TNO innovation for life

# Het Nederlands Energiesysteem onder een 90% emissiereductie doelstelling in 2040

## Overzicht van knelpunten

TNO Publiek ⟩ TNO-2026-17440
23 juli 2026

**Energy & Materials Transition**
www.tno.nl
+31 88 866 23 45
info@tno.nl

TNO-2026-17440 – 23 juli 2026

# Het Nederlands Energiesysteem onder een 90% emissiereductie doelstelling in 2040

## Overzicht van knelpunten

| | |
|---|---|
| Auteurs | Nienke Maas<br>Trijntje Verschuuren<br>Martin Scheepers |
| | |
|---|---|
| Rubricering rapport | TNO Publiek |
| Titel | TNO Publiek |
| Rapporttekst | TNO Publiek |
| Bijlagen | TNO Publiek |
| Aantal pagina's | 40 (excl. voor- en achterblad) |
| Aantal bijlagen | 2 |
| Projectnummer | 060.67836 |

*Dit project is gefinancierd als onderdeel van het onderzoeksprogramma Kennis voor energiebeleid met subsidie van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat.*

**Alle rechten voorbehouden**
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2026 TNO

# Samenvatting

**Aanleiding en onderzoeksvragen**
De EU lidstaten zijn in 2025 overeengekomen een 90% emissiereductiedoelstelling in 2040 te stellen. Dit heeft gevolgen voor de benodigde ontwikkelingen in het energiesysteem, waarmee dit reductiedoel kan worden gehaald. Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft TNO gevraagd onderzoek te doen naar knelpunten voor uitvoerbaarheid en realiseerbaarheid van het energiesysteem, waarmee rekening dient te worden gehouden.

Dit onderzoek beantwoordt de hoofdvraag: *Welke knelpunten en mogelijke maatregelen zijn er bij het realiseren van energiedoelen?*

Daarnaast wordt nog een aantal subvragen over het toekomstige energiesysteem beantwoord:
- Zijn transitiepaden naar dit energiesysteem realiseerbaar, welke knelpunten kunnen zich voordoen en zijn deze oplosbaar?
- Welke interventies en randvoorwaarden zijn nodig om het energiesysteem van 2040 te kunnen realiseren?
- Van welke factoren is het halen van de emissiereductie in 2040 het meest afhankelijk?

**Methode**
In overleg met het ministerie zijn energiedoelen bepaald ten behoeve van een energiesysteem dat voldoet aan de emissiereductiedoelstellingen. Deze energiedoelen zijn in beeld gebracht aan de hand energie-indicatoren die dienen als meet- en duidingsvariabelen in vier scenario's van een mogelijk energiesysteem in 2040. De scenario's varieerden in veronderstellingen over de internationale concurrentiepositie van de energie-intensieve industrie en de invulling van het emissiereductiedoel. Deze scenario's zijn vergeleken met de raming van de Klimaat- en Energieverkenning 2024 (KEV) die uitgaat van vastgesteld en voorgenomen beleid. De energiescenario's zijn ook vergeleken met het 'Koersvaste Middenweg scenario' van Netbeheer Nederland, waarop de netbeheerders hun investeringsplannen voor de netinfrastructuur baseren. Die vergelijking biedt inzicht in mogelijke knelpunten bij de netinfrastructuur.
NB De scenario's zijn onderdeel van een breder onderzoek en worden in dit rapport niet uitgebreid toegelicht; de focus van dit onderzoek ligt op het in beeld brengen van de mogelijke knelpunten en beleidsopties van de energiedoelen.

Voor het identificeren van knelpunten voor emissiereductie en mogelijke interventies is gebruik gemaakt van diverse expertises die in 4 bijeenkomsten samen zijn gebracht. Dit betrof bijeenkomsten met (1) TNO experts, (2) netbeheerders, (3) klankbordgroep, (4) beleidsambtenaren. De opbrengst van deze bijeenkomsten leidde tot een longlist van knelpunten, beleidsopties en oplossingsrichtingen. De knelpunten heeft TNO geclusterd in overkoepelende en thematische knelpunten.

Dit iteratieve proces heeft geleid tot een overzicht waarin de energiedoelen zijn gelinkt aan knelpunten. Dit overzicht is vervolgens aangevuld met een analyse van de mogelijke impact van deze knelpunten op de energiedoelen, en uitgewerkt tot een samenhangend beeld van energiedoelen, bijbehorende systeemsturing (welk deel van het energiesysteem geraakt wordt), systeemrisico's en afhankelijkheden. Tot slot zijn hieraan de beleidsopties gekoppeld om de geïdentificeerde risico's te mitigeren. Tezamen biedt dit een volledig overzicht van de energiedoelen en de impact van de knelpunten.

**Knelpunten en handelingsperspectieven**
Tabel S.1 geeft een overzicht van de uitkomsten van de analyse van de knelpunten. De tabel biedt per energiedoel inzicht in de bijbehorende knelpunten (vertaald naar systeemrisico's en afhankelijkheden), de beïnvloede delen van het energiesysteem (systeemsturing) en handelingsperspectieven (vertaald naar beleidsopties).

In het onderzoek kwam naar voren dat de energiedoelen niet alleen worden begrensd door specifieke knelpunten voor onderdelen van het energiesysteem, zoals weergegeven in Tabel S.1. Ongeacht de exacte invulling van het energiesysteem wordt de haalbaarheid van emissiereductiedoelen richting 2040 ook beperkt door een samenhangend geheel aan knelpunten die elkaar versterken. De uitvoerbaarheid van de energiedoelen wordt minder begrensd door de technische beschikbaarheid van verduurzamingsopties, maar meer door tijdige besluitvorming, samenhangende ketenontwikkeling, ruimtelijke keuzes en bestuurlijke regie.

**Tabel S.1:** Energiedoelen en bijbehorende knelpunten en handelingsperspectieven

| Energiedoel | Type systeem sturing | Dominante systeemrisico's | Belangrijkste afhankelijkheden | Beleidsopties |
|---|---|---|---|---|
| Schone energie | Aanbod gedreven | Ruimtelijke inpassing, netcapaciteit, marktprijsdruk | Ruimte, infrastructuurtempo, marktontwerp | Creëren investeringszekerheid, ruimtelijke sturing, marktinterventies |
| Hernieuwbare energie | Aanbod gedreven | Netcongestie, regionale uitvoerbaarheid, prijserosie | Regionale infrastructuur, maatschappelijke acceptatie | Versnellen netuitbreiding, locatiekeuzes, subsidiëring |
| Koolstofarme energie | Technologie- en keten-gedreven | Afhankelijkheid CCS lock-ins, lange doorlooptijden | $CO_2$-keten, vergunningen, internationale afstemming | Coördinatie grootschalige projecten, tijdelijke ondersteuning |
| Finaal energie verbruik/ energie besparing | Vraag - gedreven | Onzeker tempo realisatie, beperkte afdwingbaarheid | Elektrificatie, vraagvermindering en gedrag eindgebruikers, uitvoeringscapaciteit | Normering, financiële prikkels, uitvoeringsondersteuning |
| Primair energie verbruik | Systeembreed | Afhankelijk van aannames over efficiëntie en conversie | Hernieuwbare elektriciteitsproductie, waterstofproductie en CCS-inzet, import van bio- of synthetische brandstoffen | Indirect via samenhangend beleid, beperkte directe sturing |
| Elektrificatie breed | Vraag-gedreven | Netcongestie, regionale mismatch vraag-aanbod | Elektriciteitsnet, flexibiliteit, technologieontwikkeling | Versnelling netverzwaring, prioritering aansluiting, investeringszekerheid |

| Energiedoel | Type systeem sturing | Dominante systeemrisico's | Belangrijkste afhankelijkheden | Beleidsopties |
|---|---|---|---|---|
| Elektrificatie industrie | Vraag- en technologie-gedreven | Onvoldoende netcapaciteit, onvolwassen technologie | Netverzwaring, beschikbaarheid hoge-temperatuur technologie | Gerichte ondersteuning, infrastructuurplanning |
| Sectordoelen industrie | Sectoraal gestuurd | Mismatch met technisch handelingsperspectief | Technologieontwikkeling, ketenalternatieven | Flankerend beleid, flexibiliteit in toepassing |
| Verduurzaming warmtevraag | Gebieds- en infrastructuur-gedreven | Onzekerheid bronnen, dalende restwarmte | Regionale warmtebronnen, ruimtelijke inpassing | Gebiedsgerichte regie, lange-termijnkaders |
| Interconnectie capaciteit | Systeembalans-gedreven | Afhankelijkheid buitenland, geopolitieke risico's | Buitenlandse markten, internationale afspraken | Europese afstemming, regulering |
| Flexibiliteit | Markt- en systeembalans-gedreven | Onvoldoende investeringsprikkels, elektriciteitscapaciteit tekort of overschot | Marktontwerp, prijsprikkels | Marktmechanismen, stimulering flexibiliteitsopties |
| Aandeel regelbaar vermogen | Capaciteits-gedreven | Slechte businesscase door weinig draaiuren | Marktontwerp, vraag naar flexibiliteit | Capaciteitsmechanismen, regulering |
| CCS-capaciteit en $CO_2$-transport | Ketengedreven | Beperkte opslag, lock-ins, internationale concurrentie | $CO_2$-infrastructuur, opslagprojecten | Coördinatie keten, tijdelijke ondersteuning |
| Groene of koolstofarme waterstof | Ketengedreven | Onzeker vraagvolume, infrastructuur-risico's | Waterstofnet, CCS, elektriciteitsprijzen | Ketenregie, investeringszekerheid |
| Groen gas | Grondstoffen- en importgedreven | Beperkte beschikbaarheid, concurrentie om biomassa | Importstromen, biomassa-allocatie | Kaders voor inzet, prioritering |

**Synthese**

Dit onderzoek bevat geen rangschikking van de energiedoelen, knelpunten of beleidsopties. Ook geeft het geen inzicht in de invulling van het energiesysteem richting 2040 om het emissiereductiedoel te behalen. Dit onderzoek maakt inzichtelijk van welke factoren het behalen van de doelen voor 2040 het meest afhankelijk is. Deze zijn als volgt: een voldoende aanbod van schone elektriciteit (hernieuwbare bronnen, aangevuld met kernenergie), de capaciteit van het elektriciteitsnet en de mate van elektrificatie van het energie-eindgebruik. Daarnaast is het belangrijk om $CO_2$-afvang, transport en opslag op te schalen, en om te zorgen voor voldoende beschikbaarheid – waaronder import – van biomassa en duurzame brandstoffen. Door expliciet te focussen op deze factoren en keuzes te maken over de bovenstaande randvoorwaarden, kan de realisatie van het energiesysteem in 2040 binnen bereik komen.

Een rangschikking van de energiedoelen, knelpunten of beleidsopties, als ook een vertaling naar een eventuele invulling van het energiesysteem richting 2040 om het emissiereductiedoel te behalen, vallen buiten de scope van dit onderzoek.

# Inhoudsopgave

Samenvatting ..... 3

1 Inleiding ..... 7
1.1 Doel en vraagstelling ..... 7
1.2 Onderzoeksaanpak ..... 7
1.3 Opbouw van dit rapport ..... 9

2 Energiedoelen en scenario's netbeheerders ..... 10
2.1 Energiedoelen ..... 10
2.2 Vergelijking met scenario's netbeheerders ..... 12

3 Knelpunten op weg naar 2040 ..... 14
3.1 Overkoepelende knelpunten ..... 14
3.2 Knelpunten gekoppeld aan energiedoelen ..... 19
3.3 Knelpunten gekoppeld aan netinfrastructuur ..... 21
3.4 Knelpunten gekoppeld aan de Elektriciteitsketen ..... 22
3.5 Moleculen ..... 24

4 Synthese ..... 28
4.1 Inleiding ..... 28
4.2 Energiedoelen en knelpunten ..... 28
4.3 Beleidsopties ..... 30
4.4 Knelpunten en beleidsopties ..... 32
4.5 Overkoepelende observaties ..... 36

Referenties ..... 37

Bijlagen
Bijlage A: Energiedoelen en bijbehorende indicatoren 38
Bijlage B: Deelnemers bijeenkomsten 40

# 1 Inleiding

De lidstaten van de Europese Unie zijn in november 2025 een tussentijds klimaatdoel voor 2040 overeengekomen. Er is een broeikasgasreductiedoel van 90% ten opzichte van 1990 afgesproken. De Nederlandse regering is voornemens zoveel mogelijk aan te sluiten bij de Europese aanpak en indien nodig aanvullende nationaal geborgde maatregelen te nemen om het doel van 2040 te halen met oog voor betaalbaarheid en handelingsperspectief [1]. De uitvoerbaarheid en haalbaarheid van dit voornemen is daarbij een belangrijk onderdeel van de afweging en besluitvorming.

Het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK; voorheen ministerie van Klimaat en Groene Groei) heeft TNO gevraagd de knelpunten voor het realiseren van energiedoelen te onderzoeken en te structureren langs mogelijke indicatoren voor het meten van de doelstellingen. Deze energiedoelen kunnen mogelijk een onderdeel zijn van de invulling van het toekomstige energiesysteem.

## 1.1 Doel en vraagstelling

Dit rapport is primair bedoeld om een overzicht te geven van de knelpunten voor het bepalen van energiedoelen en mogelijke interventies om in 2040 een energiesysteem te kunnen realiseren waarmee het Europese emissiereductiedoel wordt gehaald. De uitkomsten zullen ook gebruikt kunnen worden als input voor de actualisatie van het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) in 2026.

De hoofdvraag voor dit onderzoek is: *Welke knelpunten en mogelijke maatregelen zijn er bij het realiseren van energiedoelen?*

Daarnaast wordt nog een aantal subvragen over het toekomstige energiesysteem beantwoord:

- Zijn transitiepaden naar dit energiesysteem realiseerbaar, welke knelpunten kunnen zich voordoen en zijn deze oplosbaar?
- Welke interventies en randvoorwaarden zijn nodig om het energiesysteem van 2040 te kunnen realiseren?
- Van welke factoren is het halen van de emissiereductie in 2040 het meest afhankelijk?

Ongeacht hoe het energiesysteem van de toekomst er precies uit komt te zien, gaat het er in dit onderzoek dus om te bepalen welke energiedoelen vanuit beleidsperspectief cruciaal zullen zijn en wat de belangrijkste knelpunten zijn om deze doelen te kunnen realiseren.

## 1.2 Onderzoeksaanpak

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen is kwalitatief onderzoek uitgevoerd. Om de vragen te kunnen beantwoorden, was wel een zeker vertrekpunt nodig, dat duidelijk maakt waar voor het energiesysteem van de toekomst van moet worden uitgegaan. Hiervoor is gebruik gemaakt van de scenariobasis van een breder onderzoek, waarin TNO systeemdynamische analyses met betrekking tot het energiesysteem heeft gemaakt ten

behoeve van een actualisatie van het NPE [2].[1] In de onderstaande paragraaf wordt de basis van dit bredere onderzoek kort toegelicht en wordt de kwalitatieve onderzoeksaanpak beschreven.

**Nederlandse energiesysteem in 2040**
In het bredere onderzoek zijn realistische scenario's gemaakt van het energiesysteem in 2040De scenario's varieerden in veronderstellingen over de internationale concurrentiepositie van de energie-intensieve industrie en de invulling van het emissiereductiedoel. Deze scenario's zijn vergeleken met de raming van de Klimaat- en Energieverkenning 2024 (KEV) die uitgaat van vastgesteld en voorgenomen beleid. De KEV geeft een raming van het energiegebruik, samenstelling van het energieaanbod (waaronder hernieuwbare energie) en broeikasgasemissies op basis van het vastgestelde en voorgenomen beleid. Dit levert een 'gap-analyse' op die inzicht geeft in de extra inspanningen die nodig zijn om de scenario's voor 2040 te realiseren.

De energiescenario's zijn ook vergeleken met het 'Koersvaste Middenweg scenario' van Netbeheer Nederland, waarop de netbeheerders hun investeringsplannen voor de netinfrastructuur baseren. Deze vergelijking biedt inzicht in mogelijke knelpunten bij de netinfrastructuur.

Deze 'gapanalyses' zijn van belang om uitspraken te kunnen doen over knelpunten en beleidsopties die zich kunnen voordoen bij een energiesysteem met 90% emissiereductiedoelstelling.

*De voor dit onderzoek gebruikte energiescenario's zijn ontwikkeld om strategische beleidskeuzes te kunnen verkennen, niet om het feitelijke toekomstige energiesysteem te voorspellen. De waarden uit deze scenario's zijn richtinggevend en indicatief en zijn als zodanig gebruikt bij het inschatten van mogelijke knelpunten.*

**Energiedoelen en -indicatoren**
De scenario's vormden de basis voor de selectie van energiedoelen. Deze doelen geven inzicht in de belangrijkste kenmerken van het energiesysteem, zoals energieverbruik, elektrificatie of flexibiliteit. De doelen maken zichtbaar hoe onderdelen tot elkaar verhouden en welke knelpunten en ontwikkelingen nodig zijn om emissiereductie mogelijk te maken.

In samenspraak met EZK zijn er energiedoelen opgesteld die sturing kunnen geven aan de mogelijke invulling van het energiesysteem richting 2040. Om deze doelen meetbaar te maken zijn er energie-indicatoren gedefinieerd. In Bijlage A worden deze aan elkaar gekoppeld. Deze specifieke indicatoren zijn gebruikt als meet- en duidingsvariabelen in de scenario's.

**Knelpunten en maatregelen**
Voor het identificeren van knelpunten en interventies is gebruikgemaakt van diverse expertises die in vier typen bijeenkomsten samen worden gebracht:

1. TNO-expertise,
2. Netbeheerders,
3. Klankbordgroep (op basis van brede energiesectorvertegenwoordiging),
4. EZK-expertise (beleid en managersniveau).

[1] Publicatie van dit rapport vindt naar verwachting eind 2026 plaats; voor onderhavig onderzoek is gebruik gemaakt van de conceptresultaten eind 2025.

De selectie van deelnemers is gebaseerd op een brede doorsnijding van expertise, zowel naar sectoren, energiedragers als randvoorwaarden, en op vertegenwoordiging van relevante beleidsdossiers en een bestaande externe klantbordgroep. In Bijlage B worden de betrokken organisaties genoemd.

De opbrengst van de eerste 4 typen bijeenkomsten leidden tot een longlist van knelpunten, die vervolgens zijn geclusterd tot overkoepelende knelpunten en thematische knelpunten. Dit iteratieve proces resulteerde in een logische ordening van kwalitatieve knelpunten, waarmee een samenhangend (zij het niet uitputtend) overzicht wordt geboden over de haalbaarheid van mogelijke doelen. Deze knelpunten zijn verder niet gekwantificeerd, maar uitsluitend beschreven en geordend. Het is daarbij van veel groter belang om het verschil te zien tussen de KEV en de bandbreedte van de scenario's dan de exacte getalsmatige output van de scenariostudies. Aanvullend op het thematisch clusteren zijn de knelpunten gekoppeld aan de energiedoelen die het ministerie heeft opgesteld. Dit iteratieve proces heeft geleid tot een overzicht waarin de energiedoelen gelinkt zijn aan knelpunten en handelingsperspectieven.

In het kwalitatieve onderzoek zijn opnames van de sessies, volledige transcripten van gesprekken, flip-overs en sticky notes uit de sessies, en notities van moderatoren gebruikt als databronnen. De resultaten zijn geaggregeerd en zijn niet herleidbaar. Het onderzoek is uitgevoerd conform de TNO integriteitsprincipes en de geldende afspraken rondom het gebruik van data.

## 1.3 Opbouw van dit rapport

Dit rapport is als volgt opgebouwd:

Hoofdstuk 2 beschrijft de energiedoelen, die van belang zijn voor het energiesysteem waarmee in 2040 de emissiereductiedoelstellingen gehaald zou moeten worden. Deze zetten we ook af tegen de scenario's van Netbeheer Nederland, waarmee de uitvoerbaarheid wordt gelinkt aan de infrastructurele kant van het toekomstig energiesysteem. In Hoofdstuk 3 worden vervolgens de opgehaalde knelpunten uit de knelpuntenanalyse weergeven aan de hand van overkoepelende en thematische onderwerpen. Tot slot linkt Hoofdstuk 4 de knelpunten en handelingsperspectieven aan de energiedoelen uit Hoofdstuk 2.

# 2 Energiedoelen en scenario's netbeheerders

## 2.1 Energiedoelen

De scenario's vormen de basis voor de selectie van energiedoelen. Deze doelen zijn in samenspraak met EZK bepaald en kunnen een mogelijke invulling van het energiesysteem zijn. De doelen maken zichtbaar hoe onderdelen tot elkaar verhouden en welke knelpunten en ontwikkelingen nodig zijn om emissiereductie mogelijk te maken. Deze paragraaf geeft verdere toelichting over de specifieke doelen, middels een korte beschrijving per doel.

De doelen zijn als volgt bepaald:

- Finaal en primair energie verbruik
- Schone energie
- Hernieuwbare energie
- Koolstofarme energie
- Elektrificatie (incl. sectordoelen industrie)
- Verduurzaming warmtevraag
- Flexibiliteit en aandeel regelbaar vermogen
- CCS-capaciteit en $CO_2$-transport
- Groene of koolstofarme waterstof
- Groen gas.

**Primair en finaal energieverbruik**
De Energy Efficiency Directive (EED) [3] kent doelstellingen voor het maximale primair en finaal energieverbruik. Primair energieverbruik betreft de totale hoeveelheid energie die nodig is om in de energievraag te voorzien, inclusief omzettings- en transportverliezen. Een hoger primair energieverbruik wordt onder meer veroorzaakt door energieverbruik bij brandstofconversie en waterstofproductie, waaronder energieverbruik voor afvang van $CO_2$. Finaal energieverbruik betreft de energie, inclusief de luchtvaartsector die uiteindelijk door eindgebruikers wordt verbruikt. Omgevingsenergie die warmtepompen gebruiken wordt niet meegeteld. Het doel staat voor de totale energiebehoefte van het energiesysteem en de mate waarin energie-efficiëntie wordt gerealiseerd.

**Schone energie**
Schone energie (of $CO_2$-vrije) omvat energie uit kernenergie en hernieuwbare bronnen zoals wind, zon, waterkracht, biomassa, aardwarmte, omgevingsenergie. Deze energievormen leveren tijdens de productie geen of zeer beperkte $CO_2$-emissies. Het doel staat voor het aandeel schone energie in het energieverbruik en geeft inzicht in de mate waarin fossiele energie wordt vervangen.

**Hernieuwbare energie**
Hernieuwbare energie omvat energie uit wind, zon, waterkracht, biomassa, aardwarmte en omgevingswarmte. Hernieuwbare bronnen vormen een belangrijke pijler onder de verduurzaming van het energiesysteem. In de Renewable Energy Directive (REDIII) [4] staan doelstellingen voor hernieuwbare energie voor 2030. Voor alle EU-landen gezamenlijk is het

doel om in 2030 tenminste 42,5% van het finale energieverbruik te dekken met energie uit hernieuwbare bronnen met een ambitie van 45%. Voor Nederland is dat doel 39%.

Het doel staat voor het aandeel hernieuwbare energie in het energieverbruik en de energieproductie.

**Koolstofarme energie**
Koolstofarme energie omvat hernieuwbare energie, kernenergie en energie uit fossiele bronnen waarbij de $CO_2$-uitstoot 70% lager is dan bij het fossiele alternatief (volgens de EU-definitie van koolstofarme energiedragers). Dit kan gerealiseerd worden door bijvoorbeeld fossiele $CO_2$-afvang. Het doel staat voor de mate waarin het energiesysteem wordt verduurzaamd door zowel hernieuwbare als emissiearme energiedragers.

**Hernieuwbare en schone elektriciteitsproductie**
Schone elektriciteit wordt geproduceerd uit hernieuwbare bronnen en kernenergie. Het overgrote deel van hernieuwbare bronnen is wind en zon, een klein deel van de elektriciteit wordt geproduceerd met biomassa. Elektriciteit speelt een centrale rol in de verduurzaming van eindgebruikerssectoren. Het doel staat voor het aandeel schone en hernieuwbare elektriciteit in de totale elektriciteitsproductie.

**Elektrificatie van het eindgebruik**
Elektrificatie betreft het vervangen van fossiele energiedragers door elektriciteit bij eindgebruikers. Dit gebeurt met name door de productie van warmte (in de gebouwde omgeving, industrie en landbouw) en het binnenlands transport. Een hogere mate van elektrificatie vermindert directe emissies en vergroot de rol van duurzame elektriciteit in het energiesysteem. Het doel staat voor het aandeel elektriciteit in het finale energieverbruik.

**Verduurzaming warmtevraag**
Verduurzaming van de warmtevraag betreft het vervangen van fossiele warmtebronnen door duurzame alternatieven, zoals warmtepompen, geothermie en warmtenetten. Het doel staat voor de mate waarin de warmtevoorziening bijdraagt aan emissiereductie.

**Flexibiliteit**
Flexibiliteit betreft het vermogen van het energiesysteem om vraag en aanbod van energie in balans te houden. Dit kan onder meer worden geleverd door opslag, vraagsturing, interconnectie en flexibele productie. Het doel geeft inzicht in de mogelijkheden om variabele energiebronnen zoals wind en zon in te passen.

**Regelbaar vermogen**
Regelbaar vermogen bestaat uit productie-installaties (aardgas, kolen, biomassa, waterstof en kerncentrales) waarvan het vermogen op aanvraag kan worden op- of afgeschaald. Inzet van andere flexibele vermogens zoals vraagresponse (waaronder flexibele inzet van electrolysers) en energieopslag in batterijen vallen hier niet onder. Regelbaar vermogen is belangrijk voor leveringszekerheid tijdens perioden met beperkte productie uit wind en zon. Het doel staat voor het aandeel regelbaar vermogen binnen het totale productievermogen.

**CCS-capaciteit en $CO_2$-transport**
CCS (Carbon Capture and Storage) bestaat uit het afvangen, transporteren en opslaan van $CO_2$ om emissies te reduceren of negatieve emissies te realiseren. Voor de toepassing van CCS is voldoende transport- en opslagcapaciteit nodig. Het doel staat voor de hoeveelheid $CO_2$ die binnen het energiesysteem wordt afgevangen, getransporteerd en opgeslagen.

**Groene waterstof en duurzame brandstoffen**
Waterstof kan worden geproduceerd uit hernieuwbare elektriciteit (groene waterstof) of uit fossiele bronnen in combinatie met $CO_2$-afvang (koolstofarme waterstof). Waterstof kan worden ingezet als grondstof, brandstof of flexibiliteitsoptie binnen het energiesysteem. Het doel staat voor de productie en het gebruik van waterstof.

**Duurzame brandstoffen**
Duurzame brandstoffen omvatten biobrandstoffen en synthetische brandstoffen die worden geproduceerd met waterstof of niet-fossiele grondstoffen. Deze brandstoffen zijn vooral relevant voor sectoren waar directe elektrificatie beperkt mogelijk is, zoals luchtvaart en scheepvaart. Biomassa kan ook gebruikt worden in de productie van duurzame brandstoffen, als de omvang van de energie-intensieve industrie kleiner is. Dit vermindert de vraag naar grondstoffen en komt er meer biomassa beschikbaar. Het doel staat voor het aandeel duurzame brandstoffen in het energieverbruik.

**Groen gas**
Groen gas is gas dat wordt geproduceerd uit hernieuwbare bronnen, zoals vergisting of vergassing van biomassa. Groen gas kan worden ingezet binnen bestaande gasinfrastructuur en vormt een alternatief voor aardgas. Het doel focust op de productie en inzet van groen gas binnen het energiesysteem.

**Interconnectie capaciteit**
Interconnectie capaciteit betreft de transportcapaciteit van grensoverschrijdende verbindingen voor elektriciteit, waterstof en andere energiedragers tussen Nederland en het buitenland. Interconnecties maken het mogelijk om energie te importeren en exporteren en dragen daarmee bij aan leveringszekerheid, systeembalans en de integratie van Europese energiemarkten. Het doel staat voor de beschikbare grensoverschrijdende transportcapaciteit en geeft inzicht in de mate waarin het Nederlandse energiesysteem kan steunen op internationale uitwisseling van energie.

**Sectordoelen industrie**
Sectordoelen industrie beschrijven de bijdrage van industriële sectoren aan de verduurzaming van het energiesysteem. De industrie is een belangrijke gebruiker van energie, elektriciteit, waterstof en grondstoffen en heeft daardoor grote invloed op de totale emissiereductieopgave. Het doel staat voor de ontwikkelingen in energieverbruik, energiedragers en verduurzamingsroutes binnen de industrie.

## 2.2 Vergelijking met scenario’s netbeheerders

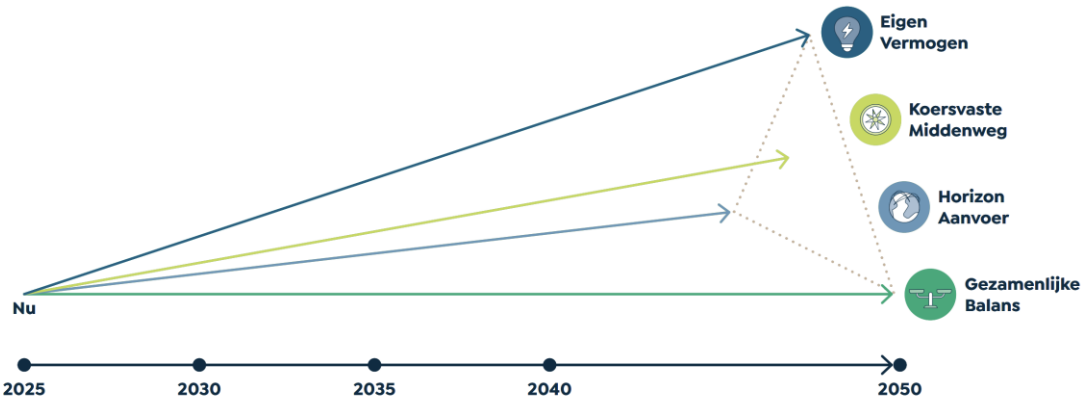
Omdat de realisatie van de vastgestelde energiedoelen mede afhankelijk is van de uitvoerbaarheid van het toekomstig energiesysteem, is ook gekeken naar de scenario’s van Netbeheer Nederland. Daarmee wordt verder inzicht geboden in de benodigde ontwikkelingen om aan te sluiten bij bestaande verwachtingen over energieverbruik en infrastructuurontwikkeling richting 2040. Deze Paragraaf beschrijft de uitkomsten van vergelijking met de scenario’s van de Netbeheerders.

Voor het maken van investeringsplannen stellen de Nederlandse netbeheerders gezamenlijk scenario’s op. Deze scenario’s [5] liggen ten grondslag aan de concept investeringsplannen 2026 die de netbeheerders in 2025 hebben gepubliceerd[2]. De investeringsplannen kijken 15 jaar vooruit, dat wil zeggen tot 2040.

[2] Zie: https://www.netbeheernederland.nl/uitvoering/investeringsplannen-ips

De Nederlandse netbeheerders gebruiken voor hun investeringsplannen vooral het Koersvaste Middenweg scenario[3]. Zie Figuur 2.1. Om te kunnen beoordelen of er voor scenario's met het Europese reductiedoel knelpunten kunnen ontstaan bij de netwerkinfrastructuur (elektriciteitsnet, waterstofnet, $CO_2$-net) heeft TNO in het bredere onderzoek een vergelijking gemaakt met het Koersvaste Middenweg-scenario. De netbeheerders zijn vervolgens nagegaan wat dit zou betekenen voor de investeringsplannen 2026. De bevindingen worden hieronder samengevat.

De netbeheerders gaan ervan uit dat een groot deel (70%) van de elektriciteitsvraag groei van het KM scenario realiseerbaar is. De elektriciteitsvraag conform Europese doelstellingen ligt daaronder. Daarmee stellen de netbeheerders dat dit, wat betreft de elektriciteitsnetinfrastructuur, uitvoerbaar is. Dit staat los van de knelpunten gerelateerd aan de realisatie van de infrastructuur.




**Figuur 2.1**: Vier scenario's van de Nederlandse netbeheerders die zijn doorgerekend voor 2025, 2030, 2035, 2040 en 2050.

**Netinfrastructuur voor waterstof**
Het investeringsplan van Gasunie gaat uit van een waterstofnetwerk dat de vijf grote industriële regio's in Nederland met elkaar verbindt en verbindingen heeft met buurlanden, waterstofopslag en importfaciliteiten. Het beoogde opslagvolume van waterstof is veel hoger dan wat er uit de scenario's komt. De netbeheerders verwachten daarom dat het Europese 90% emissiereductiedoel ook voor de netinfrastructuur voor waterstof niet of hoogstens tot beperkte knelpunten zullen leiden.

**Netinfrastructuur voor $CO_2$**
Gasunie werkt met partners aan een netinfrastructuur dat aansluit op de $CO_2$-projecten Porthos (tot 2,5 Mton/jaar) en Aramis (tot 22 Mton/jaar) en verbindingen naar België en Duitsland. De CCS-capaciteit en de netinfrastructuur voor $CO_2$-transport liggen volgens de netbeheerders in lijn met de behoefte aan CCS-infrastructuur bij realisatie van Europese doelen.

[3] De andere Netbeheer Nederland scenario's zijn bij het opstellen van de investeringsplannen soms gebruikt om consequenties voor afwijkende ontwikkelingen in te schatten.

# 3 Knelpunten op weg naar 2040

Dit hoofdstuk beschrijft de knelpunten om het energiesysteem voor 2040 te realiseren met de 90% emissiereductiedoelstelling. Er zijn knelpunten die voor bijna alle onderdelen van het energiesysteem gelden, namelijk zowel voor de ontwikkeling van bronnen, voor elektrificatie van het energiesysteem als voor het realiseren van verschillende energiedragers. Deze worden beschreven in paragraaf 3.1. Paragraaf 3.2 structureert deze knelpunten naar energiedoelen. De bron voor deze beide paragrafen zijn de sessies met TNO experts, beleidsmedewerkers van het ministerie en de klankbordgroep (zie paragraaf 1.3). Dat betekent dat er in deze paragraaf maar zeer beperkt bronnen worden genoemd. Er is met de netbeheerders separaat gesproken over de knelpunten die gerelateerd zijn aan de netinfrastructuur. Dit wordt in paragraaf 3.3 beschreven. Paragraaf 3.4 beschrijft de knelpunten die gekoppeld zijn aan de elektriciteitsketen en paragraaf 3.5 beschrijft het voor knelpunten voor moleculen. Er kunnen mogelijke dubbelingen zijn met eerdergenoemde knelpunten. Hoofdstuk 4 geeft vervolgens de synthese over de knelpunten in relatie tot emissiereductie.

## 3.1 Overkoepelende knelpunten

Deze paragraaf beschrijft de belangrijkste overkoepelende knelpunten die optreden aan zowel de bronkant, als in de elektriciteitsketen en in de moleculaire energieketens. Deze knelpunten beïnvloeden meerdere onderdelen van het energiesysteem. Zo zijn sommige van de in Paragraaf 3.2 - 3.5 beschreven knelpunten specifieke manifestaties of gevolgen van de overkoepelende knelpunten.

### Kwetsbaarheid door importafhankelijkheid

- *Importafhankelijkheid (fossiele brandstoffen, grondstoffen, biomassa) leidt tot kwetsbaarheid.*
  Importafhankelijkheid van fossiele brandstoffen, grondstoffen en biomassa maakt het energiesysteem gevoelig voor geopolitieke spanningen en verstoringen in internationale ketens. Wanneer leveringen uit het buitenland wegvallen of prijzen sterk stijgen, heeft dit direct impact op beschikbaarheid van deze grondstoffen en op de kosten van het energiesysteem. Hierdoor ontstaat een structurele kwetsbaarheid van het energiesysteem die zowel leveringszekerheid van energie als continuïteit van industriële productieprocessen onder druk zet.

- *Afhankelijkheid van kritieke materialen en hun waardeketen.*
  De energietransitie heeft ook kritieke materialen nodig. Onder andere voor de productie van batterijen, windmolens en zonnecellen worden lithium, nikkel, kobalt en zeldzame aardmetalen gebruikt. Omdat de winning en verwerking hiervan momenteel sterk geconcentreerd is in een beperkt aantal landen, is de leveringszekerheid kwetsbaar voor geopolitieke spanningen, handelspolitiek en exportrestricties. Tekorten aan deze materialen of verstoringen in de keten kunnen de ontwikkeling van het energiesysteem vertragen, risico's creëren voor onderhoud in onderdelen van het systeem en continuïteit

van prestaties, en vormen daarmee een structurele bedreiging voor het tempo, de betaalbaarheid en haalbaarheid van de energietransitie.

- *Padafhankelijkheid bij een 'meer bronnen strategie' voor weerbaarheid.*
  Om het energiesysteem robuuster te maken en minder afhankelijk van afzonderlijke energiebronnen is een 'meer-bronnenstrategie' nodig. Deze strategie omvat zowel het fysiek ontwikkelen en beschikbaar hebben van meerdere energiebronnen als het openhouden van opties om in de tijd te kunnen bijsturen. Juist hier ontstaat padafhankelijkheid: ruimte, infrastructuur en uitvoeringscapaciteit zijn beperkt, waardoor niet alle opties gelijktijdig kunnen worden gerealiseerd. Keuzes over locatie, fasering en investeringen bepalen welke technologieën later nog opschaalbaar zijn en in welke mate kan worden teruggevallen op alternatieven. Wanneer infrastructuur, regelgeving en investeringsbeslissingen eenmaal zijn vastgelegd, kan dit de flexibiliteit beperken om meerdere ontwikkelrichtingen – zoals hernieuwbaar en schoon/koolstofarm – open te houden. Hierdoor ontstaat spanning tussen het tijdig maken van scherpe keuzes en het behouden van voldoende ruimte voor diversificatie en weerbaarheid op de langere termijn.

### Klimaatdoelen en beleids(on)zekerheid

- *Laag verduurzamingstempo voor fossielafbouw in 2040.*
  Het huidige realisatietempo van projecten voor hernieuwbare energie, energie-infrastructuur en elektrificatie ligt aanzienlijk lager dan nodig is om de beoogde afbouw van fossiele energie in 2040 te halen. Dit komt o.a. door lange vergunningstrajecten, netcongestie, kosten en beschikbaarheid van duurzame technologieën en beperkte uitvoeringscapaciteit. De opgave stapelt zich op richting 2040 en het is niet zomaar opgelost. Het risico ontstaat dat fossiele brandstoffen langer in gebruik blijven dan gewenst. Zonder versnelling in besluitvorming, realisatie en infrastructuuruitbreiding komt elektrificatie, het realiseren van schone bronnen en flexibele assets in 2040 onder druk te staan.

- *Weerbaarheid en (inter)nationale autonomie versus kostenoptimaal energiesysteem.*
  De weerbaarheid van het energiesysteem is een belangrijk aandachtspunt en hangt samen met de mate van afhankelijkheid van andere landen, bijvoorbeeld via import en export van energie en grondstoffen, en met de diversificatie van leverende landen en bronnen. Keuzes die gericht zijn op het vergroten van deze weerbaarheid en autonomie sluiten echter niet altijd aan bij het verwachte of gewenste eindbeeld van het energiesysteem en zijn vaak minder kostenefficiënt dan kostenoptimale oplossingen. Het versterken van de weerbaarheid brengt doorgaans extra kosten met zich mee, bijvoorbeeld door het aanhouden van redundantie of het beperken van internationale afhankelijkheden. Hierdoor ontstaat een knelpunt: kostenoptimale scenario's bieden onvoldoende houvast voor keuzes waarin weerbaarheid en autonomie expliciet worden meegewogen, terwijl deze aspecten wel richtinggevend zijn voor strategische beslissingen over de inrichting van het energiesysteem.

- *Lokale autonomie als reactie op netbeperkingen versus systeemkostenoptimaliteit.*
  Wanneer de uitbreiding van de elektriciteitsinfrastructuur vertraging oploopt, kiezen bedrijven en andere gebruikers steeds vaker voor decentrale oplossingen om hun afhankelijkheid van beperkte aansluitcapaciteit te verminderen. Dit kan bijvoorbeeld bestaan uit de inzet van lokale batterijen, eigen opwek of andere autonome voorzieningen. Hoewel deze keuzes op korte termijn rationeel zijn vanuit het perspectief van individuele partijen, sluiten zij niet altijd aan bij het gewenste of verwachte eindbeeld van het energiesysteem en zijn zij mogelijk niet de meest kostenefficiënte oplossingen op

systeemniveau. Een voorbeeld hiervan is een bedrijf dat vanwege langdurige wachttijden voor een zwaardere netaansluiting investeert in grootschalige lokale opslag of eigen opwekcapaciteit. Deze oplossing kan de bedrijfscontinuïteit borgen, maar leidt tegelijkertijd tot hogere totale systeemkosten en kan toekomstige, meer efficiënte netverzwaring of collectieve oplossingen bemoeilijken. Daarmee ontstaat spanning tussen individuele autonomie op lokaal niveau en de realisatie van een kosten optimaal en samenhangend energiesysteem.

### Energie-infrastructuur en systeemintegratie

- *Ongelijktijdige ontwikkeling van vraag, aanbod en infrastructuur.*
  De ontwikkeling van vraag en aanbod van duurzame energie en de beschikbaarheid van infrastructuur om deze energie te transporteren loopt niet synchroon. Nieuwe grootschalige opwekcapaciteit van wind op zee wordt top-down gepland, terwijl de vraag naar duurzame elektriciteit als gevolg van elektrificatie bij bedrijven geleidelijk en organisch groeit. Tegelijkertijd kunnen netbeheerders de benodigde uitbreidingen van het elektriciteitsnet niet altijd tijdig realiseren. Bedrijven die willen elektrificeren lopen hierdoor aan tegen een gebrek aan aansluitcapaciteit, en niet alle opgewekte duurzame energie kan worden ingevoegd op het elektriciteitsnet. Dit leidt tot een suboptimale benutting van duurzame opwek en vergroot de uitdaging om vraag, aanbod en infrastructuur tijdig en samenhangend op elkaar af te stemmen.

- *Uitstel van verduurzamingsinvesteringen bij MKB en industrie.*
  Lange wachttijden voor netaansluitingen, gecombineerd met onzekerheid over toekomstige energieprijzen, hoge investeringskosten voor technologieën en wisselend overheidsbeleid, zorgen ervoor dat bedrijven verduurzamingsinvesteringen steeds vaker uitstellen of afstellen. Vooral voor het MKB en energie-intensieve bedrijven vormt netcongestie een directe belemmering om te elektrificeren of over te stappen op duurzame alternatieven. Zolang structurele oplossingen voor deze onzekerheden uitblijven en netcongestie naar verwachting langdurig aanhoudt, blijven investeringsbeslissingen kwetsbaar. In sommige gevallen kan verplaatsing van productie naar het buitenland (mogelijk ook buiten de EU) voor bedrijven een reële optie worden. Dit kan op korte termijn economische schade veroorzaken en leidt tot het risico op $CO_2$-leakage, waarbij emissies niet verdwijnen maar verschuiven naar landen met minder ambitieus klimaatbeleid.

- *Lock-ins door tijdelijke oplossingen (bijv. CCS, hybride warmtepompen).*
  Hoewel CCS is bedoeld als tijdelijke route voor $CO_2$-reductie, legt de inzet ervan beslag op infrastructuur, ruimte en middelen die nu én in de toekomst ook nodig zijn voor andere verduurzamingsopties. Dit kan ertoe leiden dat alternatieven, zoals elektrificatie of fundamentele procesvernieuwing, trager van de grond komen. Daarnaast kan CCS een prikkel creëren om bestaande fossiele productieprocessen langer in stand te houden. Wanneer bedrijven investeren in $CO_2$-afvanginstallaties en bijbehorende infrastructuur, ontstaat een economisch belang om deze installaties over een langere periode te benutten. In combinatie met beleidsinstrumenten die $CO_2$-afvang belonen of emissies via afvang als ‘opgelost’ beschouwen, kan dit ertoe leiden dat bedrijven hun processen blijven inrichten op voortgezet gebruik van fossiele brandstoffen, in plaats van te investeren in structurele emissievrije alternatieven. Hierdoor ontstaat het risico op lock-ins, terwijl CCS juist als tijdelijke oplossing is bedoeld.

Een uitzondering vormt de inzet van CCS voor negatieve emissies, bijvoorbeeld bij biogene bronnen, die ook op de langere termijn noodzakelijk blijft om moeilijk te reduceren broeikasgasemissies te compenseren.

- *Lange doorlooptijden bij grote projecten, zoals de realisatie van hoogspanningsstations.*
  Grote energie-infrastructuurprojecten, zoals hoogspanningsstations, kennen lange doorlooptijden. De voorbereidingsfase met ontwerp, locatiekeuze en vergunningsprocedures, gecombineerd met een complexe bouwfase leidt tot vertragingen. Hierdoor komen noodzakelijke uitbreidingen niet tijdig beschikbaar en neemt de druk op het elektriciteitsnet verder toe.

- *Lange doorlooptijden voor het ontwikkelen, ombouwen en/of opschalen van nieuwe processen bij bedrijven.*
  Zelfs wanneer er duidelijkheid bestaat over investeringsbeslissingen, zijn er nog diverse organisatorische, technische en operationele stappen nodig bij bedrijven voordat de nieuwe processen operationeel zijn. De bedrijven gaan dit pas doen als de systeemknelpunten (binnen afzienbare tijd) zijn opgelost. De doorlooptijd van het ontwikkelen en ombouwen van nieuwe bedrijfsprocessen komt bovenop de tijd die daarvoor nodig is. Ook de opschaling moet dan nog plaatsvinden.

- *Schaarste aan materiaal en gekwalificeerd personeel*
  De ontwikkeling en realisatie van het energiesysteem richting 2040 wordt belemmerd door een tekort aan materialen en gekwalificeerd personeel. Deze schaarste manifesteert zich in vrijwel alle onderdelen van het proces en bij uiteenlopende partijen, waaronder overheden, toezichthoudende instanties, netbeheerders, marktpartijen en uitvoerende bedrijven. Het betreft niet alleen technische beroepen, maar ook capaciteit bij vergunningverlening, juridische procedures, projectvoorbereiding en systeemintegratie. Door deze beperkte beschikbaarheid ontstaan vertragingen in meerdere schakels van de keten, van beleidsvoorbereiding en besluitvorming tot ontwerp, vergunningverlening, bouw en inbedrijfstelling van projecten. De schaarste werkt bovendien stapelend: vertragingen in één onderdeel leiden tot uitstel in andere delen van het energiesysteem, zoals de uitrol van duurzame opwek, elektrificatie bij eindgebruikers, digitalisering en de aanleg van ondersteunende infrastructuur. Hierdoor neemt het risico toe dat het tempo van systeemontwikkeling achterblijft bij wat nodig is om de energiedoelen voor 2040 tijdig te realiseren.

- *Ontbrekend Europees level-playing field belemmert verduurzamingsinvesteringen*
  Het ontbreken van een gelijk speelveld binnen Europa vormt een knelpunt voor de verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem. Relatief hoge elektriciteitsprijzen en verschillen in overheidssteun verslechteren de businesscase voor verduurzamingsinvesteringen in Nederland. Hierdoor stellen bedrijven investeringen in elektrificatie en andere duurzame oplossingen uit of verplaatsen hun productie naar het buitenland, wat de ontwikkeling van duurzame vraag vertraagt en het risico op $CO_2$-leakage vergroot.

- *Onzekerheid over bijdrage van $CO_2$-reductie in landgebruik (LULUCF).*
  Er bestaan onzekerheden over de hoeveelheid $CO_2$-emissies van veranderd landgebruik en bosbeheer (Land Use, Land Use Change and Forestry). Naar verwachting blijft deze sector ook na 2040 netto uitstoot veroorzaken. Mogelijk is het daardoor nodig dat Nederland al vóór 2040 koolstofverwijdering realiseert ter compensatie van restemissies uit landgebruik en bosbeheer, mogelijk met negatieve emissies, dat wil zeggen opslag van niet-fossiele $CO_2$.

### Ruimte en ruimtelijke inpassing

- *Schaarse ruimte en inpassingsvraag nieuwe energie-infrastructuur, opwek en verduurzamingsassets.*
  De ontwikkeling van een duurzaam energiesysteem kent een sterke fysieke ruimtelijke component. De schaarse fysieke ruimte in Nederland maakt de inpassing van nieuwe energie-infrastructuur, opwek, en andere verduurzamingsassets steeds complexer. De beschikbare ruimte is beperkt en andere, moeilijk voorspelbare vragen (zoals woningen, datacentra, bedrijventerreinen, militaire oefenterreinen, natuur) concurreren hier eveneens om. Deze ruimteopgave is niet alleen ruimtelijk, maar ook temporeel uitdagend: het kost veel tijd om de benodigde ruimtelijke puzzel zorgvuldig te leggen, waardoor projecten vertragen.

- *Padafhankelijkheid door schaarse fysieke ruimte en locatiekeuzes.*
  Locatiekeuzes voor onderdelen van het energiesysteem die in een vroeg stadium worden gemaakt, bijvoorbeeld voor energie-infrastructuur, opwek, opslag of conversie, leggen langdurig beslag op schaarse ruimte en beperken daarmee toekomstige keuzemogelijkheden. Deze ruimtelijke padafhankelijkheid wordt versterkt doordat meerdere technologieën en functies gelijktijdig aanspraak maken op dezelfde fysieke ruimte, terwijl de beschikbare ecologische en ruimtelijke ruimte beperkt is. Daarnaast bestaat onzekerheid over de toekomstige ruimtebehoefte van verschillende energietechnologieën en over de mate waarin alternatieve oplossingen later nog kunnen worden ingepast. Wanneer locaties eenmaal zijn vastgelegd en infrastructuur is gerealiseerd, wordt het moeilijker om bij te sturen of nieuwe opties toe te voegen. Hierdoor ontstaat spanning tussen het tijdig realiseren van noodzakelijke onderdelen van het energiesysteem en het openhouden van voldoende fysieke ruimte om in te kunnen spelen op technologische ontwikkelingen en veranderende systeemkeuzes richting 2040.

- *Gelijktijdig ruimte nodig voor zowel op als afbouw van het nieuwe en het oude energiesysteem.*
  Voor de energietransitie is gelijktijdig ruimte nodig voor zowel de opbouw van het nieuwe duurzame energiesysteem als de afbouw van het bestaande fossiele systeem. Ruimte voor fossiele ketens in havens moet bijvoorbeeld plaatsmaken voor opslag en overslag voor biomassa. Deze dubbele ruimtelijke claim legt extra druk op de al schaarse fysieke ruimte. Zolang er nog onvoldoende alternatieven beschikbaar zijn voor gas blijven beide systemen naast elkaar bestaan en concurreren om dezelfde locaties. Dit wordt duidelijk zichtbaar in de Rotterdamse haven, waar ruimte nodig is voor waterstofproductie (elektrolysers), de productie van synthetische brandstoffen en biobrandstoffen (zoals SAF) en mogelijk kernenergie, terwijl olieraffinage en olieopslag voorlopig ook noodzakelijk blijven.

### Regulering en procedures

- *Onzekerheid vergunningsprocedures*
  Lange en onzekere vergunningsprocedures vertragen de realisatie van energie-infrastructuurprojecten, verduurzamingsinstallaties en duurzame bronnen aanzienlijk. Voor een hoogspanningsstation of nieuwe kabelverbinding kan het vergunningstraject alleen al meerdere jaren duren, zeker wanneer bezwaar- en beroepsprocedures worden doorlopen. Hierdoor schuiven planning en uitvoering op, waardoor projecten niet tijdig beschikbaar komen voor de energietransitie.

## 3.2 Knelpunten gekoppeld aan energiedoelen

Deze paragraaf beschrijft knelpunten die gerelateerd zijn aan mogelijke energiedoelen. Zoals eerder benoemd zijn deze energiedoelen geen definitief vastgestelde doelen. Het zijn potentiële onderdelen van een mogelijk energiesysteem richting 2040 dat bijdraagt aan het Europese emissiereductiedoel. Sommige van deze knelpunten zijn gevolgen of specifieke manifestaties van de overkoepelende knelpunten beschreven in paragraaf 3.1.

### Biomassa en brandstoffen

- *Onzekerheid rond toekomstige beschikbaarheid van biomassa en duurzame brandstoffen*
  Nederland zal voor biomassa en duurzame brandstoffen in toenemende mate afhankelijk zijn van import. De mate waarin deze energiedragers binnen Nederland geproduceerd, verwerkt en opgeslagen kunnen worden is onzeker, onder meer door beperkte fysieke ruimte en concurrerende ruimteclaims. Hierdoor ontstaat onzekerheid over de toekomstige beschikbaarheid en leveringszekerheid van deze stromen. Een groeiende importafhankelijkheid kan het energiesysteem kwetsbaar maken voor verstoringen in internationale markten en ketens, en bemoeilijkt het maken van robuuste keuzes over de rol van biomassa en duurzame brandstoffen in het toekomstige energiesysteem.

- *Onzekerheid over binnenlandse productie van synthetische of biobrandstoffen*
  Er bestaat onzekerheid over de vraag of en in welke mate de productie van synthetische brandstoffen en biobrandstoffen in Nederland zal plaatsvinden. Voor met name de internationale scheepvaart zijn er alternatieve locaties voor bunkering en brandstofproductie, waardoor dit zich niet vanzelfsprekend in Nederland concentreert. Productielocaties zullen bepaalde comparatieve voordelen moeten kennen, zoals een locatie dicht bij de ruwe biomassa. Deze zijn niet automatisch hetzelfde als bij de ruwe olie raffinage. Met gerichte middelen en prikkels vanuit de Rijksoverheid en de EU kan de industrie duurzame productielocaties opzetten. Deze onzekerheid bemoeilijkt investeringsbeslissingen en strategische keuzes van de industrie over de rol van Nederland in internationale brandstofketens.

### Kernenergie

- *Onzekerheid over beschikbaarheid kernenergie vóór 2040*
  De doorlooptijden voor ontwikkeling en bouw van kerncentrales zijn lang, mede vanwege strikte veiligheidseisen, complexe regelgeving en vergunningprocedures. Dit levert risico's op vertragingen op in ontwerp en bouwprocessen. Daarnaast is de beschikbaarheid van transportcapaciteit onzeker. Deze combinatie van onzekerheden maakt het lastig om deze bron binnen de gestelde termijn te realiseren.

### Wind op zee, wind op land en zon

- *Prijsimpasse in businesscase windparken en betaalbare afname door bedrijven*
  De businesscase voor nieuwe windparken vereist een opbrengstprijs die voldoende zekerheid biedt voor investeerders, terwijl bedrijven die windstroom afnemen juist behoefte hebben aan concurrerende en voorspelbare elektriciteitsprijzen om te kunnen verduurzamen. Dit spanningsveld bemoeilijkt het tot stand komen van langjarige afnamecontracten en vertraagt zowel investeringsbeslissingen in nieuwe wind opwek als verduurzamingsstappen aan de vraagzijde. Hierdoor kan de uitbreiding van duurzame elektriciteitsproductie achterblijven, terwijl tegelijkertijd de ontwikkeling van duurzame vraag wordt afgeremd.

- *Structureel lage elektriciteitsprijzen ondermijnen investeringsprikkels*
  De verdere uitbreiding van wind en zonne-energie leidt tot een toenemend aantal uren met lage of zelfs negatieve elektriciteitsprijzen. Hierdoor nemen de inkomsten van alle vormen van elektriciteitsproductie af, niet alleen van wind en zon, maar ook van kernenergie en regelbaar vermogen. Dit zet de businesscase van zowel bestaande als nieuwe productiecapaciteit onder druk en vergroot de afhankelijkheid van aanvullende beleidsinstrumenten. Voor wind op zee wordt de SDE++ opnieuw ingezet. Voor piekvermogen, zoals gas en waterstofcentrales komt er waarschijnlijk een capaciteitsmechanisme. Deze ontwikkeling bemoeilijkt marktgedreven investeringen en maakt de verdere uitbouw van een robuust en gebalanceerd elektriciteitssysteem complexer.

- *Gelijktijdig gebruik van dezelfde locatie voor kernenergie en aanlanding wind op zee.*
  Kernenergiecentrales hebben koelwater in de nabijheid nodig. Aanlanding wind op zee is ook bij voorkeur aan kustlocaties, ook al denkt men ook na over aanlanding verder het binnenland in. Beide opgaven vragen om schaarse fysieke ruimte aan de kust voor locatiekeuze van de kerncentrale of het overslagstation en van de energie-infrastructuur voor de verbindingen met het achterland. Dit vergroot de complexiteit van de ruimtelijke inpassing en vereist zorgvuldige afwegingen, zodat besluitvorming over nieuwe kerncentrales niet ten koste gaat van de tijdige realisatie van aanlandingspunten voor wind op zee, en omgekeerd.

### Warmte en gebouwde omgeving

- *Laag verduurzamingstempo in de gebouwde omgeving.*
  De uitrol van warmtenetten verloopt trager dan nodig, waardoor het volledig uitfaseren van aardgas in 2040 onwaarschijnlijk lijkt. In de gebouwde omgeving blijft energiebesparing cruciaal, omdat het niet alleen de warmtevraag verlaagt maar in veel woningen ook leidt tot meer comfort, lagere lasten en gezondheidswinst. Tegelijkertijd staat energiebesparing op gespannen voet met de businesscase van warmtenetten: een lagere warmtevraag maakt het moeilijker om investeringen terug te verdienen. De kosten van warmtenetten zijn bovendien relatief hoog, wat deze optie minder aantrekkelijk maakt en het risico op lock-ins vergroot. Dit vertraagt de besluitvorming.

- *Onzekerheid over beschikbaarheid van industriële restwarmte voor warmtenetten*
  Efficiëntere industriële processen en verdere verduurzaming leiden tot een afname van de hoeveelheid beschikbare restwarmte. Dit creëert onzekerheid over de toekomstige omvang en betrouwbaarheid van warmte-uitkoppeling naar warmtenetten. In de afwezigheid van toereikend beleid en duidelijke prikkels om restwarmte structureel te leveren aan collectieve warmtesystemen, benut de industrie deze warmte bij voorkeur intern, bijvoorbeeld voor eigen processen. Daarnaast hebben veranderingen in de schaal en samenstelling van de industrie directe invloed op de hoeveelheid restwarmte die beschikbaar komt. Hierdoor wordt het lastiger om warmtenetten robuust en toekomstbestendig te dimensioneren en vormt restwarmte een minder zekere pijler onder de verduurzaming van de warmtevoorziening.

## 3.3 Knelpunten gekoppeld aan netinfrastructuur

Deze paragraaf beschrijft knelpunten die gerelateerd zijn aan de netinfrastructuur. Zoals eerder benoemd zijn sommige van deze knelpunten gevolgen of specifieke manifestaties van de overkoepelende knelpunten beschreven in Paragraaf 3.1.

### Elektriciteit

- *Mogelijk onrealistische veronderstelling dat netcongestie in 2040 is opgelost.*
  De scenario's veronderstellen dat netcongestie in 2040 is opgelost. Dat lijkt mogelijk te optimistisch. Veel randvoorwaarden om dit te bereiken (zoals tijdige uitbreiding van infrastructuur, voldoende personeel en materialen, efficiënte vergunningprocedures en samenhangende ruimtelijke keuzes) zijn nog niet op orde. Het is onzeker of deze randvoorwaarden snel genoeg wel op orde zijn. Voor de investeringsplannen gaan de netbeheerders uit van het Koersvaste Middenweg scenario. Ten opzichte van dat scenario is nog een aanzienlijke opgave te realiseren en kan in 2040 nog niet in alle transportbehoeften worden voorzien.

- *Structurele achterstand realisatie van elektriciteitsinfrastructuur*
  De groei van transportaanvragen voor elektriciteit verloopt sneller dan de realisatie van de uitbreidingen van de infrastructuur. Als gevolg van de huidige transport schaarste worden verduurzamingsbeslissingen uitgesteld of afgesteld. Hierdoor ontstaat een 'boeggolf' aan transportaanvragen die richting 2040 nog niet kan worden gehonoreerd. Ook wanneer netcongestie richting 2040 substantieel wordt verminderd, blijft de instroom van nieuwe investeringen, projecten en aansluitverzoeken groot. Deze opeenstapeling leidt tot aanhoudende capaciteitsdruk en grote planningsuitdagingen voor netbeheerders en overheden, waardoor het risico bestaat dat de ontwikkeling van duurzame vraag en aanbod structureel achterblijft bij de ambities voor het energiesysteem.

- *Ruimtelijke beperkingen voor uitbreiding elektriciteitsinfrastructuur*
  Elektriciteitsinfrastructuur moet worden ingepast in gebieden waar al veel andere ruimtelijke functies samenkomen, zoals natuur, woningbouw, industrie en mobiliteit. Deze stapeling van ruimteclaims bemoeilijkt de afwegingen in de planvorming, vertraagt besluitvorming en vertraagt ook de uiteindelijke realisatie van elektriciteitsinfrastructuurprojecten.

### Waterstof

- *Kip-ei-probleem tussen $CO_2$-vrije waterstofproductie en infrastructuurontwikkeling*
  De ontwikkeling van waterstofinfrastructuur, zoals pijpleidingen en opslag, is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van voldoende productie van $CO_2$-vrije waterstof (groene en blauwe waterstof). Tegelijkertijd blijven investeringen in waterstofproductie achter wanneer de businesscase onvoldoende aantrekkelijk is of wanneer afzetzekerheid ontbreekt. Hierdoor ontstaat een kip-ei-probleem: zonder voldoende productie ontbreekt de basis voor tijdige aanleg van infrastructuur, terwijl het ontbreken van infrastructuur investeringen in productie juist afremt. Dit kan ertoe leiden dat de ontwikkeling van de waterstofketen noodgedwongen wordt getemporiseerd, wat de rol van waterstof in het toekomstige energiesysteem onder druk zet.

  Voor het verbinden van de industrieclusters zijn nieuwe waterstofverbindingen nodig. Die infrastructuur is door de netbeheerder ingepland, maar de investeringsbeslissing is nog

niet genomen. Door onzekerheden die bestaan in de nog opstartende waterstofketen, zal de gefaseerde ontwikkeling van het waterstofnetwerk flexibel en adaptief moeten zijn.

**$CO_2$**

- *Onzekerheid over vraag naar $CO_2$-transport.*
  De pijpleidinginfrastructuur is primair ingericht op het transport van $CO_2$ vanuit grote industrieclusters, waaronder die in het Ruhrgebied en rond Antwerpen, naar Rotterdam. Vanuit Rotterdam wordt de $CO_2$ vervolgens getransporteerd naar lege gasvelden onder de Noordzee voor opslag, onder meer via de projecten Porthos en Aramis. De uiteindelijke vraag naar $CO_2$-transport is afhankelijk van de mate waarin investeringen in $CO_2$-afvang bij industriële installaties aantrekkelijk zijn en van de bereidheid om langjarige contracten af te sluiten voor $CO_2$-opslag bij deze opslagprojecten. In het geval deze $CO_2$ opslagcapaciteit is gerealiseerd hoeft deze nog niet door Nederlandse $CO_2$-emissies te worden ingevuld; het kan ook voorzien in de Belgische of Duitse $CO_2$ opslagbehoefte.

- *Beperkte aansluiting van $CO_2$-afvanginstallaties op pijpleidinginfrastructuur*
  Niet alle installaties waar afvang van $CO_2$ technisch en economisch mogelijk is, zijn gelegen in de nabijheid van de geplande $CO_2$-pijpleidinginfrastructuur. Dit geldt bijvoorbeeld voor afvalverbrandingsinstallaties en andere verspreid liggende puntbronnen. Voor deze installaties is aansluiting op een pijpleidingnet vaak complex of kostbaar, waardoor de toepassing van $CO_2$-afvang wordt bemoeilijkt. Een alternatief is het transport van afgevangen $CO_2$ per binnenvaartschip, truck of spoor. Deze oplossingen bieden meer flexibiliteit in locatiekeuze, maar brengt ook aanvullende kosten, logistieke complexiteit en afhankelijkheid van overslag- en opslagcapaciteit met zich mee. De noodzaak om meerdere transportmodaliteiten te combineren vergroot de complexiteit van de $CO_2$-keten en kan investeringsbeslissingen vertragen, waardoor de opschaling van $CO_2$-afvang en -opslag onder druk komt te staan.

## 3.4 Knelpunten gekoppeld aan de Elektriciteitsketen

Deze paragraaf beschrijft knelpunten die gerelateerd zijn aan elektriciteitsketen. Zoals eerder benoemd zijn sommige van deze knelpunten gevolgen of specifieke manifestaties van de overkoepelende knelpunten beschreven in paragraaf 3.1.

- *Nationale balans lijkt uitvoerbaar, maar regionale balans knelt en heeft maatwerk nodig.*
  Op nationaal niveau zijn in de scenario's vraag en aanbod van energie in balans. Op regionaal en lokaal niveau ontstaan grote verschillen in timing, schaal en beschikbaarheid van infrastructuur. In sommige regio's stapelt de vraag naar elektriciteit, waterstof en $CO_2$-infrastructuur zich sneller op dan de beschikbare capaciteit, terwijl andere regio's juist te maken hebben met onderbenutting. Door het ontbreken van voldoende flexibiliteit en maatwerk in de regionale planning ontstaat het risico dat nationale doelen haalbaar lijken, terwijl de regionale uitvoerbaarheid knelt en de realisatie van het energiesysteem als geheel vertraagt.

- *Vertraging in netaansluitingen dwingt eindgebruikers tot suboptimale keuzes.*
  Door vertragingen in netaansluitingen worden bedrijven, organisaties en overheden steeds vaker gedwongen om decentrale oplossingen te ontwikkelen. Hierdoor zetten partijen in op andere oplossingen, zoals waterstof, batterijsystemen, of lokale aggregaten. Deze keuzes zijn vaak niet kosteneffectief en sluiten niet altijd aan op de meest optimale

energiesysteemkeuzes. Decentrale oplossingen komen dus in de energiescenario's nauwelijks terug.

- *Grote afhankelijkheid van tijdige beschikbaarheid van elektriciteitsinfrastructuur.*
  Elektrificatie van diverse sectoren betekent een grotere vraag naar transportcapaciteit van verschillende elektriciteitsdragers. De bestaande elektriciteitsinfrastructuur heeft onvoldoende capaciteit om aan de groeiende vraag als gevolg van elektrificatie te voldoen.

- *Stijging elektriciteitsvraag door datacenters (o.a. door groei AI)*
  De elektriciteitsvraag van datacenters neemt toe, mede gedreven door de groei van AI-toepassingen. Deze ontwikkeling beïnvloedt niet alleen het toekomstige elektriciteitsverbruik, maar vergroot ook de druk op schaarse fysieke ruimte, arbeidscapaciteit en benodigde materialen. Hoewel zowel de exacte vraagontwikkeling als de systeemimpact nog onzeker zijn, is het belangrijk om het mee te nemen in energie- en infrastructuurplanning, en de groei van datacentra te volgen.

- *Onvoldoende regelbaar vermogen.*
  Er bestaan zorgen over de beschikbaarheid van voldoende regelbaar vermogen in de toekomst, vooral tijdens perioden met weinig zon en wind. Doordat het aantal uren waarin dit vermogen nodig is afneemt naarmate duurzame opwek toeneemt, verslechtert de businesscase voor deze centrales. Het nieuwe kabinet wil daarom een capaciteitsmarkt invoeren, zodat regelbaar vermogen ook een vergoeding ontvangt wanneer het geen elektriciteit produceert. Hiermee kan bovendien het benodigde reservevermogen in uitzonderlijke situaties beschikbaar blijven.

- *Doel van ETS is versnelling van de emissiereductie richting 2040, maar investeringen van bedrijven komen mogelijk te laat.*
  Via het instrument 'emission Trade System' (ETS) wordt een versnelde emissiereductie richting 2040 verondersteld, maar veel bedrijven stellen investeringsbeslissingen uit door een stapeling van knelpunten, zoals de lange wachttijd voor netaansluitingen. Terwijl van hen wordt verwacht dat zij hun reductie-inspanningen versnellen, blijven de condities om tijdig te investeren achter. Hierdoor ontstaat het risico dat de noodzakelijke investeringen pas laat op gang komen en de beoogde versnelling binnen het ETS niet wordt gehaald.

- *Beperkte beschikbaarheid en rijpheid van elektrificatietechnologieën*
  Niet alle technologieën die nodig zijn voor vergaande elektrificatie zijn op dit moment beschikbaar of voldoende uitontwikkeld. Met name voor industriële processen die hoge temperaturen vereisen, bevinden elektrificatietechnologieën zich nog in de ontwikkel- of demonstratiefase. Het is onzeker of deze technologieën tijdig technisch betrouwbaar, schaalbaar en kosteneffectief beschikbaar komen om grootschalige toepassing mogelijk te maken. Deze onzekerheid beperkt het handelingsperspectief voor bedrijven die hun processen willen verduurzamen en kan ertoe leiden dat investeringsbeslissingen worden uitgesteld of dat wordt teruggevallen op alternatieve routes, zoals het gebruik van moleculaire energiedragers of tijdelijke oplossingen. Hierdoor komt het tempo van elektrificatie onder druk te staan en blijft de ontwikkeling van een volledig $CO_2$-vrij energiesysteem afhankelijk van technologische doorbraken waarvan timing en haalbaarheid onzeker zijn.

## 3.5 Moleculen

Deze paragraaf beschrijft knelpunten die gerelateerd zijn aan moleculen. Zoals eerder benoemd zijn sommige van deze knelpunten gevolgen of specifieke manifestaties van de overkoepelende knelpunten beschreven in Paragraaf 3.1.

### Waterstof

- *Onzekere waterstofvraag en onduidelijke balans tussen groene en blauwe productie.*
  De toekomstige vraag naar waterstof is onzeker en sterk afhankelijk van de ontwikkeling van de energie-intensieve industrie. Wanneer deze industrie krimpt of in toenemende mate halffabricaten importeert, neemt de binnenlandse waterstofvraag aanzienlijk af. In een scenario met een concurrerende en in Nederland gevestigde industrie kan de waterstofbehoefte juist sterk toenemen. Deze grote bandbreedte maakt het voor betrokken partijen moeilijk om richting te bepalen en tijdig investeringsbeslissingen te nemen, wat het risico op lock-ins vergroot. De onzekerheid werkt direct door in de planning van waterstofinfrastructuur. Met name het bepalen van de benodigde pijpleidingcapaciteit is complex: overdimensionering leidt tot hogere transporttarieven en daarmee duurdere waterstof, terwijl onderdimensionering toekomstige opschaling kan belemmeren. Daarnaast is de balans tussen groene en blauwe waterstof onzeker. De opschaling van groene waterstof wordt geremd door hoge elektrolysekosten en beperkte beschikbaarheid van betaalbare elektriciteit, terwijl blauwe waterstof afhankelijk blijft van de tijdige realisatie van CCS-infrastructuur. Hierdoor kan de uiteindelijke verhouding tussen beide productieroutes sterk variëren, wat de samenhangende ontwikkeling van de waterstofketen onder druk zet.

- *Onzekerheid van cruciale investeringsbeslissing in CCS-infrastructuur.*
  De productie van blauwe waterstof is sterk afhankelijk van de tijdige realisatie van CCS-infrastructuur. Cruciaal is een investeringsbeslissing daarvoor die nog steeds niet is genomen. Opschaling is alleen mogelijk wanneer $CO_2$ kan worden afgevangen, getransporteerd en opgeslagen. Als opslag- en transportcapaciteit niet op tijd beschikbaar komt, kan het benodigde volume voor afvang en opslag niet worden bereikt, met directe gevolgen voor industrieën die willen verduurzamen via waterstof. Dit maakt het lastiger voor bedrijven om investeringsbeslissingen te nemen. De tijdige beschikbaarheid van CCS is bovendien onzeker door lange vergunningstrajecten, complexe bouwprojecten en noodzakelijke internationale afstemming over het gebruik van opslag- en transportcapaciteit voor $CO_2$.

- *Ketenafhankelijkheid van CCS bij blauwe waterstof*
  Voor de productie van blauwe waterstof is de opschaling van de CCS-keten randvoorwaardelijk. Het opslagveld en de $CO_2$-afvang installatie en infrastructuur moeten rond dezelfde tijd ontwikkeld zijn.
  Het is onzeker wat er gebeurt wanneer er op enig moment geen nieuwe $CO_2$-opslagcapaciteit beschikbaar is. Dit kan het geval zijn als de ondergrondse potentieel beschikbare ruimte niet gebruikt kan worden vanwege bovengrondse belemmeringen, of maatschappelijke weerstand. Bedrijven die de komende jaren investeren in blauwe waterstof in combinatie met CCS lopen dan het risico dat hun keuze niet toekomstbestendig is. Een investeringsprikkel voor blauwe waterstof kan leiden tot een lock-in op de inzet van fossiel met $CO_2$-uitstoot, zodra er geen $CO_2$-opslagcapaciteit voorhanden is.

- *Onzeker investeringsklimaat voor elektrolyse door variabele vraag- en prijsverwachtingen.* De kosten van elektrolyse zijn hoog, onder andere door de kosten van elektriciteit, wat de concurrentiepositie van groene waterstof verzwakt ten opzichte van blauwe waterstof. Daarnaast is elektrolyse afhankelijk van voldoende beschikbare elektriciteit. Ook speelt het kip-ei-probleem: producenten investeren pas wanneer afname is gegarandeerd, terwijl afnemers pas overstappen zodra productie en infrastructuur zeker zijn. Dit versterkt het onzekere investeringsklimaat voor elektrolyse en zorgt ervoor dat partijen hun investeringsbeslissingen uitstellen.

- *Lange ontwikkeltijden en beperkte beschikbaarheid van grootschalige waterstofopslag.* Waterstofopslag is essentieel voor groene waterstof om variaties in productie en vraag en om vraag in gascentrales op te vangen, maar het is onzeker of er tijdig voldoende grootschalige capaciteit beschikbaar komt. Het realiseren van opslag in zoutcavernes vergt meer dan tien jaar. Voor de eerste vier opslaglocaties staat gepland dat deze rond 2035 gereed zijn. Het is onzeker of er opslaglocaties gereed zullen zijn nadat deze vier locaties vol zijn. Daarnaast hangt de ontwikkeling van opslag samen met voortgang in andere onderdelen van de keten, zoals productie en transport, waardoor vertraging elders direct doorwerkt. Hierdoor vormt grootschalige waterstofopslag een kwetsbare schakel die de betrouwbaarheid en opschaalbaarheid van het waterstofsysteem beperkt.

- *Heterogene vraagpatronen maken integrale infrastructuurplanning lastig.* De vraag naar energie en energiedragers verschilt sterk tussen sectoren en industrieclusters. Clusters hebben een uiteenlopende opbouw, verschillende processen en daardoor ook sterk verschillende profielen in termen van elektriciteitsvraag, waterstofbehoefte, warmtegebruik en flexibiliteit. Deze heterogeniteit maakt het lastig om infrastructuur integraal en efficiënt te plannen, omdat één uniforme oplossing niet aansluit bij alle clusters en sectoren. Daarnaast ontwikkelen vraagpatronen zich niet gelijktijdig: sommige clusters hebben op korte termijn behoefte aan grootschalige infrastructuur, terwijl andere pas later volgen of juist een meer gefaseerde ontwikkeling kennen. Dit vergroot de onzekerheid over timing, schaal en locatie van investeringen in netten en pijpleidingen. Het risico ontstaat dat infrastructuur óf te vroeg en onderbenut wordt aangelegd, óf te laat beschikbaar komt en daarmee verduurzaming bij specifieke clusters belemmert. Deze spanning bemoeilijkt samenhangende systeemkeuzes en verhoogt de complexiteit van een robuuste en toekomstbestendige infrastructuurontwikkeling,

- *Onzekerheid over importafhankelijkheid van halffabricaten (moleculaire feedstocks)* Zonder inzicht in toekomstige importprijzen van halffabricaten blijft de haalbaarheid van binnenlandse investeringen onzeker, zowel voor chemische moleculen als voor waterstofgerelateerde producten. Wanneer bedrijven niet kunnen inschatten hoe geïmporteerde moleculaire feedstocks zich prijsmatig ontwikkelen, wordt het moeilijk om de concurrentiepositie en de haalbaarheid van investeringen te beoordelen.

- *Onzekerheid over innovatiesnelheid* Voor verschillende molecuulketens – zoals waterstof, biobrandstoffen en CCS – is de snelheid van innovatie onzeker, wat de ontwikkeling van het energiesysteem beïnvloedt. Hoe snel technologieën verbeteren en opschalen bepaalt immers welke brandstoffen in welke hoeveelheid nodig zijn. Door deze onzekerheden in markt- en technologieontwikkeling wordt het lastiger om het juiste moment en tempo van investeringen te bepalen.

## $CO_2$

- *Onzekere maar cruciale investeringsbeslissingen in CCS-projecten*
  De ontwikkeling van CCS-ketens is sterk afhankelijk van een beperkt aantal grootschalige projecten, zoals het Aramis-project. Realisatie is op dit moment onzeker, omdat nog geen definitieve investeringsbeslissing genomen is. Bovendien lopen er juridische procedures tegen de benodigde vergunningen. Deze combinatie van financiële, organisatorische en juridische onzekerheden vergroot het risico dat de noodzakelijke infrastructuur voor $CO_2$-transport en -opslag niet tijdig beschikbaar komt, waardoor bredere CCS-toepassingen in de industrie vertraging oplopen.

- *Ketenafhankelijkheid binnen de $CO_2$-infrastructuur*
  Vertraging in één schakel van de $CO_2$-keten werkt direct door naar de rest van het systeem. Opslagprojecten wachten op afnemers die bereid zijn volumes te contracteren, terwijl emittenten hun investeringsbeslissingen uitstellen totdat duidelijk is dat transport en opslaginfrastructuur daadwerkelijk gerealiseerd wordt. De onzekerheid rond Aramis versterkt dit, omdat betrokken partijen wachten met investeren totdat er meer zekerheid is over doorgang. Tegelijkertijd komt Aramis pas opgang wanneer er voldoende committerende emittenten zijn. Hier is dus sprake van kip-ei problematiek.

- *Internationale afhankelijkheid en concurrentie $CO_2$-keten*
  Internationale afstemming is nodig over welke niet EU-landen toegang krijgen tot EU-opslagcapaciteit, wat extra vertraging kan veroorzaken. Binnen de EU is er een interne open markt waarbij toegang tot $CO_2$ capaciteit niet geweigerd mag worden. Dit creëert onzekerheid over hoeveel opslagcapaciteit er in de Nederlandse ondergronds is voor Nederlandse bedrijven. Tegelijkertijd biedt deze open markt ook een kans en kunnen Nederlandse bedrijven afspraken maken met andere landen. De $CO_2$-keten stopt niet bij de Nederlandse grenzen, dit verhoogt de complexiteit van de coördinatie. $CO_2$-transport moet per (binnenvaart)schip van en naar het buitenland, waarin Rotterdam het knooppunt wordt.

- *Lock-ins door tijdelijkheid van CCS*
  CCS wordt gezien als een tijdelijke oplossing, waarbij het onderliggende probleem vooral wordt vooruitgeschoven. Door CCS blijft er een afhankelijkheid van fossiele bronnen, terwijl er omgeschakeld moet worden naar hernieuwbare bronnen.

- *Onzekere cruciale investeringsbeslissingen*
  De markt voor $CO_2$-opslag komt onvoldoende op gang doordat er weinig vraagcontracten worden afgesloten en boekingen nog nauwelijks van de grond komen. Het ontbreken van een uitgewerkt beleidskader voor $CO_2$-opslag maakt bovendien dat businesscases onzeker en financieel onaantrekkelijk blijven. Hierdoor blijft de marktontwikkeling achter en worden noodzakelijke investeringen in $CO_2$-transport en -opslag uitgesteld.

- *Onduidelijke governance van moleculenketens.*
  In de ontwikkeling van moleculenketens ontstaat beleids- en coördinatieonzekerheid doordat verantwoordelijkheden en eigenaarschap onvoldoende helder zijn belegd. Keuzes moeten niet alleen economisch, maar ook maatschappelijk en politiek worden gewogen. Tegelijkertijd ontbreekt structurele samenwerking tussen sectoren die juist nauw met elkaar verbonden zouden moeten zijn. Partijen stellen investeringen uit, omdat onduidelijk is welke beleidskeuzes richting 2040 daadwerkelijk worden doorgezet.

### Biomassa

- *Schaarste en sterke concurrentie om biomassa tussen energie, biobased bouw, industrie en andere sectoren.*
  Biomassa wordt in de scenario's door meerdere sectoren tegelijk gevraagd: voor energie-toepassingen zoals bio-energie en biobrandstoffen, voor productie van chemicaliën en plastics, voor biobased bouwmaterialen en voor negatieve emissies. Omdat al deze toepassingen aanspraak maken op dezelfde beperkte hoeveelheid biomassa, ontstaat onderlinge concurrentie. Dit zet druk op het systeem en maakt het lastiger om goed onderbouwde keuzes te maken over waar biomassa het meest effectief kan worden ingezet.

- *Onzekerheid over importstromen biomassa*
  Er is in de toekomst een onzekere importvraag, omdat niet duidelijk is hoeveel biomassa in Nederland geproduceerd kan worden, hoeveel geïmporteerd moet worden en of de internationale markt voldoende volumes biedt.

# 4 Synthese

## 4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk brengt de bevindingen van dit rapport samen met als doel het bepalen van doelen en mogelijke interventies om in 2040 een energiesysteem te kunnen realiseren waarmee het Europese emissiereductiedoel wordt gehaald richting 2040 onder een EU-doelstelling van netto 90% emissiereductie. Het hoofdstuk beschrijft niet hoe het energiesysteem van 2040 eruit komt te zien, maar kan gebruikt worden om sturing te geven bij het vormgeven van het systeem.

De synthese combineert de energiedoelen (hoofdstuk 2) met de kwalitatieve knelpuntenanalyse (hoofdstuk 3). Dit hoofdstuk biedt inzicht in welke systeemrisico's en afhankelijkheden naar voren komen bij verschillende energiedoelen en bijbehorende knelpunten, en welke handelingsperspectieven genoemd zijn als randvoorwaarden voor de uitvoerbaarheid richting 2040. Het bevat geen kwantificering van de knelpunten, enkel een kwalitatieve ordening. De knelpunten en energiedoelen zijn niet rangordelijk weergegeven en de handelingsperspectieven zijn een samenvatting van de sessie-input, het is geen beleidsadvies.

## 4.2 Energiedoelen en knelpunten

In Hoofdstuk 3 zijn knelpunten beschreven die zowel systeembreed als per onderdeel/keten optreden. Voor de synthese is het behulpzaam deze knelpunten te ordenen in een beperkt aantal typen knelpunten (K-typen), zodat vergelijkbare mechanismen over ketens heen herkenbaar worden en consistent kunnen worden gekoppeld aan energiedoelen.

Het gaat om de volgende type knelpunten:

1. **Onzeker investeringsklimaat en uitstel van besluitvorming**
   Onzekerheid over prijzen, beleid en randvoorwaarden leidt tot uitstel of afstel van investeringen in opwek, infrastructuur en verduurzaming bij eindgebruikers. Zo vertraagd de elektrificatie van de industrie door uitstel door netcongestie en businesscase.

2. **Ketenafhankelijkheid en kip-ei-problemen**
   Investeringen komen niet los omdat productie, infrastructuur, opslag en vraag elkaar wederzijds voorwaardelijk maken. Zo zijn voor groene/koolstofarme waterstof productie, transport/opslag en afname afhankelijk van elkaar. Dit geldt ook voor $CO_2$-afvang, -transport en -opslag.

3. **Onzekerheid over volumes en timing van vraag**
   Onzekerheid over toekomstige vraag (hoeveel, waar, wanneer) maakt dimensionering en timing van investeringen risicovol. Zo is het onzeker hoeveel regelbaar vermogen er nodig is voor de flexibele opwek.

4. **Tijd als beperkende factor: Infrastructuurtempo en maakbaarheid in de tijd**
   Doorlooptijden (vergunningen, bouw, personeel) maken dat noodzakelijke infrastructuur en projecten niet tijdig beschikbaar komen richting 2040. Zo heeft CCS te maken met lange projectcycli en onzekere vergunningsprocedures.

5. **Ruimte als harde grensvoorwaarde: Ruimtelijke schaarste en padafhankelijkheid**
   Schaarse ruimte en vroege locatiekeuzes creëren ruimtelijke lock-ins en competitie tussen functies (opwek, infra, industrie, natuur en wonen). Zo concurreren aanlanding van wind op zee en kernenergie om locaties.

6. **Marktwerking en prijsdynamiek onder druk**
   Toenemende uren met lage/negatieve prijzen en beperkte prijsprikkels ondermijnen businesscases voor zowel variabele als stuurbare productie en flexibiliteit. De businesscase van regelbaar vermogen wordt uitdagender door de toenemende hoeveelheid hernieuwbare energie.

7. **Onvoldoende flexibiliteit en systeembalans**
   Zonder voldoende flexibiliteit (vraagrespons, opslag, regelbaar vermogen, interconnectie) wordt leveringszekerheid en systeemstabiliteit kwetsbaar bij hoge variabele opwek. Het benodigd aandeel regelbaar vermogen wordt bepaald door perioden met “Dunkelflaute”.

8. **Technologische onzekerheid en innovatietempo**
   Onzekerheid over rijpheid, schaalbaarheid en kostenreductie van sleuteltechnologieën remt investeringsbeslissingen en routekeuzes. Dit komt bijvoorbeeld voor in de koolstofketenontwikkeling (biomassaconversie en $CO_2$-afvang).

9. **Lock-ins door tijdelijke of suboptimale oplossingen**
   Tijdelijke oplossingen kunnen investering en infrastructuur vastzetten in routes die later moeilijk af te bouwen zijn, waardoor transitieopties versmallen. Zoals lokale autonome oplossingen, bijvoorbeeld batterijen.

10. **Afhankelijkheid van import en geopolitieke kwetsbaarheid**
    Importafhankelijkheid van energiedragers/grondstoffen vergroot blootstelling aan prijsvolatiliteit en internationale verstoringen, wat weerbaarheid onder druk zet.

11. **Biomassa: meervoudige inzet en allocatievraagstuk**
    Biomassa is schaars en inzetbaar in meerdere sectoren; zonder allocatiekeuzes ontstaat concurrentie en risico op inefficiënt gebruik. Dit kan voorkomen bij duurzame brandstoffen voor luchtvaart versus chemie.

12. **Governance, coördinatie en verantwoordelijkheden**
    Onduidelijk eigenaarschap en onvoldoende ketenregie leiden tot suboptimale volgordes, afwachtgedrag en vertraagde besluitvorming over systeemkeuzes. Zo is er onduidelijkheid over wie de waterstof keten regisseert.

13. **Onzekerheid over beschikbaarheid bron**
    Beschikbaarheid van sleutelbronnen (restwarmte, biomassa, CCS-opslag, kernenergie voor 2040) is onzeker en beïnvloedt robuustheid van routes. Zo is er minder restwarmte beschikbaar door efficiëntie/verduurzaming.

14. **Laag en vertraagd verduurzamingstempo sectoren**
    Het huidige realisatietempo van projecten en sectorale transities ligt lager dan nodig, waardoor fossiel langer blijft en 2040-doelen onder druk komen te staan. Zo blijft elektrificatie en de ontwikkeling van hernieuwbare opwek achter op schema.

15. **Onzekerheid over omvang compensatie voor LULUCF-restemissie**
    In Nederland is LULUCF naar verwachting een restemissie; onzeker is vooral de omvang en dus de benodigde compensatie/negatieve emissies elders. Dit heeft impact op de hoogte van CCS-capaciteit en $CO_2$-transport die dienen als negatieve emissie compensatie.

K-typen zijn mechanismen die in meerdere ketens terugkomen; de koppeling in Tabel 4.1 is kwalitatief en niet bedoeld als kwantitatieve weging of causaliteit. De tabel hieronder geeft enkel inzichtelijk welke K-typen voorkomen in de energiedoelen.

**Tabel 4.1**: Kwalitatieve koppeling tussen energiedoelen en bijbehorende knelpunt-typen (K1-K15)

| Energiedoel | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | K9 | K10 | K11 | K12 | K13 | K14 | K15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Schone energie | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | |
| Hernieuwbare energie | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | |
| Koolstofarme energie | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Finaal energieverbruik / energiebespa-ring | ● | | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | | | ● | | ● | |
| Primair energieverbruik | ● | | ● | ● | | ● | ● | ● | | | | ● | | ● | |
| Elektrificatie breed | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | | ● | |
| Elektrificatie industrie | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | | ● | |
| Sectordoelen industrie | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | | ● | |
| Verduurzaming warmtevraag | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | |
| Interconnectiecapaciteit | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | | | ● | | ● | | | |
| Flexibiliteit | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | | ● | | ● | | | |
| Aandeel regelbaar vermogen | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | | | |
| CCS-capaciteit en $CO_2$-transport | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Groene of koolstofarme waterstof | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | |
| Groen gas | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | |

## 4.3 Beleidsopties

Op basis van de sessies met stakeholders en experts is een lijst met oplossingsrichtingen en beleidsopties opgesteld. Om deze beter te kunnen koppelen aan energiedoelen en knelpunttypen, zijn deze maatregelen geordend naar **typen beleidsopties**. Dit is geen beleidsadvies, maar een ordening die helpt om consistent te duiden welke oplossingsrichtingen en beleidsopties in beeld komen bij verschillende doelen.

*Vergroten van investeringszekerheid en risicodeling*
Dit type beleidsmaatregelen richt zich op het verkleinen van onzekerheden die investeringsbeslissingen vertragen of blokkeren. Door het bieden van prijs- en afnamezekerheid, garanties of risicodeling kan beleid investeringen in kapitaalintensieve

onderdelen van het energiesysteem faciliteren. Tegelijkertijd blijven deze maatregelen afhankelijk van marktontwikkeling en timing, en kunnen zij structurele onzekerheden over volumes en systeemkeuzes niet volledig wegnemen.

*Ketenregie en coördinatie over meerdere schakels*
Ketenregie richt zich op het doorbreken van wederzijdse afhankelijkheden tussen productie, infrastructuur, opslag en vraag. Dit type beleid beoogt samenhang aan te brengen waar afzonderlijke partijen individueel niet tot investeringen komen. De effectiviteit van ketenregie hangt sterk af van duidelijke rolverdeling en bestuurlijke coördinatie, en vraagt om expliciete keuzes over prioriteiten binnen en tussen ketens.

*Versnellen van infrastructuur en besluitvorming*
Deze beleidsmaatregelen zijn gericht op het verkorten van doorlooptijden en het vergroten van de maakbaarheid in de tijd. Door prioritering, versnellingsinstrumenten en aangepaste procedures kan de realisatie van energie-infrastructuur worden versneld. Tegelijkertijd blijven fysieke, juridische en personele beperkingen bepalend voor het tempo waarin deze versnelling daadwerkelijk kan worden gerealiseerd.

*Ruimtelijke sturing en strategische reservering*
Ruimtelijke sturing richt zich op het expliciet afwegen en reserveren van schaarse fysieke ruimte voor de energietransitie. Door strategische keuzes te maken over locatie, fasering en tijdelijk versus structureel ruimtegebruik kan beleid ruimtelijke conflicten beter beheersen. Dit type maatregelen vergt echter langdurige consistentie en kan ruimtelijke padafhankelijkheden niet volledig voorkomen.

*Marktontwerp en prijsprikkels aanpassen aan systeembehoefte*
Dit type beleidsmaatregelen beoogt marktmechanismen beter te laten aansluiten bij de systeemwaarde van flexibiliteit, regelbaar vermogen en betrouwbare levering. Door aanpassing van marktregels en prijsprikkels kan onder- of overinvestering worden beperkt. Tegelijkertijd zijn deze ingrepen complex en gevoelig voor timing, en kunnen zij nieuwe afhankelijkheden en lock-in risico’s introduceren.

*Europese afstemming en level playing field*
Europese afstemming richt zich op het verkleinen van verschillen in randvoorwaarden tussen lidstaten, zoals energieprijzen, steunregimes en infrastructuurplanning. Dit type beleid is cruciaal voor het behoud van investeringsbereidheid en concurrentiepositie, maar ligt slechts deels binnen nationale beïnvloedingssfeer. Nationale beleidsruimte blijft daardoor afhankelijk van Europese besluitvorming en tempo.

*Omgaan met onzekerheid en bandbreedtes (adaptief beleid)*
Adaptief beleid erkent onzekerheid als structureel kenmerk van de energietransitie en richt zich op flexibiliteit in doelen en uitvoering. Door te werken met bandbreedtes, conditionele doelen en fasering kan beleid beter inspelen op veranderende omstandigheden. Dit vergroot de robuustheid van het systeem, maar vraagt om expliciete keuzes over wanneer en hoe wordt bijgestuurd.

*Voorkomen van lock-ins en sturen op tijdelijkheid*
Dit type maatregelen richt zich op het beheersen van risico’s dat tijdelijke oplossingen structureel worden. Door tijdelijkheid expliciet te borgen en uitstapcriteria vast te leggen, kan beleid voorkomen dat investeringen toekomstige systeemkeuzes beperken. De effectiviteit hiervan hangt af van consistente toepassing en het tijdig beschikbaar komen van alternatieven.

*Biomassa-allocatie en grondstoffenbeleid*
Biomassa- en grondstoffenbeleid richt zich op het maken van expliciete keuzes over schaarse inputs die in meerdere sectoren inzetbaar zijn. Door allocatievraagstukken beleidsmatig te adresseren kan concurrentie tussen toepassingen beter worden gestuurd. Dit type beleid vereist ketenbrede afwegingen en kan schaarste niet oplossen, maar wel transparanter maken.

*Capaciteit van uitvoering: mensen, middelen en instituties*
Deze beleidsmaatregelen richten zich op de uitvoeringskracht van de energietransitie, waaronder beschikbaarheid van personeel, kennis en institutionele capaciteit. Zonder versterking van deze randvoorwaarden blijven doelen en plannen moeilijk realiseerbaar, ongeacht beleidsambitie. Dit type beleid is daarmee een noodzakelijke, maar vaak impliciete voorwaarde voor alle andere beleidsinzet.

## 4.4 Knelpunten en beleidsopties

In deze paragraaf worden de matches uit Paragraaf 4.2 (knelpunt-typen per energiedoel) gekoppeld aan de typen beleidsopties uit Paragraaf 4.3.

Tabel 4.2 geeft een overzicht van de vijftien energiedoelen en laat per doel zien welke **systeemsturing**, **dominante risico's en afhankelijkheden** en beleidsopties daarmee samenhangen. De tabel is niet bedoeld om doelen onderling te rangschikken of om uitspraken te doen over wenselijkheid van doelen. Ook biedt zij geen inzicht in de uiteindelijke praktische inrichting van het energiesysteem richting 2040. De tabel dient als hulpmiddel om inzicht te krijgen in de consequenties die verschillende typen doelen hebben voor de inrichting en uitvoerbaarheid van het energiesysteem richting 2040.

De kolom *Type systeemsturing* duidt welk deel van het energiesysteem primair wordt aangesproken door het doel, bijvoorbeeld het aanbod, de vraag, de systeembalans of specifieke ketens. De kolommen *Dominante systeemrisico's* en *Belangrijkste afhankelijkheden* laten zien waar bij dat type doel de belangrijkste kwetsbaarheden en onzekerheden liggen, zoals infrastructuurtempo, ruimtelijke inpassing, marktwerking of internationale afstemming. Deze risico's zijn gebaseerd op de in Hoofdstuk 3 beschreven knelpunten. De kolom *Beleidsopties* beschrijft welke handelingsperspectieven in dit rapport zijn geïdentificeerd als randvoorwaardelijk om de risico's te mitigeren. Dit betreft geen beleidsadvies, maar een duiding van waar en hoe beleid en oplossingsrichtingen een rol spelen bij het realiseren van doelen. Maatregelen kunnen de uitvoerbaarheid vergroten, maar nemen de onderliggende fysieke en institutionele beperkingen niet volledig weg.

De tabel laat zien dat geen van de energiedoelen systeemneutraal is. Elk doel gaat gepaard met specifieke systeemrisico's en meerdere afhankelijkheden die meegewogen moeten worden in beleidsvorming. Daarbij verschilt de aard van deze risico's per doel: doelen gericht op energieaanbod leggen andere accenten dan doelen die focussen op vraag, flexibiliteit of moleculaire routes. Dit vertaalt zich in uiteenlopende knelpunten op het gebied van infrastructuur, ruimtegebruik, marktordening en ketenafhankelijkheden.

De handelingsperspectieven spelen hierbij een ondersteunende rol: zij kunnen risico's mitigeren en uitvoerbaarheid vergroten, maar nemen de onderliggende fysieke en institutionele beperkingen niet weg. De tabel is bedoeld als leeswijzer voor de daaropvolgende alinea's, waarin deze systeemlogica en risico's per doel nader worden geduid.

**Tabel 4.2**: Mogelijke energiedoelen en bijbehorende knelpunten en handelingsperspectieven

| Energiedoel | Type systeem sturing | Dominante systeemrisico's | Belangrijkste afhankelijkheden | Beleidsopties |
|---|---|---|---|---|
| Schone energie | Aanbod gedreven | Ruimtelijke inpassing, netcapaciteit, marktprijsdruk | Ruimte, infrastructuurtempo, marktontwerp | Creëren investeringszekerheid, ruimtelijke sturing, marktinterventies |
| Hernieuwbare energie | Aanbod gedreven | Netcongestie, regionale uitvoerbaarheid, prijserosie | Regionale infrastructuur, maatschappelijke acceptatie | Versnellen netuitbreiding, locatiekeuzes, subsidiëring |
| Koolstofarme energie | Technologie- en keten-gedreven | Afhankelijkheid CCS, kernenergielock-ins, lange doorlooptijden | $CO_2$-keten, vergunningen, internationale afstemming | Coördinatie grootschalige projecten, tijdelijke ondersteuning |
| Finaal energie verbruik/ energie besparing | Vraag -gedreven | Onzeker tempo realisatie, beperkte afdwingbaarheid | Elektrificatie, vraagvermindering en gedrag eindgebruikers, uitvoeringscapaciteit | Normering, financiële prikkels, uitvoeringsondersteuning |
| Primair energie verbruik | Systeembreed | Afhankelijk van aannames over efficiëntie en conversie | Hernieuwbare elektriciteitsproductie, waterstofproductie en CCS-inzet, import van bio- of synthetische brandstoffen | Indirect via samenhangend beleid, beperkte directe sturing |
| Elektrificatie breed | Vraag-gedreven | Netcongestie, regionale mismatch vraag-aanbod | Elektriciteitsnet, flexibiliteit, technologieontwikkeling | Versnelling netverzwaring, prioritering aansluiting, investeringszekerheid |
| Elektrificatie industrie | Vraag- en technologie-gedreven | Onvoldoende netcapaciteit, onvolwassen technologie | Netverzwaring, beschikbaarheid hoge-temperatuurtechnologie | Gerichte ondersteuning, infrastructuurplanning |
| Sectordoelen industrie | Sectoraal gestuurd | Mismatch met technisch handelingsperspectief | Technologieontwikkeling, ketenalternatieven | Flankerend beleid, flexibiliteit in toepassing |
| Verduurzaming warmtevraag | Gebieds- en infrastructuur-gedreven | Onzekerheid bronnen, dalende restwarmte | Regionale warmtebronnen, ruimtelijke inpassing | Gebiedsgerichte regie, lange-termijnkaders |
| Interconnectie capaciteit | Systeembalans-gedreven | Afhankelijkheid buitenland, geopolitieke risico's | Buitenlandse markten, internationale afspraken | Europese afstemming, regulering |
| Flexibiliteit | Markt- en systeembalans-gedreven | Onvoldoende investeringsprikkels, tekort of overschot elektriciteitscapaciteit | Marktontwerp, prijsprikkels | Marktmechanismen, stimulering flexibiliteitsopties |
| Aandeel regelbaar vermogen | Capaciteits-gedreven | Slechte businesscase door weinig draaiuren | Marktontwerp, vraag naar flexibiliteit | Capaciteitsmechanismen, regulering |
| CCS-capaciteit en $CO_2$-transport | Ketengedreven | Beperkte opslag, lock-ins, internationale concurrentie | $CO_2$-infrastructuur, opslagprojecten | Coördinatie keten, tijdelijke ondersteuning |
| Groene of koolstofarme waterstof | Ketengedreven | Onzeker vraagvolume, infrastructuur-risico's | Waterstofnet, CCS, elektriciteitsprijzen | Ketenregie, investeringszekerheid |
| Groen gas | Grondstoffen- en importgedreven | Beperkte beschikbaarheid, concurrentie om biomassa | Importstromen, biomassa-allocatie | Kaders voor inzet, prioritering |

*Schone energie*
Een doel voor schone energie stuurt primair op de aanbodzijde en vraagt om grootschalige opwek en infrastructuur. De uitvoerbaarheid wordt vooral begrensd door ruimte (K5), infrastructuurtempo (K4) en markt- en prijsdynamiek (K6), terwijl ook importafhankelijkheid (K10) en onzekerheid over beschikbaarheid van bronnen (K13) een rol spelen. Beleidsmaatregelen kunnen investeringszekerheid creëren, maar nemen deze fysieke en ruimtelijke grenzen niet weg.

*Hernieuwbare energie*
Hernieuwbare-energiedoelen leiden tot een sterke concentratie van risico's rond netcongestie en regionale uitvoerbaarheid (K4, K5) en prijsdruk door variabele opwek (K6). Daarnaast spelen maatschappelijke acceptatie en ruimtelijke schaarste (K5) een doorslaggevende rol. Beleid is vooral randvoorwaardelijk via subsidiëring, versnelling netuitbreiding en locatiekeuzes, maar kan het tempo slechts beperkt afdwingen.

*Koolstofarme energie*
Doelen voor koolstofarme energie zijn sterk keten- en technologiegedreven en daarmee gevoelig voor ketenafhankelijkheden (K2), lock-ins (K9) en lange doorlooptijden (K4). De haalbaarheid hangt af van de tijdige beschikbaarheid van CCS-opslagfaciliteit en CCS-infrastructuur en van internationale afstemming (K10, K13). Beleidsmaatregelen zijn noodzakelijk om projecten op gang te brengen, maar vergroten ook het risico op padafhankelijkheid.

*Finaal energieverbruik / energiebesparing*
Vraag- en besparingsdoelen sturen indirect op het energiesysteem en zijn sterk afhankelijk van gedrag, uitvoering en tempo (K14). De belangrijkste onzekerheden liggen bij realisatiesnelheid van elektrificatie en vraagvermindering (K4) en beperkte afdwingbaarheid (K1). Beleid kan via normering en prikkels ondersteunen, maar de uiteindelijke systeemimpact blijft onzeker richting 2040.

*Primair energieverbruik*
Een doel voor primair energieverbruik werkt systeembreed en is sterk afhankelijk van aannames over elektrificatie, conversie en CCS-inzet (K3, K8). De relatie met concrete investeringsbeslissingen is indirect, waardoor de sturingskracht beperkt is. Beleidsmaatregelen beïnvloeden deze indicator vooral via samenhang met andere doelen.

*Elektrificatie breed*
Elektrificatiedoelen leggen directe druk op het elektriciteitssysteem en worden vooral begrensd door netcapaciteit en tempo van netuitbreiding (K4) en regionale verschillen in beschikbare ruimte (K5). Daarnaast spelen technologische onzekerheid (K8) en marktcondities (K6) een belangrijke rol. Beleid kan prioriteren en versnellen, maar kan regionale uitvoerbaarheid van elektrificatie en de benodigde netverzwaring niet volledig garanderen.

*Elektrificatie industrie*
Bij industriële elektrificatie komen meerdere knelpunten samen: onzeker investeringsklimaat (K1), onvoldoende netcapaciteit (K4) en onvolwassen technologie voor hoge-temperatuurprocessen (K8). Ook lock-in risico's (K9) spelen wanneer bedrijven uitwijken naar tijdelijke alternatieven zoals CCS. Beleidsmaatregelen zijn cruciaal, maar sterk afhankelijk van ketensamenhang en timing van verschillende onderdelen zoals netverzwaring of beschikbaarheid van technologie.

*Sectordoelen industrie*
Sectordoelen veronderstellen een duidelijk technisch handelingsperspectief, terwijl dat in de praktijk vaak onzeker is door technologische en ketenafhankelijkheden (K2, K8). Hierdoor ontstaat risico op mismatch tussen doel en uitvoerbaarheid (K14). Beleid moet hier flexibiliteit bieden, omdat uniforme doelen niet aansluiten bij alle sectoren.

*Verduurzaming warmtevraag*
Warmtetransitiedoelen zijn sterk gebieds- en infrastructuur-gebonden en lopen aan tegen ruimtelijke schaarste (K5) en onzekerheid over beschikbare bronnen, zoals restwarmte (K13). Het tempo wordt beperkt door lokale besluitvorming en uitvoering (K4, K14). Beleidsregie is essentieel, maar kan brononzekerheden niet volledig oplossen.

*Interconnectiecapaciteit*
Interconnectiedoelen dragen bij aan systeembalans, maar vergroten ook de afhankelijkheid van buitenlandse markten en geopolitiek (K10). De effectiviteit hangt af van internationale coördinatie en governance (K12). Normering vindt plaats op EU-niveau, met onderlinge afstemming over uitbreidingsplannen. Maakbaarheid wordt dus deels bepaald door samenwerking met buurlanden.

*Flexibiliteit*
Flexibiliteitsdoelen zijn randvoorwaardelijk voor het energiesysteem, maar kampen met zwakke investeringsprikkels (K6) en onzekerheid over benodigde volumes (K3). Zonder passend marktontwerp ontstaat risico op onder- of overinvestering. Beleidsmaatregelen zijn noodzakelijk, maar complex en gevoelig voor timing.

*Aandeel regelbaar vermogen*
Doelen voor regelbaar vermogen lopen vast op slechte businesscases door weinig draaiuren (K6) en onzekerheid over toekomstige systeembehoefte (K3). Tegelijk is regelbaar vermogen cruciaal voor leveringszekerheid. Beleidsinterventies zijn onvermijdelijk, maar vergroten het risico op lock-ins (K9).

*CCS-capaciteit en $CO_2$-transport*
CCS-doelen zijn sterk gevoelig voor ketenafhankelijkheid (K2), onzeker investeringsklimaat (K1) en internationale concurrentie om $CO_2$-opslag (K10). Daarnaast speelt lock-in risico (K9) en de onzekerheid rond LULUCF-restemissies (K15). Beleidscoördinatie is essentieel, maar kan de fundamentele tijdelijkheid van CCS niet wegnemen.

*Groene of koolstofarme waterstof*
Waterstofdoelen kennen grote onzekerheid door vraagbandbreedtes (K3), ketenafhankelijkheden (K2) en infrastructuurrisico's (K4). De balans tussen groen en blauw wordt beïnvloed door CCS-beschikbaarheid en elektriciteitsprijzen (K6, K13). Beleidsregie is nodig, maar vraagt expliciete keuzes over rol van waterstof en prioritering van waterstof als doel.

*Groen gas*
Groen-gasdoelen zijn vooral begrensd door beschikbaarheid van biomassa (K11, K13) en importafhankelijkheid (K10). Om deze gelimiteerd beschikbare hoeveelheid biomassa is concurrentie met andere toepassingen. Daarnaast bestaat er onzekerheid over de opschaling van nieuwe technologie. Beschikbaarheid en allocatie lijken de voornaamste begrenzende factoren te zijn. Daarom draaien beleidskeuzes primair om de allocatie van groen gas en de prioritering van groen gas als bron voor elektriciteit i.p.v. de industrie.

## 4.5 Overkoepelende observaties

De analyse langs de energiedoelen in de voorgaande paragrafen en de consequenties daarvan voor de inrichting en uitvoerbaarheid van het energiesysteem richting 2040, laten zien dat geen van deze doelen systeemneutraal is. Ieder energiedoel heeft knelpunten die impact hebben op het systeem en systeemrisico's en afhankelijkheden met zich meebrengen. Dit betekent dat de afweging van de energiedoelen en de uitvoerbaarheid richting 2040 sterk wordt bepaald door een samenhangend pakket van knelpunten. Energiedoelen die sturen op de aanbodzijde, zoals hernieuwbare, schone en koolstofarme energie, lopen vooral aan tegen fysieke grenzen in tijd en ruimte, markt- en prijsdynamiek en onzekerheid over beschikbaarheid van bronnen. Vraag- en efficiëntiegerichte doelen, zoals energiebesparing en finaal energieverbruik, kennen juist beperkingen in tempo, afdwingbaarheid en uitvoeringscapaciteit. Ketengedreven doelen—zoals CCS, waterstof en groen gas—worden gekenmerkt door sterke ketenafhankelijkheden, onzekerheid over volumes en timing, en verhoogde risico's op lock-ins en internationale afhankelijkheden. Energiedoelen rond flexibiliteit, regelbaar vermogen en interconnectie zijn randvoorwaardelijk voor het functioneren van het systeem als geheel, maar vereisen ingrijpende aanpassingen in netwerkplanning en/of governance.

Dit betekent dat energiedoelen niet los gezien kunnen worden van de randvoorwaarden waaronder zij gerealiseerd moeten worden. Veel doelen veronderstellen impliciet tijdige beschikbaarheid van infrastructuur, voldoende uitvoeringscapaciteit, ruimte voor inpassing en een investeringsklimaat dat grootschalige en langjarige investeringen mogelijk maakt. Daarnaast blijkt uit de analyse dat onzekerheid over vraagontwikkeling, technologische rijpheid en internationale context structureel is en niet volledig kan worden weggenomen met nationale beleidsinzet. Dit pleit ervoor om in Europese context ruimte te houden voor nationale invulling, fasering en adaptiviteit, bijvoorbeeld via bandbreedtes of conditionele formuleringen.

De handelingsperspectieven kunnen hierbij worden gezien als randvoorwaarden bij doelkeuzes, niet als automatische garanties voor realisatie. Handelingsperspectieven zoals beleid dat gericht is op investeringszekerheid, ketenregie, versnelling van infrastructuur, ruimtelijke sturing en marktontwerp zijn voor veel energiedoelen noodzakelijk om risico's te mitigeren, maar nemen de onderliggende fysieke, ruimtelijke en institutionele beperkingen niet volledig weg. Europese afstemming en een gelijk speelveld zijn daarbij cruciaal voor doelen met sterke internationale verwevenheid, zoals interconnectie, waterstof, CCS en importafhankelijke energiedragers. Adaptief beleid en expliciete aandacht voor lock-in risico's zijn nodig om te kunnen omgaan met onzekerheid en om te voorkomen dat tijdelijke oplossingen structureel bepalend worden voor het energiesysteem na 2040.

Samenvattend onderstreept de analyse dat emissiereductie in Europa gebaat is bij ambitie in combinatie met realisme over uitvoerbaarheid. De keuze van energiedoelen, ondersteunend aan het halen van emissiereductiedoelen, kan hier richting aangeven. Door daarbij expliciet aandacht te besteden aan bijbehorende knelpunten en noodzakelijke beleidsrandvoorwaarden, kunnen Europa en Nederland een robuuste richting kiezen die zowel duidelijke kaders biedt als rekening houdt met de nationale uitvoering. Op die manier gaan het energiesysteem en de daarmee samenhangende doelen een functie vervullen om de afgesproken broeikasemissiereductie te realiseren.

# Referenties


[1] D66, CDA en VVD, *Aan de slag - Bouwen aan een beter Nederland - Coalitieakkoord 2026-2030,* 2026.

[2] R. Beres, M. Scheepers en J. Giraldo Chavarriaga, „Scenario analysis for the National Plan Energy system," TNO 2026 R10505, 2026.

[3] Europese Commissie, „Richtlijn 2023/1781 (Energy Efficiency Directive)," 2023a.

[4] Europese Commissie, „Richtlijn 2023/2413," 2023b.

[5] Netbeheer Nederland, „Netbeheer Nederland Scenario's Editie 2025," 2025.

[6] European Commission, *Amending Rgulation (EU) 2021/1119 astablishing the framework for achieving climate neutrality COM (2025) 524 final,* 2025.

[7] M. Scheepers, J. v. Stralen, J. Giraldo Chavarriaga, A. Elberry, A. Uslu and C. Oliveira, "Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050 - Scenario update and scenario variants for industry," TNO P10607, 2024.

[8] J. v. Stralen, F. Dalla Longa, B. Daniëls, K. Smekens and B. v. d. Zwaan, "OPERA; a New High-Resolution Energy System Model for Sector Integration Research," 2021.

[9] PBL, „Klimaat- en Energieverkenning 2024," 2024.

[10] PBL, „Klimaat- en Energieverkenning 2025," 2025.

Bijlage A

# Energiedoelen en bijbehorende indicatoren

In Hoofdstuk 2 zijn energiedoelen geïntroduceerd die in samenspraak met het ministerie zijn bepaald. Aan deze doelen zijn indicatoren gekoppeld die dienen als een ondersteunend analytisch hulpmiddel om verschillende typen energiedoelen te koppelen, te analyseren en mogelijke knelpunten te identificeren. Deze indicatoren kunnen uiteindelijk ook gebruikt worden bij de uitvoering van het beleid ten aanzien van energiedoelen. In deze bijlage worden de energiedoelen en bijbehorende indicatoren weergegeven om een volledig overzicht te creëren in de synthese en dient als achtergrondinformatie voor Paragraaf 4.3 - 4.5. De onderstaande tabel geeft dit overzicht.

**Tabel A.1:** Energiedoelen gekoppeld aan indicatoren

| Energiedoel | Energie-indicatoren |
|---|---|
| Schone energie | Aandeel hernieuwbare, schone en koolstofarme energie.<br>Aandeel van afzonderlijke hernieuwbare energiebronnen.<br>Elektriciteitsaanbod schone energie. |
| Hernieuwbare energie | Aandeel hernieuwbare energie, hernieuwbare elektriciteit en hernieuwbare warmte- en koude.<br>Aandeel van afzonderlijke hernieuwbare energiebronnen.<br>Aandeel hernieuwbare, schone en koolstofarme energie.<br>Aandeel wind en zon in hernieuwbare elektriciteitsproductie. |
| Koolstofarme energie | Aandeel hernieuwbare, schone en koolstofarme energie. |
| Finaal energie verbruik/ energiebesparing | Primaire en finale energieverbruik.<br>Relatieve verandering van het primaire en finale energie verbruik.<br>Finale schone ($CO_2$-vrije) energie. |
| Primair energie verbruik | Primaire en finale energieverbruik.<br>Relatieve verandering van het primaire en finale energie verbruik.<br>Primaire schone ($CO_2$-vrije) energie. |
| Elektrificatie breed | Elektriciteitsaanbod schone energie.<br>Aandeel wind en zon in hernieuwbare elektriciteitsproductie.<br>Elektriciteitsproductie uit kernenergie als aandeel van het elektriciteitsverbruik en ten opzichte van het finaal energieverbruik. |
| Elektrificatie industrie | Elektriciteitsaanbod schone energie.<br>Aandeel wind en zon in hernieuwbare elektriciteitsproductie.<br>Elektriciteitsproductie uit kernenergie als aandeel van het elektriciteitsverbruik en ten opzichte van het finaal energieverbruik.<br>Elektrificatiegraad voor industrie, industrie + gebouwde omgeving + mobiliteit en voor het totale energiesysteem. |

| Energiedoel | Energie-indicatoren |
|---|---|
| Sectordoelen industrie | Elektrificatiegraad voor industrie, industrie + gebouwde omgeving + mobiliteit en voor het totale energiesysteem.<br>Duurzame brandstoffen ten opzichte van finaal energieverbruik (incl. bunkers) en hernieuwbare energie.<br>Finaal energieverbruik voor 4 industriesectoren.<br>Finaal energieverbruik per eindgebruikerssector. |
| Verduurzaming warmtevraag | Hernieuwbare warmte ten opzichte van finaal energieverbruik (incl. bunkers) en hernieuwbare energie. |
| Interconnectie capaciteit | Geen indicator voor bepaald. |
| Flexibiliteit | Aandeel regelbaar productievermogen in totaal opgesteld vermogen.<br>Overig flexibel vermogen als percentage van totaal opgesteld vermogen. |
| Aandeel regelbaar vermogen | Aandeel regelbaar productievermogen in totaal opgesteld vermogen.<br>Overig flexibel vermogen als percentage van totaal opgesteld vermogen. |
| CCS capaciteit en $CO_2$-transport | $CO_2$-afvang en -opslag. |
| Groene of koolstofarme waterstof | Groene waterstof productie en finaal verbruik groene waterstof ten opzichte van de productie van hernieuwbare energie en finaal energieverbruik. |
| Groen gas | Biomassa, biogas en groen gas ten opzichte van finaal energieverbruik (incl. bunkers) en hernieuwbare energie.<br>Aandeel groen gas in gasverbruik gebouwde omgeving. |

Bijlage B

# Deelnemers bijeenkomsten

**TNO-expertise bijeenkomsten (14, 19 en 21 januari 2026)**

**Netbeheerders bijeenkomst (17 december 2025) - deelnemers:**
Alliander
Gasunie
Stedin
Tennet

**Klankbordgroep bijeenkomst (26 januari 2026) - deelnemers:**
EBN
Energie NL
Havenbedrijf Rotterdam
Holland Solar
NedZero
NVDE
TU Delft
VEMW

**Bijeenkomst beleidsambtenaren EZK (19 januari 2026)**
**Bijeenkomst MT stuurgroep (EZK (5 februari 2026)**

**Energy & Materials Transition**

Radarweg 60
1043 NT  Amsterdam
www.tno.nl

TNO innovation for life