

## Hoeveel ruimte vergt een CO<sub>2</sub>-neutrale auto, truck en schip?

Stefan Bakker - KiM - [stefan.bakker@minienw.nl](mailto:stefan.bakker@minienw.nl)  
Saeda Moorman - KiM - [saeda.moorman@minienw.nl](mailto:saeda.moorman@minienw.nl)  
Marlinde Knoope - KiM - [marlinde.knoope@minienw.nl](mailto:marlinde.knoope@minienw.nl)

### **Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 13 en 14 oktober 2022, Utrecht**

#### **Samenvatting**

De transitie naar CO<sub>2</sub>-neutrale mobiliteit vergt de komende decennia niet alleen veel hernieuwbare energie, maar ook veel ruimte. Dit geldt zeker voor de *productie* van de CO<sub>2</sub>-neutrale energie, maar ook andere stappen in de energieketen - *transport, opslag, distributie en laden/tanken* - kunnen (extra) ruimte kosten ten opzichte van de huidige fossiele energieketen. Het ruimtebeslag is van belang in de discussie over het realiseren van energieketens in eigen land versus import van CO<sub>2</sub>-neutrale energiedragers.

In dit paper analyseren we het ruimtebeslag van 4 energieketens voor CO<sub>2</sub>-neutrale mobiliteit, zowel per voertuig (personenauto en binnenvaartschip) als totalen (wegverkeer en internationale zee- en luchtvaart). Voor zover wij weten is dit nog niet eerder op deze kwantitatieve manier gedaan. De 4 beschouwde ketens zijn 1) elektriciteit in een accu-elektrisch voertuig, 2) waterstof (op basis van elektriciteit of (bio)methaan) in een voertuig met brandstofcel of verbrandingsmotor, 3) synthetische brandstoffen (op basis van elektrolyse-waterstof en CO<sub>2</sub> of N<sub>2</sub>) in een voertuig met verbrandingsmotor, en 4) biobrandstoffen in een voertuig met verbrandingsmotor.

Uit de analyse komt naar voren dat toepassing van elektriciteit in voertuigen leidt tot een *relatief* laag ruimtebeslag: dat van waterstof uit elektriciteit en synfuels is enkele malen (2 à 5) hoger. In totaal vergt elektrische wegmobiliteit windparken ter omvang van de provincie Utrecht. Als lucht- en scheepvaart hun brandstof in Nederland zouden bunkeren in de vorm van synfuels, is hiervoor 9 keer de provincie Utrecht aan windparken nodig.

Bij waterstof is de wijze van transport van de waterstof vanaf de productielocatie sterk bepalend voor de uitkomst: vervoer in de vorm van ammoniak (per schip) vergt de meeste ruimte en gasvormig vervoer (per buis) het minste, met vloeibaar waterstof (extreem gekoeld) ertussenin. Het ruimtebeslag van het transport komt door energie voor compressie en voor omzetting naar vloeibaar waterstof en NH<sub>3</sub> (en terug), waarvoor extra elektriciteitsproductie nodig is. Het ruimtebeslag van biobrandstof hangt af van de vraag of de biomassa uit residuen (afvalstromen) of uit speciaal geteelde energiegewassen komt. In het eerste geval is het (extra) ruimtebeslag nihil, in het tweede geval juist het hoogst van alle energieketens.

## 1. Inleiding

Het klimaatneutraal maken van ons mobiliteitssysteem is een grote uitdaging. Het past in het streven van de Europese Green Deal van klimaatneutraliteit in 2050 en het verminderen van transportemissies met 90% (Europese Commissie, 2019) en de visie van IenW (2020) om te streven naar 'nagenoeg nul' CO<sub>2</sub>-uitstoot in mobiliteit in 2050. Zo'n grote CO<sub>2</sub>-reductie in de totale economie vereist een veelomvattende transitie met grote investeringen, beleidskeuzes en gedragsveranderingen. Ook ruimtelijk heeft deze energietransitie grote consequenties. Het gaat niet alleen om de vraag hoe we de benodigde CO<sub>2</sub>-neutrale energie voor mobiliteit produceren, maar ook wáár: komen er enkele grote locaties of vele kleine? En hoe organiseren we het transport, opslag en distributie naar de afnemers in de mobiliteitssector? Is er überhaupt genoeg plaats om de CO<sub>2</sub>-neutrale energie zelf te maken of importeren we die beter uit het buitenland? Dit paper richt zich op deze, nog niet vaak geadresseerde, vraag naar de ruimtelijke implicaties van de gewenste transitie naar CO<sub>2</sub>-neutrale mobiliteit.

Wij analyseren 4 energieketens voor mobiliteit op ruimtegebruik in 2030 (voor 2050 zijn er te veel onzekerheden), te weten de ketens voor de energiedragers elektriciteit, waterstof, biobrandstof en synfuel. Een energieketen bestaat steeds uit een aantal stappen:

1. Productie van de energiedrager uit grondstoffen.
2. Transport, opslag en distributie van de energiedrager. Het onderscheid tussen transport en distributie is dat transport grootschalig is en distributie fijnmazig.
3. Tanken of laden van de energiedrager in het voertuig.
4. Gebruik in het voertuig: omzetting van de energiedrager in aandrijving van het voertuig.

De resultaten geven globaal inzicht in het ruimtebeslag van de ketens ten opzichte van elkaar, wat van belang kan zijn bij beleidsafwegingen – naast andere aspecten zoals kosten, milieu-effecten, energievoorzieningszekerheid, veiligheid et cetera. Ten opzichte van bestaande ruimtelijke verkenningen voor energie- en klimaatbeleid (Kuijers et al., 2020; Londo & Kramer, 2019) geeft dit paper specifiek inzicht in de ruimtelijke aspecten van energie in de mobiliteitssector.

*Box: Bestaande ambities voor enkele productiemiddelen van CO<sub>2</sub>-neutrale energie in Nederland.*

Windenergie: bovenop de 11,5 GW gepland op zee in 2030 volgens het Klimaatakkoord (2019) is er recent voorgesteld om 10 GW extra te bouwen om aan een grotere verwachte elektriciteitsvraag te voldoen (Stuurgroep Extra Opgave, 2022).

Elektrolyse: Het doel in het Klimaatakkoord (2019) is de installatie van 3-4 GW elektrolysecapaciteit in 2030. Bij 95% bedrijfstijd en 69% energie-efficiency is de jaarlijkse waterstofproductie 90-120 PJ. De benodigde elektriciteitsinput bedraagt 36-48 TWh, wat ruim meer is dan de huidige productie van hernieuwbare elektriciteit op basis van zonne- en windenergie in Nederland van circa 30 TWh per jaar (CBS, 2022). Deze extra elektriciteitsvraag betekent, vertaald in windparken, een grote ruimtelijke opgave.

Daarbij vergeleken is het verwachte ruimtebeslag van de 3-4 GW elektrolysecapaciteit van 0,45-0,60 km<sup>2</sup> (berekend op basis van IEA, 2019) zeer klein.

## 2. Methode en aannames

### 2.1 Overzicht ketens

Een energieketen begint met energieproductie en eindigt bij gebruik in een voertuig. We beschouwen 5 modaliteiten, elk met een eigen referentievoertuig. Zie tabel 1.

Tabel 1. De 5 beschouwde modaliteiten en hun referentievoertuig.

Modaliteit	Referentievoertuig	Ruimtebeslag bepaald op basis van	Opmerkingen
Licht wegvervoer	Personenauto	Afstand per jaar (13.000 km)	Bestelauto's vallen in principe ook onder licht wegvervoer en hebben veelal vergelijkbare kenmerken
Zwaar wegvervoer	Trekker-oplegger	Afstand per jaar (87.000 km)	Dit is de zwaarste categorie (N3, tot 40 ton)
Binnenvaart	Schip vergelijkbaar met een Groot Rijnschip (M8, 110 m)	Afstand per jaar (70.000 km)	
Zeevaart	General cargo ship voor lange afstand	Gebunkerde brandstof	
Luchtvaart	Boeing 787 voor 300+ passagiers en intercontinentale vluchten	Gebunkerde brandstof	Vluchten langer dan 4000 km stoten meer dan de helft van de CO <sub>2</sub> -emissies van de vluchten van en naar EU- luchthavens uit; vluchten boven de 1500 km 75% (Eurocontrol, 2022)

De vier energiedragers (elektriciteit, waterstof, biobrandstof en synfuel) zijn niet alle even geschikt voor alle referentievoertuigen. Figuur 1 geeft een overzicht van de in deze studie beschouwde combinaties van energiedragers en voertuigen. Als selectiecriteria hebben we toegepast:

- Een Technological Readiness Level  $\geq$  6 voor de voertuig-energiedragercombinatie,
- Praktische toepasbaarheid.

Vanuit het tweede criterium is de synfuel ammoniak, die zeer giftig is, alleen beschouwd voor binnenvaart en zeevaart en niet voor het wegverkeer.

In de intercontinentale luchtvaart zien we alleen de drop-in fuels als optie: brandstoffen die chemisch lijken op kerosine, waardoor geen aanpassingen aan de vliegtuigen nodig zijn. Deze keuze heeft zowel te maken met de lage TRL van de andere opties (accu-elektrisch en waterstof) als met praktische gewichts- en volumekenmerken van accu's en waterstofsysteem.

energieketen	subtype	conversie in voertuig	personenauto	zwaar wegvervoer	binnenvaart*	scheepvaart	luchtvaart
elektriciteit		accu-elektrisch					
		ERS					
waterstof		FC-elektrisch					
		ICE aangepast					
synfuels	drop-in (FT)	ICE					
	ammoniak	ICE aangepast					
	methanol	ICE aangepast					
biobrandstof	drop-in (FT)	ICE					
	bio-ethanol**	ICE aangepast					

\* ook scheepvaart korte en middellange afstand

\*\* ethanol is een benzinevervanger

*Figuur 1. Energiedrager-voertuigcombinaties in deze studie. De combinaties die met grijs zijn aangegeven vallen buiten de scope. ERS: Electric Road System; FC: fuel cell; ICE: internal combustion engine; FT: Fischer-Tropsch; Drop-in: in samenstelling vergelijkbaar met fossiel.*

Tabel 2 geeft een overzicht van de beschouwde technieken per energieketen en subtypen.

*Tabel 2. De beschouwde technieken per ketenstap.*

Energieketen	Input in productie-proces	Productie	Transport, opslag, distributie	Tanken, laden	Gebruik in voertuig
Elektriciteit		Windturbines; Zonnepanelen op daken of LIW	Elektriciteitsnet, systeembatterijen, evt. opslag in andere vorm (bijv H <sub>2</sub> )	(Snel)laadpunten	Accu met elektromotor; ERS
Waterstof	Elektriciteit	Elektrolyse m.b.v. hernieuwbare elektriciteit (mix van zon en wind)	Transport: Buis: Gasvormig onder hoge druk; Schip: Vloeibaar (cryogeen)	Tanken gas onder druk (incl. compressie); zuivering	Brandstofcel + (kleine) accu + elektromotor; Aangepaste verbrandingsmotor
	Aardgas en biomethaan	SMR op basis van aardgas met 90% CO <sub>2</sub> -afvang en -opslag (CCS) en 10% biomethaan	Schip: In de vorm van ammoniak; Distributie: gasvormig, per tankwagen of buisleiding		
Synfuels: FT-liquids	Waterstof en CO <sub>2</sub> uit DAC	FT-fabriek	Identiek aan huidig	Identiek aan huidig	Identiek aan huidig
Synfuels: ammoniak	Waterstof en stikstof	Ammoniak-fabriek	Aangepast	Aangepast	Aangepaste ICE
Synfuels: methanol	Waterstof en CO <sub>2</sub> uit DAC	Methanol-fabriek	Aangepast	Aangepast	Aangepaste ICE

Biobrandstof: bio-FT-liquids	Energie-gewassen of residuen	Bio-FT-fabriek	Identiek aan huidig	Identiek aan huidig	Identiek aan huidig
Biobrandstof: bio-ethanol	Energie-gewassen of residuen	Ethanol-fabriek	Aangepast	Aangepast	Aangepaste ICE

LIW: landschap/infrastructuur/water

ERS: electric road system

DAC: direct air capture

## 2.2 Definitie en afbakening ruimtegebruik

In dit paper beschouwen we ruimtegebruik uit kwantitatief oogpunt. We analyseren eerst het ruimtegebruik per eenheid energie die is geproduceerd, getransporteerd en uiteindelijk gedistribueerd aan een voer- of vaartuig. Het gaat om een eenheid energie op het punt van laden of tanken. Daarna vertalen we dit, via een energiegebruik per voertuig, naar een ruimtebeslag:

1. Per voertuig:
  - a. Een personenauto
  - b. Een binnenvaartschip
2. Totaal:
  - a. Het totale Nederlandse wegverkeer
  - b. Lucht- en zeevaart op basis van wat deze modaliteiten binnen Nederland bunkeren.

Ruimtegebruik per voertuig = ruimtegebruik per energie-eenheid op punt van laden/tanken [ $\text{m}^2/\text{GJ}$ ] x energie geladen of getankt door het voertuig [GJ]

Voor het energiegebruik van een voertuig nemen we zijn jaargebruik; het ruimtegebruik is het ruimtegebruik dat nodig is om deze hoeveelheid energie in een jaar te kunnen produceren.

We berekenen het ruimtegebruik op twee manieren.

Het *netto* ruimtegebruik is het bovengrondse landoppervlak dat primair (d.w.z. als hoofddoel) voor de productie van energie wordt gebruikt, bijvoorbeeld het stuk land dat wordt ingenomen door een windturbine of dat wordt gebruikt om zonnepanelen op te zetten, zonder rekening te houden met het feit dat windturbines op honderden meters afstand van elkaar geplaatst moeten worden om elkaar niet te beïnvloeden. Er kunnen dieren grazen rondom de zonnepanelen, die ook kunnen profiteren van de schaduw ervan, maar het primaire grondgebruik is voor zonne-energie.

Het *bruto* ruimtegebruik geeft het totale oppervlak dat nodig is om een bepaalde hoeveelheid energie te kunnen produceren. Hierbij telt bijvoorbeeld ook de ruimte tussen de turbines mee als ruimtegebruik van de energieopwekking, ondanks dat die nog voor andere doeleinden gebruikt wordt of kan worden. Deze tussenruimte moet echter wel aanwezig zijn om de turbines op onderlinge afstand te kunnen plaatsen en is dus onmisbaar. Deze brutomaat is nuttig om te bepalen wat de ruimtelijke mogelijkheden en beperkingen zijn om een bepaalde hoeveelheid (of bepaald vermogen) energie te

produceren. Overigens kunnen ook combinaties van energieproductie plaatsvinden op hetzelfde oppervlak, bijvoorbeeld biomassateelt tussen de turbines van een windpark, maar dit laten we hier buiten beschouwing.

Tabel 3 geeft aan wat wel en niet onder het ruimtegebruik van de productie van elektriciteit en biomassa (als grondstof van biobrandstoffen) valt. Een algemene aanname hierbij is dat voor het netto-oppervlak het primaire doel van het landoppervlak leidend is, en dat wanneer de energie-productie een secundair doel is van het gebruikte oppervlak, het netto-gebruik nul is. Dit laatste geldt voor zonne-energie op daken van gebouwen en biomassa uit residuen uit de landbouw.

Bij de biobrandstoffen op basis van residuen hebben we geen ruimtegebruik aan de winning van de biomassa toegekend.

*Tabel 3. Afbakening ruimtegebruik van de productie van energiedragers.*

	Netto	Bruto
Windenergie	Land- of zee-oppervlak voor turbines + eventuele additionele infrastructuur (toegangswegen, transformatorplatform op zee)	Oppervlak van windpark
PV (op daken)	Geen ruimtegebruik	Het gebruikte dakoppervlak
PV (in landschap, op infrastructuur en op water)	Oppervlakte van zonnepanelen + ruimte tussen de panelen	Gelijk aan netto
Biobrandstoffen (energiegewassen)	Oppervlakte van land benodigd om houtige biomassa te produceren	Gelijk aan netto
Biobrandstoffen (residuen)	Geen landgebruik	Oppervlakte van land waar het residu van wordt gewonnen
Waterstof uit elektrolyse	Netto-oppervlak nodig voor productie elektriciteit voor elektrolyse	Bruto oppervlak van benodigde elektriciteit
Waterstof uit SMR met CCS en 10% biomethaan	Netto-oppervlak nodig voor SMR en CCS en transport aardgas	Gelijk aan netto
Synfuels	Netto-oppervlak nodig voor waterstof-productie uit elektrolyse + DAC	Bruto oppervlak van benodigde elektriciteit + DAC

Opslag van CO<sub>2</sub> en transport van aardgas vinden plaats onder de grond en hebben als zodanig geen ruimtegebruik. De benodigde biomethaan kan worden gewonnen uit afval (rioolslib) of reststromen van de landbouw of veeteelt en rekenen we daarom ook geen landgebruik toe.

Bij de productie van synfuels is, naast waterstof, CO<sub>2</sub> uit de lucht nodig. De *direct air capture* (DAC) installaties hiervoor hebben een beperkt ruimtegebruik maar rekenen we wel mee.

Voor het transport en distributie van elektriciteit gaan we uit van de bovengrondse oppervlakte van het hele elektriciteitsnet: bovengrondse hoogspanningskabels en transformatorstations. We delen dat toe aan alle geleverde elektriciteit. Met andere woorden: elke kilowattuur is gelijk, we maken geen onderscheid naar verschillende

eindgebruikerssectoren. Voor de productie van waterstof rekenen we geen landgebruik toe aan transport en distributie van elektriciteit, onder de aanname dat de elektrolyser relatief dichtbij de elektriciteitsproductielocatie (windturbines en zonnepanelen) kan worden aangesloten.

### 2.3 Aannames

Het zichtjaar is 2030 voor alle technieken in de energieketens. Bij de analyse voor het totale ruimtegebruik is dit gecombineerd met de *huidige* mobiliteitsvraag (in précoronajaar 2019). In de tabellen 4 en 5 geven we de belangrijkste aannames voor de productie van de energiedragers en het ruimtegebruik hiervan.

Productie (en input hiervoor):

*Tabel 4. Het ruimtegebruik voor productie en de input in het productieproces.*

	Ruimtegebruik per eenheid energie (gemiddelde, en spreiding tussen haakjes)	Bron	Opmerkingen
Wind (netto)	0,9 m <sup>2</sup> /MWh elektriciteit per jaar (0,3-2,3)	Gemiddelde van vier literatuurbronnen uit Nederland, de EU en de VS	Geen onderscheid tussen land en zee gemaakt.
Wind op zee (bruto)	6 MW/km <sup>2</sup> geïnstalleerd vermogen (4-10)	Gemiddelde van 4 bronnen in Nederland	
Zon (LIW)	12 m <sup>2</sup> /MWh elektriciteit per jaar (6-25)	Gemiddelde van 5 literatuurbronnen	
Biomassa (cellulose) voor productie biobrandstof	56 m <sup>2</sup> /GJ biomassa per jaar (13 - 99)	Trainor et al. (2016)	Omzetting van biomassa naar ethanol: 43%
CO <sub>2</sub> (DAC)	0,02 m <sup>2</sup> /GJ synfuel per jaar (0,003-2,0)		

*Tabel 5. Inputs voor de productie van energiedragers.*

Waterstofproductie (elektrolyser)	50 kWh elektriciteit per kg H <sub>2</sub>
Waterstofproductie (SMR-CCS)	0,17 GJ aardgas per kg H <sub>2</sub>
Waterstof overige ketenstappen:	
Liquefactie (eventueel)	15 kWh elektriciteit per kg H <sub>2</sub>
Conversie naar NH <sub>3</sub> (eventueel)	43 kWh elektriciteit per kg H <sub>2</sub>
Reconversie NH <sub>3</sub> naar H <sub>2</sub> (eventueel)	Rendement 66%
Compressie en zuivering bij tankstation	4 kWh elektriciteit per kg H <sub>2</sub>
FT-liquids	Input van 11,7 kg H <sub>2</sub> /GJ Input van 78 kg CO <sub>2</sub> /GJ (DAC)
Ammoniak	9,5 kg H <sub>2</sub> /GJ
Methanol	Input van 10,8 kg H <sub>2</sub> /GJ Input van 94 kg CO <sub>2</sub> /GJ (DAC)

Voor de waterstofproductie met elektrolyse is aangenomen dat de elektrolyser een mix krijgt van 76% elektriciteit uit windturbines en 24% elektriciteit uit zonnepanelen (op basis van Hoogervorst, 2020), waarbij elektriciteit uit zonnepanelen uitgesplitst kan worden naar 9% op daken en 15% LIW (Van Hooff et al., 2021).

Transport, distributie en opslag:

Voor het ruimtegebruik van het elektriciteitsnet nemen we het huidige ruimtebeslag van het hoogspanningsnet (150 km<sup>2</sup>) en transformatorstations (15 km<sup>2</sup>), vermeerderd met de uitbreiding die tot 2050 nodig wordt geacht: 40-70 km<sup>2</sup> voor het hoogspanningsnet en 3 km<sup>2</sup> voor transformatorstations, alsmede 20-50 km<sup>2</sup> voor benodigde flexibiliteit (waterstofopslag, stationaire accu's en gascentrales) (Netbeheer Nederland, 2021). Uitgaande van de gemiddelde elektriciteitsvraag in 2050 in vier scenario's voor klimaatneutrale energie (Den Ouden et al., 2021) komt het ruimtegebruik op 1 m<sup>2</sup> per MWh per jaar.

Voor transport, distributie en opslag van waterstof, synfuels en biobrandstof rekenen we geen ruimtebeslag. In het geval van synfuels en biobrandstof kan grotendeels de huidige infrastructuur voor fossiele brandstof hiervoor (her)gebruikt worden, waardoor er geen extra ruimtebeslag is. Het ruimtebeslag van waterstof is deels ondergronds (zoals buisleidingen) en in opslagtanks die vergelijkbaar zijn met huidige opslagtanks van fossiele brandstoffen. Dit ruimtebeslag is in orde-grootte bovendien een stuk kleiner dan het ruimtebeslag van de elektriciteitsproductie voor waterstof uit elektrolyse.

Laden en tanken:

Voor het laden van elektrische voertuigen zijn laadpalen nodig. Deze bevinden zich grotendeels op privé-terrein en deels in de (semi-)publieke ruimte: op straat, op laadpleinen en bij snellaadstations of op bedrijventerreinen. Het oppervlak hiervoor is klein ten opzichte van productie en transport van elektriciteit. Hetzelfde geldt voor de tankstations voor waterstof, biobrandstof en synfuels.

Tabel 6 geeft de energie-efficiëntie van de verschillende energieketens, opgesplitst in WTT (well-to-tank, productie tot laden/tanken) en TTW (tank-to-wheel, gebruik in voertuig) en WTW (well-to-wheel, gehele keten). Voor gebruikte bronnen zie Bakker et al. (te verschijnen). Deze gebruiken we om het energiegebruik, en daarmee het ruimtegebruik, per voertuig te berekenen.

*Tabel 6. Energie-efficiënties van de ketens.*

	Energie-efficiëntie			Opmerkingen / verklaring
	WTT	TTW	WTW	
Elektriciteit (wind)	81%	89%	71%	Transport & distributie, laden/ontladen en efficiëntie elektromotor (inclusief terugwinning remenergie)
Elektriciteit (zon)	76%	89%	67%	Gelijk aan wind + efficiëntie PV-omvormer
H <sub>2</sub> -elektrolyse (transport gasvormig)	59%	55%	32%	Voor elektrolyse is gerekend met een rendement van 67%;

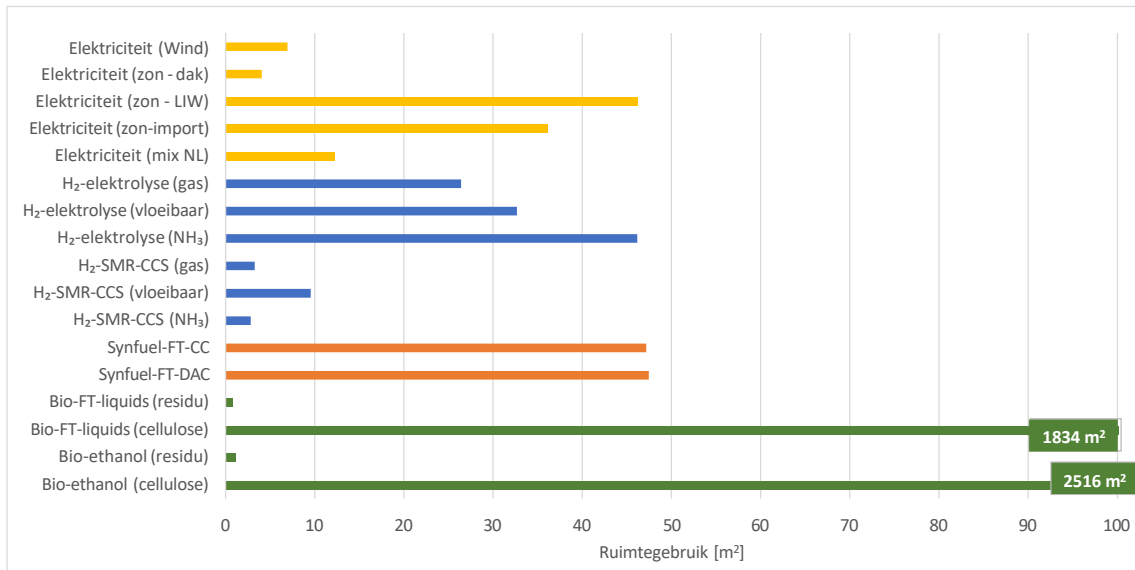


H <sub>2</sub> -elektrolyse (transport in vloeibare vorm)	48%	55%	26%	De verschillen in WTT-rendement worden verklaard door de transportwijze; Toepassing in een voertuig met brandstofcel (FCEV)
H <sub>2</sub> -elektrolyse (transport als NH <sub>3</sub> )	34%	55%	18%	
H <sub>2</sub> -SMR-CCS (transport als gas)	61%	55%	34%	Voor SMR-CCS is gerekend met een rendement van 69%; De verschillen in WTT-rendement worden verklaard door de transportwijze; Toepassing in een voertuig met brandstofcel (FCEV)
H <sub>2</sub> -SMR-CCS (transport in vloeibare vorm)	49%	55%	27%	
H <sub>2</sub> -SMR-CCS (transport als NH <sub>3</sub> )	31%	55%	17%	
H <sub>2</sub> -elektrolyse (gas)	59%	43%	25%	Idem als hierboven, maar dan toepassing in voertuig met (aangepaste) verbrandingsmotor
H <sub>2</sub> -elektrolyse (vloeibaar)	48%	43%	20%	
H <sub>2</sub> -elektrolyse (NH <sub>3</sub> )	34%	43%	14%	
H <sub>2</sub> -SMR-CCS (gas)	61%	43%	26%	Idem als hierboven, maar dan toepassing in voertuig met (aangepaste) verbrandingsmotor
H <sub>2</sub> -SMR-CCS (vloeibaar)	49%	43%	21%	
H <sub>2</sub> -SMR-CCS (NH <sub>3</sub> )	31%	43%	13%	
Synfuel-NH <sub>3</sub>	43%	43%	18%	
Synfuel-FT-DAC	38%	43%	16%	
Synfuel-MeOH-DAC	40%	43%	17%	
Bio-FT-liquids (cellulose)	59%	43%	25%	
Bio-ethanol (cellulose)	43%	43%	18%	

### 3. Resultaten

#### 3.1 Ruimtegebruik per voer- of vaartuig

Door het verschil in energie-efficiëntie kost toepassing van waterstof uit elektrolyse en synfuels ruim 2 à 5 keer meer elektriciteit dan toepassing van puur elektriciteit. Deze verschillen komen ook tot uitdrukking in het netto-ruimtegebruik om 1 personenauto van CO<sub>2</sub>-neutrale energie te voorzien (zie figuur 2). Voor een mix van 76% elektriciteit uit windturbines en 24% elektriciteit uit zonnepanelen (op basis van Hoogervorst (2020)) is dat ongeveer 12 m<sup>2</sup>. Voor waterstof uit elektrolyse en FT-liquids is het 25-45 m<sup>2</sup> per voertuig, waarbij de variant waarin waterstof wordt getransporteerd in de vorm van ammoniak (die daarna weer wordt omgezet in waterstof) de meeste energie en ruimte kost. Het ruimtegebruik van biomassa uit energiegewassen is veel groter dan dat van de andere opties, rond de 2000 m<sup>2</sup>.

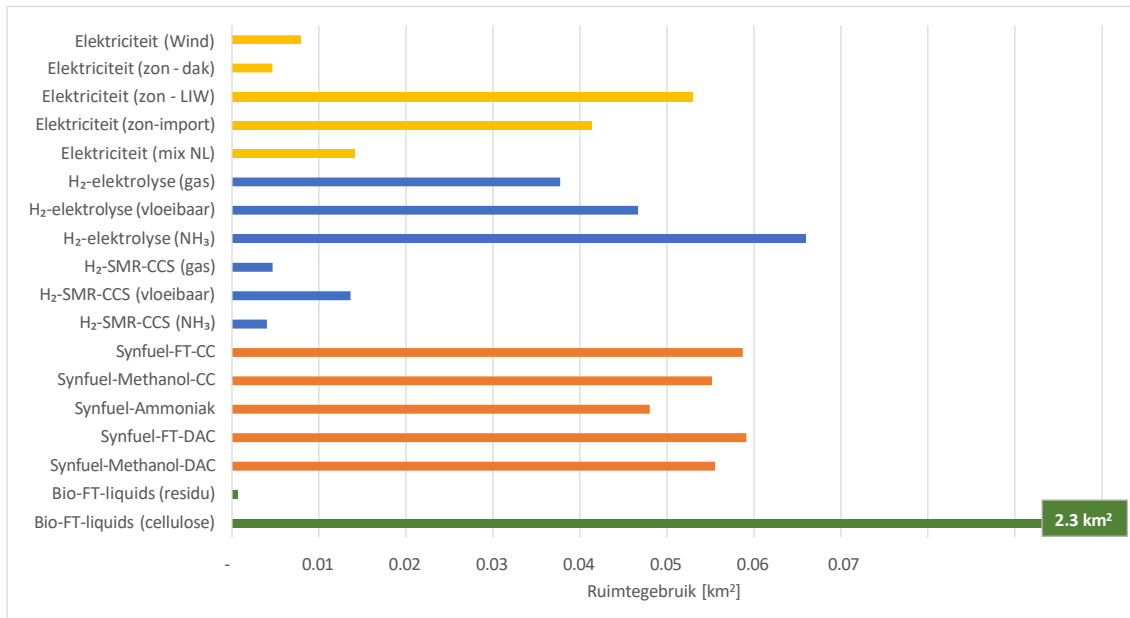


Figuur 2. Netto-ruimtegebruik voor de energielevering van 1 personenauto. Voor Elektriciteit (mix NL) en de benodigde elektriciteit voor elektrolyse geldt een verhouding van 76% wind en 24% zon. H<sub>2</sub>-SMR-CCS: geen landgebruik toegerekend aan het gebruik van biomethaan. Geen landgebruik toegerekend aan biomassa-feedstock uit residuen. Afkortingen: LIW: landschap, infrastructuur, water; CCS: Carbon Capture & Storage; CC: Carbon Capture; FT: Fischer-Tropsch; DAC: Direct Air Capture.

Voor een vrachtauto is het ruimtegebruik 600 m<sup>2</sup> voor elektriciteit en 1300-2300 m<sup>2</sup> voor waterstof en synfuels. Om een trekker-oplegger volledig op zonne-energie te laten rijden is een PV-paneeloppervlakte van ongeveer 200 m<sup>2</sup> nodig.

Voor een binnenvaarstschip is ongeveer 1 ha (0,01 km<sup>2</sup>) voor elektriciteit en 2-4 ha voor waterstof en de diverse synfuels (FT-liquids, methanol en ammoniak) nodig (figuur 3).

Waterstof uit SMR-CCS neemt minder ruimte in dan waterstof uit elektrolyse en past ruimtelijk daardoor beter in Nederland. De SMR-installatie vergt namelijk maar weinig ruimte en het aardgas dat ervoor nodig is ook niet. Voor de 10% biomethaan om het SMR-CCS-proces CO<sub>2</sub>-neutraal te maken gaan we zoals gezegd uit van reststromen, wat geen (extra) ruimte vraagt. Het enige ruimtegebruik is afkomstig van de elektriciteit benodigd voor productie, transport en distributie van de waterstof.



*Figuur 3. Netto-ruimtegebruik van energielevering voor 1 binnenvaartschip (Groot Rijnschip M8, 110 m). Voor Elektriciteit (mix NL) en de benodigde elektriciteit voor elektrolyse geldt een verhouding van 76% wind en 24% zon. H<sub>2</sub>-SMR-CCS: geen landgebruik toegerekend aan het gebruik van biomethaan. Geen landgebruik toegerekend aan biomassa-feedstock uit residuen. Afkortingen: LIW: landschap, infrastructuur, water; CCS: Carbon Capture & Storage; CC: Carbon Capture; FT: Fischer-Tropsch; DAC: Direct Air Capture*

### 3.2 Ruimtegebruik totaal

Als in 2019 alle wegmobiliteit in Nederland elektrisch was geweest, zou dit naar schatting 40 TWh elektriciteit (bij het laden) hebben gekost met een netto ruimtebeslag van ongeveer 250 km<sup>2</sup>. Ter vergelijking, dit komt overeen met ongeveer 1/5 van het bestaande oppervlak voor weginfrastructuur en (buiten) parkeren.

Om alle wegvoertuigen in Nederland op elektriciteit te laten rijden, is een windmolenpark ter grootte van de provincie Utrecht nodig. Dit is het bruto ruimtebeslag, inclusief de ruimte tussen de windturbines.

Voor het maken van synfuels voor de vliegtuigen en zeeschepen die momenteel in Nederland bunkeren zijn windparken met een oppervlak van 9 keer de provincie Utrecht nodig, of 1/4 van het Nederlands Continentaal Plat (NCP). Dit is ook weer het bruto oppervlak. Het realiseren van een dergelijk oppervlak aan windparken zou een grote uitdaging betekenen, omdat andere sectoren ook elektriciteit nodig hebben en de potentiële ruimte voor windparken beperkt is tot ongeveer 1/3 van het NCP.

Als alle brandstof die momenteel in Nederland door lucht- en zeescheepvaart wordt gebunkerd biobrandstof uit energiegewassen (non-residuen) zou zijn, dan is daar een landoppervlak van ongeveer 2 keer Nederland voor nodig. In geval van biomassa uit residuen is er geen extra beslag op landoppervlak, dus het netto ruimtebeslag is nihil. Uiteraard vergt het primaire gewas wel ruimte. Het is aannemelijk dat er op de langere termijn zowel energiegewassen als residuen nodig zijn om aan de vraag naar biomassa in alle sectoren te voldoen.

### 3.3 Ruimtevergelijking van de ketenstappen

Productie van energie (inclusief de grondstoffen hiervoor) is de ketenstap die veruit de meeste ruimte gebruikt in alle vier de ketens. Dat neemt niet weg dat ook de andere ketenstappen ruimtelijk kunnen 'knellen', vooral in stedelijke omgeving.

De stap transport, opslag en distributie neem in de keten van elektriciteit een aanzienlijke ruimte in, meer dan in de andere ketens. Deze stap is zelfs in zijn geheel verantwoordelijk voor het ruimtegebruik bij de optie 'elektriciteit-zon op dak', omdat we aan de zonnepanelen zelf netto geen ruimtebeslag toerekenen. Het gaat vooral om het ruimtebeslag van hoogspanningskabels en transformatorstations voor transport en distributie van elektriciteit. Transformatorstations staan meestal in of aan de rand van stedelijke gebieden. Daarnaast is er nog flexibiliteit in het elektriciteitssysteem nodig om de fluctuaties in zonne- en windenergie op te vangen. De hiervoor benodigde installaties – stationaire batterijen, waterstofopslag – nemen ook ruimte in.

Bij de ketens van waterstof, synfuels en biobrandstof hebben we het ruimtebeslag in deze stap als verwaarloosbaar beschouwd ten opzichte van de productiestap (en de input voor de productie).

Ook de laad- en tankinfrastructuur vergt ruimte, vaak op plekken waar ruimte schaars is. Voor 9 miljoen elektrische auto's zijn naar schatting 1,4 miljoen (semi-)publieke laadpunten nodig (ElaadNL, 2021), die veelal op de stoep of op laadpleinen zullen staan. Daarbij komen de snelladers langs de snelwegen of uitvalswegen. Voor waterstof geldt dat de vulstations lokaal goed moeten worden ingepast met het oog op de veiligheid (waterstof wordt gebruikt onder hoge druk, is zeer licht ontvlambaar en heeft een ontstekingsenergie die 10 keer zo laag is als die van aardgas). Voor de syn- en biofuels die chemisch gelijk zijn aan hun fossiele equivalent, is de ruimtelijke inpassing van deze stappen gemakkelijker dan voor elektriciteit en waterstof.

## 4. Discussie

Bij de voorgaande analyse plaatsen we enkele opmerkingen over de methodologie, onzekerheden en de interpretatie van de resultaten.

### 4.1 Methode

Bij het netto-ruimtegebruik geldt het bovengronds oppervlak dat niet, of nog maar beperkt, voor andere doeleinden te gebruiken is. Voor zonne-energie is dit wellicht een wat strikte benadering. We rekenen ook de ruimte onder en tussen zonnepanelen in het landschap of op infrastructuur toe aan de energieproductie, terwijl daar ook nog ander gebruik van zou kunnen worden gemaakt, zoals beweiding.

Bij biobrandstoffen uit energiegewassen rekenen we alle ruimte van de energiegewassen mee, hoewel deze ruimte ook kan bijdragen aan biodiversiteit of geschikt is voor recreatie. Bij biobrandstoffen uit residuen daarentegen, kennen we geen landgebruik toe aan deze residuen, rest- en afvalstromen uit land- en bosbouw, maar rekenen we het landgebruik voor 100% toe aan het primaire product, zoals mais of suikerriet. In de Renewable Energy Directive II wordt een soortgelijke benadering gebruikt bij het bepalen van de broeikasgasemissies. Echter het residu heeft wel degelijk een economische waarde. Daarom kan er ook een allocatie van landgebruik op basis van economische waarde worden gedaan (Hanssen et al., 2020). De uitkomsten met betrekking tot ruimtebeslag zullen dan substantieel anders zijn, maar we zijn geen literatuur tegengekomen die deze benadering kwantitatief toepast.

#### *4.2 Onzekerheden*

De resultaten zijn weergegeven zonder onzekerheidsmarges, maar er zijn uiteraard onzekerheden. Deze onzekerheden beïnvloeden niet de verhouding in ruimtegebruik tussen de verschillende ketens, maar wel de absolute waarden. De onzekerheid wordt vooral veroorzaakt door de spreiding in de literatuur over het ruimtegebruik van energieproductie (zie tabel 4). De literatuur over zon- en windenergie is vooral uit Nederland omdat de opbrengst per eenheid ruimte verschilt tussen landen, maar we hebben ook wel enkele internationale bronnen gebruikt. Zo hebben we voor windenergie en biomassa-productie een factor 8 tussen de laagste en hoogste waarde voor het netto ruimtebeslag gevonden. Voor wind is de spreiding bij het bruto ruimtegebruik overigens minder groot: een factor 2,5.

Voor transport en distributie van elektriciteit hebben we het elektriciteitsnet als geheel onderzocht, zonder onderscheid naar gebruikerssectoren, zoals elektrische mobiliteit versus huishoudens of industrie. Dit is een versimpeling van de werkelijkheid aangezien het gebruikersprofiel van mobiliteit verschilt van andere sectoren, waardoor ook de benodigde aanpassingen in het elektriciteitsnet anders zijn, vooral wanneer bijvoorbeeld alle wegmobiliteit elektrisch wordt.

#### *4.3 Interpretatie*

De kwantitatieve analyse die we in dit paper hebben gebruikt heeft als voordeel een inzichtelijke maat te geven voor het ruimtegebruik van energie voor mobiliteit. Het nadeel is dat er aan de kwalitatieve kant geen aandacht wordt gegeven. Kwalitatieve aspecten effecten op het landschap kunnen zeer belangrijk zijn (Londo en Kramer, 2019), bijvoorbeeld vanuit het oogpunt van maatschappelijke acceptatie en het combineren met andere functies en maatschappelijke doelen, zoals natuur en leefbaarheid.

Dit kunnen we illustreren met windenergie. Kwantitatief kunnen we goed inzicht krijgen in het netto- en bruto-ruimtebeslag, in de maat  $m^2$  of  $km^2$ , zoals we hiervoor hebben laten zien. Kwalitatief gezien speelt echter mee dat de aanwezigheid van de turbines beperkingen oplevert voor gebruikers van de ruimte tussen de turbines. Daarnaast hebben de windturbines een subjectieve (landschappelijke) impact, bijvoorbeeld in de

vorm van zichthinder. De kwaliteit van de ruimte is dus beïnvloed door de aanwezigheid van de windturbines.

Bij de kwalitatieve aspecten van ruimtebeslag is ook van belang waar het ruimtegebruik precies plaatsvindt en hoe dit relateert aan andere ruimtegebruikers. In gebieden met een hoge bevolkingsdichtheid of grote natuurwaarden zullen over het algemeen andere kwaliteitseisen gelden voor ruimtelijke inpassing dan in gebieden met een lage bevolkingsdichtheid of natuurwaarde.

## 5. Conclusie

Uit de analyse komt naar voren dat toepassing van elektriciteit in voertuigen leidt tot een relatief laag ruimtebeslag. Dat van waterstof uit elektriciteit en synfuels is enkele malen (2 à 5) hoger.

Als in 2019 alle wegmobiliteit in Nederland elektrisch was geweest, zou dit naar schatting een netto ruimtebeslag van ongeveer 250 km<sup>2</sup>. Dit komt overeen met ongeveer 1/5 van het bestaande oppervlak voor weginfrastructuur en (buiten) parkeren. Het bruto ruimtegebruik is veel hoger: in totaal vergt elektrische wegmobiliteit windparken ter omvang van de provincie Utrecht.

Als lucht- en scheepvaart hun brandstof in Nederland zouden bunkeren in de vorm van synfuels, is hiervoor 9 keer de provincie Utrecht aan windparken nodig. Als hiervoor biobrandstoffen uit energiegewassen gebruikt zouden worden is een oppervlakte van ongeveer 2 keer Nederland nodig.

Naast de productie van energie nemen ook transport, opslag en distributie van energie ruimte in. De ruimtelijke inpassing hiervan kan knelpunten opleveren, vooral in een stedelijke omgeving.

## Literatuur

Bakker, S. et al. (te verschijnen). *CO<sub>2</sub>-neutrale energieketens voor mobiliteit. Efficiëntie, kosten en ruimtegebruik in beeld*. Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

CBS (2022). *Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen*. Geraadpleegd via <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/82610NED>

Den Ouden et al. (2020). *Klimaatneutrale scenario's 2050. Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050*. Berenschot en Kalavasta.

Elaad NL (2021). *Elektrisch rijden in stroomversnelling. Elektrificatie van personenauto's tot en met 2050*. Outlook Q3 2021.

- Eurocontrol (2021). *EUROCONTROL Data Snapshot #4 on CO<sub>2</sub> emissions by flight distance*. <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-data-snapshot-co2-emissions-flight-distance>
- Europese Commissie (2019). *The European Green Deal*. COM(2019) 640 final.
- Hanssen, S. et al. (2020) Biomass residues as twenty-first century bioenergy feedstock—a comparison of eight integrated assessment models. *Climatic Change* **163**, 1569–1586
- Hoogervorst, N. (2020). *Kosten van klimaatneutrale elektriciteit in 2030. Operationalisering voor de Startanalyse 2020*. PBL-rapport 4252. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- IEA (2019). *The future of hydrogen*. Parijs: International Energy Agency.
- IenW (2020). *Visie Duurzame Energiedragers in Mobiliteit*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Kuijers, T. et al. (2020). *Ruimtelijke uitwerking energiescenario's*. Generation.Energy en PosadMaxwan. Den Haag.
- Londo, M. en G. Kramer (2019). Ruimtelijke opgaven door klimaatbeleid. Een verkenning van de implicaties van het Klimaatakkoord. *Landschap* 2019 **4**, 189-197.
- Netbeheer Nederland (2021). *Het energiesysteem van de toekomst. Integrale infrastructuurverkenningen 2030-2050*.
- Stuurgroep Extra Opgave (2022). *Spijtvrij voorsorteren op zero-emissie mobiliteit*
- TNO. (2020a). *Real-world fuel consumption of passenger cars and light commercial vehicles*, TNO 2020 R11664.
- Trainor, A., McDonald, R., & Fargione, J. (2016). Energy sprawl is the largest driver of land use change in United States. *PLoS ONE* 11(9): e0162269
- Van Hooff, W., T. Kuijers, R. Quax, J. Witte (2021). *Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland*. TKI Urban Energy en Generation.Energy.