



# Klimaat en rekenkracht

Onderzoek naar de milieu-impact van Artificial Intelligence (AI)  
in het onderwijs

Bram Lankreijer, Jort Wolda, Berend Driessen

**18 DECEMBER 2024**

# Inhoudsopgave

## **1** Contextbeschrijving en conclusies

Waarom is de milieu-impact van AI een relevant onderwerp en wat zijn de conclusies van dit onderzoek?  
Pagina 3-5

## **2** Milieu-impact AI in het onderwijs

Wat is de milieu-impact van AI in het onderwijs?  
Pagina 6-10

## **3** AI en het onderwijs

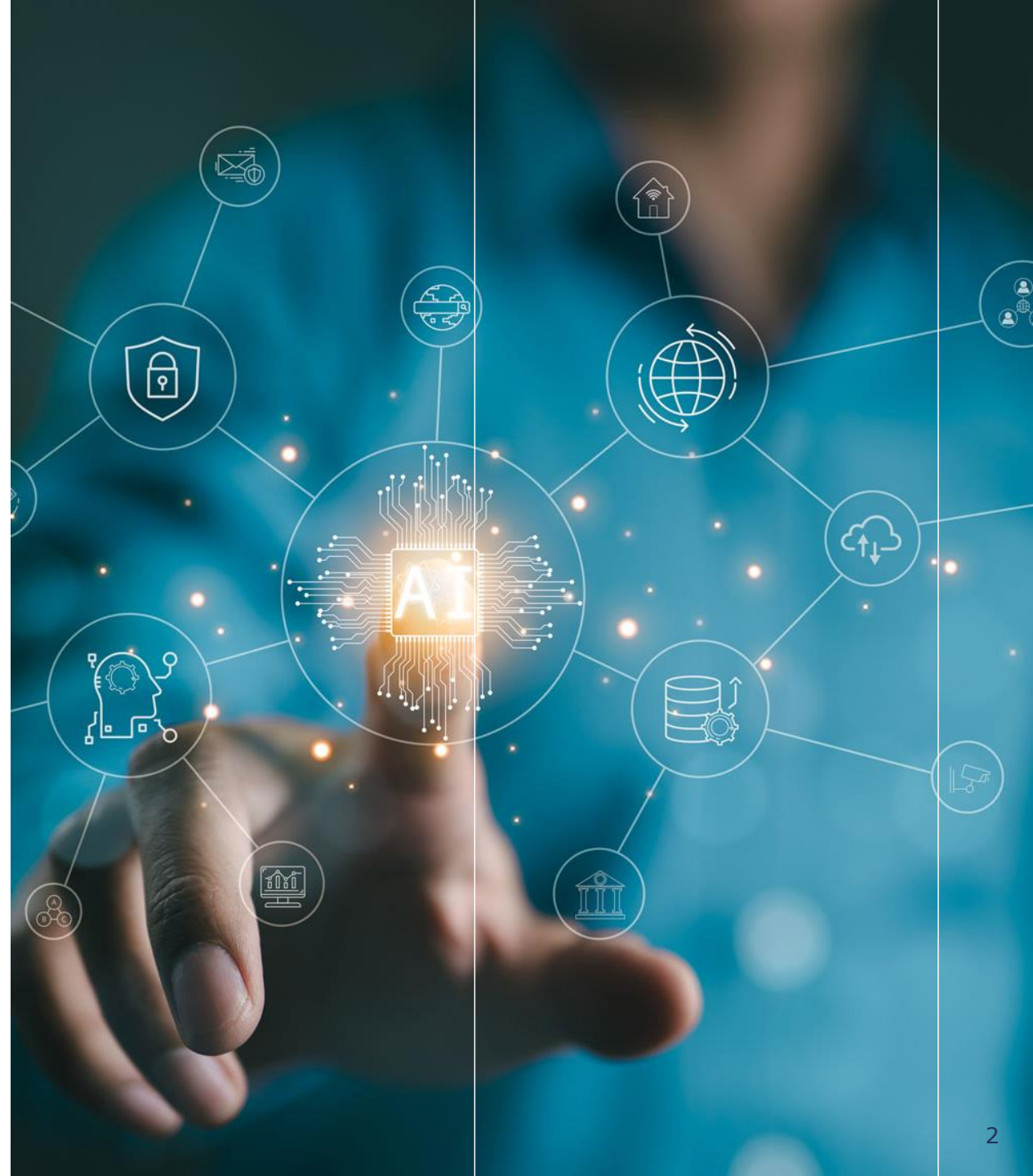
Hoe kan AI gedefinieerd worden en welke toepassingen kent AI in het onderwijs?  
Pagina 11-14

## **4** De milieu-impact van AI

Wat houdt milieu-impact in en hoe leiden AI-systemen tot milieu-impact?  
Pagina 15-30

## **5** Bronnenlijst en appendix

Pagina 31-37





# 1. Contextbeschrijving en conclusies



## HOOFDSTUK 1 - CONTEXTBESCHRIJVING EN CONCLUSIES

# Contextbeschrijving

De afgelopen jaren heeft de spectaculaire ontwikkeling van *artificial intelligence* (AI) een revolutie veroorzaakt in de manier waarop we werken [1]. Om deze prestaties mogelijk te maken, zijn AI-modellen steeds groter en complexer geworden. Naar schatting verdubbelt de rekenkracht die nodig is om deze ontwikkeling bij te benen iedere 100 dagen [2]. De milieu-implicaties van AI worden daarmee ook een steeds belangrijker thema. De energie die bijvoorbeeld nodig is om een taak uit te laten voeren door AI groeit ieder jaar tussen de 26% en 36% [2]. Dit zou betekenen dat AI-systemen in 2028 meer energie zouden kunnen gebruiken dan heel IJsland verbruikte in het jaar 2021. Hiermee oefent de opkomst en grootschalige adoptie van complexe AI-modellen toenemende druk uit op het al overvraagde en instabiele elektriciteitsnetwerk.

Ook integreert AI steeds meer in het onderwijs; zowel in bestaande (leer)systemen als door een toename van het gebruik van generatieve AI-tools zoals ChatGPT. Zeker het toenemende gebruik van grote en complexe generatieve AI-tools heeft daarmee mogelijk implicaties voor de milieu-impact van het onderwijs.

Dit onderzoek beoogt daarom de milieu-impact van AI in algemene zin, en voor het onderwijs specifiek, in kaart te brengen door het beantwoorden van de onderstaande onderzoeksvragen:

- Welke soorten AI worden gebruikt in het onderwijs?
- Welke dimensies van milieu-impact kent AI?
- Wat is de algemene milieu-impact van AI?
- Wat is de milieu-impact van AI in het onderwijs?



**Leeswijzer** – Hoofdstuk 2 illustreert de milieu-impact van AI voor het onderwijs. Dit gebeurt op basis van hoe AI gebruikt kan worden gedurende een hypothetische schooldag (po en vo). De hoofdstukken daarna bevatten achtergrondinformatie en onderbouwing. Hoofdstuk 3 gaat in op de definitie van AI en welke AI-systemen in het onderwijs gebruikt worden. Hoofdstuk 4 gaat in op de definitie van milieu-impact en hoe AI tot milieu-impact leidt. In de appendix is een begrippenlijst en aanvullende informatie over aannames te vinden.



**Scope** - Dit onderzoek kijkt specifiek naar de milieu-impact van complexe *datagedreven* generatieve AI. In het onderwijs wordt echter ook gebruikgemaakt van *kennisgedreven* 'rule-based' systemen, zoals sommige adaptieve leersystemen. Deze systemen zijn significant minder rekenintensief en zijn bewust buiten de scope van dit onderzoek gelaten.

## HOOFDSTUK 1 - CONTEXTBESCHRIJVING EN CONCLUSIES

# Conclusies

### 1. Welke soorten AI worden gebruikt in het onderwijs?

In het onderwijs worden verschillende soorten AI gebruikt, van simpelere *kennisgedreven* adaptieve leersystemen tot complexe *datagedreven* AI-tools in de vorm van large language models (LLM's) zoals ChatGPT.

### 2. Welke dimensies van milieu-impact kent AI?

AI heeft zowel directe (*productie, transport, operatie, levensende*) als indirecte (*positieve of negatieve toepassingen*) milieu-impact. Van deze onderdelen is de *operatie* de categorie die zich het beste laat kwantificeren en daarnaast relatief goed herleidbaar is naar individuele gebruikers. Voor de operatie zijn CO<sub>2</sub>-uitstoot en waterverbruik de belangrijkste impactcategorieën.

### 3. Wat is de algemene milieu-impact van AI?

Op wereldschaal heeft het toenemende gebruik van AI ook een steeds duidelijkere impact op ons milieu, ondanks dat het effect per individuele gebruiker relatief klein is. Naast de groeiende adoptie van AI-modellen, draagt de toenemende complexiteit van deze modellen ook bij aan het vergroten van de milieu-impact. Met het oog op deze ontwikkelingen wordt er geschat dat AI in 2030 verantwoordelijk is voor 5% van de wereldwijde CO<sub>2</sub>-uistoot.

Er is echter relatief weinig informatie beschikbaar over de milieu-impact van complexe, generatieve AI-modellen. Daarnaast kan de milieu-impact tussen verschillende generatieve modellen aanzienlijk uiteenlopen op basis van hun complexiteit, en is de uiteindelijke impact ook sterk afhankelijk van de locatie van datacenters en de timing van het gebruik.

### 4. Wat is de milieu-impact van generatieve AI voor het onderwijs?

Om de milieu-impact voor het onderwijs te illustreren zijn we uitgegaan van hypothetische schooldagen waarin AI op verschillende momenten wordt ingezet door zowel leerlingen als docenten. Wanneer het gehele onderwijs een heel schooljaar lang deze hypothetische schooldag zou volgen, leidt dit tot een milieu-impact die vergelijkbaar is met het jaarlijkse waterverbruik van 1.440 personen, het elektriciteitsverbruik van 6.829 huishoudens en de CO<sub>2</sub>-uitstoot van 2.566 benzineauto's met een gemiddeld aantal gereden kilometers.

#### **Bewustwording in het onderwijs omtrent de milieu-impact van AI**

Hoewel de milieu-impact van individuele gebruikers beperkt is, kan de grootschalige adoptie van AI nog steeds leiden tot significante impact. Ook in het onderwijs zou bewustwording omtrent de milieu-impact van AI daarom een factor kunnen zijn om mee te nemen in de overwegingen omtrent de inzet van AI in de klas.



## 2. Milieu-impact van AI in het onderwijs



## HOOFDSTUK 2 - MILIEU-IMPACT VAN AI IN HET ONDERWIJS

# Hoe illustreren wij de milieu-impact van AI in het onderwijs?

### De milieu-impact van een hypothetische schooldag

De milieu-impact van AI blijft vaak abstract, omdat cijfers zonder context lastig te interpreteren zijn. Om deze impact inzichtelijker te maken, baseren we onze analyse op een hypothetische schooldag waarin generatieve AI-modellen op verschillende manieren worden ingezet. Hierbij maken we onderscheid tussen het primair onderwijs (po) en het voortgezet onderwijs (vo), en bekijken we zowel het gebruik door leerlingen als door leraren.

In deze analyse brengen we de milieu-impact van AI in kaart door te kijken naar het energieverbruik, de CO<sub>2</sub>-uitstoot en het watergebruik aan het einde van deze hypothetische schooldag. Een overzicht van de gebruikte cijfers is te vinden in tabel 1. Verdere onderbouwing is terug te vinden in hoofdstuk 4. Om deze cijfers tastbaarder te maken, vergelijken we ze met de milieu-impact van alledaagse apparaten en activiteiten uit de directe belevingswereld van de gebruiker. Dit perspectief helpt om de impact van AI beter te begrijpen en in verhouding te zien tot andere dagelijkse handelingen.

### Extrapoleren naar school- en landelijk niveau

Op basis van de hypothetische schooldag maken we een inschatting van de milieu-impact van AI op het niveau van een gemiddelde school in zowel het po als het vo. Daarnaast schatten we de totale milieu-impact van AI in het onderwijs op landelijk niveau. Dit biedt handvatten voor de bredere implicaties van AI-gebruik binnen de onderwijssector.

Het is belangrijk te benadrukken dat deze analyse gebaseerd is op een hypothetische schooldag anno 2024 en dat de gegevens over de milieu-impact van AI-modellen beperkt zijn. Voor de nieuwste AI-modellen, zoals GPT-4, is er daarnaast vrijwel geen informatie beschikbaar. Aangezien deze modellen doorgaans complexer zijn dan eerdere generaties, ligt het voor de hand dat hun milieu-impact groter is. Dit moet bij de interpretatie van de resultaten in overweging worden genomen.

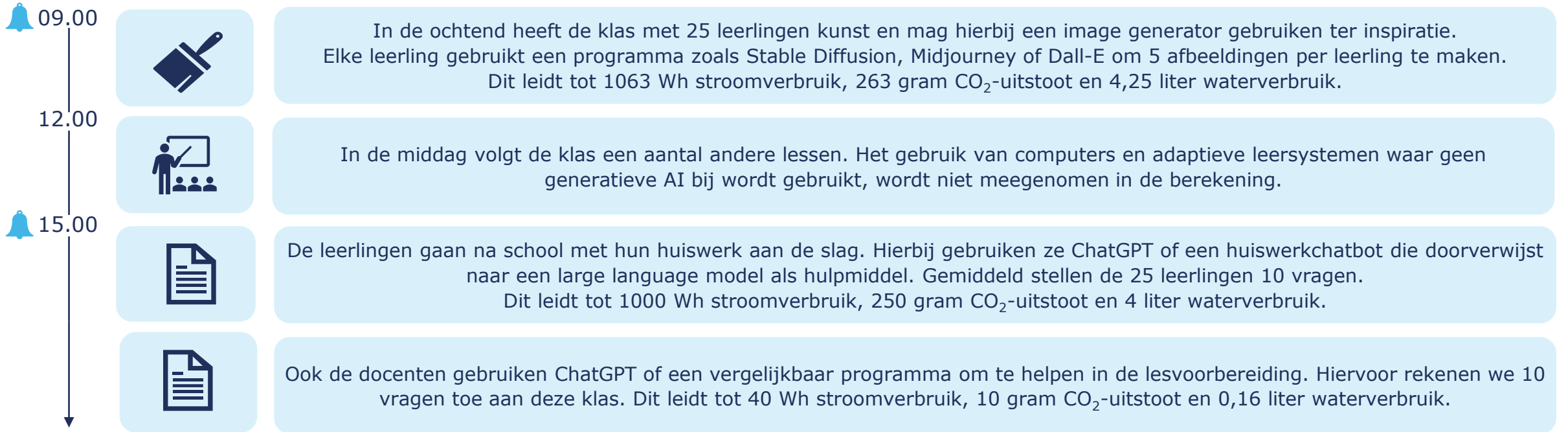
Type AI	Energie	CO <sub>2</sub>	Water
Large language model	4 Wh / vraag	1g CO <sub>2</sub> / vraag	16 ml / vraag
Image generation	8,5 Wh / afbeelding	2,1g CO <sub>2</sub> / afbeelding	34 ml / afbeelding

Tabel 1. Overzicht van de gebruikte cijfers voor het berekenen van de impact van een schooldag.

## HOOFDSTUK 2 - MILIEU-IMPACT VAN AI IN HET ONDERWIJS

# De milieu-impact van een schooldag

Van het gebruik van AI in het voortgezet onderwijs



## De milieu-impact van AI-gebruik in deze klas komt vandaag in totaal neer op:

- **2103 Wh stroomverbruik:** dit is genoeg stroom om bijna 15 uur een digibord van 75 inch te gebruiken.
- **523 g CO<sub>2</sub>-uitstoot:** dit is vergelijkbaar met 3,5 km rijden in een benzineauto.
- **8,4 L waterverbruik:** ruim voldoende water om vier mensen een dag van drinkwater te voorzien.



# De milieu-impact van een schooldag

Van het gebruik van AI in het primair onderwijs



## In het primair onderwijs wordt aangenomen dat geen generatieve AI wordt gebruikt door leerlingen

Kennisnet raadt aan om geen generatieve AI te laten gebruiken door leerlingen onder de 13 jaar. Om deze reden is er aangenomen dat leerlingen in het primair onderwijs geen AI gebruiken. Er kunnen wel kennisgedreven programma's gebruikt worden zoals een adaptief leersysteem als Rekentuin. Aangezien hier beperkte informatie over bekend is en de impact relatief klein is ten opzichte van generatieve AI, worden hier geen verdere aannames over gedaan.



De bel gaat en alle leerlingen stromen de klas uit. De leerkracht blijft nog achter om na te kijken en bereid de lessen van morgen voor. De leerkracht gebruikt ChatGPT voor lesideeën die passen bij de behoeften van de klas. Hiervoor stelt de leerkracht 10 vragen aan ChatGPT. Dit leidt tot 40 Wh aan stroomverbruik, 10 gram CO<sub>2</sub>-uitstoot en 160 ml watergebruik.

## De milieu-impact van AI-gebruik in deze klas komt vandaag in totaal neer op:

- **40 Wh stroomverbruik:** dit is genoeg om een iPhone 3 keer mee op te laden.
- **10 g CO<sub>2</sub>-uitstoot:** dit is vergelijkbaar met 67 meter rijden in een benzineauto.
- **160 ml waterverbruik:** dit komt overeen met een klein glas water.




## HOOFDSTUK 2 - MILIEU-IMPACT VAN AI IN HET ONDERWIJS

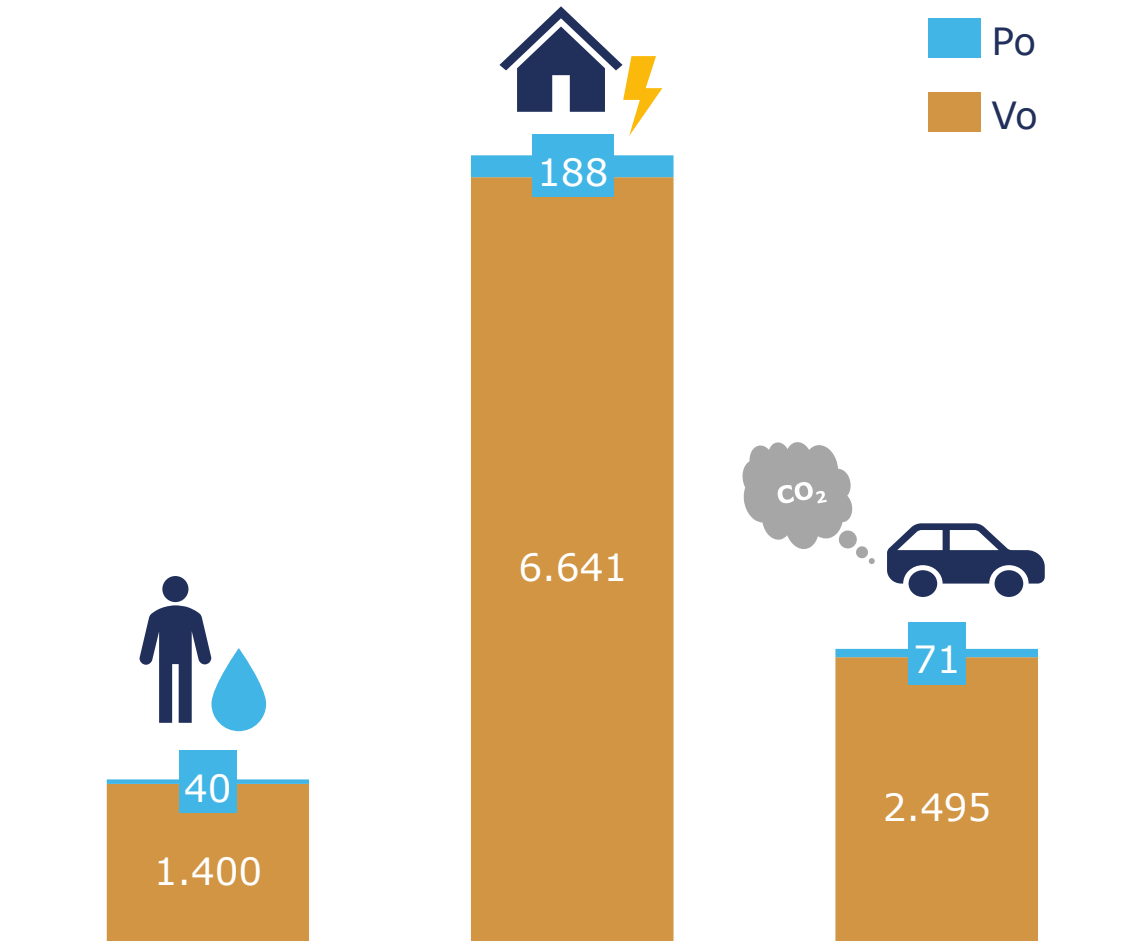
# De milieupact op landelijk niveau

We kunnen de milieupact van AI voor het gehele onderwijs in context plaatsen door een vergelijking te maken met het waterverbruik van personen, stroomverbruik van huishoudens en CO<sub>2</sub>-verbruik van auto's. Figuur 1 illustreert de impact wanneer alle klassen op alle scholen in Nederland dagelijks AI zouden gebruiken zoals op de hypothetische schooldagen. Onderliggende aannames over bijvoorbeeld het aantal leerlingen of het gemiddelde stroomverbruik van een woning staan in Appendix E. De resultaten laten zien dat AI-gebruik op scholen een noemenswaardige impact heeft, maar nog niet in de ordergrootte dat het de totale milieupact van Nederland (dat miljoenen huishoudens en een grote industrie- en landbouwsector omvat) sterk beïnvloedt.

Tabel 2 toont de impact per school, die voor het primair onderwijs een stuk kleiner is aangezien hier alleen de leerkrachten generatieve AI gebruiken.

Tabel 2. Indicatie van de impact van AI per school in personen aan waterverbruik, huishoudens aan elektriciteitsverbruik en auto's aan CO<sub>2</sub>-uitstoot

			
Po	0,01	0,03	0,01
Vo	1	4,6	1,7



Figuur 1. Indicatie van de landelijke impact van AI in personen aan waterverbruik, huishoudens aan elektriciteitsverbruik en auto's aan CO<sub>2</sub>-uitstoot.



### 3. AI en het onderwijs



## HOOFDSTUK 3 - AI EN HET ONDERWIJS

# Wat is AI?

Met AI worden computersystemen bedoeld die intelligent gedrag vertonen. Hierbij kan gedacht worden aan systemen die gezichten herkennen, automatisch teksten genereren of een volgende serie op je favoriete videostreamingdienst aanbevelen.

Artificial intelligence (AI) verwijst naar systemen die intelligent gedrag vertonen door hun omgeving te analyseren en – met een bepaalde mate van autonomie – actie te ondernemen om specifieke doelen te bereiken [3].

### Hoe werkt AI?

Een AI-systeem bestaat uit twee bestanddelen: algoritmen en data [16]. Op basis van deze twee delen doorloopt een AI-systeem drie stappen:

- 1) Detecteren:** het systeem verzamelt data, bijvoorbeeld informatie uit een leerlingvolgsysteem of de input in tekstvorm die een gebruiker levert aan een tool als ChatGPT.
- 2) Interpreteren:** het systeem interpreteert deze data met behulp van een algoritme, bijvoorbeeld wat het niveau van de leerling is of wat een gebruiker van ChatGPT verwacht op basis van zijn/haar input.
- 3) Handelen:** op basis van deze analyse voert het systeem een handeling uit, bijvoorbeeld het voorschotelen van opgaven die passen bij het niveau van de leerling of het genereren van tekst door ChatGPT die zo goed mogelijk aansluit op de input van de gebruiker.

### Welke typen AI zijn er?

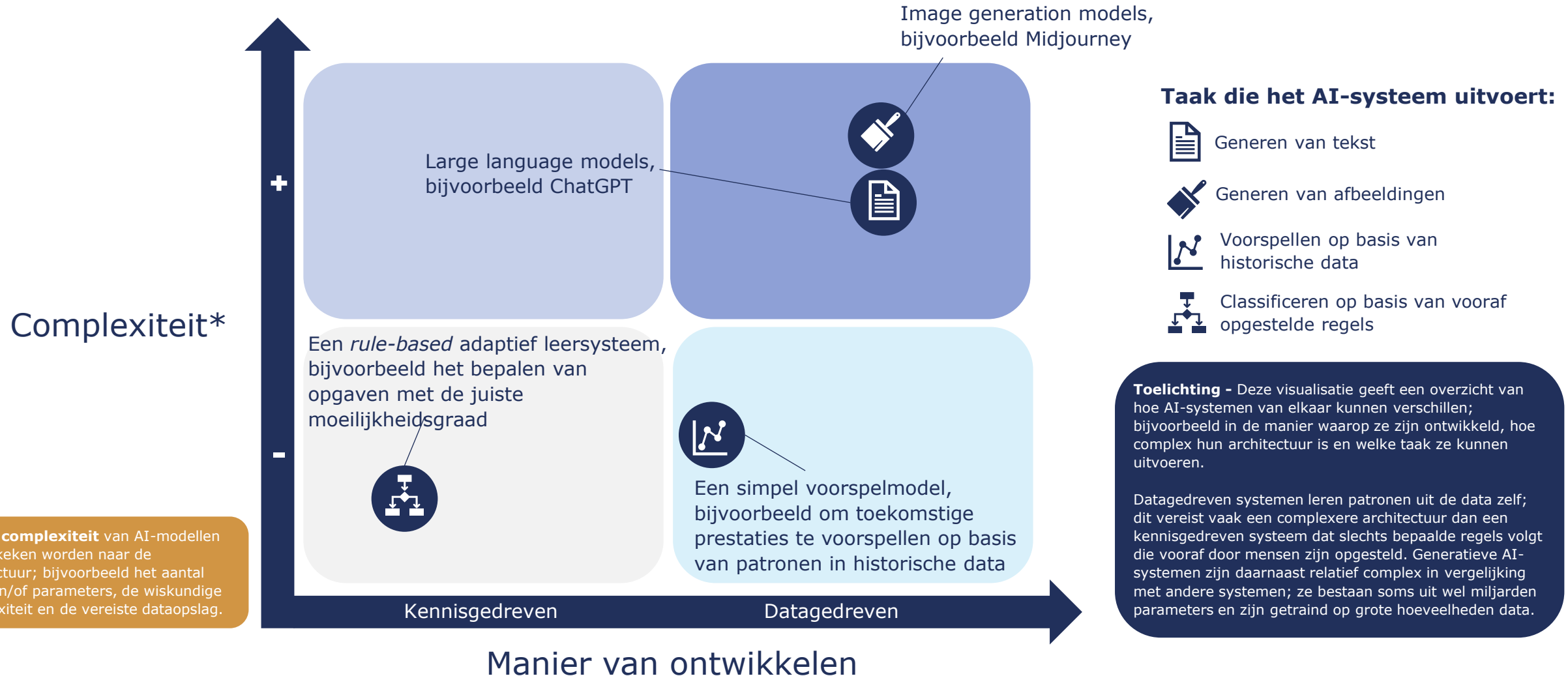
Systemen kunnen bijvoorbeeld van elkaar onderscheiden worden door de manier waarop ze zijn ontwikkeld.

- **Kennisgedreven AI** maakt gebruik van een vast stappenplan of bepaalde logica, bedacht door de mens.
- **Datagedreven AI** maakt gebruik van *machine learning*, waarbij een systeem zelf patronen leert herkennen in grote hoeveelheden data.

Ook zijn AI-systemen vaak **taakspecifiek**. Een bepaald AI-systeem is bijvoorbeeld specifiek ontworpen om het niveau van een leerling te bepalen en hier de lesstof op aan te passen. Een ander AI-systeem is daarentegen weer goed in het genereren van afbeeldingen. Echter kunnen deze AI-systemen in de meeste gevallen niet elkaars taken overnemen.

Daarnaast verschillen AI-systemen in de **complexiteit** van hun architectuur, bijvoorbeeld in het aantal parameters (de interne instellingen van een AI-model). Bepaalde taken, zoals het genereren van content, vereisen bijvoorbeeld een complexere architectuur. Een globale vuistregel is dat datagedreven AI-systemen over het algemeen complexer zijn, zie Figuur 2 op de volgende pagina ter illustratie.

# Datagedreven AI is veelal complexer



\*Bij de **complexiteit** van AI-modellen kan gekeken worden naar de architectuur; bijvoorbeeld het aantal lagen en/of parameters, de wiskundige complexiteit en de vereiste dataopslag.

## HOOFDSTUK 3 - AI EN HET ONDERWIJS

# Hoe wordt AI in het onderwijs toegepast?

AI wordt op verschillende manieren toegepast in het onderwijsproces, zoals tijdens lessen, bij de voorbereiding van lesmateriaal en bij het maken van huiswerk. Deze toepassingen kunnen worden onderverdeeld in twee categorieën [17]:

- 1) AI-integraties:** digitale (leer)middelen die gebruikmaken van AI.
  - a. Adaptieve leermiddelen – Passen het niveau van de lesstof aan, bijvoorbeeld op basis van de prestaties van de leerling.
  - b. Monitoringsystemen – Ondersteunen leraren bij het analyseren van leerprestaties en het geven van gepersonaliseerde begeleiding.
  - c. Chatbots specifiek toegespitst op studiebegeleiding.
- 2) AI-tools:** losse toepassingen, al dan niet speciaal ontwikkeld voor het onderwijs.
  - a. Large language models (LLM's) – Modellen zoals ChatGPT die door leerlingen kunnen worden ingezet voor het genereren van teksten, bijvoorbeeld extra uitleg over een bepaald onderwerp.
  - b. Image generation – Modellen zoals Midjourney of Dall-E waarmee leerlingen afbeeldingen kunnen genereren, bijvoorbeeld om te verwerken in presentaties.

## Voorbeelden



Gynzy



snappet

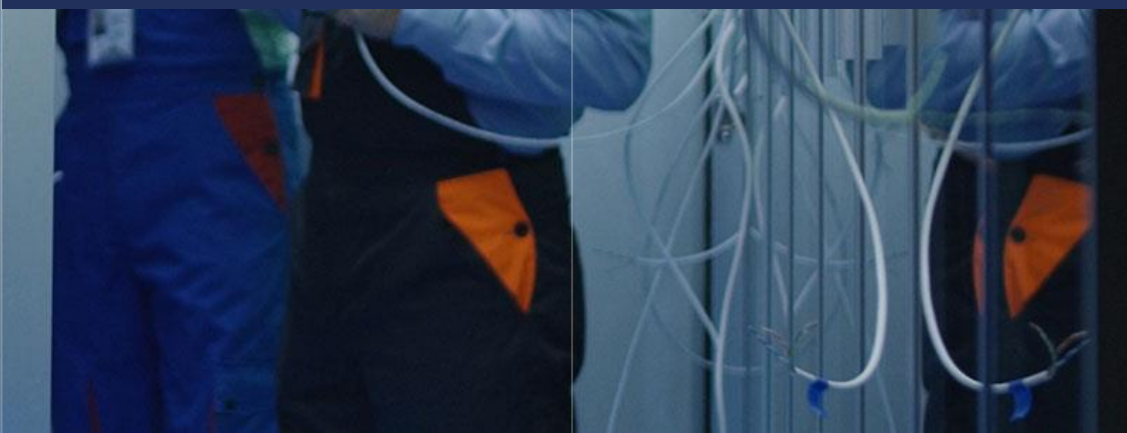


Gemini





## 4. De milieu-impact van AI



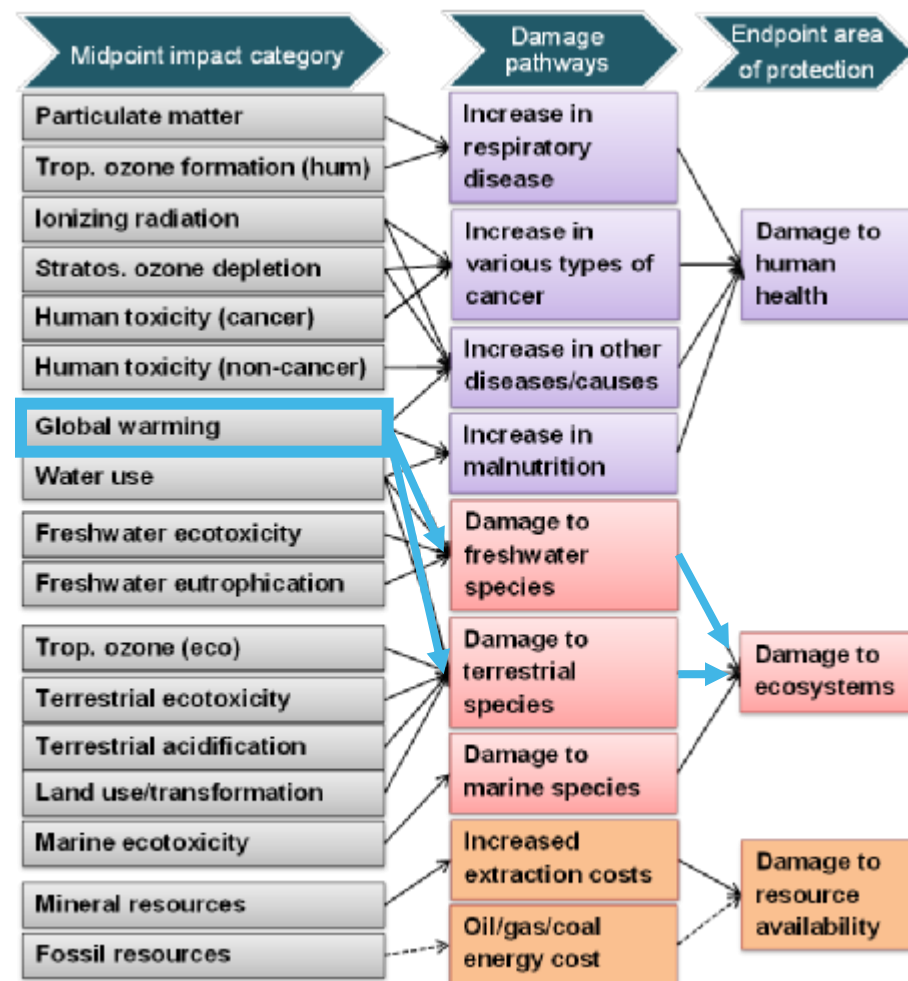
# Wat is milieu-impact?

Milieu-impact is een wijziging van de natuurlijke toestand van het milieu die het gevolg is van een specifieke activiteit. Deze wijziging kan op grofweg twee manieren plaatsvinden [18]:

- **Het onttrekken van grondstoffen** – Hierbij kan gedacht worden aan het mijnen van fossiele energiebronnen, het verbruiken van water of het delven van edele metalen.
- **Het toevoegen van afvalstoffen** – Hierbij kan gedacht worden aan de CO<sub>2</sub>-uitstoot door het verbranden van fossiele energiebronnen, het lozen van afvalstoffen in het water of het dumpen van bijvoorbeeld elektronisch of plastic afval.

Deze twee mechanismen kunnen op allerlei verschillende manieren leiden tot (milieu)schade, zoals te zien is in Figuur 3. Het verbranden van fossiele brandstoffen leidt bijvoorbeeld tot CO<sub>2</sub>-uitstoot (global warming). Dit heeft zowel negatieve gevolgen voor de biodiversiteit van het leven op land als het leven in zoet water, en leidt via beide wegen tot het beschadigen en ontregelen van ecosystemen.

Het is goed om op te merken dat het verbruik van energie (bijvoorbeeld elektriciteit) niet *per definitie* leidt tot een bepaalde milieu-impact. Dit is sterk afhankelijk van de energiebron. Elektriciteit die wordt opgewekt uit zonne-energie leidt bijvoorbeeld tot minder milieu-impact dan elektriciteit die wordt opgewekt door het verbranden van fossiele brandstoffen.



Figuur 3. Overzicht van de structuur van ReCiPe voor impactanalyse [5].





## 4.1 Directe en indirecte milieu-impact



## HOOFDSTUK 4.1 - DIRECTE EN INDIRECTE MILIEU-IMPACT

# Welke milieu-impact heeft AI?

De OECD maakt het onderscheid tussen de *directe* en *indirecte* milieu-impact van AI-systemen [4]. In figuur 4, op de volgende slide, wordt het verschil tussen beide verder toegelicht met behulp van een visualisatie.

### Directe milieu-impact; de levenscyclus van een AI-systeem

Dit omvat alle impact die voortkomt uit de levenscyclus van een AI-systeem. Deze cyclus kent vier verschillende fases:

- 1) Productie** – De productie van de hardware waarop AI-systemen draaien, zoals chips, graphics processing units (GPU's) en central processing units (CPU's).
- 2) Transport** – Het vervoeren en opslaan van de geproduceerde hardware.
- 3) Operatie** – Het inzetten van de geproduceerde hardware voor het ontwikkelen en gebruiken van AI-software.
- 4) Levens einde** – Het recyclen of afvoeren van de hardware als elektronisch afval.

Voor fases 1, 2 en 4 is het erg lastig om specifieke impact toe te wijzen aan AI-systemen, aangezien deze amper te onderscheiden is van de bredere milieu-impact van de hardware voor ICT-systemen. Daarnaast is het ook uitdagend om de impact die voortkomt uit de levenscyclus van hardware mee te nemen in de evaluatie van een specifiek AI-systeem.

### Indirecte milieu-impact; wordt AI op de juiste manier ingezet?

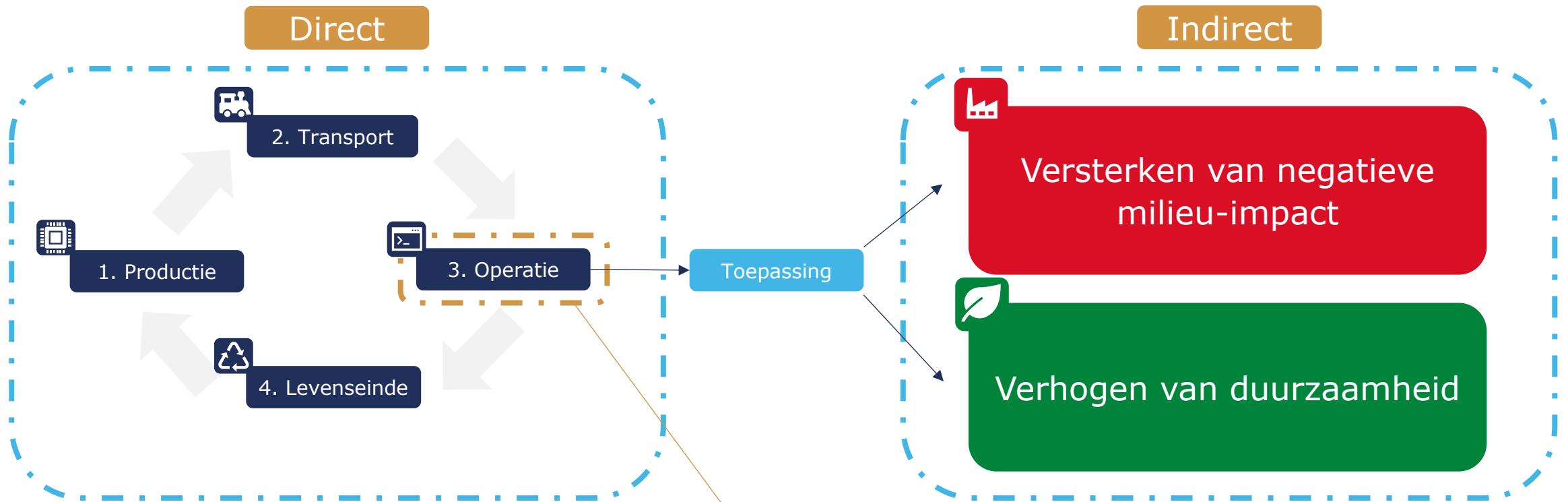
Dit omvat de impact die voortkomt uit hoe een AI-systeem wordt toegepast. Aangezien deze effecten moeilijk te herleiden zijn, is een inschatting van deze vorm van impact voornamelijk kwalitatief.

**Negatief** – AI kan worden ingezet op een manier die negatieve milieu-impact van bepaalde sectoren versterkt. Een voorbeeld is het gebruik van AI-applicaties voor het vinden en extraheren van fossiele brandstoffen. Daarnaast kunnen adviesalgoritmen in e-commerce of media-applicaties leiden tot een toename van consumptiegedrag.

**Positief** – AI kan worden ingezet om de duurzaamheid van sectoren te vergroten. Voorbeelden zijn het optimaliseren van energiesystemen of transportnetwerken waardoor energie wordt bespaard. Daarnaast kan AI bijdragen aan natuurrampenbestrijding en het monitoren of verbeteren van biodiversiteit, water- en luchtkwaliteit.

Hoewel alle dimensies besproken worden in dit onderzoek, ligt de nadruk op de **directe milieu-impact** die voortkomt uit **de operatie** van AI-systemen (**fase 3**), omdat er voor zowel fase 1, 2 en 4 als voor indirecte milieu-impact zeer beperkt data beschikbaar zijn die direct toe te wijzen zijn aan een specifiek AI-model.

# Visualisatie milieu-impact AI



De milieu-impact van de *operatie* van AI-modellen kan het meest accuraat gekwantificeerd worden in vergelijking met de andere onderdelen. Daarnaast is dit ook de milieu-impact die direct te herleiden is naar het *gebruik* van AI.

## HOOFDSTUK 4.1 - DIRECTE EN INDIRECTE MILIEU-IMPACT

# Wat is de directe milieu-impact van AI?

Er zijn meerdere manieren waarop AI-systemen voor milieu-impact zorgen. De belangrijkste drie worden hieronder uitgelicht; (1) het gebruik van grondstoffen, zoals edele metalen, voor de productie van hardware, (2) het energieverbruik van de datacenters waar de AI-modellen draaien en (3) het waterverbruik van deze datacenters, bijvoorbeeld voor het koelen van de hardware en het water dat wordt gebruikt bij het opwekken van energie.



Grondstoffen

Om een AI-programma te laten draaien is er hardware nodig. Dit zijn bijvoorbeeld de datacenters waar de modellen draaien. Dat zorgt voor de uitputting van zeldzame, minerale, grondstoffen.

- Microchips zijn essentiële bouwstenen voor elektronische producten. Hiervoor is onder andere kobalt, silicium en platina nodig [6,7]. Wereldwijd toenemende vraag naar chips kan op den duur voor grondstofschaarste zorgen en maakt ons afhankelijk van andere landen [8].
- OpenAI gebruikte een supercomputer om GPT-3 te trainen met 10.000 GPU's en 285.000 CPU's. Dat is ruim genoeg chips voor 10.000 normale computers [9].



Energie

De datacenters waar AI-programma's draaien gebruiken veel stroom. Deels voor de training maar de meeste stroom wordt gebruikt tijdens het gebruik van het model. Het stroomgebruik leidt weer tot CO<sub>2</sub>-uitstoot.

- AI zorgt nu al voor 10% tot 20% van het elektriciteitsverbruik van datacenters [10].
- De elektriciteitsvraag voor AI stijgt met zo'n 70% per jaar [10].
- Het wordt verwacht dat in 2030 de CO<sub>2</sub>-uitstoot van datacenters is verdrievoudigd door AI, wat leidt tot 2,5 miljard ton CO<sub>2</sub>-uitstoot per jaar [11]. Dit is ongeveer 5% van de wereldwijde CO<sub>2</sub>-uitstoot per jaar [12].



Water

Datacenters genereren warmte en moeten daarom gekoeld worden. Hier wordt schoon water voor gebruikt omdat zout of vies water de koelsystemen aantast of verstopt.

- In 2021 is geschat dat alle datacenters in Amerika gezamenlijk zo'n 1,7 miljard liter water per dag gebruiken. Dit was ruim 0,1% van de totale vraag in de VS [13].
- Een enkel datacenter kan al 2,1 miljoen liter water per dag verbruiken. Sommige bevinden zich op locaties waar water al schaars is, zoals Arizona, wat voor nog grotere schaarste zorgt [10].

## HOOFDSTUK 4.1 - DIRECTE EN INDIRECTE MILIEU-IMPACT

# Wat is de indirecte milieu-impact van AI?

De indirecte milieu-impact van AI is afhankelijk van waar de technologie uiteindelijk voor wordt *ingezet*. Sommige onderzoeken schatten zelfs in dat de netto-impact van AI op het klimaat positief is [21]. Het gebruik van AI biedt bijvoorbeeld kansen op de volgende gebieden:

- **Energietransitie** – Het versnellen en mogelijk maken van de transitie naar het gebruik van duurzame energiebronnen, bijvoorbeeld door het optimaliseren van energiesystemen [21].
- **Verminderen van de menselijke ecologische voetafdruk** – Het verminderen van de druk die menselijke activiteiten op het milieu uitoefenen, bijvoorbeeld door het optimaliseren van grondstofverbruik en afval of CO<sub>2</sub>-uitstoot [21].

AI kan echter ook worden ingezet op manieren waardoor negatieve milieu-impact wordt vergroot:

- **Extractie en productie van grondstoffen** – Het efficiënter kunnen mijnen en extraheren van grondstoffen, waardoor natuurlijke bronnen sneller uitgeput raken en er meer afval en CO<sub>2</sub>-uitstoot ontstaat [4].
- **Commerciële algoritmen** – Het vergroten van menselijke consumptie door producten gericht en effectief te adverteren aan specifieke doelgroepen [4].

Het is echter uitdagend om de effecten hiervan in kaart te brengen, laat staan te kwantificeren. Dit komt omdat deze indirecte effecten niet altijd even goed meetbaar zijn en op verschillende niveaus doorwerken:

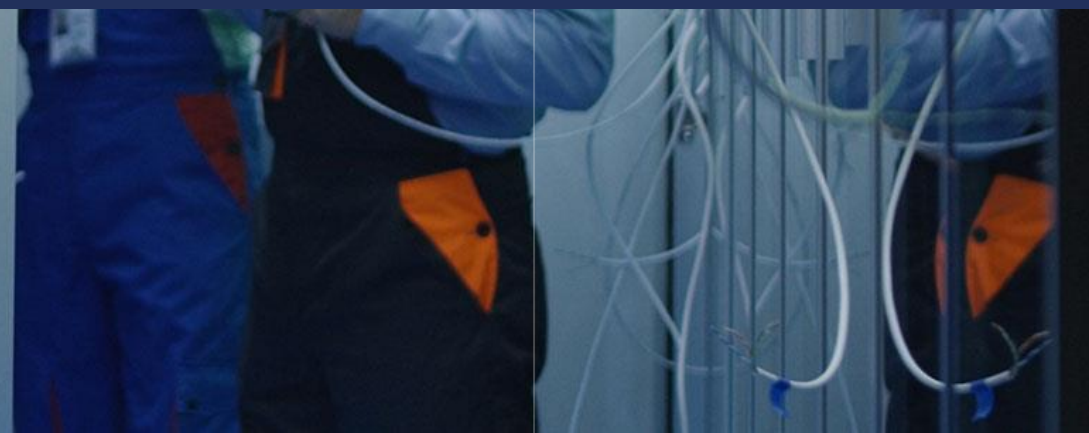
- **Indirect eerstegraadseffect** – Voorbeeld: een optimalisatie-algoritme wordt gebruikt om transportroutes efficiënter in te richten, wat leidt tot minder brandstofgebruik en daarmee CO<sub>2</sub>-uitstoot. Dit zou je kunnen omschrijven als een *positief eerstegraadseffect*.
- **Indirect tweedegraadseffect** – Door dit optimalisatie-algoritme besparen bedrijven op brandstofkosten, wat paradoxaal genoeg een *negatief tweedegraadseffect* zou kunnen veroorzaken:
  1. Door besparingen op brandstof zullen bedrijven mogelijk minder geneigd zijn over te stappen op duurzame alternatieven.
  2. Door besparingen op brandstof zullen bedrijven mogelijk goedkopere tarieven aan hun klanten kunnen bieden, waardoor de vraag naar transportservices toeneemt en brandstofgebruik uiteindelijk *stijgt*.

### Reboundeffect

Een beroemd voorbeeld van een indirect tweedegraads effect is het *reboundeffect* [21]. Dit stelt dat wanneer er de efficiëntie van iets toeneemt (bijvoorbeeld transport), dit soms kan leiden tot een toename van de vraag. Hierdoor kunnen de positieve milieueffecten van efficiëntie worden afgezwakt of soms zelfs teniet worden gedaan.



## 4.2 Milieu-impact van de operatie van AI: training versus gebruik



## 4.2 MILIEU-IMPACT VAN DE OPERATIE VAN AI: TRAINING VERSUS GEBRUIK

# Hoe leidt de operatie van AI tot milieu-impact?

De operatie van AI-systemen kan onderverdeeld worden in de ontwikkeling en het gebruik van het model (Figuur 5) [20]:

### 1) Het ontwikkelen van een AI-systeem – trainingsfase

- a. Het programmeren van de regels van een adaptief leersysteem, bijvoorbeeld welke sommen makkelijk/moeilijk zijn, en hoeveel antwoorden een leerling goed moet hebben om een niveau omhoog te gaan.
- b. Het trainen van een taalmodel zoals ChatGPT op enorme hoeveelheden tekstdata om de onderliggende structuur te leren.

### 2) Het gebruik van een AI-systeem – inferencefase

- a. Een adaptief leersysteem dat op basis van het niveau van een leerling bepaalt welke som hij of zij te zien krijgt.
- b. ChatGPT die tekst genereert op basis van een vraag.

AI-systemen draaien op hardware-infrastructuur, bijvoorbeeld computers of servers in datacenters. Zowel het ontwikkelen als het gebruik van AI leidt daarmee tot verschillende vormen van milieu-impact; deze infrastructuur verbruikt immers energie en wordt vaak gekoeld met behulp van (zoet) water.

### CO<sub>2</sub>-uitstoot (energieverbruik)

De operatie van AI-systemen kost energie in de vorm van stroomverbruik. Afhankelijk van de manier waarop deze stroom wordt opgewekt, leidt dit tot verschillende mate van CO<sub>2</sub>-uitstoot. Wanneer een taalmodel zoals ChatGPT wordt getraind in een datacenter dat zon- of windenergie gebruikt, leidt dit logischerwijs tot minder CO<sub>2</sub>-uitstoot dan bij het gebruik van fossiele brandstoffen.

### Waterverbruik

Waterverbruik omvat de hoeveelheid water die wordt opgebruikt doordat het verdampt, wordt opgenomen in producten of anderszins uit het watersysteem verdwijnt [19]. De operatie van AI zorgt voor waterverbruik op twee manieren; (1) op locatie van de datacenters voor het koelen van de hardware en (2) extern, door het water dat wordt verbruikt bij het opwekken van elektriciteit [19].

Het World Economic Forum (WEF) schat in dat de *trainingsfase* verantwoordelijk is voor 20% van de ecologische voetafdruk van AI, terwijl de *inferencefase* maar liefst 80% van de milieu-impact voor zijn rekening neemt [14].

## 4.2 MILIEU-IMPACT VAN DE OPERATIE VAN AI: TRAINING VERSUS GEBRUIK

# Verskil *training* en *inference*

## Training

De ontwikkeling van een (datagedreven) AI-systeem

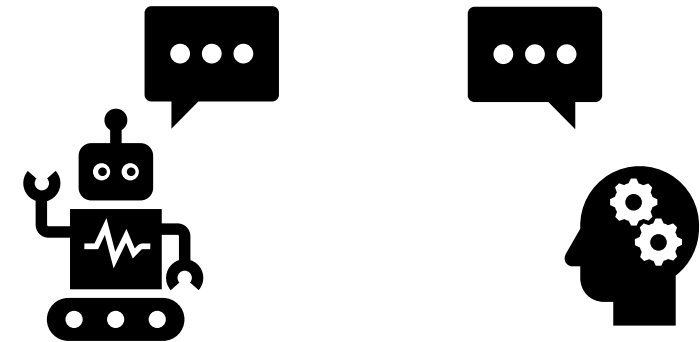


**Training** is het proces waarin (datagedreven) AI de patronen in de data leert herkennen door het afstellen van interne parameters van het systeem. Parameters in een AI-systeem zijn de getallen of instellingen die de interne werking van het model bepalen.

**Voorbeeld:** een AI die op teksten uit een technologieblog is getraind, heeft een andere tekststructuur aangeleerd dan een AI die is getraind op de teksten uit Engelstalige kookboeken.

## Inference

Het gebruik van een (datagedreven) AI-systeem



**Inference** is het proces waarin (datagedreven) AI een output genereert op een bepaalde input. Hier wordt de interne structuur dus niet door veranderd.

**Voorbeeld:** stel, we geven een LLM de opdracht: 'Noem enkele feiten over Apple'. De twee AI-modellen uit het voorbeeld hiernaast, die op verschillende data zijn getraind, zullen op basis van deze input beide een andere output formuleren. De AI die is getraind op teksten uit een technologieblog, zal waarschijnlijk feiten opnoemen gerelateerd aan het *bedrijf* Apple. De AI die is getraind op de teksten uit Engelstalige kookboeken zal eerder feiten opnoemen gerelateerd aan Apple als *vrucht*.



## 4.2 MILIEU-IMPACT VAN DE OPERATIE VAN AI: TRAINING VERSUS GEBRUIK

# Wat is de milieu-impact van het trainen van AI-systemen?

**Zoals eerder benoemd zorgt het ontwikkelen (trainen) van AI-systemen ook voor milieu-impact. Hier zijn grote hoeveelheden water- en elektriciteitsverbruik mee gemoeid. Deze impact is echter eenmalig; het gebruik van AI door miljoenen mensen weegt daarom op termijn een stuk zwaarder.**

Het trainen van GPT-3 heeft ongeveer 1287 MWh aan elektriciteit gekost. Dit is vergelijkbaar met de jaarlijkse elektriciteitsvraag van ongeveer 515 Nederlandse woningen. Hier kwam naar schatting 552 ton aan CO<sub>2</sub> bij vrij. Dat is vergelijkbaar met de jaarlijkse uitstoot van 334 benzineauto's [15].

Het waterverbruik voor de training van GPT-3 zat in de ordegrrootte van miljoenen liters[19], vergelijkbaar met het jaarlijkse waterverbruik van tientallen tot enkele honderden Nederlanders.

GPT-4 is getraind op 570 keer meer parameters dan GPT-3, de energievraag was daarmee ongetwijfeld een stuk hoger. Mogelijk is de training wel efficiënter geworden; de exacte milieu-impact van GPT-4 is daarmee lastig in te schatten. Wat we hier wel uit kunnen opmaken is dat de veranderingen snel gaan en dat bovenstaande cijfers ongetwijfeld achterlopen op de nieuwste modellen [15].

Ook al kost het trainen van deze modellen op het eerste oog veel water en elektriciteit, uiteindelijk zorgt het gebruik voor de grootste impact. Zo schat NVIDIA dat 80% tot 90% van de elektriciteitsvraag van *machine learning* door de gebruiksfase komt en schat het WEF dat 80% van de milieu-impact door gebruik komt [15] [14].

Een eigen inschatting laat ook zien dat het gebruik zwaarder weegt. Alleen in januari 2023 had GPT-3 namelijk zo'n 590 miljoen bezoekers [22]. De elektriciteitsvraag wordt geschat op zo'n 4 Wh per vraag [15] [23]. Op basis hiervan is het stroomverbruik door het gebruik in deze ene maand al hoger dan van het trainen van model.


De impact van training weegt uiteindelijk dus een stuk minder zwaar. Daarbij is het onduidelijk hoe vaak een model precies wordt gebruikt en voor welk aandeel van de training iemand 'verantwoordelijk' gehouden kan worden. **Daarom laten we de trainingsfase verder buiten beschouwing en leggen we de focus op de gebruiksfase.**

## 4.2 MILIEU-IMPACT VAN DE OPERATIE VAN AI: TRAINING VERSUS GEBRUIK

# De milieu-impact van het gebruik van large language models



## CO<sub>2</sub>-uitstoot (energieverbruik)

 4 Wh / vraag


 1 gram CO<sub>2</sub> / vraag

Dit gaat uit van de gemiddelde energievraag voor een vraag aan BLOOM [23], een model vergelijkbaar met GPT-3 [19]. Hier is de training niet in meegenomen. Daarbij kan de energievraag wisselen per programma en per type vraag.

Een CO<sub>2</sub>-intensiteit van 250 g / kWh is aangenomen. Dit is vergelijkbaar met de gemiddelde intensiteit in Nederland maar in andere landen kan dit veel lager of hoger zijn, bijvoorbeeld 57 in Frankrijk en 429 in de VS [23].



## Waterverbruik

 16 ml / vraag

Dit gaat uit van een vraag aan GPT-3 die wordt behandeld in een datacenter in Nederland, exclusief training. Hierbij is zowel on-site als off-site watergebruik meegenomen. Off-site bevat naast het waterverbruik van het datacenter ook het watergebruik dat nodig was voor de opwek van de gebruikte elektriciteit.


Zoals eerder vermeld is de locatie erg bepalend voor de watervraag. De keuze voor een datacenter in Nederland is arbitrair maar zit dicht bij het gemiddelde van de landen die zijn meegenomen in het onderzoek dat als referentie wordt gebruikt [19].

## 4.2 MILIEU-IMPACT VAN DE OPERATIE VAN AI: TRAINING VERSUS GEBRUIK

# De milieu-impact van het gebruik van image generation models



## CO<sub>2</sub>-uitstoot (energieverbruik)

 8,5 Wh / afbeelding

 2,1 gram CO<sub>2</sub> / afbeelding

Dit gaat uit van de gemiddelde energievraag voor een opdracht voor het programma Stable Diffusion [24]. In dit onderzoek is de gemiddelde impact bepaald van een bezoeker die 4 afbeeldingen genereert. Dit resulteerde in 0,202 MJ stroomgebruik, waarvan 60% door inference [24]. Van deze 0,202 nemen we dus 60% en delen het door 4 om het vervolgens om te rekenen van MJ naar Wh.

Wederom is een CO<sub>2</sub>-intensiteit van 250 g / kWh aangenomen.



## Waterverbruik

 34 ml / afbeelding

Aangezien het waterverbruik voornamelijk nodig is voor het koelen, wat samenhangt met het energieverbruik, wordt er aangenomen dat de verhouding tussen water en elektriciteitsverbruik bij image generation models hetzelfde is als bij LLMs.

Het referentieonderzoek bepaalt het watergebruik van GPT-3 dan ook op de locatie en het elektriciteitsgebruik [19]. Aangezien de elektriciteitsvraag 2,1 keer zo hoog is, gaan we dus ook uit van 2,1 keer zoveel waterverbruik. Wederom wordt er uitgegaan van een datacenter in Nederland.



## 4.3 Variaties in milieu-impact van AI



## HOOFDSTUK 4.3 - VARIATIES IN MILIEU-IMPACT VAN AI

# Waarom is de milieupact anders voor verschillende modellen?

Over de milieupact van specifieke AI-modellen zijn relatief weinig data beschikbaar; leveranciers van AI-modellen zijn weinig transparant over de specificaties van de door hen gebouwde technologie. Hierdoor is het lastig om tot accurate cijfers te komen, wat er onder andere toe leidt dat de schattingen omtrent de milieupact van specifieke AI-modellen nogal uiteenlopen. Naast een gebrek aan data zijn er nog een aantal andere factoren die deze variatie (gedeeltelijk) kunnen verklaren:

- **Complexiteit** – Er is een positieve relatie tussen de complexiteit van een model en de milieupact [25]. Dezelfde typen AI-modellen (bijvoorbeeld LLM's) kunnen verschillen in complexiteit; GPT-3 heeft bijvoorbeeld 176 miljard parameters terwijl Llama 2 uit slechts 70 miljard parameters bestaat. Dit leidt mogelijk tot variërende cijfers.
- **Taaktype** – Naast complexiteit is ook het type taak van invloed op de milieupact van een AI-model [10]. Dit kan gaan om taken die beduidend van elkaar verschillen; bijvoorbeeld het genereren van tekst tegenover het genereren van een afbeelding. Echter kan de impact van vergelijkbare taken ook uiteenlopen; het samenvatten van een tekst kost bijvoorbeeld meer energie, en leidt daarmee tot meer impact, dan het beantwoorden van een simpele vraag.

- **Invloed van randvoorwaarden** – Ook kan de variatie in cijfers omtrent de milieupact van AI-modellen verklaard worden door de aannames die zijn gedaan om tot een berekening te komen. Een voorbeeld hiervan is de efficiëntie van het type hardware dat gebruikt wordt tijdens het ontwikkelen en gebruiken van een model.

### Toelichting op de uitgangspunten voor berekeningen

Zoals beschreven zijn er een aantal redenen waarom het accuraat berekenen van de milieupact van specifieke AI-modellen uitdagend is. Om toch tot een bruikbare inschatting te kunnen komen, is het nodig om bepaalde aannames te doen. Het is echter belangrijk om duidelijk te communiceren (1) op welke uitgangspunten en aannames deze berekening gebaseerd is en (2) dat het dus een berekening betreft gebaseerd op een specifieke situatie. Hiermee schetsen onze berekeningen dus slechts een indicatief beeld, en zijn daarmee dus niet bedoeld als harde data waarmee accuraat (beleidsmatige) afwegingen gemaakt kunnen worden. Om de cijfers die in dit rapport genoemd staan voldoende context te geven, staat in Appendix C een overzicht van hoe de cijfers zich verhouden tot alternatieve data en uitgangspunten.

## HOOFDSTUK 4.3 - VARIATIES IN MILIEU-IMPACT VAN AI

# Waarom is de milieu-impact van AI wisselend per locatie?

De milieu-impact van AI varieert sterk per locatie en per moment. Zo wordt water gebruikt voor koeling bij datacenters, wat wordt beïnvloed door het weer. Ook wisselt de waterschaarste per locatie sterk. Water wordt ook gebruikt voor bij elektriciteitscentrales, daarvoor is ook de elektriciteitsbron van belang, die ook kan variëren [19].

De CO<sub>2</sub>-uitstoot hangt ook af van de **elektriciteitsmix**. Wind- en zonne-energie zijn bijvoorbeeld klimaatneutraal, terwijl kolencentrales wel veel CO<sub>2</sub> uitstoten. Dit verschil kan per land en locatie aanzienlijk zijn.

Een goed voorbeeld is de vergelijking tussen de training van BLOOM en GPT-3. BLOOM werd getraind in Frankrijk, waar veel elektriciteit uit kerncentrales komt, met een gemiddelde *carbon intensity* van 57 g CO<sub>2</sub> per kWh [23]. GPT-3 werd getraind in Amerika, waar de meeste stroom uit fossiele brandstoffen komt, met een gemiddelde *carbon intensity* van 429 g CO<sub>2</sub> per kWh [15][26]. De cijfers voor BLOOM en GPT-3 zijn gemiddelden per land. De exacte locatie en timing zijn ook belangrijk. Californië heeft bijvoorbeeld veel zonnepanelen, terwijl West Virginia bijna alleen kolencentrales heeft [27].

Wat het nog complexer maakt is dat programma's niet altijd op maar één plek draaien. Zeker voor grote programma's kan het zo zijn dat datacenters van een externe partij worden gebruikt om de programma's in de lucht te houden [19].

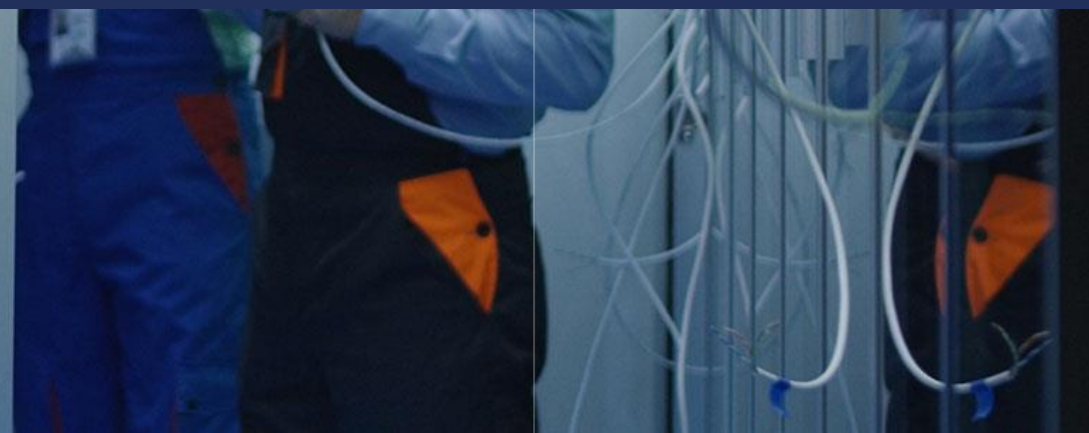
Kortom, de getallen in dit onderzoeksveld zijn onzeker. We weten dat de locatie en de timing van belang zijn, maar we kunnen niet altijd achterhalen wat, waar en wanneer dit allemaal precies gebeurt. Hierdoor moeten er noodgedwongen aannames worden gedaan, bijvoorbeeld over de *carbon intensity*.

Andere onzekerheid kan komen uit een **verschil in onderzoekscope**. Sommige studies kijken bijvoorbeeld alleen naar on-site watergebruik voor datacenterkoeling, terwijl andere ook off-site watergebruik voor energiecentrales meenemen.

Dit leidt tot variërende uitkomsten tussen bronnen, zonder dat een van beide volledig onjuist is. Het is in sommige gevallen echter lastig te achterhalen door welke keuzes en aannames de resultaten anders zijn.



## Bronnen en appendix



## KLIMAAT EN REKENKRACHT

## Bronnenlijst

Bron	Link
[1]	<a href="#">A review of green artificial intelligence: Towards a more sustainable future - ScienceDirect</a>
[2]	<a href="#">How to manage AI's energy demand — today and in the future   World Economic Forum</a>
[3]	<a href="#">A definition of Artificial Intelligence: main capabilities and scientific disciplines   Shaping Europe's digital future</a>
[4]	<a href="#">Measuring the environmental impacts of artificial intelligence compute and applications : The AI footprint   OECD Digital Economy Papers   OECD iLibrary</a>
[5]	<a href="#">LCIA: the ReCiPe model   RIVM</a>
[6]	<a href="#">Kritieke materialen in de Nederlandse toeleveringsketen   CBS</a>
[7]	<a href="#">How recycling mitigates supply risks of critical raw materials: Extension of the geopolitical supply risk methodology applied to information and communication technologies in the European Union - ScienceDirect</a>
[8]	<a href="#">Zonder kritieke materialen geen energietransitie en microchips</a>
[9]	<a href="#">OpenAI Presents GPT-3, a 175 Billion Parameters Language Model   NVIDIA Technical Blog</a>
[10]	<a href="#">The Environmental Impacts of AI – Primer</a>
[11]	<a href="#">Trends in mondiale uitstoot van CO2 en alle broeikasgassen: 2020 rapport   Planbureau voor de Leefomgeving</a>
[12]	<a href="#">Global CO2 emissions by year 1940-2024   Statista</a>
[13]	<a href="#">Data centre water consumption   npj Clean Water</a>
[14]	<a href="#">How to manage AI's energy demand — today and in the future   World Economic Forum</a>
[15]	<a href="#">Carbon Emissions and Large Neural Network Training</a>
[16]	<a href="#">Wat is artificial intelligence? - Kennisnet</a>
[17]	<a href="#">Zo zie je AI terug in leermiddelen en andere toepassingen - Kennisnet</a>

Bron	Link
[18]	<a href="#">Introduction to Environmental Impact Assessment: Principles and Procedures, Process, Practice and Prospects</a>
[19]	<a href="#">Making AI Less "Thirsty": Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models</a>
[20]	<a href="#">Sustainable AI: Environmental Implications, Challenges and Opportunities</a>
[21]	<a href="#">Ecological footprints, carbon emissions, and energy transitions: the impact of artificial intelligence (AI)</a>
[22]	<a href="#">ChatGPT reaches 100 million users two months after launch   Chatbots   The Guardian</a>
[23]	<a href="#">ESTIMATING THE CARBON FOOTPRINT OF BLOOM, A 176B PARAMETER LANGUAGE MODEL</a>
[24]	<a href="#">Estimating the environmental impact of Generative-AI services using an LCA-based methodology - ScienceDirect</a>
[25]	<a href="#">HAI AI-Index-Report-2024.pdf</a>
[26]	<a href="#">Frequently Asked Questions (FAQs) - U.S. Energy Information Administration (EIA)</a>
[27]	<a href="#">Electricity Generation by State   October 2024   Choose Energy</a>



# Appendix A

Waarom kiezen wij voor een bepaalde aanpak? De focus op *inference* en de aangenomen waarden voor elektriciteitsvraag.

Nogmaals willen we benadrukken dat dit onderzoeksveld in ontwikkeling is, wat de resultaten onzeker maakt. We hebben ervoor gekozen om ons te richten op de CO<sub>2</sub>-uitstoot, het elektriciteitsverbruik en het waterverbruik tijdens het gebruik (*inference*). Dit heeft drie belangrijke redenen.

1. Het is lastig om de impact van de ontwikkeling (*training*) accuraat toe te wijzen aan een individuele gebruiker. Bij toenemend gebruik van AI (wat verwacht wordt) *daalt* bijvoorbeeld het aandeel per gebruiker dat toe te schrijven is aan de ontwikkeling van AI. Daarnaast is het de vraag of het verrekenen van de training met het gebruik gepast is; een individuele gebruiker heeft hier relatief weinig invloed op. Wij kijken daarom specifiek naar de additionele impact van een specifieke gebruiker.
2. Er is relatief veel bekend over de impact die voortvloeit uit het gebruik, al is ook hier nog relatief veel onzeker in het onderzoeksveld.
3. De focus op *inference* beperkt de ruimte voor eigen interpretatie. Je zou bijvoorbeeld, naast de impact van de training of benodigde hardware, óók de impact van *edge devices* (zoals een laptop) kunnen meenemen in berekening. Wanneer je AI gebruikt op een laptop, welk percentage van de milieu-impact van deze laptop is dan redelijk om toe te schrijven aan AI? Hierover kunnen meningen verschillen.

Wij hebben er daarnaast voor gekozen om voor elke aanname één onderzoek te gebruiken en niet een gemiddelde te nemen van de waarden uit meerdere onderzoeken. Voor de energievraag van een LLM gebruiken we een onderzoek naar BLOOM. In dit onderzoek is de energievraag en het aantal vragen voor 18 dagen bijgehouden. Voor de energievraag voor een *image generator* is een onderzoek naar Stable Diffusion gebruikt. In dit onderzoek is een replica van het programma gemaakt wat vervolgens op lokale hardware is gerund. Vervolgens hebben onderzoekers de stroomvraag van deze hardware gemeten. Beide onderzoeken hebben een transparante onderzoeksopzet en baseren zich op experimenten waar de elektriciteitsvraag daadwerkelijk is gemeten en niet op aannames is gebaseerd. Het is echter goed om te benoemen dat de getallen in het onderzoeksveld uiteenlopen. Een aantal alternatieve waarden en bijhorende bronnen zijn te vinden in Appendix C.

# Appendix B

## Waarom kiezen wij voor een bepaalde aanpak? De aannames voor waterverbruik.

Het onderzoek waarop we onze aannames voor het watergebruik baseren, maakt een schatting van het watergebruik van GPT-3 [19]. Dit onderzoek doet dit aan de hand van het elektriciteitsverbruik, dat ook is vastgesteld op 4 Wh per *vraag*. Het onderzoek neemt daarnaast zowel het waterverbruik mee voor het koelen van de hardware (on-site) als waterverbruik dat nodig was bij de elektriciteitsopwekking (off-site). Op basis van aannames over de verschillende weersomstandigheden, de elektriciteitsmix en de kenmerken van datacenters maken zij vervolgens per locatie een schatting van het waterverbruik van een LLM.

Ze gebruiken hiervoor per locatie een ander getal voor de power usage effectiveness (PUE), wat aangeeft hoe efficiënt een datacenter met zijn energie omgaat, en de water usage effectiveness (WUE), wat aangeeft hoeveel water er nodig is om te koelen per gebruikte hoeveelheid energie. Voor onze berekeningen zijn we uitgegaan van een datacenter dat in Nederland staat. Dit is een arbitraire keuze geweest: dat wij in Nederland gevestigd zijn, betekent namelijk niet dat onze vraag per definitie door een datacenter in Nederland wordt behandeld. De resultaten voor Nederland zijn echter geen *outliers* en zijn vergelijkbaar met de PUE en WUE van veel andere locaties die in het onderzoek worden genoemd.

Hoewel het bovenstaande onderzoek een LLM als uitgangspunt neemt, kan het ook gebruikt worden om het waterverbruik van andere AI-systemen te berekenen. Wanneer de locatie van een datacenter en het elektriciteitsverbruik van een AI-systeem bekend zijn, kan op basis van bovenstaande onderzoek ook een schatting worden gemaakt van het watergebruik van dit systeem. Op deze manier hebben wij ook een schatting kunnen maken van het waterverbruik van *image generation models* op basis van data over Stable Diffusion.

# Appendix C

## Alternatieve aannames en bijbehorende bronnen

Variabele	Alternatief 1	Alternatief 2	Alternatief 3	Bron 1	Bron 2	Bron 3
E-vraag inference LLM	2,9 Wh / vraag  GPT, niet gedefinieerd welke versie	4 Wh / pagina gegenereerde tekst  GPT-3	0,05 Wh / vraag  Specifiek text generation met verouderde modellen waaronder GPT-2	<a href="#">Environmental Impact of Generative AI   20 Stats &amp; Facts 2024</a>	<a href="#">Making AI Less "Thirsty": Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models</a>	<a href="#">Power Hungry Processing: ⚡ Watts ⚡ Driving the Cost of AI Deployment?</a>
E-vraag inference image generation	2,9 Wh / afbeelding  Verschillende modellen waaronder Stable Diffusion 2.1			<a href="#">Power Hungry Processing: ⚡ Watts ⚡ Driving the Cost of AI Deployment?</a>		
Watervraag LLM	7,2 – 48,3 ml / vraag  Zelfde onderzoek als hoofdaanname maar voor verschillende locaties			<a href="#">Making AI Less "Thirsty": Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models</a>		
Watervraag image generation	15,2 – 101,4 ml / vraag  Zelfde onderzoek als hoofdaanname maar voor verschillende locaties			<a href="#">Making AI Less "Thirsty": Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models</a>		

# Appendix D

## Begrippenlijst

Begrip	Uitleg
<b>AI (artificial intelligence)</b>	Een techniek waarmee computersystemen intelligent gedrag kunnen vertonen, zoals het herkennen van gezichten, het genereren van tekst, of het aanbevelen van films.
<b>Adaptief leersysteem</b>	Een systeem dat lesstof aanpast aan het niveau van een leerling, gebaseerd op prestaties en voortgang.
<b>BLOOM</b>	Een large language model dat vergelijkbaar is met GPT-3 qua aantal parameters.
<b>CO<sub>2</sub>-intensiteit</b>	De hoeveelheid CO <sub>2</sub> -uitstoot per geproduceerde eenheid energie; deze varieert afhankelijk van de energiebron, zoals kolen of windenergie.
<b>Datagedreven AI</b>	AI-systemen die leren van patronen in grote hoeveelheden data, zoals teksten of afbeeldingen.
<b>Inference (gebruiksfase)</b>	De fase waarin een AI-systeem wordt gebruikt om een taak uit te voeren, zoals het beantwoorden van vragen of het genereren van afbeeldingen.
<b>Generatieve AI</b>	Een type AI dat nieuwe inhoud kan creëren, zoals teksten (bijvoorbeeld ChatGPT) of afbeeldingen (bijvoorbeeld Stable Diffusion).
<b>GPU (graphics processing unit)</b>	Een krachtige processor die vaak wordt gebruikt voor het trainen en draaien van AI-modellen.
<b>Kennisgedreven AI</b>	AI-systemen die werken op basis van vooraf door mensen opgestelde regels en logica.
<b>Large language model (LLM)</b>	Een type AI dat grote hoeveelheden tekstdata gebruikt om taken zoals tekstgeneratie of samenvatting uit te voeren (bijvoorbeeld GPT-3 of BLOOM).
<b>Milieu-impact</b>	De invloed van een activiteit of systeem op het milieu, zoals energieverbruik, CO <sub>2</sub> -uitstoot, en waterverbruik.
<b>Parameters</b>	Interne instellingen van een AI-model die tijdens de training worden geoptimaliseerd om het model beter te laten presteren.
<b>Power usage effectiveness (PUE)</b>	Een maat voor hoe efficiënt een datacenter met energie omgaat; een lagere PUE betekent efficiënter energiegebruik.
<b>Rule-based systemen</b>	AI-systemen die werken op basis van vaste regels, zonder dat ze patronen leren uit data.
<b>Stable Diffusion</b>	Een AI-systeem dat wordt gebruikt voor het genereren van afbeeldingen.
<b>Training (ontwikkelfase)</b>	De fase waarin een AI-model wordt getraind op data om patronen te herkennen en taken te leren uitvoeren.
<b>Water usage effectiveness (WUE)</b>	Een maat voor hoeveel water nodig is om een datacenter te koelen per eenheid gebruikte energie.

## KLIMAAT EN REKENKRACHT

## Appendix E

Aanname	Waarde	Bron
Schooldagen	200 (minstens 189 in het vo)	<a href="#">Overzicht aantal uren onderwijstijd   Schooltijden en onderwijstijd   Rijksoverheid.nl</a>
Gemiddeld e-verbruik Nederlands huishouden	2500 kWh	<a href="#">StatLine - Energieverbruik particuliere woningen; woningtype en regio's</a>
Gemiddelde aantal kilometers per benzineauto	11,000 km	<a href="#">Hoeveel rijden personenauto's?   CBS</a>
Gemiddelde CO <sub>2</sub> -uitstoot per kilometer in een benzineauto	149 gCO <sub>2</sub>	<a href="#">Reistijd, geld en CO2-uitstoot naast elkaar gelegd: NS komt met vergelijker voor auto, fiets en trein   Auto   AD.nl</a>
Dagelijks drinkwaterverbruik per persoon	130 liter	<a href="#">Hoeveel water gebruiken we? - Nederland in cijfers 2021   CBS</a>
Elektriciteit per iPhone-lading (iPhone 14 Pro)	13 Wh	<a href="#">Hoeveel stroom verbruiken iPhone en Samsung smartphones?   ANWB</a>
Energieverbruik digibord	142 W	<a href="#">SMART Board MX (V4) series interactive display with iQ specifications</a>
Aantal scholen in Nederland (po)	6.562	<a href="#">Aantal scholen in het primair onderwijs   Kerncijfers en indicatoren Primair Onderwijs   OCW in cijfers</a>
Aantal leerlingen in Nederland (po)	1.465.311	<a href="#">Ontwikkeling van het aantal leerlingen in het primair onderwijs   Kerncijfers en indicatoren Primair Onderwijs   OCW in cijfers</a>
Aantal scholen in Nederland (vo)	1456	<a href="#">Aantal vo-scholen   Kerncijfers en indicatoren Voortgezet Onderwijs   OCW in cijfers</a>
Aantal leerlingen in Nederland (vo)	987.115	<a href="#">Leerlingenaantallen voortgezet onderwijs   Kerncijfers en indicatoren Voortgezet Onderwijs   OCW in cijfers</a>
Aantal leerlingen per klas (po en vo)	Wisselend per type school, een gemiddelde van 25 is aangenomen	<a href="#">Grote, veeleisende klas jaagt leraar het onderwijs uit   De Algemene Onderwijsbond - Hoe is de groep van mijn kind op de basisschool samengesteld?   Rijksoverheid.nl - Groepsgrootte op verschillende scholen - Ouders &amp; Onderwijs</a>



**In opdracht van Kennisnet**

[www.kennisnet.nl](http://www.kennisnet.nl)

[LinkedIn](#)

[support@kennisnet.nl](mailto:support@kennisnet.nl)

**Berenschot**

[www.berenschot.nl](http://www.berenschot.nl)

[linkedin.com/company/berenschot](https://linkedin.com/company/berenschot)