toegenomen productie van hernieuwbare elektriciteit en de afgenomen productie van de elektriciteit uit steenkool. In 2021 nam dit weer enigszins toe door het grotere gebruik van kolen voor elektriciteitsopwekking (vanwege de schaarste van aardgas). Over de periode 2000-2022 daalde de emissiefactor met gemiddeld 2,9% per jaar.

De cijfers van het CBS komen vrijwel overeen met de data van [co2monitor.nl](https://co2monitor.nl). Volgens de CO<sub>2</sub> monitor was de gemiddelde emissiefactor van stroom in 2021 0,29 kg/kWh. Dit is iets minder dan de emissiefactor die is gerapporteerd door het CBS (0,30 kg/kWh). In 2022 melden beide bronnen een emissiefactor van 0,27 kg/kWh.

<sup>11</sup> Gebaseerd op het elektriciteitsverbruik van de grootste drie operators, en uitsluitend de 'netwerkwijde' (modems, routers en eindgebruikersapparatuur uitgezonderd – hiervoor hanteren we het percentage groene stroom voor consumenten van 78% uit [20]).





Figuur 19 CO<sub>2</sub>-emissiefactor van elektriciteitsproductie (kg/kWh) (bron: Dialogic o.b.v. [24])

### 3.3 Scope 1-emissies

In dit onderzoek staan de (scope 2-)emissies als gevolg van het elektriciteitsverbruik van de digitale sector centraal. Naast deze emissies zien we een aantal relevante emissies in scope 1. Deze behandelen en modelleren we separaat.

#### 3.3.1 Noodaggregaten datacenters

Om continuïteit te kunnen garanderen zijn vrijwel alle datacentra van enig formaat voorzien van een noodstroomvoorziening. Deze zorgt ervoor dat de apparatuur in het datacenter voorzien blijft van stroom wanneer er een storing optreedt op het elektriciteitsnetwerk. Om dit te realiseren wordt een aantal technieken toegepast, die achtereenvolgens steeds langer durende onderbrekingen opvangt:

- Allereerst zijn veel datacenters voorzien van een redundante aansluiting op het elektriciteitsnetwerk. Dit voorkomt dat het defect aan één aansluiting c.q. de achterliggende transportlijnen leidt tot stroomuitval.
- De tweede linie bestaat uit een noodstroomvoorziening op basis van batterijen. De capaciteit van deze batterijen is voldoende om voor een korte tijd (enkele minuten tot een half uur) in de elektriciteitsbehoefte te kunnen voorzien. Met deze voorziening kunnen korte 'dips' worden opgevangen en is er tijd om de aggregaten op te starten.
- De derde linie bestaat uit noodstroomaggregaten. Dit zijn in de regel dieselgeneratoren die het datacenter voor langere tijd van stroom kunnen voorzien. Het duurt enkele minuten voordat een dieselaggregaat is opgestart.

De dieselaggregaten leiden bij gebruik tot diverse emissies (voornamelijk CO<sub>2</sub> maar bijvoorbeeld ook fijnstof) op de datacenterlocatie. De aggregaten worden echter uitsluitend in uitzonderingssituaties gebruikt. De leveringszekerheid van stroom in Nederland bedroeg in 2021 nog 99,99963%. Hoewel het omgerekend om gemiddeld 2 minuten storing per aansluiting per jaar gaat, is er spreiding in de tijdsduur van storingen. Daarnaast geven de netbeheerders aan dat de leveringszekerheid in de toekomst mogelijk in het gedrang kan komen. [25]

### **Rekenmethode**

De CO<sub>2</sub>-emissies van noodaggregaten van datacenters zijn berekend op basis van een model op basis van Monte Carlo simulatie.<sup>12</sup> De structuur van het model en de gehanteerde aannames zijn weergegeven in Figuur 20.

In het model is rekening gehouden met zowel de daadwerkelijke inzet van noodaggregaten (sterk afhankelijk van het aantal storingsminuten van de elektriciteitsvoorziening) en de periodieke *tests* van de aggregaten.

### **3.3.2 Koelinstallaties datacenters**

De apparatuur die aanwezig is in datacenters verbruikt elektrische energie die voor een groot deel wordt omgezet in warmte. Om oververhitting van de apparatuur te voorkomen is daarom koeling vereist. De meeste ICT-apparatuur in datacenters wordt gekoeld met lucht: de apparatuur bevat ventilatoren die lucht aanzuigen en warme lucht uitblazen. Deze lucht dient vervolgens afgevoerd te worden om recirculatie van deze warme lucht (en oververhitting) te voorkomen.

De meest gebruikte koelmethode in datacenters is vrije luchtkoeling, ofwel het gebruik van buitenlucht om apparatuur te koelen. [26] Datacenters kunnen zowel gebruik maken van directe als indirecte vrije luchtkoeling. Bij directe vrije luchtkoeling wordt de buitenlucht beperkt voorbehandeld en naar de ICT-apparatuur geleid. Nadeel hiervan is dit kan leiden tot vervuiling van het datacentrum. Indirecte vrije luchtkoeling is een manier om dit te voorkomen. In dit systeem is er geen direct contact tussen de lucht in het datacentrum en de buitenlucht, maar onttrekt de buitenlucht de warmte uit het datacentrum via een warmtewisselaar.

De ideale lucht-intake temperatuur voor datacenters is tegenwoordig 27 graden Celsius. Wanneer de buitenlucht te warm is, is aanvullende koeling nodig. Bij vrije luchtkoeling kan buitenlucht gekoeld worden door water in deze luchtstroom te laten verdampen (adiabatische koeling). Dit volstaat echter niet wanneer er zeer hoge temperaturen zijn of wanneer de er een hoge luchtvochtigheid is. [27] In dat geval is mechanisme koeling nodig met directe expansie koelsystemen (air conditioning). Deze systemen bevatten meestal gefluoreerde koolwaterstoffen (HFK's) die een zeer krachtig broeikas effect hebben. HFK's hebben een broeikas effect dat 124 tot 22.800 keer zo groot is als dat van CO<sub>2</sub> en blijven bovendien veel langer in de atmosfeer aanwezig. [26] Het gebruik hiervan vormt dus een milieurisico.

In het Nederlandse klimaat kunnen datacentra vrijwel altijd worden gekoeld zonder directe expansie koelsystemen. Toch moeten datacentra gedurende het hele jaar de juiste lucht-intake temperatuur garanderen, waardoor directe expansie koelsystemen vaak alsnog aanwezig zijn en een lekkagerisico met zich meebrengen. [27] Ondanks de brede toepassing van directe expansie koelsystemen is de verwachte uitstoot van HFK's beperkt. Vanwege de milieurisico's van HFK's is er wereldwijde regulering en is er ook een Europese verordening over gefluoreerde broeikasgassen.<sup>13</sup> Deze regelgeving ziet erop toe dat de emissies (ook wel

---

<sup>12</sup> Hierbij wordt voor iedere parameter een kansverdeling geschat (op basis van betrouwbaarheidsinterval of gemiddelde en standaardafwijking). Vervolgens wordt in een formule bepaald hoe de uitkomst moet worden berekend, gegeven specifieke waarden voor de parameters. Deze formule wordt een groot aantal keer berekend, waarbij steeds willekeurig (maar volgens de kansverdeling) waarden worden gekozen voor de parameters. De uitkomst is vervolgens te zien als een kansverdeling.

<sup>13</sup> EU-verordening nr. 517/2014 van het Europees Parlement en de Raad van 16 april 2014 betreffende gefluoreerde broeikasgassen en tot intrekking van verordening (EG) nr. 842/2006.

de lekkage van HFK's) resulterend uit de productie en consumptie van deze stoffen geregistreerd, gemonitord en beperkt wordt. Wanneer lekkages worden geconstateerd moeten deze direct gemeld worden bij het lokaal bevoegde gezag, die vervolgens de Inspectie Leefomgeving en Transport op de hoogte stelt. [28]

Naast strengere controles op lekkage wordt ook gewerkt aan de uitfasering van HFK's. Er zijn dan ook duurzame alternatieven voor het koelen van datacentra, zoals directe vloeistofkoeling, warme-koude Opslag (WKO) en andere (natuurlijke) koudemiddelen met een laag broeikaseffect zoals ammoniak en R1234z. [26] Deze alternatieve koelmethoden worden in toenemende mate toegepast door datacentra om energiekosten te verlagen.

## 4 Resultaten

In dit hoofdstuk presenteren we onze schatting van de emissies van de digitale sector, op basis van de hierboven beschreven methodologie en modellering. Het gaat hier om de uitkomsten voor 2023. In het volgende hoofdstuk geven we (op basis van trends en scenario's) voorspellingen voor de toekomst.

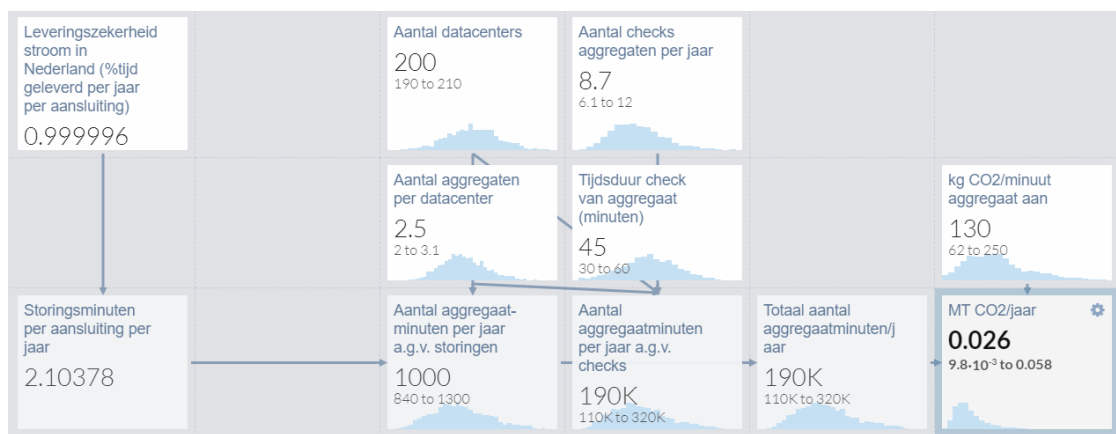
### 4.1 Scope 1

De digitale sector kent, gegeven de gekozen definities, relatief beperkt scope 1-emissies. De reden is dat de digitale sector voornamelijk 'draait' op digitale apparatuur, die primair werkt op elektriciteit. Aanpalende onderdelen – denk bijvoorbeeld aan de productie van de apparatuur zélf, of bijvoorbeeld logistieke aspecten – vallen buiten scope 1.

We zien twee relevante vormen van scope 1-emissies die nadere uitwerking verdienen. De eerste zijn de emissies die voortkomen uit het gebruik van noodaggregaten bij datacenters. De andere zijn koelstoffen die mogelijk vrijkomen uit koelssystemen van datacenters.

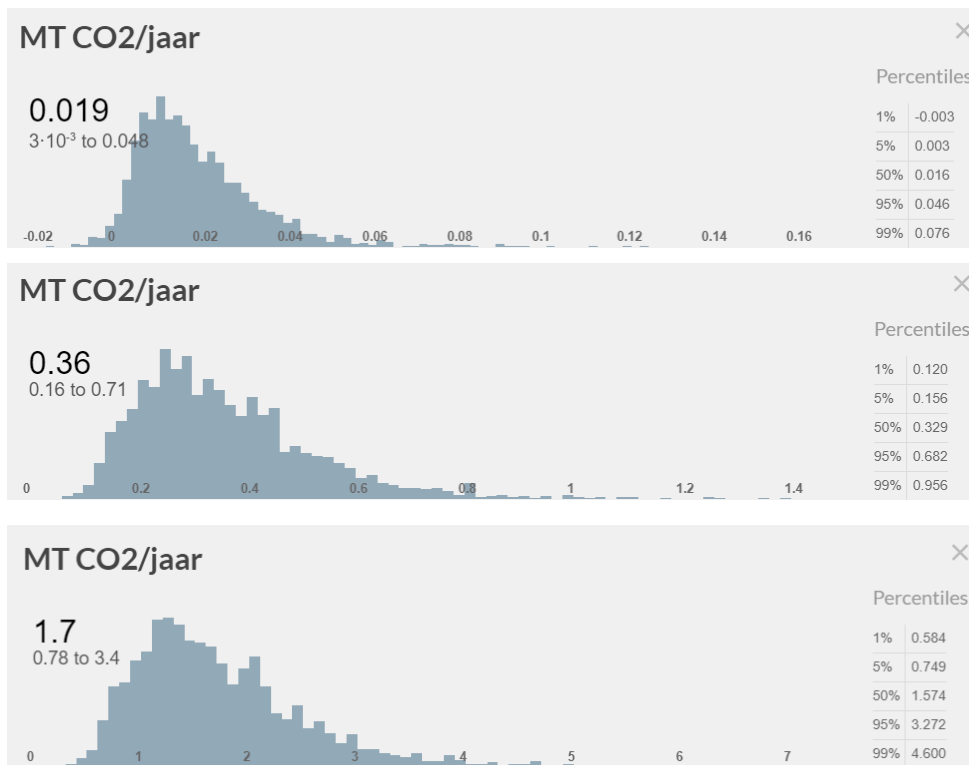
#### 4.1.1 Noodaggregaten datacenters

Figuur 20 toont de uitkomst van de modellering van de emissies van CO<sub>2</sub> bij de inzet en het testen van (diesel) noodaggregaten van datacenters.



Figuur 20 Model emissies noodaggregaten (bron: Dialogic)

Vergeleken met de scope 2-emissies (verderop) gaat het hier om een zeer beperkte uitstoot. De reden hiervoor is uiteraard dat de noodaggregaten in de praktijk nauwelijks écht gebruikt worden. De emissies die er zijn, komen voort uit periodieke tests van de apparatuur. De uitkomst is dan ook sterk afhankelijk van het aantal storingsminuten van de elektriciteitsvoorziening (leveringszekerheid). De leveringszekerheid bedraagt op dit moment 99,99996% [25], omgerekend 126 seconden per jaar. Merk op dat dit een gemiddelde bedraagt en de verdeling niet 'normaal' is: als er een storing is, dan duurt deze al snel langer dan 126 seconden, maar omdat storingen op zichzelf zeldzaam zijn, is de verwachtingswaarde laag. Figuur 21 toont de impact op de uitstoot voor scenario's met lagere leveringszekerheid.



Figuur 21 Impact van daadwerkelijk gebruik noodaggregaten op uitstoot van CO<sub>2</sub> bij (van boven naar beneden) leveringszekerheid van 99,9% (8u storing/jaar), 99% (3,6 dagen) en 95% (18 dagen). (bron: model Dialogic)

Een aantal aanbieders van digitale diensten, waaronder Microsoft, is bezig of voornemens de fossiele brandstoffen die worden gebruikt voor noodstroomvoorzieningen te vervangen door duurzame brandstoffen, zoals synthetische diesel. [29]

#### 4.1.2 Koelstoffen

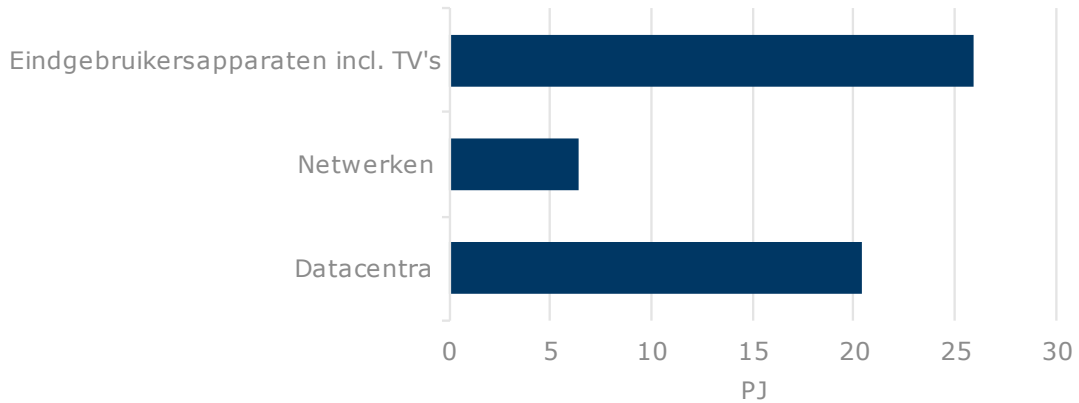
Er is beperkt informatie beschikbaar over het type en de grootte van koelssystemen in datacenters. Hierdoor is het niet mogelijk om een schatting te doen van de hoeveelheid HFK's die jaarlijks worden uitgestoten. Gezien de strenge regulering rondom monitoring en rapportage van lekkages is onze aanname dat deze niet veel voorkomen en beperkt in omvang zijn. Indien lekkages wel plaatsvinden, dienen deze zo snel mogelijk te worden gerepareerd. De verwachting is daarom dat de uitstoot van HFK's door datacentra beperkt is en dat deze, ondanks het grote broeikaseffect, een beperkt aandeel vormen in de klimaatimpact van de digitale economie.

## 4.2 Scope 2

### 4.2.1 Energieverbruik

Het energieverbruik van de digitale sector is gemodelleerd volgens het model zoals eerder beschreven in hoofdstuk 3.1. Met het model is het totale energieverbruik geschat op 53 PJ in 2023. Figuur 22 toont de verdeling van het energieverbruik van de Nederlandse digitale sector per categorie.

### Energieverbruik (PJ) digitale sector in Nederland in 2023 naar categorie

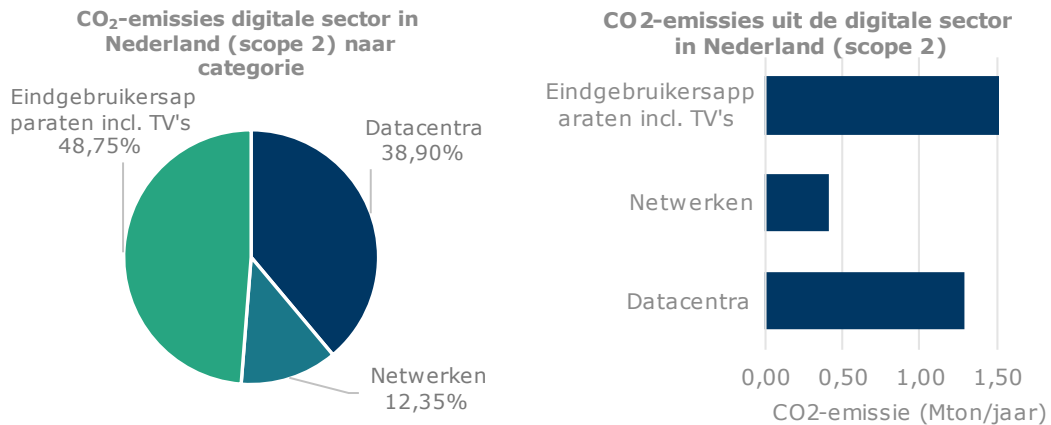


Figuur 22 Aandeel van de verschillende categorieën in energieverbruik in 2023 (op basis van modellering Dialogic)

#### 4.2.2 Emissies

De scope 2-emissies van de digitale sector zijn gemodelleerd volgens het model zoals eerder beschreven in hoofdstuk 3.1. Met het model is de CO<sub>2</sub>-uitstoot in scope 2 op basis van het *locatiegebaseerde perspectief* geschat op **3,33 Mton** in 2023. Volgens een rapport van het Joint Research Centre (JRC) van de Europese Commissie was de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van Nederland in 2021 146,87 Mton. [30] Dat zou betekenen dat ongeveer **2,3%** van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van Nederland voortkomt uit de digitale sector.

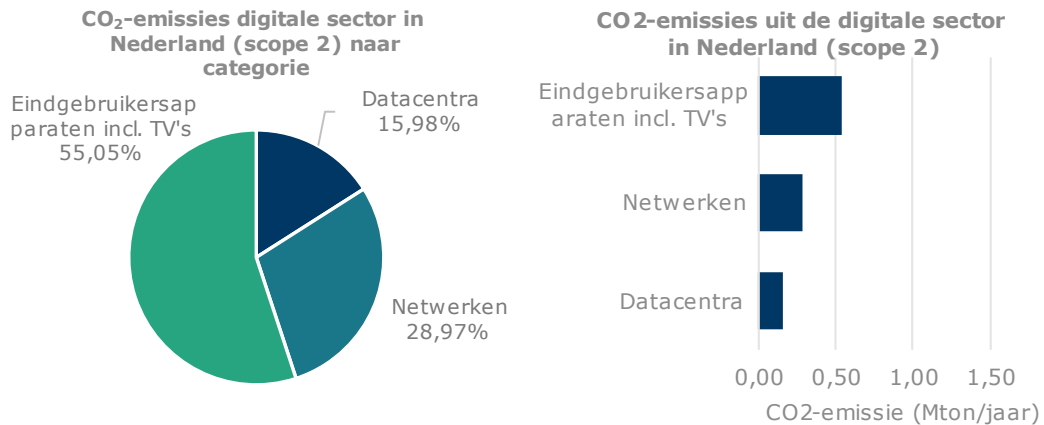
Figuur 23 toont de verdeling van de CO<sub>2</sub>-emissies van de Nederlandse digitale sector per categorie in het *locatieperspectief* (emissiefactoren op *systemniveau*).



Figuur 23 Aandeel van de verschillende categorieën in CO<sub>2</sub>-emissies in 2023 (op basis van modellering Dialogic; locatiegebaseerd perspectief: emissiefactoren op systeemniveau)

Wanneer we de emissies bepalen op basis van het *marktgebaseerde perspectief* (c.q. de emissiefactor voor afgenomen groene stroom op nul stellen) ontstaat het beeld van Figuur 24. De onderlinge verhoudingen wijzigen omdat het percentage afname van groene stroom per categorie verschilt. Voor eindgebruikersapparaten (alsook netwerkapparatuur aan zijde van de afnemer, zoals modems) gaan we uit van het percentage afname van groene stroom door consumenten. Dit ligt met 67% lager dan dat voor bijvoorbeeld datacenters (88%). De

totale uitstoot voortkomend uit de digitale sector komt in het *marktgebaseerde perspectief* op 0,9 Mton (ongeveer 0,7% van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van Nederland)

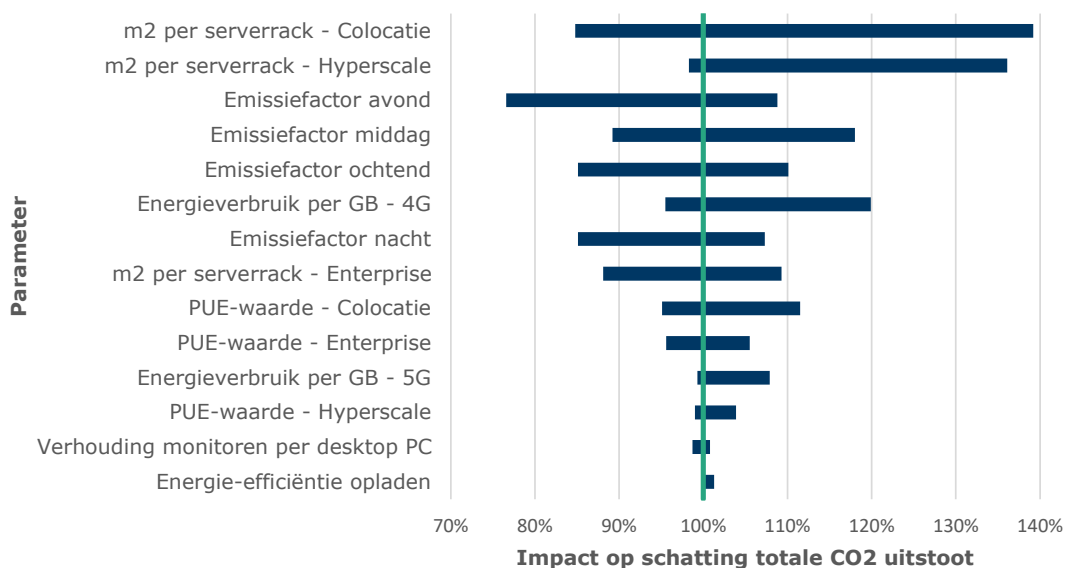


Figuur 24 Verdeling van emissies naar categorie (op basis van modellering Dialogic; marktgebaseerd perspectief: emissiefactoren op basis van afnameprofiel)

### 4.3 Gevoeligheidsanalyse model

Een gevoeligheidsanalyse biedt inzicht in de mate waarin het model reageert op fluctuaties in de invoerparameters. Voor elke invoerparameter is een logische minimale en maximale waarde bepaald, welke vervolgens is ingevuld in het model onder verder constante omstandigheden.

Figuur 25 toont het effect van de invoerparameters op de schatting van de CO<sub>2</sub>-uitstoot voor 2023. Hoe groter het interval, hoe gevoeliger het model is voor de invoerparameter. Het model is logischerwijs gevoelig voor de emissiefactoren die worden gebruikt om per dagdeel het stroomverbruik om te rekenen naar de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Ook de oppervlakte per serverrack (in m<sup>2</sup>) heeft grote invloed op het model. Deze parameter dient als basis voor de berekening van de CO<sub>2</sub>-uitstoot voor datacenters. Gegeven dat de categorie datacenters de grootste bijdrage levert aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot is het model evident gevoelig voor deze parameters. Desondanks is de impact van de invoerparameters op het model beperkt: voor de meeste parameters geldt dat de onder- en overschatting op basis van de minimale en maximale waarde minder dan 15% van de originele schatting ligt.



Figuur 25 Gevoeligheidsanalyse voor de basisversie van het model (2023) (bron: Dialogic)

Op basis van het model maken we voorspellingen van de toekomstige CO<sub>2</sub>-uitstoot van de digitale sector in Nederland. In verschillende scenario's rekenen we het model voor toekomstige jaren door, waarbij bepaalde parameters worden gevarieerd. Welke parameters en *hoe* deze worden gevarieerd beschrijven we hieronder.

## 4.4 Triangulatie

Om de resultaten van ons model te trianguleren, kijken we naar 1) het gerapporteerde energieverbruik van de ICT-sector in andere publicaties en 2) de gerapporteerde CO<sub>2</sub>-uitstoot van de ICT-sector door andere studies.

### 4.4.1 Energieverbruik

Onderstaande tabel toont het gerapporteerde energieverbruik in PJ van de ICT-sector door verschillende bronnen voor de jaren 2018-2021. Data van het CBS laat zien dat het elektriciteitsverbruik van de sector Informatie en Communicatie<sup>14</sup> 19 PJ was in 2021 (4,9 TWh). Uit cijfers van RVO en TNO komt naar voren dat het energieverbruik van ICT in de dienstensector 16 PJ bedroeg in 2021. Verder verschilt het gerapporteerde energieverbruik in 2020 waarbij CBS en RVO/TNO respectievelijk 15,9 PJ en 15,6 PJ rapporteren, terwijl het gerapporteerde energieverbruik volgens het MJA-Sectorrapport ICT in dat jaar 18,7 PJ bedroeg. [31]

<sup>14</sup> Hier vallen ook bedrijfsactiviteiten onder die niet onderdeel uitmaken van de digitale sector (zoals uitgeverijen en film- radio- en tv-productie)



Tabel 5: Gerapporteerd energiegebruik (in PJ) van de ICT-sector 2018-2021 door verschillende bronnen. [32] [33] [34]

	2018	2019	2020	2021
<b>CBS</b>	13,1	14,6	15,9	19
<b>RVO/TNO</b>	15,5	16,2	15,6	16
<b>MJA-Sectorrapport</b>	19	18,8	18,7	-

Het energieverbruik van de digitale sector dat naar voren komt uit de berekening in dit onderzoek, ligt aanzienlijk hoger dan de getallen in bovenstaande tabel. Dit kan worden verklaard door de beperktere afbakening van de ICT-sector bij het rapporteren van energieverbruik in bovenstaande drie bronnen. Het CBS rapporteert over de geleverde elektriciteit voor bedrijfstak J (Informatie en communicatie), RVO en TNO rapporteren over het energieverbruik van de dienstensector ICT en het MJA-Sectorrapport heeft als afbakening de MJA3-ICT sector. Deze drie publicaties hebben dus een beperktere afbakening. In dit onderzoek kijken we immers naar de digitale sector, wat breder is dan alleen de ICT-sector.

Verder schat een recente studie dat de ICT-sector in 2020 verantwoordelijk was voor ongeveer 4% van het wereldwijde energieverbruik. [35] Als we het geschatte energieverbruik uit onze modellering vergelijken met het totale energieverbruik in Nederland, komt dit uit op ongeveer 1,8% (52,8 PJ gedeeld door 3000 PJ). [36]

In recent onderzoek van Ecorys is ook gekeken naar het energieverbruik van (een deel van) de digitale sector in 2020. Dialogic heeft tijdens de uitvoering van dit onderzoek inzage gehad in een conceptversie van het betreffende onderdeel. De uitkomsten van het onderzoek komen overeen. Er zijn twee fundamentele verschillen in de afbakening van beide onderzoeken:

- De categorieën "Eindgebruikersapparaten" en "TV's" vallen volledig buiten scope van het onderzoek van Ecorys. Het totale energieverbruik van de digitale sector komt in dit onderzoek daardoor (19 PJ) hoger uit.
- In de hier gehanteerde categorie "Netwerken" nemen wij zowel het stroomverbruik aan zijde van de netwerkaanbieder als dat aan zijde van de afnemer (van modems en andere apparatuur) mee. De eerste component komt zowel qua definitie als resultaten overeen met het onderdeel 'Datatransport' in het onderzoek van Ecorys. De laatste component is in het onderzoek van Ecorys buiten scope. Het energieverbruik in onze categorie "Netwerken" komt daardoor in totaal hoger uit dan het energieverbruik in de categorie "Datatransport" van Ecorys.

In het onderzoek van Ecorys wordt daarnaast voor het inschatten van de uitstoot uitgegaan van het emissieprofiel van de daadwerkelijke stroomafname binnen de sector. Dit betekent concreet dat Ecorys het afnemen van groene stroom meeneemt bij het bepalen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot, waardoor de inschattingen van de uitstoot lager uitkomen. In ons onderzoek is primair gerekend met emissiefactoren op *systeemniveau*, maar tonen we resultaten voor beide attributiemethoden.

#### 4.4.2 Emissies

Verschillende studies schatten het aandeel van de scope 1 en scope 2 emissies van de ICT-sector op wereldwijde CO<sub>2</sub>-emissies tussen de 1,4% en 2,1%. Zoals in Tabel 6 weergegeven

schat een recente studie door Malmudin et al. dat de ICT-sector in 2020 verantwoordelijk was voor ongeveer 1,5% van de wereldwijde CO<sub>2</sub>-emissies. [35] De andere twee publicaties schatten de scope 1 en scope 2 uitstoot ('use phase emission') op 1,4% en 2,1%. Als ook de scope 3 emissies worden meegenomen, variëren de schattingen van 1,9% tot 4% van de wereldwijde CO<sub>2</sub>-uitstoot.

Tabel 6: Geschatte CO<sub>2</sub>-uitstoot van de ICT-sector in 2020 als onderdeel van de wereldwijde CO<sub>2</sub>-uitstoot. [9]

	CO <sub>2</sub> -emissies scope 1-2	CO <sub>2</sub> -emissies scope 1-3
<b>Malmudin et al. (2023) [35]</b>	1,50%	2,40%
<b>Andrae (2020) [37]</b>	1,40%	1,90%
<b>Belkhir &amp; Elmegli (2018) [38]</b>	2,10%	3,00%
<b>Bieser et al. (2023) [39]</b>		1,5 – 4%

Wanneer we kijken naar bovenstaande schattingen, dan zijn de resultaten van onze modellering iets hoger. Volgens ons model zijn de scope 2 emissies van de digitale sector in Nederland goed voor ongeveer **2,1%** van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot in Nederland. Dit zou kunnen komen door een iets andere gehanteerde scope en door een relatief grotere digitale sector in Nederland vergeleken met andere landen wereldwijd.

Om de resultaten van dit onderzoek in context te plaatsen is het tot slot relevant om te kijken naar de relatieve omvang van de uitstoot binnen de hier gehanteerde afbakening (scope 1 en scope 2) ten opzichte van de totale uitstoot. Voor datacenters lijkt de meeste uitstoot zich in de gebruiksfase, en daarmee onze scope 1 en scope 2, te bevinden [40] [38] [3]. In [39] wordt op basis van diverse bronnen becijferd dat ongeveer 60% van de emissies in de ICT-sector voortkomen uit servers, opslagsystemen en netwerken. De resterende 40% komt voort uit koeling en air conditioning, noodstroomvoorzieningen en gerelateerde diensten. [41] [42].

## 5 Scenarioanalyse

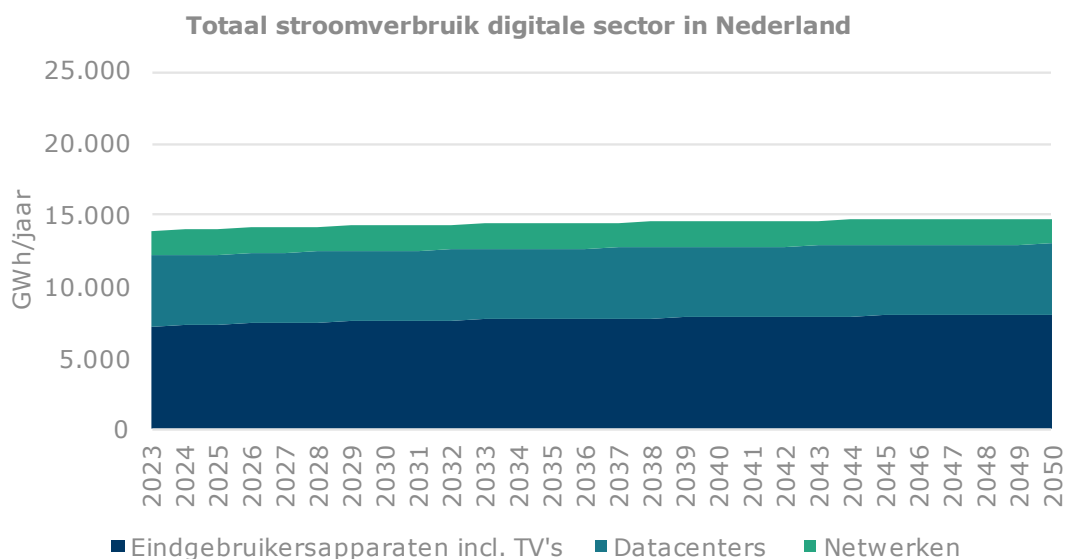
In dit hoofdstuk presenteren we voorspellingen voor het elektriciteitsverbruik en de scope 2 CO<sub>2</sub>-emissies van de digitale sector in de toekomst. We baseren deze voorspellingen op een aantal trends en scenario's. Deze trends en scenario's beïnvloeden variabelen in ons model. Allereerst passen we algemene trends toe op de modelparameters (denk hierbij bijvoorbeeld aan de bevolkingsontwikkeling). Vervolgens definiëren we een viertal scenario's, die voortkomen uit verschillende paden waarlangs de vraag naar digitale diensten enerzijds en de efficiëntie van digitale diensten anderzijds zich zou kunnen gaan ontwikkelen. Hierna bespreken we scenario's op het gebied van de energiemix (de mate waarin elektriciteitsproductie CO<sub>2</sub>-uitstoot). Tot slot gaan we in op een aantal concrete besparings-opties.

### 5.1 Algemene trends

Een aantal trends speelt in alle scenario's (en nemen we in alle scenario's op dezelfde wijze mee):

- **Bevolkingsgroei.** Dit leidt tot (onder andere) groei van het aantal eindgebruikersapparaten en het aantal mobiele aansluitingen. Als bron hanteren we de prognoses van het CBS van 2021. [43]
- **Groei van het aantal huishoudens in Nederland.** Dit leidt primair tot een groei van het aantal vaste internetaansluitingen en het aantal eindgebruikersapparaten (primair televisies). We hanteren de Huishoudensprognose 2021-2070 van het CBS als bron. [44]

Figuur 26 toont het effect van de algemene trends op het stroomverbruik van de digitale sector in Nederland. Alle overige parameters blijven gedurende de jaren gelijk. Dit is uiteraard geen aannemelijk scenario (zie verderop), maar deze rekenwijze maakt wel de gevolgen van bevolkings- en huishoudensgroei in het model inzichtelijk.



Figuur 26 De groei van het stroomverbruik van de digitale sector in Nederland door de algemene trends (bron: Dialogic)

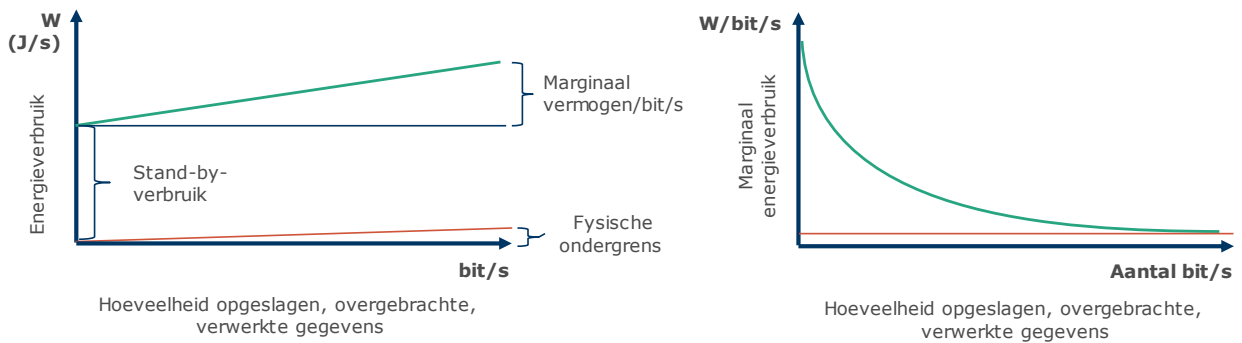
In het model is het stroomverbruik van datacenters onafhankelijk van het aantal inwoners en huishoudens in Nederland, het verbruik van deze categorie blijft daarom even groot. Het aantal eindgebruikersapparaten is direct gekoppeld aan het aantal huishoudens en de bevolkingsgrootte in Nederland. Het is daarom evident dat deze categorie verantwoordelijk is voor de grootste toename in stroomverbruik in dit scenario. Het stroomverbruik neemt van **13,9 TWh** in 2023 toe naar **14,3 TWh** in 2030 waarvan ongeveer **0,3 TWh** toename wordt veroorzaakt door een toename in het aantal eindgebruikersapparaten. Het stroomverbruik groeit verder naar **14,5 TWh** in 2040 en naar **14,8 TWh** in 2050.

## 5.2 Scenario's efficiëntie digitale technologie vs. behoeftegroei

In de afgelopen jaren groeide het volume van opgeslagen, verwerkte en overgebrachte data exponentieel met tientallen procenten per jaar. [45] [46] [47, p. 14] Deze groei laat zich deels verklaren door de groei van het aantal internetgebruikers/aansluitingen (vooral op wereldwijd niveau), de introductie van nieuwe diensten, de adoptiegroei van bestaande diensten, 'kwaliteitsgroei' (bijvoorbeeld foto's en video's met hogere resoluties) en 'intensiteitsgroei' (bijvoorbeeld: er worden meer uren streaming video gekeken). [48]

De vraag rijst of en hoe deze toegenomen behoefte in relatie staat tot de energie die nodig is om eraan te kunnen voldoen. Fysisch gezien kost het overbrengen, opslaan en verwerken van informatie altijd een bepaalde hoeveelheid energie, die afhankelijk is van de hoeveelheid informatie. De Shannon-von Neumann-Landauer (SNL)-limiet bepaalt hoeveel energie er minimaal nodig is om één bit aan informatie te verwerken. [49] [50] [51] In theorie betekent een toename van de hoeveelheid (verwerkte, opgeslagen, overgebrachte) data dan ook een evenredige groei in energieverbruik.

In de praktijk gaat deze redenering echter niet direct op. Allereerst speelt bij digitale infrastructuur over het algemeen een hoog 'stand-byverbruik'. Dat wil zeggen dat een server, een basisstation, et cetera een bepaald energieverbruik hebben zelfs wanneer er géén data-keer is, en dit energieverbruik relatief hoog is ten opzichte van het marginale meerverbruik per hoeveelheid data. Figuur 27 toont dit schematisch. Hoe méér data er wordt verwerkt, hoe efficiënter dit over het algemeen gebeurt (in termen van energieverbruik per bit). Daar staat uiteraard tegenover dat wanneer er méér apparatuur nodig is om een bepaalde databehoeftte in te vullen, en er daardoor meer stand-byverbruik is (vanwege overcapaciteit), de efficiëntie weer terugloopt. Een analogie is te maken met een passagiersvliegtuig: omdat het grootste deel van het gewicht (en daarmee brandstofverbruik en uitstoot) voortvloeit uit het gewicht van het toestel zélf, is de hoeveelheid uitstoot per passagier dubbel zo groot bij een halfgevuuld vliegtuig (het gewicht van de extra passagiers leidt weliswaar tot een iets hoger gewicht en daarmee uitstoot, maar *grosso modo* wordt de uitstoot om het toestel zélf in de lucht te krijgen efficiënter ingezet). Er is pas (substantieel) meer uitstoot wanneer het aantal passagiers groeit en er meer vliegtuigen de lucht in moeten.



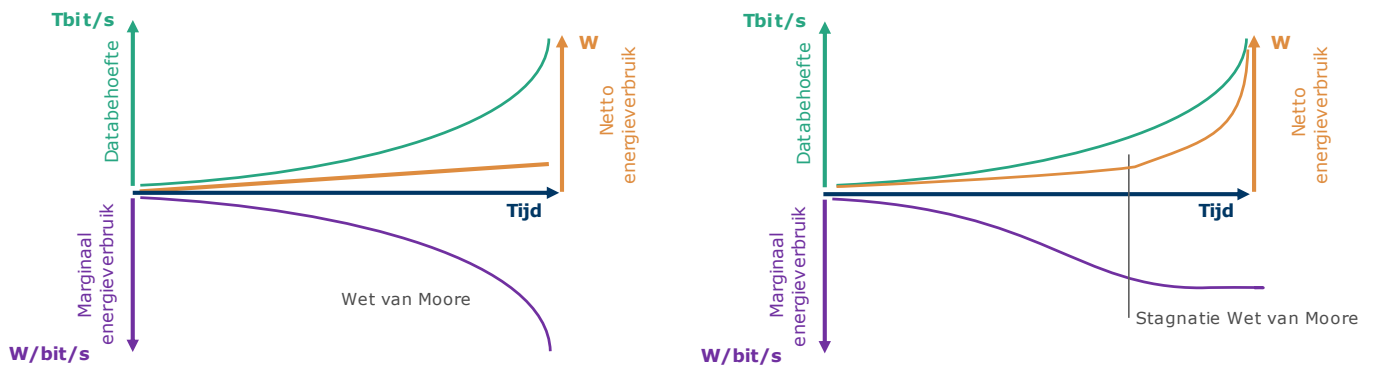
*Figuur 27 Relatie tussen energieverbruik en de hoeveelheid gegevens die wordt opgeslagen, overgebracht, verwerkt. (bron: Dialogic)*

Ten aanzien van dat laatste punt speelt in de digitale sector nog een andere dynamiek. Dankzij de voortdurende verbetering in efficiëntie van halfgeleiders neemt het energieverbruik van chips (per bit) tot nu toe exponentieel af. De 'Wet van Moore' (overigens eerder een voorspelling dan een wetmatigheid, maar wel een die bepalend is voor de cadans van de digitale sector) stelt dat de dichtheid van transistors op chips iedere twee jaar verdubbelt, wat leidt tot een toename van efficiëntie. [52] In de analogie met vliegtuigen betekent dit dat het aantal stoelen per vliegtuig iedere twee jaar toeneemt – het aantal passagiers kan in diezelfde tijd dus eveneens verdubbelen terwijl het brandstofverbruik slechts marginaal toeneemt.

Van zowel de Wet van Moore als de groei van onze databehoeftte wordt gesteld dat deze op enig moment zal moeten stagneren, primair vanwege het feit dat oneindige groei strijdig zou zijn met fysische grenzen. [53] Wanneer de grenzen van de Wet van Moore eerder worden bereikt dan de grenzen aan de groei van de databehoeftte, zou dit vanaf dat moment kunnen leiden tot een snellere groei van het energieverbruik (immers, de Wet van Moore compenseert de groei dan niet meer met verhoging van efficiëntie). [2] Figuur 28 toont dit schematisch, waarbij links het scenario wordt getoond waarin zowel databehoeftte als de Wet van Moore doorgroeien en elkaar compenseren, en rechts het scenario waarin de verbetering van het marginale energieverbruik stagneert terwijl de databehoeftte blijft doorgroeien.

Bij dit scenario kan overigens de vraag worden gesteld in hoeverre databehoeftte voor een deel aanbod gedreven is (het feit dat er efficiëntiegroei is aan de chipkant veroorzaakt wellicht vraaggroei – de efficiëntiegroei leidt immers ook tot lagere marginale kosten van eindproducten en diensten). Daarnaast is efficiëntiegroei niet uitsluitend het gevolg van de Wet van Moore. Zo bestaat er een 'trade-off' tussen enerzijds het gebruiken van nieuwere, snellere chips, en anderzijds het investeren in de ontwikkeling van efficiëntere software<sup>15</sup>. Zolang de Wet van Moore van kracht blijft, kan het economisch gezien verstandiger zijn te wachten op een snellere chip dan ontwikkelaars in te huren om software te verbeteren.

<sup>15</sup> Bij het efficiënter maken van software spelen marginale meeropbrengsten. Ter illustratie: in [80] wordt het energieverbruik van verschillende formaten voor afbeeldingen vergeleken. Hoewel het recent ontwikkelde WebP-formaat hier het beste scoort, is de verbetering ten opzichte van het twintig jaar oude JPEG marginaal.



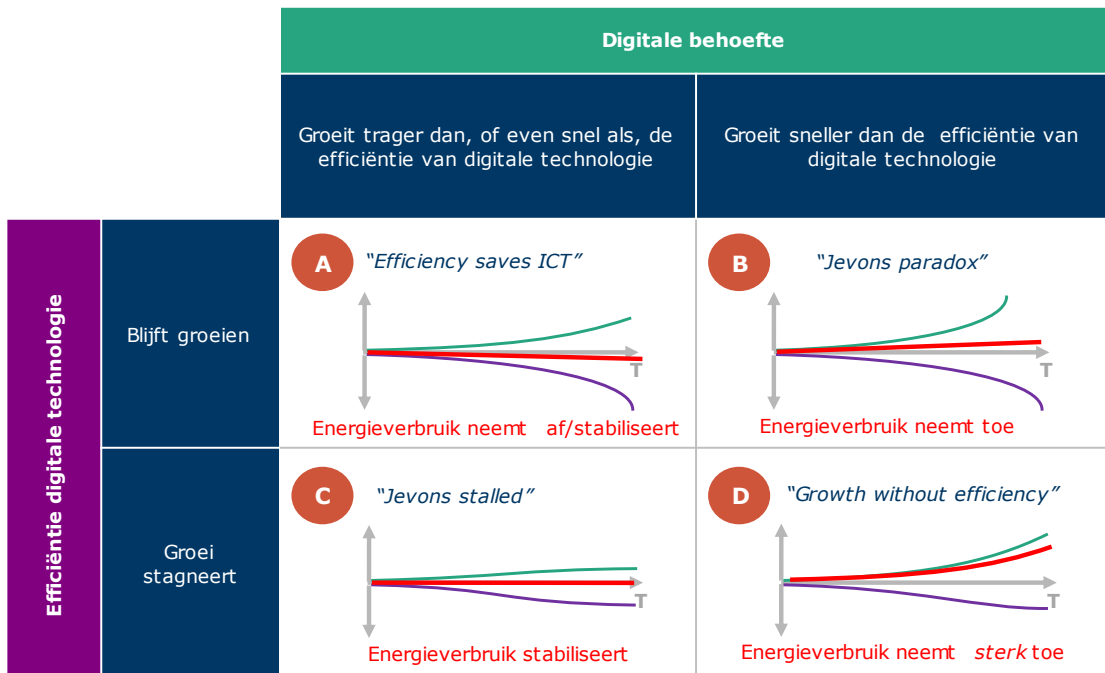
Figuur 28 De balans tussen de ontwikkeling van de efficiëntie van digitale technologie ('Wet van Moore') en de exponentiële groei van databehoefte. Links het scenario waarin beiden doorgroeien, rechts het scenario waarin de efficiëntieverbetering stagneert. (bron: Dialogic)

In [9] wordt de dynamiek tussen efficiëntiegroei als gevolg van ICT enerzijds en groei van vraag naar ICT anderzijds besproken, en worden vier scenario's benoemd (Tabel 7).

- A. De efficiëntiegroei van ICT zet door, terwijl de vraag naar ICT groeit in lijn met of langzamer dan de efficiëntiegroei ("efficiency saves IT"). In dit geval stabiliseren of dalen emissies. Zoals hierboven beschreven lijkt dit het huidige scenario te zijn. [10]
- B. De efficiëntiegroei van ICT zet door, terwijl de vraag naar ICT (nog) harder groeit ("Jevons paradox"). ICT-efficiëntiegroei kan de vraaggroei niet bijbenen, en emissies stijgen dus (mogelijk tijdelijk, als de vraag op een gegeven moment weer stabiliseert en efficiëntie desondanks doorgroeit). Dit scenario komt overeen met de 'Jevons Paradox'.<sup>16</sup>
- C. De efficiëntiegroei van ICT stagneert, maar de vraag ook ("Jevons stalled"). In dit geval stabiliseren ook de emissies (in feite 'bevriest' het status quo).
- D. De efficiëntiegroei van ICT stagneert, terwijl de vraaggroei doorzet ("Growth without efficiency"). In dit scenario stijgen emissies sterk.

<sup>16</sup> Het fenomeen dat technologische vooruitgang die leidt tot efficiënter gebruik van grondstoffen leidt tot vergroting van de vraag, en daardoor netto tot een verhoging van het gebruik van grondstoffen. Het werd voor het eerst geobserveerd in 1865 in het kader van efficiëntieverbeteringen van het gebruik van kolen. [70]

Tabel 7 Scenario's voor de groei van efficiëntie van ICT versus scenario's voor de groei van vraag naar ICT (bron: Dialogic; bewerking van tabel uit [9] onder de CC-BY-4.0 licentie). Horizontaal in de grafieken is de tijdsas getekend. Groen en paars stellen respectievelijk de digitale behoefte en (omgekeerd) de efficiëntie van digitale technologie voor. Rood betreft de emissies uit de digitale sector.



### Modellering

In het model wordt het energieverbruik van de digitale sector bepaald op basis van een set parameters, waarvan een deel gerelateerd is aan de vraagzijde (ontwikkeling aantal aansluitingen, dataverkeer, et cetera) en een deel gerelateerd is aan de efficiëntie (bijvoorbeeld: het energieverbruik per overgebrachte hoeveelheid data). In de verschillende scenario's variëren we de ontwikkeling van deze parameters.

Allereerst categoriseren we de parameters: een parameter is ofwel gerelateerd aan de vraag, ofwel aan de efficiency. Voor alle parameters schatten we vervolgens twee waarden:

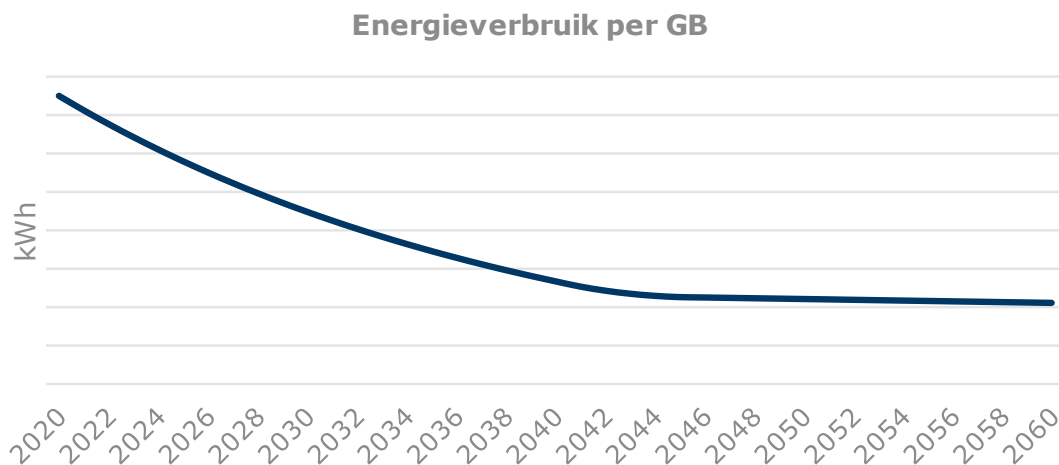
- Een groeipercentage (CAGR: *compound annual growth rate*). Ieder opvolgend jaar wordt de parameter vermenigvuldigd met dit percentage, wat leidt tot exponentiële groei of daling.
- Een absoluut groeigetal. Ieder jaar wordt de parameter vermeerderd of verminderd met dit getal, wat leidt tot lineaire stijging of daling.

Voor ieder scenario bepalen we vervolgens, separaat voor vraag en efficiency, de periode waarin sprake is van exponentiële ontwikkeling en de periode (daarna) waarin sprake is van lineaire ontwikkeling. We definiëren een 'overgangperiode' waarin exponentiële ontwikkeling overgaat in lineaire ontwikkeling (in de overgangperiode hanteren we een lineaire interpolatie tussen beiden). Deze methode volgt op hoofdlijnen de methode uit [2], waarin 'het einde van de Wet van Moore' op willekeurige momenten wordt ingezet in een Monte Carlosimulatie. Onderstaande Tabel 8 toont de gekozen parameters per scenario.

Tabel 8 Scenario's voor exponentiële versus lineaire groei voor de vraagzijde en efficiency (bron: Dialogic)

	Vraagontwikkeling stagneert vanaf	Vraagontwikkeling stagneert tot	Efficiencyontwikkeling stagneert vanaf	Efficiencyontwikkeling stagneert tot
<b>0. Geen enkele vraaggroei (alleen algemene trends)</b>	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
<b>A "Efficiency saves ICT"</b>	2035	2040	2040	2045
<b>B "Jevons paradox"</b>	(niet)	(niet)	2040	2045
<b>C "Growth without efficiency"</b>	(niet)	(niet)	2030	2035
<b>D "Jevons stalled"</b>	2030	2035	2030	2035

Een voorbeeld ter illustratie van deze werkwijze is hieronder weergegeven in Figuur 29. In dit voorbeeld hanteren we een exponentiële daling voor de periode tot 2040. Vanaf 2045 hanteren we een vaste daling per jaar. Tussen 2040 en 2045 hanteren we een combinatie van beiden (in 2041 nog  $4/5^e$  van de exponentiële daling en  $1/5^e$  van de lineaire daling, in 2044 vice-versa).



Figuur 29 Illustratie modellering exponentiële versus lineaire ontwikkeling van parameters

### 5.2.1 Resultaten

Tabel 6 toont het cumulatieve elektriciteitsverbruik en de cumulatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot tot 2050 gegeven de vijf verschillende scenario's. Zoals eerder benoemd hebben in het nulscenario enkel bevolkingsgroei en de toename van het aantal huishoudens effect op het geschatte elektriciteitsverbruik en de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Dit scenario dient hiermee als baseline scenario om het effect van de efficiëntie van de digitale technologie en de behoeftegroei inzichtelijk te maken.



Tabel 9 Resultaten voor de vijf scenario's (efficiëntie digitale technologie vs. vraaggroei) in de toekomst (bron: Dialogic). Emissies op basis van het locatiegebaseerde perspectief (emissiefactoren op systeemniveau)

Mton CO <sub>2</sub> -uitstoot in jaar:	2023	2030	2040	2050
0 Alleen algemene trends (bevolking/hh)	3,33	0,79	0,11	0,01
A "Efficiency saves ICT"		0,79	0,11	0,01
B "Jevons paradox"		0,93	0,15	0,02
C "Growth without efficiency"		0,93	0,15	0,02
D "Jevons stalled"		0,93	0,13	0,02

Elektriciteitsverbruik in jaar (GWh):	2023	2030	2040	2050
0 Alleen algemene trends (bevolking/hh)	14,7	14,3	14,6	14,8
A "Efficiency saves ICT"		16,8	18,8	19,0
B "Jevons paradox"		16,8	19,5	22,2
C "Growth without efficiency"		16,8	19,5	22,2
D "Jevons stalled"		16,8	17,5	17,8

### 5.3 Ontwikkelingen in de energiemix

Richting de toekomst toe moet rekening worden gehouden met ontwikkelingen in de elektriciteitsmix. De transitie naar hernieuwbare energiebronnen zal leiden tot een lagere uitstoot. De vraag is hoe de CO<sub>2</sub>-emissiefactor van de elektriciteitsproductie zich in de toekomst zal gaan ontwikkelen. Vanaf 2030 geldt een verbod op het gebruik van kolen bij de productie van elektriciteit. Ook zal naar verwachting in 2030 een groot gedeelte (75-90%) van de elektriciteit afkomstig zijn uit hernieuwbare bronnen (vooral wind op zee). [54] De ambitie is hierbij dat in 2030 jaarlijks 90 TWh wordt opgewekt uit wind op zee, 35 TWh uit zon- en windenergie op land en 7 TWh uit kleinschalige opwek (vooral zonenergie van huishoudens). In lijn met de doelen van de Europese Klimaatwet is het streven van de Nederlandse overheid om in 2050 volledig CO<sub>2</sub>-neutrale elektriciteitsproductie te realiseren.

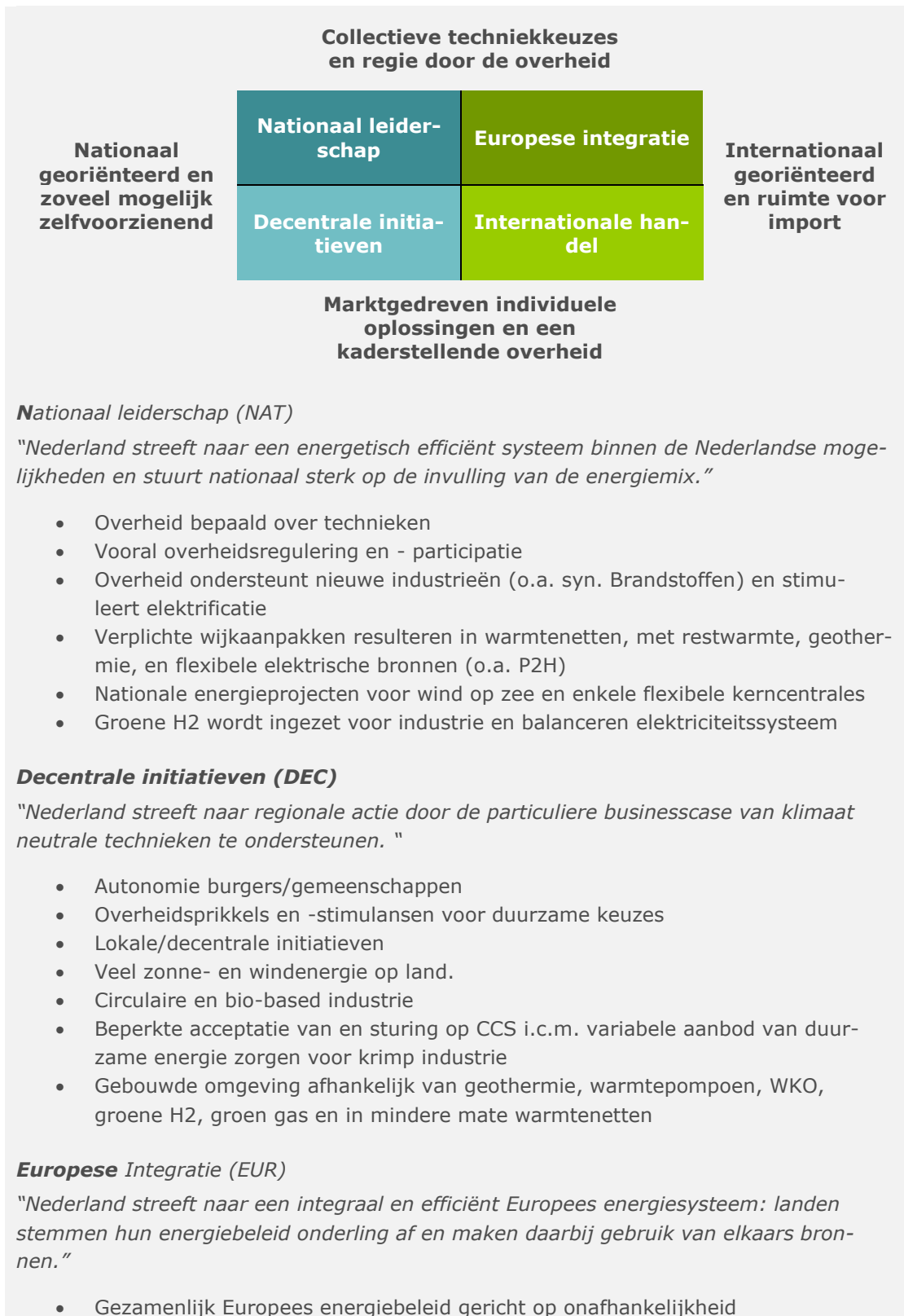
In voorbereiding op deze ontwikkelingen hebben Nederlandse netbeheerders een Integrale Infrastructuurverkenning gedaan voor de periode 2030 tot 2050 (hierna: II3050). Deze verkenning bevat vier uiteenlopende scenario's die ontwikkelingen in het toekomstige energiesysteem schetsen, waaronder ook mogelijke ontwikkelingen in de energiemix. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van deze scenario's om mogelijke toekomstige emissiefactoren van stroom in kaart te brengen. Hieronder wordt kort toegelicht hoe de scenario's tot stand zijn gekomen en hoe deze zijn gebruikt om de toekomstige emissiefactor voor ons model te berekenen.

De vier scenario's uit II3050 hanteren fundamenteel andere uitgangspunten voor de toekomstige ontwikkeling van de energievoorziening. Ieder scenario hetzelfde eindpunt, namelijk een klimaatneutraal energiesysteem. Hoe dit energiesysteem er precies uitziet verschilt echter per scenario. Het DESTEP-scenarioraamwerk<sup>17</sup> is gebruikt om op een gestructureerde wijze zekere en onzekere ontwikkelingen in kaart te brengen. Op basis van dit raamwerk zijn markt- en internationale ontwikkelingen, technologische ontwikkelingen,

<sup>17</sup> Het DESTEP-scenarioraamwerk wordt gebruikt om relatief zekere en onzekere trends te identificeren met behulp van zes overkoepelende thema's: 1) demografische ontwikkelingen; 2) economie, welvaart, markt en internationale ontwikkelingen; 3) sociale omstandigheden en levensstijl; 4) technologieontwikkeling en adoptie; 5) ecologie, zorg landschap; en 6) politiek, bestuur, beleid, plannen en programma's.

en beleids-/bestuurlijke ontwikkelingen geïdentificeerd als de meest onzekere trends. Deze dimensies worden dan ook gebruikt om de scenario's te onderscheiden en de verhaallijnen te differentiëren. De vier scenario's worden geplot en kort samengevat in Box 1.

Box 1. II3050-scenario's [55]



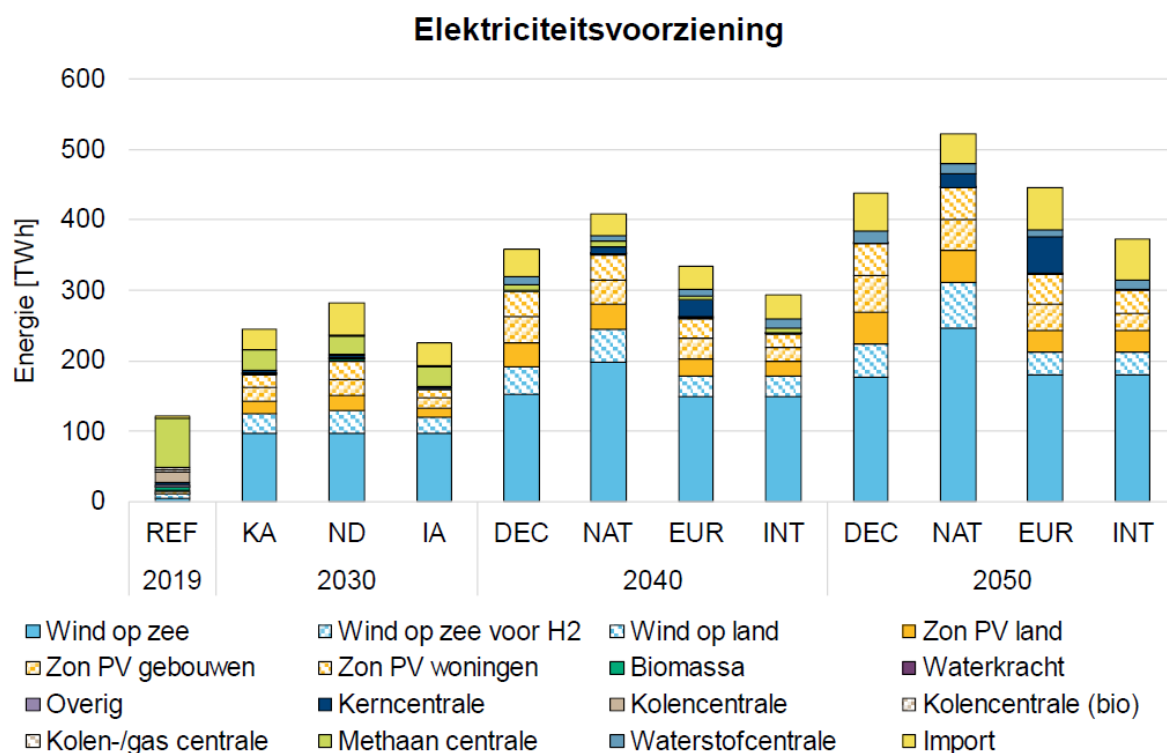
- Benutting groen gas
- Groei van zonne-, wind- en kernenergie (tot 8 GW)
- Int. samenwerking voor wind op Noordzee
- Elektrificatie industrie en benutting biomassa en H<sub>2</sub>
- Grote schaal CCS-toepassing voor BECCS en blauwe H<sub>2</sub>
- Regie en wijkaanpakken leiden tot warmtenetten
- Europees netwerk van laadinfra en uitbreiding van het HSL-netwerk voor mobiliteit

### ***Internationale Handel (INT)***

*"Nederland streeft naar ontwikkeling van de eigen economie door maximaal in te zetten op de internationale wereldwijde energie- en grondstoffenketens."*

- Gebruik int. grondstoffen- en energiemarkt
- Minimale kosten
- Ondersteunende prikkels (o.a. subsidies en CO<sub>2</sub>-beprijzing)
- Import H<sub>2</sub> en andere dragers
- Gebouwde omgeving gebruikt hybride oplossingen i.c.m. H<sub>2</sub>
- Industrie elektrificeert en gebruikt H<sub>2</sub>
- Deel industrie verdwijnt door wereldwijde handelsketens
- Nederlands specialiseert in het verwerken van halffabricaten
- Productie groene H<sub>2</sub> in NL gekoppeld aan wind

De Integrale Infrastructuurverkenning bevat voor ieder scenario een overzicht van de toekomstige elektriciteitsvoorziening in de jaren 2030, 2040 en 2050. Figuur 1 geeft een overzicht van de elektriciteitsvoorziening zoals deze wordt geraamd in ieder scenario. De scenario's KA (Klimaatambitie), ND (Nationale Drijfveren) en IA (Internationale Ambitie) voor 2030 zijn gebaseerd op een eerdere scenariostudie van de netbeheerders. [55] Zoals te zien is in de figuur verschillen de scenario's onder meer in het gebruik van kernenergie, waterstof en biobrandstoffen.



Figuur 30. Aanbod van elektriciteit in verschillende toekomstscenario's. Bron: Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050, tussenrapportage [55]

De informatie in Figuur 30 is gebruikt in combinatie met de emissiefactoren van individuele energiebronnen om per scenario een emissiefactor te berekenen. De emissiefactoren van individuele energiebronnen worden samengevat in Tabel 10. De meeste cijfers zijn afkomstig van [co2emissiefactoren.nl](http://co2emissiefactoren.nl), een website met door de overheid en experts erkende emissiefactoren. Voor kolen, gas en olie is geen emissiefactor voor elektriciteit beschikbaar. De emissiefactoren van kolen en gas zijn daarom gebaseerd op data van CBS. [56] De emissiefactor van olie is handmatig berekend op basis van de emissiefactor bij verbranding en de gemiddelde efficiëntie van olie-energiecentrale (40%). [57] Voor waterstof is aangenomen dat alle waterstofproductie groen (met energie uit duurzame bronnen) of blauw (met energie uit fossiele bronnen en CO<sub>2</sub>-afvang) is en dat de emissiefactor daarom 0 g/kWh betreft. Dit omdat waterstof volgens alle scenario's pas in 2040 grootschalig wordt toegepast.

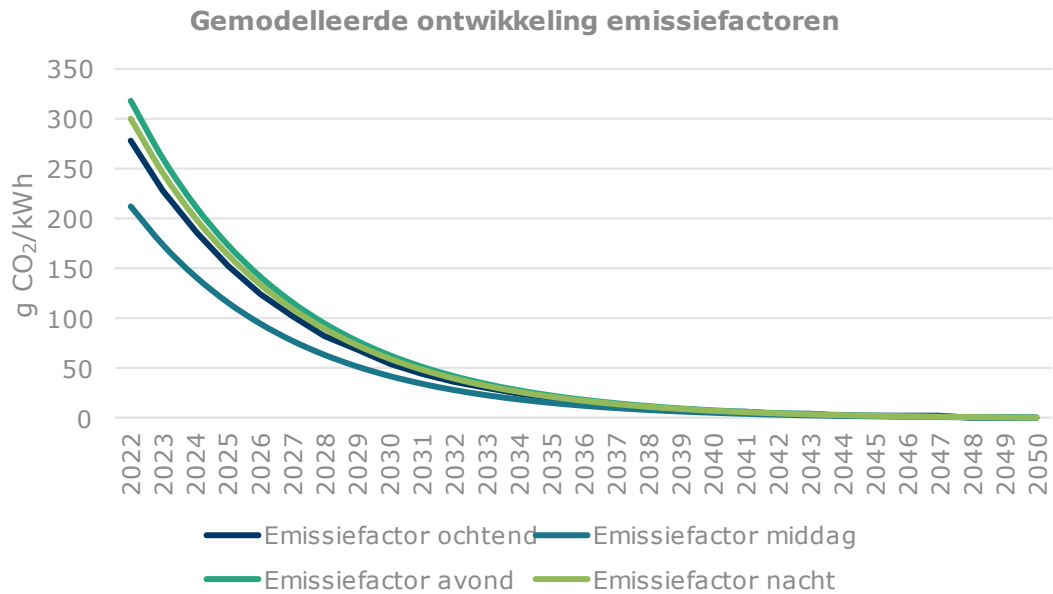
Tabel 10. Emissiefactoren van individuele elektriciteitsbronnen. Bron: CBS & [co2emissiefactoren.nl](http://co2emissiefactoren.nl).

Elektriciteitsbron	g CO <sub>2</sub> /kWh
Wind op zee	0
Wind op land	0
Zon	0
Uranium	0
Overig hernieuwbaar	0
Import (stroom onbekend)	337
(Bio)gas	380
Kolen	830
Olie	659
Biomassa & afval	44
Waterstof	0

In 2030 heeft het scenario Internationale Ambitie de laagste emissiefactor en het scenario Nationale Drijfveren de hoogste. In 2040 heeft het scenario Nationaal Leiderschap de laagste emissiefactor en het scenario Decentrale Initiatieven de hoogste. In 2050 resulteren alle scenario's in een emissiefactor van 0 g CO<sub>2</sub>/kWh, aangezien de scenario's uitgaan van een klimaatneutraal energiesysteem.

### 5.3.1 Resultaten

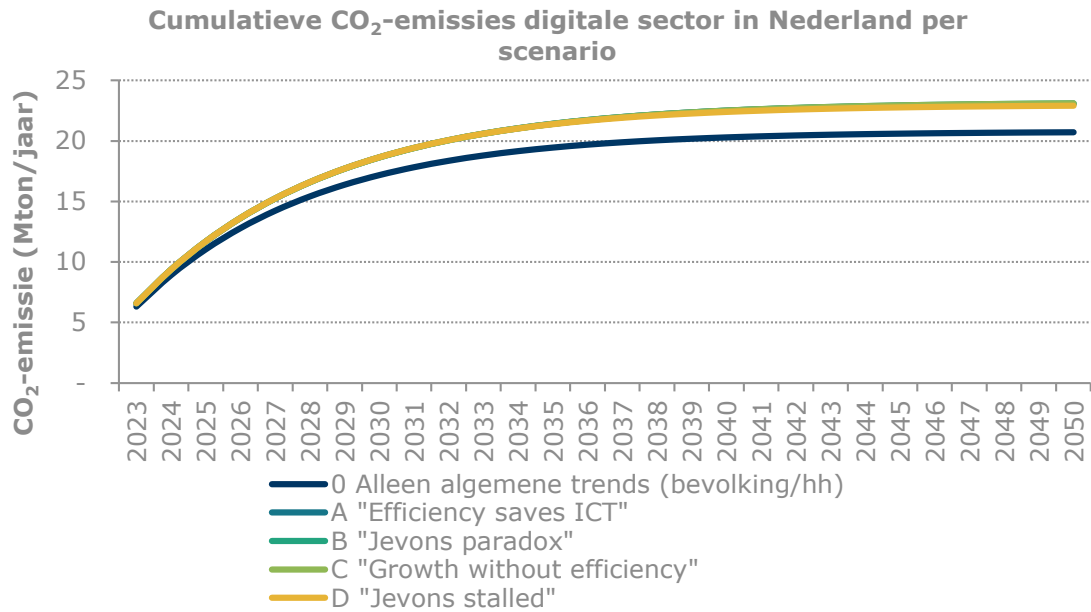
Figuur 31 geeft een overzicht van de gemodelleerde toekomstige emissiefactor van elektriciteit per dagdeel, zoals berekend met behulp van de II3050-scenario's.<sup>18</sup>



Figuur 31 Gemodelleerde ontwikkeling van de energiemix en emissiefactoren.

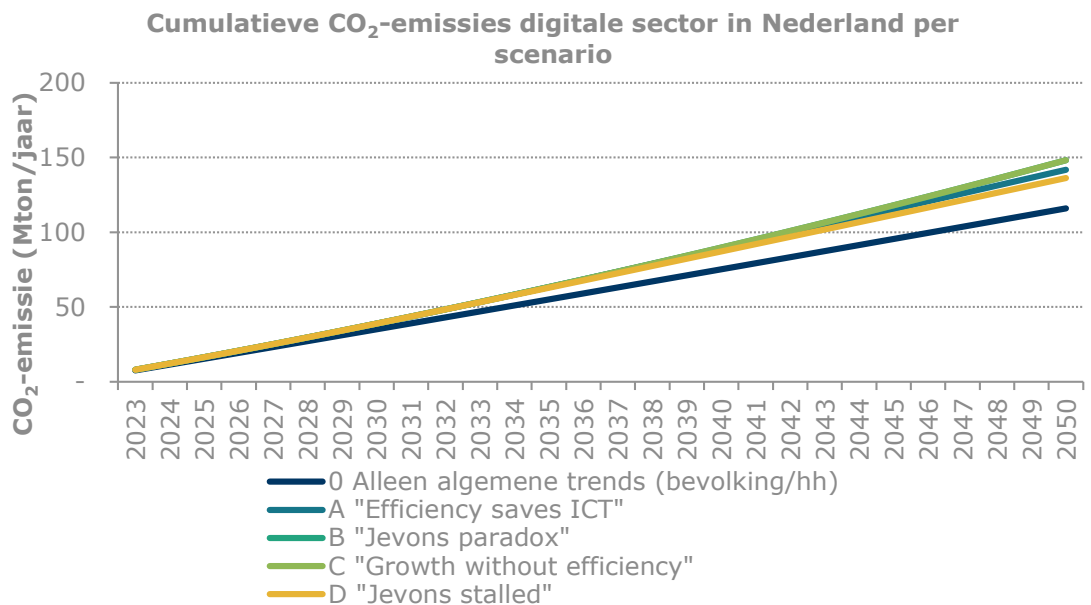
In paragraaf 5.2.1 wordt uitgegaan van dit scenario, waarin de energiemix uit een steeds groter deel hernieuwbare bronnen bestaat, en de emissiefactoren in 2050 nul zijn. Als gevolg daarvan vinden de meeste emissies plaats in de eerste jaren. Figuur 32 laat dit zien.

<sup>18</sup> De ontwikkeling van de daling van de emissiefactoren is gebaseerd op een gemiddelde van de laagste en hoogste waarden uit de II3050-scenario's voor drie meetjaren (2030, 2040 en 2050). Onder de aanname dat de daling exponentieel is (een percentage per jaar) is een curve gefit en zijn de emissiefactoren per toekomstig jaar berekend relatief ten opzichte van 2023. Vervolgens zijn emissiefactoren in 2023 uitgesplitst naar dagdelen en toegepast op deze indexcijfers om tot de absolute emissiefactoren voor de toekomstige jaren te komen.



Figuur 32 Gemodelleerde cumulatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot van de digitale sector in Nederland in de verschillende scenario's, uitgaand van een steeds groenere energiemix (lagere emissiefactoren). Emissies op basis van het locatiegebaseerde perspectief (emissiefactoren op systeemniveau)

De aanname dat de elektriciteitsvoorziening in 2050 klimaatneutraal is, is in het kader van ons model een tekortkoming van deze scenario's. De scenario's sluiten namelijk aan op de klimaatambities, terwijl er geen garantie is dat deze daadwerkelijk gerealiseerd worden. Om aan te geven hoe groot de impact hiervan is, toont Figuur 33 de resultaten wanneer voor de gehele looptijd wordt gerekend met de huidige energiemix en bijbehorende emissiefactoren. Vergeleken met Figuur 32 is de cumulatieve uitstoot (in alle scenario's) vele malen hoger.



Figuur 33 Gemodelleerde cumulatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot van de digitale sector in Nederland in de verschillende scenario's, uitgaand van een statische energiemix (emissiefactoren blijven de hele looptijd zoals ze nu zijn). Emissies op basis van het locatiegebaseerde perspectief (emissiefactoren op systeemniveau)

In de praktijk verwachten we uiteraard wel dat het energiesysteem uiteindelijk vergroent, maar het is denkbaar dat de doelen in tijd niet worden gehaald. Om de effecten hiervan te kunnen analyseren is een parameter voor deze vertraging ingebouwd in het model. Dit betekent dat we zowel rekening kunnen houden met een scenario waarin klimaatdoelen worden behaald, als met scenario's waarin de verduurzaming van de elektriciteitsvoorziening langzamer plaatsvindt, en doelen pas na 2050 worden gerealiseerd.

Tabel 11 toont de relatieve verhoging van de cumulatieve uitstoot in het jaar 2050 bij verschillende hoeveelheden vertraging, ten opzichte van een situatie waarin geen vertraging zou optreden en de doelen in 2050 zijn behaald.

Tabel 11 Het effect van een vertraging in de vergroening van de energiemix in cumulatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot tot 2050

Vertraging	Cumulatieve CO <sub>2</sub> -uitstoot in 2050				
	0 Alleen algemene trends (bevolking/hh)	A "Efficiency saves ICT"	B "Jevons paradox"	C "Growth without efficiency"	D "Jevons stalled"
+0 jaar (2023)	16,2 Mton	18,4 Mton	18,5 Mton	18,5 Mton	18,3 Mton
+1 jaar	+18,3%	+18,5%	+18,6%	+18,6%	+18,5%
+2 jaar	+36,6%	+37,4%	+37,4%	+37,4%	+37,3%
+3 jaar	+54,9%	+56,6%	+56,7%	+56,7%	+56,3%
+4 jaar	+73,3%	+76,0%	+76,2%	+76,2%	+75,6%
+5 jaar	+91,7%	+95,7%	+96,0%	+96,0%	+95,1%
+6 jaar	+110,0%	+115,7%	+116,1%	+116,1%	+114,7%
+7 jaar	+128,4%	+135,9%	+136,5%	+136,5%	+134,5%
+8 jaar	+146,8%	+156,3%	+157,1%	+157,1%	+154,3%
+9 jaar	+165,1%	+176,8%	+178,0%	+178,0%	+174,2%
+10 jaar	+183,4%	+197,5%	+199,1%	+199,1%	+194,0%

## 5.4 Besparingsopties

In deze paragraaf gaan we in op een aantal concrete, hypothetische besparingsopties. We kijken hierbij uitsluitend naar de impact op emissies op basis van ons model – daarbij laten we essentiële factoren zoals maatschappelijke wenselijkheid en praktische haalbaarheid buiten beschouwing.

### 5.4.1 Hyperscalers versus kleinere datacenters

Over het algemeen wordt aangenomen dat de efficiëntie van hyperscaler-datacenters beter is dan die van kleinere datacenters (colocatie en on-premises). Waar de maten en andere eigenschappen van bijvoorbeeld servers relatief gestandaardiseerd zijn voor colocatie, hoeft een hyperscaler zich hier niet aan te houden. Door de grotere schaal en lagere variëteit in apparatuur kunnen de hyperscalers zeer specifieke oplossingen realiseren voor bijvoorbeeld voeding en koeling van de hardware.

Daar komt bij dat clouddiensten (die vanuit de hyperscalers worden geleverd) het delen van dezelfde onderliggende hardware (reken-, opslag- en communicatiecapaciteit) zeer eenvoudig maken. De capaciteit kan daardoor veel efficiënter worden ingezet vergeleken met een situatie met veel gereserveerde (en daardoor ook af en toe onvolledig benutte) capaciteit per gebruiker. De (cloud)capaciteit die overdag voor het uitwisselen van werkbestanden wordt gebruikt, kan 's avonds worden gebruikt om een videostreamingdienst of game te faciliteren. Voor individuele applicaties (zoals een videostreamingdienst) hoeft daarnaast minder piekcapaciteit (die het grootste deel van de tijd ongebruikt zou blijven) aan te worden

gehouden: vanwege de omvang kan de infrastructuur van de cloudbaanbieders dergelijke pieken immers eenvoudig opvangen (en doen pieken zich in de praktijk nooit bij alle cloud-toepassingen tegelijk voor).

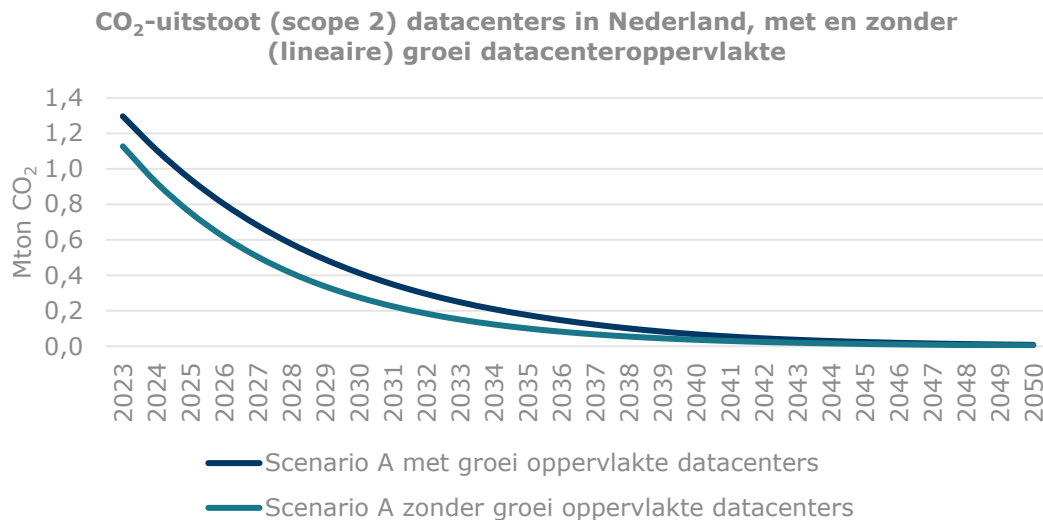
De Rijksoverheid publiceerde in 2022 een ontwerpbesluit over regels voor de vestiging van hyperscale datacenters in Nederland. Hierin wordt onder andere beschreven dat hyperscale datacenters (meer dan 10 hectare grond of meer dan 70 MW) niet meer worden toegestaan, met uitzondering van de twee huidige hyperscale locaties in Nederland; Hollandse Kroon en Eemshaven. De redenen die hiervoor worden aangevoerd zijn dat kleinere datacenters makkelijker in te passen zijn in het landschap, ze een minder grote energievraag hebben en relatief grotere economische meerwaarde hebben.

Daarnaast beschrijft het ontwerpbesluit dat de datacentrumcapaciteit in Nederland relatief hoog is ten opzichte van de binnenlandse vraag (en dus relatief veel capaciteit ten behoeve van buitenlandse vraag zou zijn). De strategie stuurt daarmee aan op een meer evenwichtige verdeling van datacenters binnen Europa. Hoewel dit de (groei van de) CO<sub>2</sub>-uitstoot van datacenters in Nederland zou kunnen doen afnemen, zal deze uitstoot dan simpelweg in een ander land plaatsvinden.

In het model is een beperkte migratie van colocatie- en on-premises datacenters naar hyperscaler datacenters meegenomen. Het weglaten van deze migratie levert een minimaal verschil op (binnen de foutmarges) in de uitkomsten.

#### 5.4.2 De groei van het totale datacenteroppervlakte beperken

Naast het sturen op het *type* datacenters zou de overheid kunnen sturen op het *aantal* datacenters. In ons model kunnen we het effect van dergelijke maatregelen bestuderen door de groei van het totale oppervlakte datacenters op nul te stellen. Figuur 34 toont het effect hiervan op de CO<sub>2</sub>-uitstoot door datacenters. Logischerwijs wordt in de categorie datacenters minder CO<sub>2</sub> uitgestoten wanneer de groei van het oppervlakte lager is.



Figuur 34 Het effect van de groei van het totale oppervlakte van datacenters op de gemodelleerde CO<sub>2</sub>-uitstoot van datacenters. Emissies op basis van het locatiegebaseerde perspectief (emissiefactoren op systeemniveau)

Het is de vraag wat hierbij het handelingsperspectief voor beleid is. Het beperken van de groei van het datacenteroppervlakte leidt waarschijnlijk tot een 'waterbedeffect': gegeven dezelfde digitale behoefte zal datacenterruimte die niet in Nederland kan worden



geacommodeerd, simpelweg in een van onze buurlanden terecht komen. Ervan uitgaand dat de emissiefactoren in onze buurlanden vergelijkbaar zijn met die van Nederland leidt een dergelijke maatregel dus niet tot een netto reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot op mondiaal niveau.

#### 5.4.3 Legacyplatformen: oude systemen vervangen

Mogelijk kunnen er besparingen worden gerealiseerd door oudere systemen vroegtijdig te vervangen door nieuwe. Als gevolg van de efficiëntieontwikkelingen verbruiken oudere systemen immers meer stroom voor hetzelfde resultaat (aantal opgeslagen, verwerkte of overgebrachte bits) dan nieuwere apparatuur. RVO rapporteerde in 2020 een besparing van 319 TJ elektriciteitsverbruik per jaar in de ICT-sector door het uitfaseren van "legacyplatformen". [31] In 2019 betrof het 259 TJ [58] en in 2018 werd 291 TJ gerapporteerd [59]. Bij een gemiddelde emissiefactor van 277,5 g CO<sub>2</sub>/kWh gaat het om tussen de 0,02 en 0,03 Mton reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot per jaar.

In het model zou een dergelijke vervanging kunnen worden meegenomen als een eenmalige verhoging van de efficiëntie met (bijvoorbeeld) 2,5 jaar (uitgaande van een gemiddelde afschrijftermijn van apparatuur van 5 jaar en een gemiddelde levensduur die daar precies tussenin ligt), vermenigvuldigd met een percentage apparatuur dat daadwerkelijk vroegtijdig wordt vervangen. Dit resulteert in een (beperkte) daling van de emissies gedurende een periode van 2,5 jaar (daarna was de apparatuur hoe dan ook vervangen; sterker nog, deze wordt uitgaande van dezelfde of langere levensduur nu weer 2,5 jaar later vervangen).

De keerzijde hiervan is dat de productie en installatie van de nieuwe apparatuur en afvoer van oude apparatuur leidt tot scope 3-emissies. Deze vallen buiten de scope van het model. Op basis van het hier ontwikkelde model is niet vast te stellen of een dergelijke vervanging onderaan de streep een emissiereductie oplevert. Dat gezegd kan het in individuele gevallen relevant zijn om vroegtijdige vervanging te overwegen als mogelijkheid.

#### 5.4.4 Vraagsturing

Een van de routes om het elektriciteitsverbruik van de digitale sector terug te brengen is vraagsturing. Hierbij gaat het om maatregelen die de vraag beperken of in tijd sturen. Vraagsturing kan in alle gemodelleerde scenario's worden toegepast, maar is het meest relevant in de scenario's waarbij de efficiëntiegroei de vraaggroei niet meer kan compenseren.

Of het terugbrengen van de vraag een zinvolle reductiestrategie is, is op basis van dit onderzoek niet te beantwoorden. Daarvoor moet de besparing als gevolg van een lager elektriciteitsverbruik immers worden afgewogen tegen een eventuele toename van uitstoot die dit produceert (bijvoorbeeld: wanneer we deels stoppen met videobellen, zal er wellicht weer meer gereisd worden). Daarnaast dient een afweging te worden gemaakt die rekening houdt met de economische waarde die de vraag vertegenwoordigt (een dergelijke exercitie wordt uitgevoerd in [60]).

'Perfekte' vraagsturing in tijd zou betekenen dat alle vraag plaatsvindt op het moment dat de emissiefactor het laagst is. Dit lijkt iets realistischer dan vraagreductie; naast het sturen van de vraag zélf zijn ook oplossingen aan zijde van de elektriciteitsproductie denkbaar, zoals (op dagniveau althans) batterijen. Voorbeelden van interventies op dit vlak zijn het uitstellen van het opladen van eindgebruikersapparaten (o.a. Apple in de V.S.) en het uitstellen van uitstelbare acties (o.a. Microsoft Windows Updates) tot momenten dat er meer aanbod van (duurzaam opgewekte) elektriciteit is.

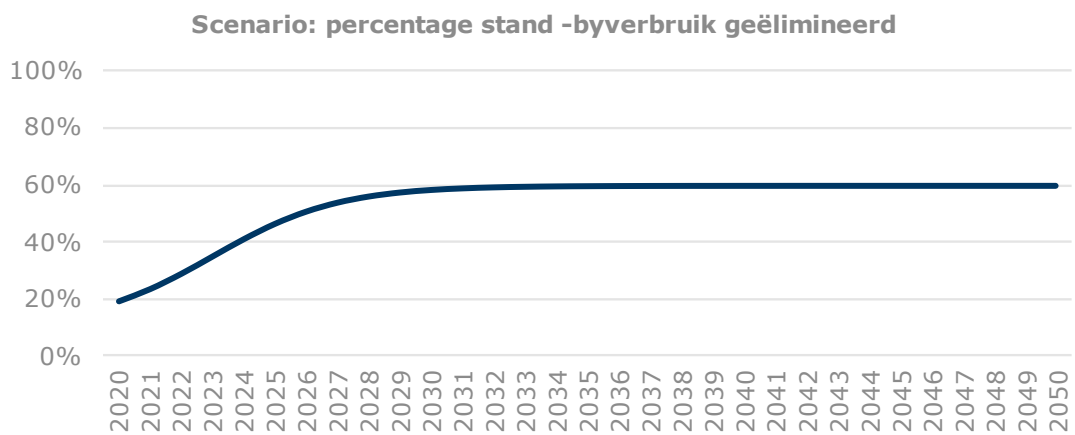
De impact hiervan kan modelmatig worden benaderd door de emissiefactor voor alle dagperiodes (ochtend tot en met nacht) op de laagst mogelijke emissiefactor te stellen. Zonder deze vraagsturing komt de cumulatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot van 2023 tot en met 2050 uit op

ongeveer 22,6 Mton, afhankelijk van het gehanteerde scenario, en op basis van het energiemix-scenario waarin de doelen worden gehaald. Mét 'perfecte' vraagsturing daalt dit tot rond de 16,0 Mton – een reductie van 29%. Merk op dat dit cijfer de (modelmatig) maximaal haalbare en niet een in de praktijk haalbare reductie aangeeft.

#### 5.4.5 Stand-byverbruik reduceren

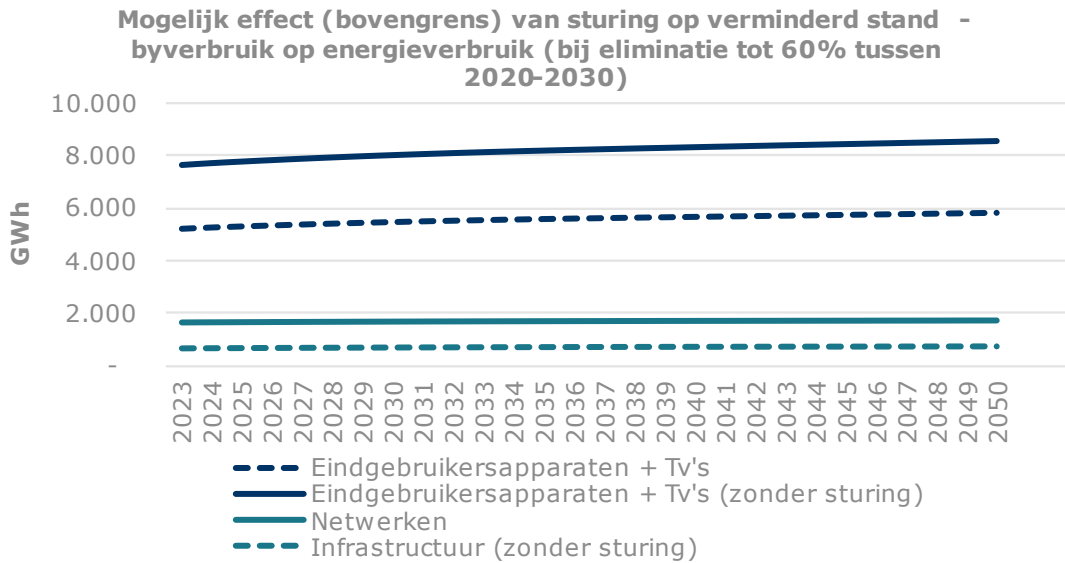
Het stand-byverbruik van eindgebruikersapparaten, modems, set-topboxen en tv's vertegenwoordigt een aanzienlijk deel van het totale energieverbruik van deze apparaten. Beleid dat stuurt op het verminderen van het stand-byverbruik van apparaten zou de CO<sub>2</sub>-uitstoot dus substantieel kunnen terugdringen.

De impact van een dergelijke maatregel modelleren we als een hypothetische adoptie van 'perfecte tijdschakelaars' door eindgebruikers vanaf een bepaalde periode, met een bepaalde adoptiesnelheid. Hiervoor zijn verschillende parameters te kiezen – ter illustratie nemen we het in Figuur 35 getoonde pad aan.



Figuur 35 Voorbeeldscenario reductie stand-byverbruik: eliminatie van 50% van het stand-byverbruik in 2030, start vanaf 2020

Figuur 36 toont het verschil in totaal elektriciteitsverbruik per jaar per categorie, met en zonder toepassing van de in Figuur 35 getoonde reductie van het stand-byverbruik.



Figuur 36 Het effect van het reduceren van stand-byverbruik met 60% in de periode 2020-2032, per categorie, op het stroomverbruik (stippellijn: uitkomst zonder reductie van het stand-byverbruik)

Bij deze resultaten is een aantal opmerkingen te plaatsen. Allereerst wordt hier uitgegaan van scenario A ("efficiency saves ICT"). Het stand-byverbruik groeit (in deze categorieën) niet met de vraagintensiteit maar alleen met de bevolkings- en huishoudensgroei, dus de scenariokeuze maakt in die zin niet uit. Als scenario voor de energiemix gaan we uit van het halen van het doel om in 2050 CO<sub>2</sub>-neutraal elektriciteit te produceren. Om die reden wordt het effect op de uitstoot steeds kleiner. Hoe later deze maatregel wordt ingevoerd, hoe minder zin deze dus heeft gelet op het reduceren van de cumulatieve CO<sub>2</sub>-uitstoot tot 2050.

# 6 Conclusies

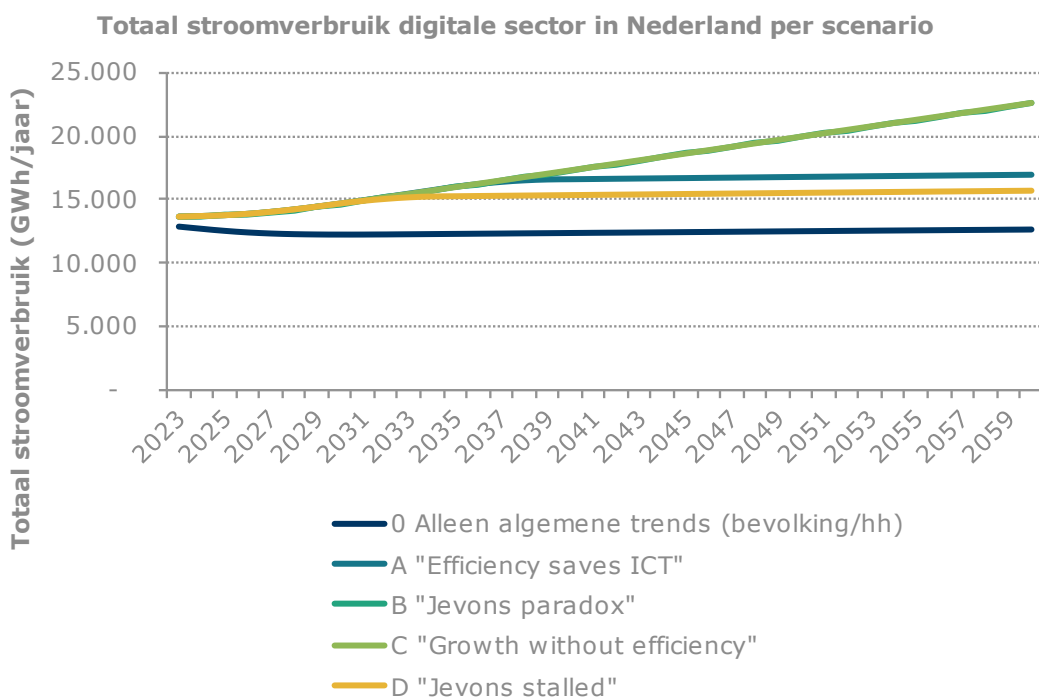
## 6.1 Beantwoording hoofdvragen

### 1. Wat is de bijdrage van de digitale sector aan het ontstaan van emissies?

De emissies van de digitale sector bestaan voornamelijk uit scope 2- en scope 3-emissies, waarbij in dit onderzoek alleen scope 2-emissies in beeld zijn. De scope 2-emissies hangen volledig samen met het elektriciteitsverbruik van de digitale apparatuur. In dit onderzoek is gekeken naar eindgebruikersapparaten (zoals smartphones, tablets, desktops, TV's), vaste en mobiele netwerken, en datacenters.

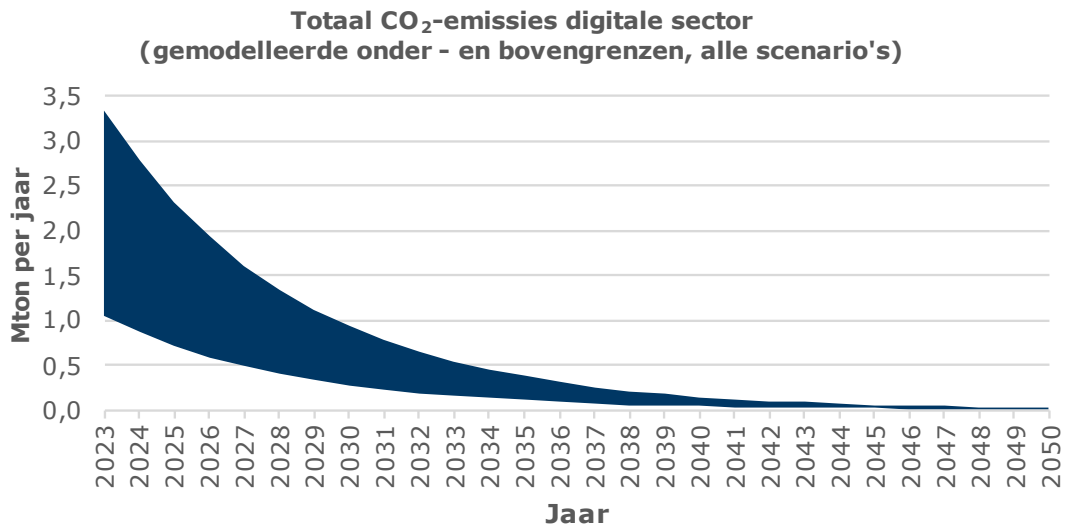
De totale geschatte uitstoot hiervan bedroeg in 2023 naar schatting maximaal 3,33 Mton CO<sub>2</sub> (gebaseerd op emissiefactoren op systeemniveau) en minimaal 1,04 Mton CO<sub>2</sub> (wanneer voor ingekochte groene stroom lage emissiefactoren worden gerekend). Daarvan is ongeveer 50% toe te wijzen aan eindgebruikersapparaten en TV's, 12% aan netwerken en 38% aan datacenters. Ter vergelijking, de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van Nederland was in 2021 in totaal 146,87 Mton. Daarmee is de digitale sector (afgaand op onze afbakening) verantwoordelijk voor tussen de 0,7% - 2,3% van de totale uitstoot.

In de digitale sector spelen (naast algemeen maatschappelijke trends als bevolkingsgroei) zowel exponentiële groei van de vraag (naar dataverwerking, opslag en overdracht) als exponentiële verbetering van de efficiëntie daarvan (bekend als de Wet van Moore). Tot nu toe lopen beide ontwikkelingen redelijk met elkaar in de pas. Het is echter denkbaar dat in de toekomst de efficiencyontwikkeling stagneert. Bij aanhoudende exponentiële vraaggroei zou dan ook het elektriciteitsverbruik en daarmee de uitstoot sterk groeien. Er zijn ook scenario's denkbaar waarin dit niet gebeurt, bijvoorbeeld omdat de vraaggroei sterk aanbodgedreven zou kunnen zijn. In de verschillende scenario's zien we de volgende uitkomsten voor de komende jaren (Figuur 37) voor wat betreft het elektriciteitsverbruik.



Figuur 37 De CO<sub>2</sub>-uitstoot van de Nederlandse digitale sector per scenario

Omdat de scope 2-emissies van de digitale sector voortkomen uit elektriciteitsverbruik is de emissiefactor van elektriciteit sterk bepalend voor de omvang van de emissies. Wanneer het doel om de elektriciteitsproductie per 2050 CO<sub>2</sub>-neutraal te laten zijn wordt gehaald, zal ook de emissie van de digitale sector zijn gereduceerd tot nul (en als gevolg liggen de uitkomsten van de verschillende scenario's ook zeer dicht bij elkaar). Vertragingen bij het halen van deze doelen (zeker in combinatie met een van de minder gunstige scenario's hierboven) zou kunnen leiden tot hogere uitstoot. Figuur 38 toont de onder- en bovengrens voor de verwachte CO<sub>2</sub>-uitstoot in scope 2 op basis van alle verschillende scenario's.<sup>19</sup>



Figuur 38 De gemodelleerde onder- en bovengrens van de toekomstige CO<sub>2</sub>-uitstoot in scope 2 (uit het elektriciteitsverbruik van) de Nederlandse digitale sector (Bron: Dialogic)

## 2. **Wat zijn, gelet op deze analyse, de prioritair acties voor EZK om de verduurzamingsopgave van de digitale sector te ondersteunen?**

Allereerst adviseren we de vinger aan de pols te houden voor wat betreft de besproken scenario's. Als de efficiencygroei van digitale technologie stagneert, zou immers een forse stijging van de uitstoot kunnen volgen. Op dat moment zijn wellicht meer rigoureuze beleidsmaatregelen aan de orde dan in een situatie waarin vraag en efficiëntie met elkaar opgaan. Daarnaast levert het *niet* halen van de doelen rondom de emissiefactoren van elektriciteitsproductie snel tot hogere uitstoot vanuit de digitale sector (bijna een verdubbeling bij een vertraging van vijf jaar).

In de huidige situatie en die op korte termijn zien we wel enkele mogelijkheden om het elektriciteitsverbruik van de digitale sector (en daarmee emissies) terug te dringen. Een aantal van deze besparingsmogelijkheden is gekwantificeerd op basis van het model dat in dit onderzoek is ontwikkeld.

Fundamenteel gezien zijn er twee routes voor het terugdringen van het stroomverbruik, en daarmee emissies, van de digitale sector: het beïnvloeden van de vraag en het verhogen van de efficiëntie van digitale technologie (c.q. versnellen van de efficiëntiegroei). Het afremmen van de vraag heeft wellicht negatieve economische consequenties die hier niet in

<sup>19</sup> Specifiek: de scenario's A t/m D. Voor alle scenario's is de uitstoot zowel berekend op basis van de emissiefactoren op systeemniveau als op basis van het afnameprofiel (dus inclusief groene stroom). Als ondergrens wordt de laagste uitkomst getoond, als bovengrens de hoogste.

beeld zijn gebracht. Dat hoeft echter niet per definitie te gelden voor het *sturen* van de vraag, zodanig dat in hogere mate gebruik kan worden gemaakt van duurzame energiebronnen. Dit zou kunnen worden vormgegeven op basis van dynamische elektriciteitsstarieven in combinatie met slimmere logica voor wat betreft de timing van (bijvoorbeeld) het opladen van apparaten.

## 6.2 Beantwoording deelvragen

### 1. Wat is in 2030, 2040 en 2050 de bijdrage van de digitale sector aan het energiegebruik en de CO<sub>2</sub>- en eventueel andere broeikasgasemissies?

Figuur 38 toont de boven- en ondergrens van de gemodelleerde bijdrage van de digitale sector in Nederland aan CO<sub>2</sub>-emissies, voor zover het scope 2-emissies betreft en gegeven de in dit onderzoek gehanteerde afbakening en aannames. De bandbreedte is gebaseerd op de vier scenario's voor efficiëntie- versus vraaggroei, en de mate waarin groene stroom wordt meegenomen (markt- versus locatieperspectief).

Tabel 12 toont het gemodelleerde toekomstige elektriciteitsverbruik en de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de digitale sector in de toekomst in vijf verschillende scenario's. *Hierbij is uitgegaan van de het tijdig behalen van de doelen ten aanzien van de energiemix.* Als gevolg van het dalen van de emissiefactor (in combinatie met het feit dat de effecten van de scenario's zich pas vanaf ongeveer 2035 voordoen) verschillen de scenario's beperkt van elkaar in termen van CO<sub>2</sub>-uitstoot. Er zijn echter wel substantiële verschillen in het elektriciteitsverbruik.

Tabel 12 De bijdrage van de digitale sector aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2023, 2030, 2040 en 2050 (emissies op basis van het locatieperspectief: emissiefactoren op systeemniveau)

Mton CO <sub>2</sub> -uitstoot in jaar:	2023	2030	2040	2050
0 Alleen algemene trends (bevolking/hh)	2,94	0,67	0,09	0,01
A "Efficiency saves ICT"		0,67	0,09	0,01
B "Jevons paradox"		0,81	0,13	0,02
C "Growth without efficiency"		0,81	0,13	0,02
D "Jevons stalled"		0,81	0,11	0,02

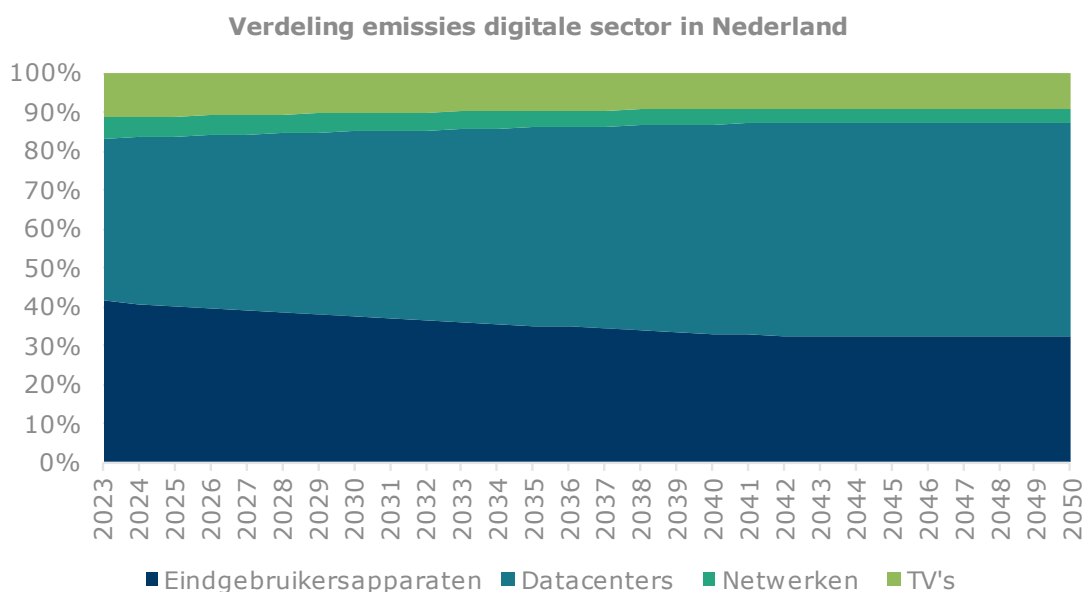
Elektriciteitsverbruik in jaar (GWh):	2023	2030	2040	2050
0 Alleen algemene trends (bevolking/hh)	13,0	12,1	12,3	12,5
A "Efficiency saves ICT"		14,6	16,5	16,7
B "Jevons paradox"		14,6	17,3	19,9
C "Growth without efficiency"		14,6	17,3	19,9
D "Jevons stalled"		14,6	15,3	15,5

Naast de hierboven genoemde scenario's speelt de vraag of de doelen ten aanzien van het terugdringen van de emissiefactor van elektriciteitsproductie worden gehaald. Tabel 11 (pagina 55) laat zien dat een vertraging van iets meer dan vijf jaar hierbij leidt tot een verdubbeling van de totale uitstoot over de periode 2023-2050. De invloed van de scenario's is bij vertraging van het behalen van de doelen relatief groter.

In dit onderzoek is tot slot ook gekeken naar scope 1-emissies; deze blijken van zeer beperkte omvang te zijn. In onderstaande figuur wordt aangenomen dat zowel de vraaggroei als de efficiëntiegroei van digitale technologie aanhouden en met elkaar in de pas blijven lopen (scenario A). Dit is een aannemelijk, maar niet het enige scenario.

## 2. Wat is het relatieve aandeel van verschillende soorten ICT-goederen of gebruikers in de digitale sector?

Figuur 39 toont het relatieve aandeel van verschillende categorieën onderdelen van de digitale sector in de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot (scope 2-emissies, gegeven onze afbakening en definities, in scenario A, en uitgaande van het halen van de doelen ten aanzien van de energiemix). Eindgebruikersapparaten en datacenters vormen hierin de grootste categorieën. In dit scenario daalt het relatieve aandeel van de eindgebruikersapparaten terwijl de datacenters uiteindelijk het grootste deel vertegenwoordigen. Merk hierbij wel op dat (zoals Figuur 38 weergeeft) de totale uitstoot minimaal wordt in 2050, onder de aanname dat de doelen ten aanzien van duurzame opwek worden gehaald.



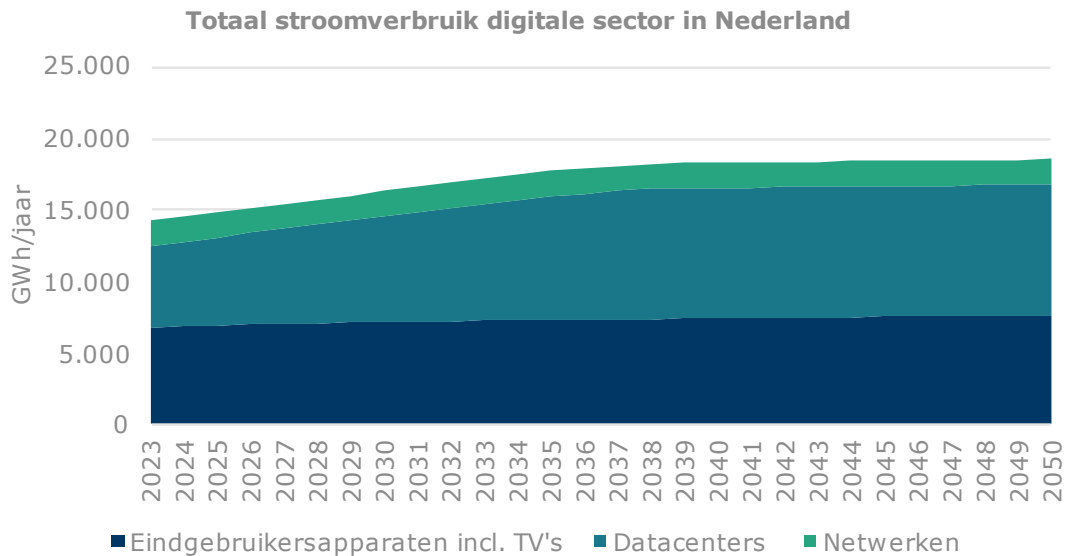
Figuur 39 Relatief aandeel van verschillende categorieën in de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de digitale sector (in scenario A: Efficiency saves ICT; emissies op basis van marktperspectief: emissiefactoren op systeemniveau).

## 3. Welke meerjarige trends zijn er in het energieverbruik van ICT-goederen in de digitale sector Nederland?

Het energieverbruik van de digitale sector wordt primair gedreven door de vraag naar digitale diensten, vermenigvuldigd met de efficiëntie van digitale technologie. Aan de vraagzijde zien we een aantal generieke trends, waaronder bevolkingsgroei en de groei van het aantal huishoudens. Deze leiden tot een evenredige groei van de vraag. Daarnaast zien we een groei van de 'intensiteit' van de vraag (kort gezegd het aantal diensten, apparaten, minuten, gigabytes, et cetera dat een gebruiker consumeert). Voor deze component zijn verschillende scenario's denkbaar – ze zou kunnen afvlakken, maar ook kunnen doorgroeien.

Aan de aanbodzijde zien we een historische trend van efficiëntiegroei (de hoeveelheid energie die nodig is voor het verwerken, opslaan of overbrengen van een bepaalde hoeveelheid gegevens). De vraag die de industrie bezighoudt is of deze efficiëntiegroei – in de volksmond gelijkgesteld aan de Wet van Moore – aanhoudt of op enig moment afvlakt. Vooral relevant is de vraag of een dergelijke afvlakking dan ook samengaat met een afvlakking van de vraagontwikkeling. Als de vraagontwikkeling zou doorzetten terwijl de efficiëntiegroei staakt, dan zou dit kunnen leiden tot een forse groei van het elektriciteitsverbruik.

Onderstaande Figuur 40 toont het gemodelleerde toekomstige stroomverbruik van de digitale sector in Nederland (net als de grafieken hierboven) voor scenario A. In dit scenario stagneert de vraagzijde tussen 2035 en 2040 en de efficiëntiegroei van digitale technologie tussen 2040 en 2045, wat leidt tot een afvlakking van het stroomverbruik (het stroomverbruik stijgt alsnog licht als gevolg van bevolkingsgroei en een groei van het aantal huishoudens).



Figuur 40 Het totale gemodelleerde stroomverbruik van de Nederlandse digitale sector per categorie (scenario A: Efficiency saves ICT)

Op basis van dit onderzoek valt echter te concluderen dat niet het stroomverbruik, maar de energiemix bepalend is voor de toekomstige uitstoot van de digitale sector. Hoe sneller de emissiefactor van onze energiemix daalt, hoe kleiner het effect is van efficiëntiegroei en vraaggroei op de uitstoot van de digitale sector. Als in 2050 een klimaatneutraal energiesysteem wordt gerealiseerd – zoals voorgesteld in de II3050-scenario's – dan zal de digitale sector vrijwel geen scope 1- en scope 2-emissies hebben, onafhankelijk van het energieverbruik. Alleen als het behalen van klimaatdoelen vertraagd plaatsvindt zijn verschillen in de uitstoot waarneembaar, mede afhankelijk van trends in de efficiëntie van en vraag naar digitale technologieën en diensten.

4. **Welke opties (huidige en mogelijke initiatieven) zijn er voor EZK om de initiatieven van de digitale sector ten aanzien van hun verduurzamingsopgave te ondersteunen, beprijsen en normeren?, en:**
5. **Welke van de door u gevonden opties hebben de meeste impact en zouden prioriteit moeten hebben?**

In dit onderzoek is een aantal globale besparingsopties geïdentificeerd:

- **Het sturen op de groei van de totale datacenteroppervlakte in Nederland.** Hoewel dit leidt tot een afname van de groei van emissies in de categorie datacenters, vermoeden we dat dit op mondiaal niveau niet zal leiden tot emissiereductie – de datacentercapaciteit zal gegeven dezelfde vraag dan immers buiten onze landsgrenzen moeten worden ingevuld.
- **Het sturen op efficiëntie van datacenters.** Aangenomen wordt dat hyperscaler-datacenters een hogere efficiëntie kunnen halen dan colocation- en on-premises



datacenters. Het huidige beleid is er echter op gericht het aantal hyperscalers in Nederland te beperken, om andere redenen dan uitsluitend de uitstoot.

- **Het vervangen van 'legacy' (oude) systemen door efficiëntere.** Hoewel er besparingen worden gerapporteerd door dergelijke vervanging, is op basis van ons onderzoek niet te zeggen wat de negatieve effecten zijn in termen van scope 3-uitstoot (fabricage en installatie van de nieuwe apparatuur en afvoer van de oude).
- **Vraagreductie en/of vraagsturing.** Het terugdringen van de vraag lijkt lastig, en zou moeten worden gewogen ten opzichte van de economische vraag die deze vertegenwoordigt. Het sturen van de vraag in tijd (met name naar de momenten op de dag waarop de emissiefactor van elektriciteit lager is) kan wel leiden tot een besparing. We zien op dit vlak ook enkele initiatieven aan zijde van eindgebruikersapparaten. Het is de vraag in hoeverre iets vergelijkbaars mogelijk is voor datacenters.
- **Het reduceren van stand-byverbruik.** We zien in alle categorieën dat stand-byverbruik een relatief groot deel van de totale elektriciteitsbehoefte, en daarmee uitstoot, vertegenwoordigt. Het dynamischer op- en afschakelen van apparatuur zou kunnen leiden tot een forse reductie. Als vingeroefening is een analyse uitgevoerd waarbij consumentenapparatuur 'achter een tijdschakelaar' wordt geplaatst.

Een meer lange-termijnoptie is te investeren in de ontwikkeling van efficiëntere digitale technologie (met name halfgeleiders).

De hier gemodelleerde toekomstige scenario's voor de ontwikkeling van CO<sub>2</sub>-emissie van de digitale sector in Nederland geven primair een bovengrens voor besparingsopties. Op basis van het model kan worden vastgesteld wat bepaalde besparingsopties in het beste geval aan besparing kunnen opleveren. Daarbij wordt echter geen afweging gemaakt met de negatieve gevolgen van besparingsopties (zoals de economische waarde die hiermee gemoeid gaat).

### 6.3 Beperkingen van het onderzoek

Dit onderzoek kent, als gevolg van de opzet, een aantal belangrijke beperkingen.

#### ***Afbakening digitale sector***

In dit onderzoek is een specifieke afbakening gehanteerd van de digitale sector. Een andere afbakening leidt tot andere resultaten. Het is van belang om de verschillen in afbakeningen mee te nemen wanneer wordt vergeleken tussen studies.

We vermoeden op basis van wat tijdens de studie is gevonden dat er zich aan de 'randen' van de digitale sector een grote categorie heterogene apparaten en gebruiksvormen bevindt die lastig in beeld te brengen is, maar wel een relatief groot energieverbruik (en daarmee uitstoot) vertegenwoordigt. Denk hierbij bijvoorbeeld aan kassasystemen, industriële apparaten, verkeerssystemen, et cetera. Het is niet helemaal terecht om het verbruik c.q. de uitstoot van deze apparaten volledig mee te tellen bij de digitale sector, maar ze niet meenemen is dat wellicht ook niet.

#### ***Verskillende groeiscenario's***

We zien daarnaast dat verschillende studies in de literatuur verschillende opvattingen laten zien ten aanzien van de vraag of en hoe lang exponentiële vraaggroei c.q. exponentiële groei van de efficiëntie van digitale technologie (de Wet van Moore) zal doorgaan. Afhankelijk hiervan kunnen de resultaten (zeker wanneer cijfers als 'kilowattuur-per-gigabyte' worden geëxtrapoleerd) sterk variëren. In dit onderzoek zijn deze keuzes weliswaar geëxpliciteerd als scenario's, maar ook bij deze scenario's zijn diverse parameters te kiezen (zoals het moment en de snelheid waarmee de vraag c.q. de efficiëntie stagneren).

### ***Scope 3-emissies***

Daarnaast is ervoor gekozen om alleen scope 1- en scope 2-emissies mee te nemen, waarbij deze begrippen op een bepaalde manier zijn vertaald naar het sectorniveau. Tijdens het onderzoek is gebleken dat scope 3-emissies een groot aandeel hebben in de uitstoot van de digitale sector. Zoals in Tabel 6 te zien is, neemt in een aantal referentieonderzoeken de uitstoot met een factor van ongeveer 1,5 toe wanneer ook scope 3-emissies worden meegenomen. Een studie van Freitag et al. schat dat de scope 3-emissies goed zijn voor ruwweg 23% van de totale emissies en dat deze het hoogste zijn voor eindgebruikersapparaten (ongeveer 50%). [9] Het is dus zeer relevant om de scope 3-emissies in beeld te brengen. Voordat beleidsopties (zoals het vroegtijdig vervangen van oudere apparatuur) worden overwogen, dient te worden vastgesteld of deze geen verhoging van scope 3-emissies opleveren.

### ***Regionale afbakening***

Tot slot zijn in dit onderzoek emissies meegenomen voor zover die zich binnen Nederland voordoen, terwijl ook zou kunnen worden gekeken naar emissies die causaal verband houden met vraag naar digitale diensten vanuit Nederland (c.q. vanuit het buitenland en in Nederland geproduceerd). Het weren van bijvoorbeeld datacenters zou weliswaar kunnen leiden tot een lagere uitstoot, maar deze uitstoot zal dan onvermijdelijk gaan plaatsvinden in onze buurlanden.

## 7 Verwijzingen

- [1] Schulze, M. (2023). *Nationale Coalitie Duurzame Digitalisering. Strategieraad.*
- [2] Koot, M., en Wijnhoven, F. (2021). *Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic forecasting model* [[ris.utwente.nl](https://ris.utwente.nl)] vol. 291, Enschede: Elsevier.
- [3] Malmudin, J., en Lundén, D. (2018). *The electricity consumption and operational carbon emissions of ICT network operators 2010-2015* [[kth.diva-portal.org](https://kth.diva-portal.org)] Stockholm: Centre for Sustainable Communications.
- [4] Carbon Trust (2021). *Carbon impact of video streaming* [[www.carbontrust.com](https://www.carbontrust.com)] London,
- [5] Lundén, D., Malmudin, J., Bergmark, P., en Lövehagen, N. (2022). *Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators* [[www.mdpi.com](https://www.mdpi.com)] 14 red., vol. 5, MDPI.
- [6] Greenhouse Gas Protocol. *Greenhouse Gas Protocol, Frequently Asked Questions* [[ghgprotocol.org](https://ghgprotocol.org)]
- [7] CBS (2023). *Elektriciteitsbalans; aanbod en verbruik* [[opendata.cbs.nl](https://opendata.cbs.nl)]
- [8] Dutch Data Center Association (2023). *The State of the Dutch Data Centers 2023: The Fact of the Matter* [[www.dutchdatacenters.nl](https://www.dutchdatacenters.nl)]
- [9] Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G.S., en Friday, A. (2021). *The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations* [[www.sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com)] vol. 2,
- [10] Malmudin, J. (2022). *Internet consume less energy and emit less carbon than what many think* [[datatracker.ietf.org](https://datatracker.ietf.org)] IETF.
- [11] Malmudin, J. (2020). *The power consumption of mobile and fixed network data services - The case of streaming video and downloading large files* [[online.electronicsgoesgreen.org](https://online.electronicsgoesgreen.org)] Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration. pp. 87-96.
- [12] CBS (2022). *Elektriciteit geleverd aan datcenters, 2017-2021* [[www.cbs.nl](https://www.cbs.nl)]
- [13] CE Delft (2020). *Energiegebruik 5G-netwerk* [[ce.nl](https://ce.nl)]
- [14] Autoriteit Consument & Markt (2023). *ACM Telecommonitor* [[public.tableau.com](https://public.tableau.com)]
- [15] NetAnders (2023). *CO2 monitor* [[co2monitor.nl](https://co2monitor.nl)]
- [16] NLdigital. *Wat doet de digitale sector om te verduurzamen?* [[www.nldigital.nl](https://www.nldigital.nl)]
- [17] ACM. *Stroometiket: groene en grijze energie* [[www.acm.nl](https://www.acm.nl)]
- [18] GHG Protocol, 5 World Resources Institute (2023). *Scope 2 Guidance* [[ghgprotocol.org](https://ghgprotocol.org)]
- [19] Vandebron (2022). *Hoeveel procent van de Nederlandse stroom is groen?* [[vandebron.nl](https://vandebron.nl)]
- [20] KPN. *KPN is milieubewust. Minder energie, minder grondstoffen* [[www.overons.kpn](https://www.overons.kpn)]
- [21] VodafoneZiggo (2023). *Integrated Report 2022. Onze duurzame ambities* [[integratedreport2022.vodafoneziggo.nl](https://integratedreport2022.vodafoneziggo.nl)]
- [22] T-Mobile. *Over ons. Duurzaamheid* [[www.t-mobile.nl](https://www.t-mobile.nl)]
- [23] Dutch Data Center Association (2022). *Energieverbruik datacenters* [[www.dutchdatacenters.nl](https://www.dutchdatacenters.nl)]
- [24] CBS (2022). *Rendementen en CO2-emissie van elektriciteitsproductie in Nederland, update 2020* [[www.cbs.nl](https://www.cbs.nl)]
- [25] NOS (2023). *Netbeheerder waarschuwt voor stroomtekort in 2030* [[nos.nl](https://nos.nl)]
- [26] RVO (2022). *Duurzaam koelen van datacenters 2*
- [27] Dutch Data Center Association (2022). *Nederlandse datacenters houden het hoofd koel tijdens hittegolf* [[www.dutchdatacenters.nl](https://www.dutchdatacenters.nl)]
- [28] Rijkswaterstaat. *Lekkages* [[www.infomil.nl](https://www.infomil.nl)]
- [29] Microsoft (2020). *On the road to net-zero, green backup is a big step forward* [[go.microsoft.com](https://go.microsoft.com)]

- [30]Crippa, M., Guizzardi, D., Banja, M., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Pagani, F., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J., Quadrelli, R., Riskey Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Grassi, G., Rossi, S., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., en Vignati, E. (2022). *CO2 emissions of all world countries - JRC/IEA/PBL 2022 Report* [[edgar.jrc.ec.europa.eu](http://edgar.jrc.ec.europa.eu)] Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [31]RVO (2020). *MJA-Sectorrapport 2020 ICT* [[www.nldigital.nl](http://www.nldigital.nl)]
- [32]CBS (2022). *Aardgas en elektriciteit; leveringen openbaar net, bouw en dienstensector* [[opendata.cbs.nl](http://opendata.cbs.nl)]
- [33]RVO & TNO. *Energieverbruik naar functie* [[energiecijfers.databank.nl](http://energiecijfers.databank.nl)]
- [34]RVO (2021). *MJA-Sectorrapport 2020 ICT* [[www.nldigital.nl](http://www.nldigital.nl)]
- [35]Malmodin, J., Lövehagen, N., Bergmark, P., en Lundén, D. (2023). *ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome* [[papers.ssrn.com](http://papers.ssrn.com)] Stockholm,
- [36]CLO (2022). *Energieverbruik per sector, 1990-2021* [[www.clo.nl](http://www.clo.nl)]
- [37]Andrae, A.S. (2020). *New perspectives on internet electricity use in 2030* [[www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)]
- [38]Belkhir, L., en Elmeligi, A. (2018). *Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations* [[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)] pp. 448-463.
- [39]Bieser, J.C., Hintemann, R., Hilty, L.M., en Beucker, S. (2023). *A review of assessments of the greenhouse gas footprint and abatement potential of information and communication technology* [[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)] Elsevier.
- [40]Andrae, A.S., en Edler, T. (2015). *On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030* [[files.ifi.uzh.ch](http://files.ifi.uzh.ch)] pp. 117-157.
- [41]Avgerinou, M., Bertoldi, P., en Castellazzi, L. (2017). *Trends in data centre energy consumption under the European code of conduct for data centre energy efficiency* [[op.europa.eu](http://op.europa.eu)]
- [42]Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., en Koomey, J. (2020). *Recalibrating global data center energy-use estimates* [[datacenters.lbl.gov](http://datacenters.lbl.gov)] 367 red., AAAS.pp. 984-986.
- [43]CBS (2021). *Prognose bevolking; geslacht en leeftijd, 2022-2070* [[opendata.cbs.nl](http://opendata.cbs.nl)]
- [44]CBS (2021). *Huishoudensprognose 2021-2070: Groei aantal huishoudens houdt aan* [[www.cbs.nl](http://www.cbs.nl)]
- [45]Cisco Systems (2013). *Forecast and Methodology 2012-2017*
- [46]Ericsson (2020). *Ericsson Mobility Report* [[www.ericsson.com](http://www.ericsson.com)] Ericsson.
- [47]Dialogic, Brennenraedts, R., Vankan, A., te Velde, R., Minne, B., Veldkamp, J., en Kaashoek, B. (2014). *De impact van ICT op de Nederlandse economie* [[www.dialogic.nl](http://www.dialogic.nl)] Utrecht: Ministerie van Economische Zaken.
- [48]van der Vorst, T., en Brennenraedts, R. (2018). *Understanding the demand growth for digital connectivity* [[www.dialogic.nl](http://www.dialogic.nl)] Seoul,
- [49]Grobe, K., en Jansen, S. (2020). *Limits to exponential Internet Growth* [[online.electronicsgoesgreen.org](http://online.electronicsgoesgreen.org)] Berlijn: ADVAoptical.pp. 97-104.
- [50]Tucker, R.S. (2009). *Switching and Energy* [[people.eng.unimelb.edu.au](http://people.eng.unimelb.edu.au)]
- [51]Landauer, R. (1961). *Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process* [[ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org)] 5 red., vol. 3, pp. 183-191.
- [52]. *Oxford Reference* [[www.oxfordreference.com](http://www.oxfordreference.com)] Oxford University Press.
- [53]L.S., (2015). *The end of Moore's law* [[www.economist.com](http://www.economist.com)]
- [54]Rijksoverheid (2022). *Elektriciteit* [[dashboardklimaatbeleid.nl](http://dashboardklimaatbeleid.nl)]
- [55]Netbeheer Nederland (2023). *Scenario's investeringsplannen 2024* [[www.netbeheernederland.nl](http://www.netbeheernederland.nl)]
- [56]CBS (2023). *Emissiefactoren van elektriciteit uit steenkool en aardgas, 2000-2021* [[www.cbs.nl](http://www.cbs.nl)]
- [57]PCI Energy Solutions (2023). *Power PLant Efficiency: Coal, Natural Gas, Nuclear and More* [[www.pcienergysolutions.com](http://www.pcienergysolutions.com)]
- [58]RVO (2019). *MJA-Sectorrapport 2019 ICT* [[www.nldigital.nl](http://www.nldigital.nl)]
- [59]RVO (2018). *MJA-Sectorrapport 2018. ICT* [[www.nldigital.nl](http://www.nldigital.nl)]
- [60]Ecorys (2023). *Economisch belang digitale infrastructuur*

- [61]Welzl, M. (2022). *What do we know about the Internet's energy usage?* [[datatracker.ietf.org](https://datatracker.ietf.org)] IETF.
- [62]Villalobos, P., Sevilla, J., Besiroglu, T., Heim, L., Ho, A., en Hobbhahn, M. (2022). *Machine Learning Model Sizes and the Parameter Gap* [[arxiv.org](https://arxiv.org)]
- [63]Schien, D. (2022). *Carbon Footprinting of Networks for Digital Services – Factoring in Energy Proportionality* [[datatracker.ietf.org](https://datatracker.ietf.org)] IETF.
- [64]Rupp, K. (2018). *42 Years of Microprocessor Trend Data* [[www.karlrupp.net](https://www.karlrupp.net)]
- [65]Proske, M., Poppe, E., en Jaeger-Erben, M. (2020). *The smartphone evolution - an analysis of the design evolution and environmental impact of smartphones* [[online.electronicsgoesgreen.org](https://online.electronicsgoesgreen.org)] 138-145,
- [66]Narayanan, D., Shoeybi, M., Casper, J., LeGresley, P., Patwary, M., Korthikanti, V., Vainbrand, D., Kashinkunti, P., Bernauer, J., Catanzaro, B., Phanishayee, A., en Zaharia, M. (2021). *Efficient Large-Scale Language Model Training on GPU Clusters Using Megatron-LM* [[arxiv.org](https://arxiv.org)]
- [67]Lundén, D., Malmödin, J., Bergmark, P., en Lövehagen, N. (2022). *Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators* [[www.mdpi.com](https://www.mdpi.com)] Basel: MDPI.
- [68]Jevons, W.S. (1865). *The Coal Question: An Enquiry Concerning the Progress of the Nation, and the probably exhaustion of our coal mines* [[books.google.nl](https://books.google.nl)] London and Cambridge: Macmillan and co..
- [69]Gu, M., Li, X., en Cao, Y. (2014). *Optical storage arrays: a perspective for future big data storage* [[doi.org](https://doi.org)] 3 red.,
- [70]Arthur D. Little (2023). *The evolution of data growth in Europe* [[www.adlittle.com](https://www.adlittle.com)]
- [71]van Wijnen, Jan Fred (2023). *Ontwikkeling AI loopt vast op astronomisch stroomverbruik* [[fd.nl](https://fd.nl)]
- [72]The MosaicML NLP Team (2023). *Introducing MPT-7B: A New Standard for Open-Source, Commercially Usable LLMs* [[www.mosaicml.com](https://www.mosaicml.com)]
- [73]GeSI (2019). *Digital with Purpose: Delivering a SMARTer2030* [[gesi.org](https://gesi.org)]
- [74]IEA (2020). *Data Centres and Data Transmission Networks* [[www.iea.org](https://www.iea.org)]
- [75]Bals, C. (2022). *Environmental Sustainability @ Proximus* [[www.itu.int](https://www.itu.int)] ITU.
- [76]Anders, S., en Edler, T. (2015). *On global electricity usage of communication technology: trends to 2030* [[www.mdpi.com](https://www.mdpi.com)]
- [77]Nederlandse Emissieautoriteit (2022). *Emissiecijfers 2021-2022* [[www.emissieautoriteit.nl](https://www.emissieautoriteit.nl)]
- [78]CE Delft (2014). *Achtergrondgegevens stroometikettering 2013*
- [79]NOS, en Ekker, H. (2020). *Opening grootste windpark van Nederland; meeste stroom naar datacenter Microsoft* [[nos.nl](https://nos.nl)]
- [80]Irani, F. (2023). *Power consumption of JPEG, WebP, and AVIF* [[fershad.com](https://fershad.com)]

Afbeelding voorblad: Freepik. [[www.freepik.com](https://www.freepik.com)], hier gebruikt onder licentie.



**Contact:**

Dialogic *innovatie & interactie*  
Hooghiemstraplein 33-36  
3514 AX Utrecht  
Tel. +31 (0)30 215 05 80  
[www.dialogic.nl](http://www.dialogic.nl)

