

Onderzoeksrapport:

# Effecten van piekverwarming: elektrisch of met duurzaam gas?

Een onderzoek naar de impact van de piekvoorziening van warmte in de gebouwde omgeving en landbouw op het primair energiegebruik en het benodigd flexibel vermogen voor elektriciteit.

14 december 2023

Dit rapport is samengesteld voor het **Ministerie van Economie en Klimaat** ter ondersteuning van de uitwerking van het **Nationaal Plan Energie**.

**Opdrachtgevers:** Michiel Hekkenberg (EZK), Tycho Smit (EZK), Sabine Jansen (BZK)

**Auteurs:** Charlotte von Meijenfeldt (Quintel) & Mathijs Bijkerk (Quintel)

---

# Inhoudsopgave

Samenvatting.....	4
Inleiding .....	6
<b>1. Scenario's: input, berekeningen en output.....</b>	<b>7</b>
Scenariosamenstelling.....	8
Scenario-input.....	9
Scenarioberekeningen.....	11
Scenario-output .....	12
<b>2. Systemeffecten variant elektrisch en variant duurzaam gas .....</b>	<b>14</b>
Energievraag .....	15
Balans en tekorten op het elektriciteitsnet.....	20
<b>3. Een optimaal energiesysteem .....</b>	<b>25</b>
Conclusies .....	26
Discussie .....	27
<b>Bijlagen .....</b>	<b>28</b>
Scenariosamenstelling.....	29
Resultaten .....	35
Parameters warmtetechnologie.....	37
Deskresearch COP .....	38
Modellering in het Energietransitiemodel .....	39
Overzicht & links scenario's .....	41

# Samenvatting

Verwarming in de gebouwde omgeving en landbouw (voornamelijk glastuinbouw) speelt een grote rol in de energiebehoefte en -voorziening van Nederland. Om aan het Klimaatakkoord te voldoen moet de vraag naar verwarming volledig duurzaam ingevuld worden. De technieken die hiervoor gekozen worden bepalen voor een deel de invulling (vraag, aanbod, flexibiliteit en infrastructuur) van het energiesysteem. Om te begrijpen welke gevolgen de keuzes in duurzame verwarming in de gebouwde omgeving en landbouw hebben op ons toekomstige energiesysteem, zijn in dit onderzoek de systeemeffecten van all-electric en hybride verwarming tegen elkaar afgewogen.

Dit onderzoek is uitgevoerd naar aanleiding van een vraag die ontstond bij het opstellen van het Nationaal plan energiesysteem (NPE): als de piekvraag naar verwarming, die ontstaat op koude dagen, wordt ingevuld door elektriciteit, leidt dit dan tot een dergelijke toename in primaire energievraag door verbruik van duurzaam gas in piekcentrales, dat dit duurzaam gas efficiënter direct voor verwarming ingezet kan worden?

Om meer zicht te krijgen op de systeemeffecten van all-electric en hybride verwarming en de vraag vanuit het NPE te kunnen bijvallen of ontkrachten is de volgende hoofdvraag gesteld: **welke duurzame verwarmingstechniek voor de gebouwde omgeving en landbouw, all-electric of hybride (met duurzaam gas), is vanuit systeemperspectief optimaal?**

In dit onderzoek is gekeken naar twee aspecten in het Nederlandse energiesysteem: de verschillen in primaire energievraag (berekend op basis van de samenstelling van de elektriciteitsproductie per uur) en de impact op het elektriciteitsnet (vermogen aan flexibiliteitsmiddelen of productiemethoden die nodig zijn om te voorzien in de uurlijkse vraag).

Dit onderzoek is uitgevoerd met het Energietransitiemodel (ETM) waarin twee extreme scenariovarianten zijn gemodelleerd met als basis de I13050-scenario's voor Nationaal en Europees van Netbeheer Nederland<sup>2</sup>. Hierbij is één scenariovariant gemaakt waarbij de gebouwde omgeving en landbouw voornamelijk verwarmd wordt met een all-electric systeem (in dit geval een luchtwarmtepomp of e-boiler) — **variant elektrisch** — en een scenariovariant met voornamelijk hybride systemen (in dit geval hybride luchtwarmtepompen op waterstof) — **variant duurzaam gas**. Door de uitkomsten van beide te vergelijken kunnen uitspraken gedaan worden over de verschillen tussen beide systemen.

De belangrijkste conclusies uit dit onderzoek zijn als volgt:

**De primaire energievraag van all-electric systemen is significant lager dan hybride systemen op duurzaam gas (waterstof)**

Wanneer een aanzienlijk deel van de gebouwde omgeving en de landbouwsector overstapt op luchtwarmtepompen, blijkt de primaire energievraag van het gehele energiesysteem, inclusief de conversieverliezen van centrales of flexibele energiebronnen, lager te zijn dan wanneer er gebruik wordt gemaakt van hybride luchtwarmtepompen die werken op waterstof. Dit verschil (tussen de 38% - 49% hoger voor huishoudens op hybride waterstof warmtepompen) wordt veroorzaakt door de relatief hoge efficiëntie van luchtwarmtepompen (vanwege het gebruik van omgevingswarmte) in vergelijking met de hybride variant die deels gebruik maken van een HR-ketel met lagere efficiëntie. Hierdoor worden ook additionele eventuele conversieverliezen die optreden bij de hogere productie van elektriciteit in de varianten elektrisch ruim gecompenseerd. Bovendien gaan bij

<sup>1</sup> Zie <https://www.rvo.nl/onderwerpen/energiesysteem/nationaal-plan-energiesysteem> voor meer informatie.

<sup>2</sup> <https://www.netbeheernederland.nl/dossiers/toekomstscenarios-64>

het gebruik van waterstof in de gebouwde omgeving ook energieverliezen gepaard met de productie van waterstof (bijvoorbeeld bij het gebruik van elektrolyse). Het aanpassen van het omslagpunt van hybride warmtepompen heeft hierop geen invloed, er is altijd meer primaire energie nodig wanneer een hybride luchtwarmtepomp op waterstof wordt gebruikt. Deze conclusie geldt niet voor het gebruik van een (collectieve) e-boiler. De e-boiler maakt geen gebruik van omgevingswarmte en is hierdoor minder efficiënt om de piekvragen op te vangen dan een waterstofketel.

*Aandachtspunten:* er is in dit onderzoek niet gekeken naar het gebruik van groen gas als basis voor een hybride systeem. Dit zou de primaire energievraag van een hybride systeem verbeteren ten opzichte van waterstof aangezien de conversieverliezen bij de productie van groen gas zeer beperkt zijn. Ook is er niet gekeken naar andere warmtepompen, zoals water-water warmtepompen. Dit zou juist de primaire energievraag van de varianten elektrisch significanter verbeteren dan in de varianten duurzaam gas.

## **Er is meer behoefte aan productie- of flexibiliteitsmiddelen in het elektriciteit systeem voor variant elektrisch**

Ondanks dat het gebruik van luchtwarmtepompen in de gebouwde omgeving en landbouw ten opzichte van de hybride variant op waterstof een lagere primaire energievraag heeft, hebben de varianten elektrisch een hogere (piek)vraag naar elektriciteit. Zo is er in dit onderzoek geconstateerd dat er in de

piekuren 3 - 8% meer vermogen wordt gevraagd bij gebruik van luchtwarmtepompen ten opzichte van hybride warmtepompen en dat de vraag naar elektriciteit ook 20 - 30 % hoger ligt. Dit zorgt ervoor dat er in de varianten elektrisch tekorten optreden ten opzichte van het totale opgesteld vermogen aan productie- en flexibiliteitsmiddelen in de gebruikte I13050-scenario's. Er is dus meer behoefte aan productie- of flexibiliteitsmiddelen om ervoor te zorgen dat er op het juiste moment voldoende elektriciteit is om in de totale vraag te voorzien en tekorten te voorkomen.

*Aandachtspunten:* er is in dit onderzoek alleen gekeken naar de effecten op het elektriciteitsnet. Ook in de vraag naar groen gas en waterstof kunnen pieken of tekorten ontstaan op basis van de totale uurlijkse beschikbaarheid of totale potentie. Daarnaast zijn de tekorten die ontstaan zeer afhankelijk van het opgesteld elektriciteitsproductievermogen en flexibiliteitsmiddelen in de I13050-scenario's.

**Op basis van dit onderzoek kan geconcludeerd worden dat een all-electric systeem op basis van luchtwarmtepompen vanuit een systeemperspectief efficiënter is dan een hybride systeem, voornamelijk door de hoge efficiëntie van warmtepompen. De keuze voor een efficiënter systeem leidt wel tot een hogere elektriciteitsvraag. Om de balans op het elektriciteitsnetwerk te behouden zal daarom ofwel de beschikbaarheid van flexibel aanbod vergroot moeten worden, ofwel de piekvraag gereduceerd moeten worden.**

# Inleiding

Dit onderzoek is gedaan ter ondersteuning van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat bij het maken van het Nationaal plan energiesysteem (NPE). In het NPE worden belangrijke keuzes gemaakt over de toekomst van het Nederlandse energiesysteem. Om deze keuzes goed te kunnen onderbouwen is er met behulp van het Energietransitiemodel (ETM) aanvullend onderzoek gedaan naar de systeemimpact van toekomstige verwarming van de gebouwde omgeving en landbouw.

Op dit moment wordt in Nederland nog het grootste deel van de gebouwde omgeving en de landbouw verwarmd met aardgas. Om de gestelde klimaatdoelen te halen zal in 2050 de gehele gebouwde omgeving en landbouw overgestapt moeten zijn op een duurzamere manier van verwarmen. De uiteindelijke technologiekeuze heeft verstrekkende gevolgen voor het Nederlandse energiesysteem. Zo maakt de warmtebehoefte van de gebouwde omgeving en landbouw een significant deel uit (ongeveer een kwart in 2019) van de totale Nederlandse energievraag. Daarnaast is deze behoefte ook zeer afhankelijk van de tijd van het jaar: in de winter is de vraag naar warmte velen malen hoger en kunnen er op koude dagen hoge pieken optreden. De keuze voor een bepaalde (mix van) verwarmingstechnologie(en) bepaalt daardoor ook in zekere mate de keuze voor een bepaald energiesysteem (bijvoorbeeld productiepark, hoeveelheid batterijen, etc.).

In het NPE wordt bepaald hoe de Nederlandse gebouwde omgeving en landbouw in de toekomst duurzaam verwarmd worden. Hierbij is vooral de keuze tussen een all-electric of hybride systeem

interessant, met name als het gaat over de invulling van de piekmomenten in de warmtevraag (bijvoorbeeld op koude dagen). Bij een all-electric systeem worden de pieken met elektriciteit ingevuld terwijl de piekmomenten bij een hybride systeem worden ingevuld met duurzaam gas. Hierbij is de vraag welke van de twee manieren efficiënter is. Zorgt een all-electric systeem altijd voor een minder hoge energievraag of is er een mogelijkheid dat de efficiëntie van het gehele systeem (van centrale tot warmtepomp) lager is dan verwarmen met duurzaam gas door conversieverliezen? En als er meer pieken op het elektriciteitsnet ontstaan door all-electric verwarmen, hoeveel extra vermogen aan elektriciteitsproductie is er dan nodig om dit op te vangen?

In dit onderzoek worden bovenstaande hypothesen, ter ondersteuning van het NPE, verder onderzocht. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een fictief energiesysteem waarbij het overgrote deel van de gebouwde omgeving en landbouw wordt verwarmd via een individuele luchtwarmtepomp of collectieve e-boiler versus een individuele hybride (lucht)warmtepomp op waterstof of collectieve waterstofketel. Door onder andere de primaire energievraag en de uurlijkse behoefte aan elektriciteit tussen beide systemen te vergelijken kan er een uitspraak gedaan worden welke van de twee varianten efficiënter is voor het Nederlandse energiesysteem. Op deze manier wordt geprobeerd om inzichten te genereren die ervoor zorgen dat de toekomstige manier van verwarmen in Nederland zo optimaal mogelijk wordt ingericht.

# 1. Scenario's: input, berekeningen en output

Methode

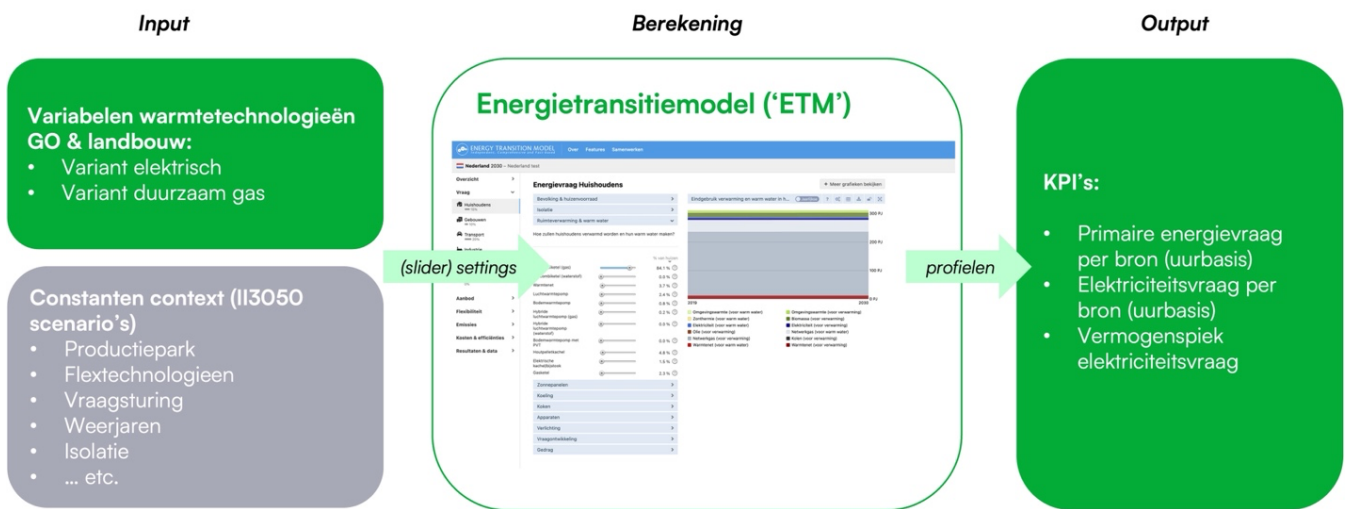
---

# Scenariosamenstelling

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van een scenariostudie. Door een scenariovariant met all-electric verwarming en een scenariovariant met hybride verwarming op duurzaam gas (in dit geval waterstof) op te stellen is onderzocht wat de verschillende effecten zijn op bepaalde aspecten in het energiesysteem.

Met behulp van het Energietransitiemodel (ETM) is een scenariostudie gedaan om verschillen tussen een all-electric en hybride systeem bloot te leggen. In totaal kunnen er ongeveer 800 aannames gedaan worden over het toekomstige energiesysteem in het ETM voor 2050. Hierbij zijn een aantal aannames gevarieerd om

verschillen te duiden terwijl andere aannames constant zijn gehouden om de vergelijking zo zuiver mogelijk te kunnen maken. Aannames over de typen verwarmingstechnieken in de gebouwde omgeving (huishoudens en utiliteiten) en de landbouw (waarbij de warmtevraag voornamelijk afkomstig is uit de glastuinbouw) zijn gevarieerd terwijl aannames over bijvoorbeeld het type aanbod, weerjaren, de totale warmtevraag constant zijn gehouden. Het ETM rekent vervolgens de energievraag en het aanbod voor elk uur door op basis van deze aannames. Als uitkomst zijn alle uurlijkse profielen gebruikt om uitspraken te doen over de verschillen in efficiëntie.



Figuur 1 — Conceptueel overzicht van onderzoeksopzet



# Scenario-input

Om een goed beeld te krijgen van de systeemeffecten van volledig elektrisch verwarmen versus het gebruiken van een meer hybride variant op duurzaam gas zijn twee verschillende scenario's gemodelleerd voor 2050. Er is nadrukkelijk gekozen om deze scenario's niet realistisch op te stellen maar een extreme situatie te modelleren zodat goed zichtbaar wordt wat de verschillen tussen beide scenario's zijn.

Dit resulteert in de volgende twee varianten:

- Variant 1: Warmtebehoefte gebouwde omgeving & landbouw wordt voornamelijk ingevuld met all-electric systemen
- Variant 2: Warmtebehoefte gebouwde omgeving & landbouw wordt voornamelijk ingevuld met hybride systemen op duurzaam gas

## Variant 1 - elektrisch

In variant 1 - elektrisch zijn alle delen van de gebouwde omgeving die op pandniveau (/individueel) verwarmd worden op een luchtwarmtepomp gezet. Op deze manier wordt altijd de piekvraag ingevuld met elektriciteit. Er is gekozen voor een luchtwarmtepomp omdat dit een veelvoorkomende verwarmingstechniek is en ook de minst gunstige vorm van all-electric verwarmen is door de hoge energievraag en relatief hoge pieken in de warmtevraag. Voor de collectieve verwarming is de gebruikte restwarmte en geothermie constant gehouden maar is als voornaamste verwarmingstechniek gekozen voor een e-boiler. Zie **tabel 5 & 8** in de bijlage voor de specifieke instelling voor variant elektrisch.

## Variant 2 — duurzaam gas

In variant 2 — duurzaam gas zijn alle delen van de gebouwde omgeving die op pandniveau

(/individueel) verwarmd worden op een hybride luchtwarmtepomp op basis van waterstof gezet. Op deze manier wordt de piekvraag altijd opgevangen met duurzaam gas terwijl er bij een normale warmtevraag gebruik wordt gemaakt van een luchtwarmtepomp om dit hetzelfde te modelleren als in variant elektrisch. Er is in dit geval gekozen voor waterstof en niet voor groen gas om zo ook rekening te kunnen houden met eventuele conversieverliezen bij de omzetting naar waterstof. Voor de collectieve verwarming is de gebruikte restwarmte ook constant gehouden maar is als verwarmingstechniek gekozen voor een luchtwarmtepomp met waterstof-ketel als back-up. Zie **tabel 5 & 8** in de bijlage voor de specifieke instelling voor variant elektrisch.

Om de beide varianten zo zuiver mogelijk te kunnen vergelijken is er voor gekozen om de context (alle andere aannames) gelijk te houden. In dit geval is er gebruik gemaakt van de I13050 studie<sup>2</sup> die een uitspraak doet over hoe het energiesysteem er uit ziet in 2050. Deze studies zijn gebruikt omdat deze de meest volledige en gedegen set aan aannames bevatten over het energiesysteem in 2050. De volgende twee context scenario's zijn gebruikt:

- Context 1: I13050 scenario — Europees
- Context 2: I13050 scenario — Nationaal

## Context 1 — I13050 Europese integratie

In het Europese I13050 scenario wordt er uitgegaan van een groter aanbod van waterstof, voornamelijk uit import. Om deze reden wordt er ook in de gebouwde omgeving waterstof gebruikt om in de verwarmingsvraag te voorzien. Variant duurzaam gas zal dan ook beter aansluiten bij het aanbod in dit scenario.

## Context 2 — II3050 Nationaal leiderschap

In het Nationale II3050 scenario is er veel vermogen aan nationale elektriciteitsproductie opgesteld waardoor het aanbod van elektriciteit respectievelijk hoog ligt alsmede de waterstof productie uit elektriciteit (middels power-to-gas). Daarnaast is ook uitgegaan van een hoge inzet van collectieve warmteoplossingen en vermindering van de warmtevraag door isolatie. Variant elektrisch sluit dus conceptueel beter aan bij dit scenario ten opzichte van het nationale scenario maar er is hoogstwaarschijnlijk ook nog genoeg aanbod voor variant duurzaam gas.

Gezamenlijk resulteert dit in totaal 4 (extreme) scenario's<sup>3</sup>:

1. **EUR (all-e)** II3050 Europees — Variant all-electric
2. **EUR (dg)** II3050 Europees — Variant duurzaam gas
3. **NAT (all-e)** II3050 Nationaal — Variant all-electric
4. **NAT (dg)** II3050 Nationaal — Variant duurzaam gas

In alle vier de scenario's wordt de invulling van de warmtebehoefte voor de gebouwde omgeving (huishoudens en utiliteiten) en de landbouw overschreven. Alle andere aannames, bijvoorbeeld over het productiepark, opslag, weerjaar en isolatie<sup>3</sup> worden overgenomen uit de II3050 studie. Dit resulteert in een set van aannames (of 'slider settings') die kunnen worden ingevoerd in het ETM.

Het nadeel van deze methode is dat in de II3050 scenario's nadrukkelijk veel tijd is geïnvesteerd in een goede balans van vraag en aanbod. In dit onderzoek wordt deze balans verstoord door de (warmte)vraag in de gebouwde omgeving en landbouw vergaand te veranderen. Dit maakt de vergelijking van de systeemeffecten tussen varianten moeilijker en minder zuiver aangezien de context en de balans tussen vraag en aanbod een impact heeft op de uitkomsten. Om dit te ondervangen wordt ook gekeken naar de verschillen tussen beide context scenario's.

---

<sup>3</sup> Netbeheer Nederland, (2023), "Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's":

- DEC, Decentrale initiatieven, 2050, [https://energytransitionmodel.com/saved\\_scenarios/14552](https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14552) (niet gebruikt)
- NAT, Nationaal leiderschap, 2050, [https://energytransitionmodel.com/saved\\_scenarios/14553](https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14553)

- EUR, Europese integratie, 2050, [https://energytransitionmodel.com/saved\\_scenarios/14554](https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14554)
- INT, Internationale handel, 2050, [https://energytransitionmodel.com/saved\\_scenarios/14555](https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14555) (niet gebruikt)

# Scenarioberekeningen

Alle vier de scenario's worden gemodelleerd in het Energietransitiemodel (ETM). Op basis van bovenstaande input modelleert het ETM het energiesysteem in 2050 vraag en aanbod op uurlijkse basis.

Hierdoor kan voor elk uur worden bekeken wat de effecten zijn op het energiesysteem. Hierbij wordt er in het ETM rekening gehouden met de totale vraag binnen de Nederlands landsgrenzen voor alle verschillende vraagsectoren — gebouwde omgeving, transport, landbouw, industrie en de overige vraag alsmede het totale aanbod — productie, conversie, opslag, import/export en vraagsturing van o.a. zon, wind, waterstof, groen gas, kolen, gas, en nucleair

energie. De energievraag en mogelijke vraagpieken die zich voordoen buiten de gebouwde omgeving en landbouw worden op deze manier ook meegenomen en afgewogen tegen het totaal opgestelde vermogen aan aanbod en flexibiliteit middelen. Zie het hoofdstuk 'Modellering in het Energietransitiemodel' in de bijlage voor meer informatie en verwijzingen naar belangrijke ETM-documentatie.

# Scenario-output

Door te kijken naar de verschillen in de scenario-output van de vier scenario's kunnen conclusies worden getrokken over welke variant (elektrisch of duurzaam gas) gunstiger is. In dit onderzoek wordt hiervoor gekeken naar de totale primaire energievraag, de indirecte & directe elektriciteitsvraag, de balans van vraag en aanbod in elektriciteit en de (mogelijke) tekorten die optreden op de elektriciteitsmarkt.

## Primaire energievraag (per drager op basis van uurlijkse berekeningen)

De primaire energievraag is in dit onderzoek op uurbasis uitgerekend. Door de primaire energievraag voor elk uur te berekenen zijn op deze manier ook mogelijke vraagpieken, temperatuurafhankelijkheden of beschikbaarheid van wind, zon of flexibiliteitsmiddelen meegenomen. Om tot de primaire energievraag voor verwarming voor beide varianten te komen zijn de volgende stappen genomen:

1. Voor elk uur is de vraag naar elektriciteit en waterstof voor verwarming in de gebouwde omgeving en landbouw bepaald
2. Voor elk uur is ook het aandeel van elke drager in de productiemix van elektriciteit en waterstof bepaald
3. Door de vraag naar elektriciteit en waterstof voor verwarming per uur te vermenigvuldigen met het aandeel van elke drager in de productiemix (%) is per drager berekend hoeveel elektriciteit en waterstof er per uur mee geproduceerd is
4. Door de geproduceerde elektriciteit en waterstof per uur voor elke drager te delen door de conversieverliezen van de drager (bijvoorbeeld bij de inzet van biomassa centrales voor de productie van elektriciteit of de omzetting van elektriciteit naar waterstof) is de primaire energievraag per uur voor elke drager berekend

5. Bij waterstofproductie uit elektriciteit is daarbij rekening gehouden met conversieverliezen van de elektriciteitsmix in elk uur
6. Bij elektriciteitsproductie uit waterstof is daarbij rekening gehouden met conversieverliezen van de waterstofmix in elk uur
7. De uurlijkse primaire energievraag per drager is vervolgens opgeteld om tot de jaarlijkse primaire energievraag voor verwarming per drager te komen

*Aandachtspunten:*

- In de berekeningen van de primaire energievraag is niet de uurlijkse benutting van opslag van waterstof of elektriciteit meegenomen door de complexiteit die dit met zich meebrengt. De context scenario's (II3050 nationaal & europees) bevatten wel een grote hoeveelheid elektriciteit en waterstof opslag. Dit betekent dat de primaire energievraag hoogstwaarschijnlijk afwijkt van de daadwerkelijke primaire energievraag aangezien de berekening een versimpeling is ten opzichte van de daadwerkelijke situatie in de scenario's.

## **Verdieping op de primaire energievraag: COP-omslagpunt**

Voor hybride luchtwarmtepompen wordt in het ETM een omslagpunt gemodelleerd die bepaalt vanaf welke efficiëntie (COP) en dus welke buitentemperatuur de luchtwarmtepomp overschakelt op een HR-ketel. In alle varianten is het COP-omslagpunt constant gehouden op 2.6 (zoals deze is ingesteld in alle II3050 scenario's). Dit omslagpunt van elektriciteit naar gas is gebaseerd op de gas- en elektriciteitsprijzen uit 2019. Om te onderzoeken of er een COP-omslagpunt bestaat waarbij de primaire energievraag voor variant duurzaam gas wel lager is dan in variant elektrisch zijn de volgende stappen ondernomen:

# Quintel

1. Voor het scenario Europees — duurzaam gas zijn 6 verschillende COP-omslagpunten ingesteld (evenredig voor ruimteverwarming en heet water). Dit resulteert in 6 verschillende sub-scenario's.
2. Voor elk van de sub-scenario's is vervolgens de primaire warmtevraag bepaald volgens bovenstaande methodes.

## Directe en indirecte elektriciteitsvraag (per drager op basis van uurlijkse berekeningen)

Naast de primaire energievraag voor warmte is ook de directe en indirecte (in het geval dat er elektriciteit is omgezet naar waterstof) elektriciteitsvraag voor verwarming berekend. Dit betekent dat de efficiëntieverliezen van centrales niet zijn meegenomen maar alleen is genoteerd van welke bron de elektriciteit in dat uur afkomstig is. Hierbij zijn de volgende stappen ondernomen:

1. Voor elk uur is de vraag naar elektriciteit en waterstof voor verwarming in de gebouwde omgeving en landbouw bepaald
2. Voor elk uur is ook het aandeel van elke drager in de productiemix van elektriciteit en waterstof bepaald
3. Door de vraag naar elektriciteit voor verwarming per uur te vermenigvuldigen met het aandeel van elke drager in de productiemix is per drager berekend hoeveel elektriciteit er per uur mee

geproduceerd is: de directe elektriciteitsvraag per drager per uur

4. Door de vraag naar waterstof voor verwarming per uur te vermenigvuldigen met het aandeel van elke drager in de productiemix is per drager berekend hoeveel waterstof er per uur mee geproduceerd is
5. Door de hoeveelheid waterstof geproduceerd uit elektriciteit (door elektrolyse) te vermenigvuldigen met de productiemix van elektriciteit per uur, is de indirecte elektriciteitsvraag per drager per uur berekend
6. De uurlijkse directe en indirecte elektriciteitsvraag per drager is vervolgens opgeteld om tot de jaarlijkse directe en indirecte elektriciteitsvraag voor verwarming per drager te komen

## Uurlijkse balans van vraag en aanbod

Bij de balans van vraag en aanbod is een load duration curve opgesteld:

1. Door het inflexibele aanbod uit must-run en volatiele bronnen van de inflexibele vraag uit de vraagsectoren af te trekken ontstaat de residual load curve, waarbij positieve waarden tekorten zijn waar nog in moet worden voorzien met flexibel aanbod en negatieve waarden overschotten die kunnen worden benut door flexibele vraag
2. Door deze residual load curve te sorteren van hoog naar laag, ontstaat de load duration curve

# **2. Systemeffecten variant elektrisch en variant duurzaam gas**

Resultaten

---

# Energievraag

Allereerst is er in dit onderzoek gekeken naar de verschillen in uitkomsten van de primaire energievrage. Door deze met elkaar te vergelijken kunnen uitspraken gedaan worden over welk systeem efficiënter is. Hierbij is een additionele studie naar het COP-omslagpunt voor hybride verwarmingssystemen uitgevoerd om meer duiding te geven aan de verschillen in efficiëntie tussen een all-electric systeem en een hybride systeem.

## Primaire energievrage

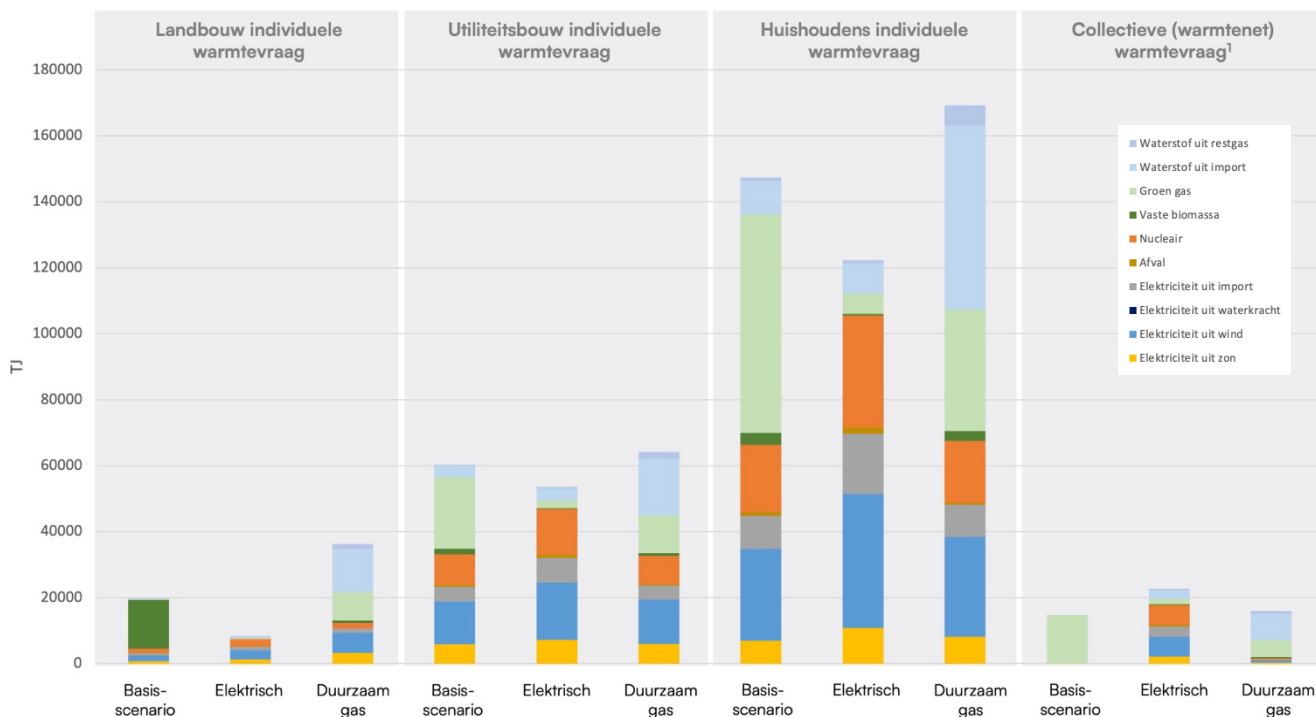
Bij uitsplitsing van de primaire energievrage is duidelijk te zien dat variant elektrisch voor zowel het Nationale als het Europese scenario efficiënter is voor zowel landbouw, utiliteitsbouw en de individuele vrage voor huishoudens. Voor collectieve verwarming van huishoudens in de varianten elektrisch is dit niet het geval omdat hier, in tegenstelling tot de andere categorieën, gebruik is gemaakt van een e-boiler in plaats van een lucht-warmtepomp of bodem-warmtepomp (zie de bijlage voor een overzicht van instellingen en parameters van technieken). De e-boiler maakt geen gebruik van omgevingswarmte (lucht of bodem) en is hierdoor minder efficiënt dan een waterstofketel. Wanneer er ook in warmtenetten gebruik wordt gemaakt van warmtepompen, zakt de primaire energievrage beneden die van de hybride variant.

In het Europese scenario is daarnaast te zien dat de totale warmtevraag hoger ligt dan die in het Nationale scenario. Dit komt omdat er in het Nationale scenario meer isolatie is toegepast en meer gebruik wordt gemaakt van collectieve verwarming. Daarnaast ligt ook de totale primaire energievrage van het basisscenario hier dicht bij de totale primaire energievrage van variant elektrisch omdat in het basisscenario ook al een groot deel van de gebouwde

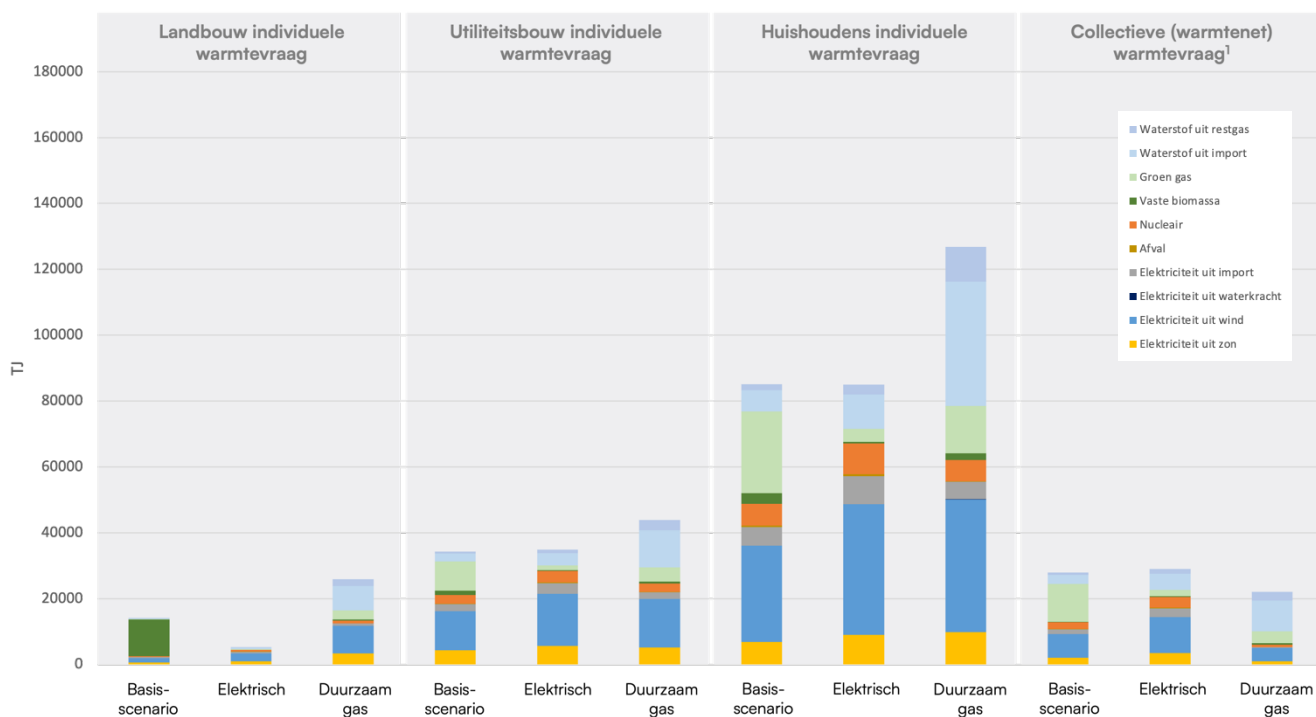
omgeving en landbouw gebruik maakt van warmtepompen. Dit is niet het geval in het Europese scenario waar het grootste deel van de gebouwde omgeving gebruik maakt van een hybride warmtepomp op waterstof.

*Aandachtspunten:*

- Er is in dit geval gebruik gemaakt van een warmtepomp met een outputtemperatuur van 45 graden, als de outputtemperatuur (bijvoorbeeld bij slecht geïsoleerde gebouwen) hoger is zal dit zorgen voor een hogere primaire energievrage ten opzichte van variant duurzaam gas doordat de efficiëntie (COP) achteruitloopt. Aangezien dit ook gedeeltelijk het geval zal zijn voor variant duurzaam gas, die ook een outputtemperatuur van 45 graden heeft, zal dit niet zorgen voor een hogere primaire energievrage dan in variant duurzaam gas.
- De COP voor lucht-warmtepompen wordt in het ETM per uur berekend op basis van de buitentemperatuur. De COP-berekening die hiervoor gebruikt wordt is vergeleken met verscheidene (S)COP-berekeningen. Hieruit is gebleken dat deze gemiddeld is. Zie figuur 13 in de bijlage voor meer informatie.
- In beide varianten is uitgegaan van een lucht-warmtepomp (in het hybride systeem in combinatie met een HR-ketel). De efficiëntie (COP) van een bodem-warmtepomp ligt een stuk hoger. Als er meer gebruik wordt gemaakt van bodem-warmtepompen in de gebouwde omgeving en landbouw zal dit de primaire energievrage van variant elektrisch sterker doen verminderen dan voor variant duurzaam gas.
- In de berekeningen van de primaire energievrage is niet de uurlijkse benutting van opslag van waterstof of elektriciteit meegenomen door de complexiteit die dit met zich meebrengt. De context scenario's (II3050 nationaal & europees) bevatten wel een grote hoeveelheid elektriciteit en waterstof opslag. Dit betekent dat de primaire energievrage hoogstwaarschijnlijk afwijkt van de daadwerkelijke primaire energievrage aangezien de berekening een versimpeling is ten opzichte van de daadwerkelijke situatie in de scenario's.



Figuur 2 — **Europees** — In deze grafieken wordt de totale primaire energievraag getoond voor zowel het basisscenario (II3050 scenario zonder aanpassingen), variant elektrisch en variant duurzaam gas. Aandachtspunten: (1) in deze grafiek wordt voor de collectieve warmtevraag (op het warmtenet) alleen primaire energievraag voor de flexibele warmtebronnen getoond, de werkelijke primaire energievraag ligt hoger (2) bij waterstof uit import zijn geen conversieverliezen in het buitenland meegenomen.



Figuur 3 — **Nationaal** — In deze grafieken wordt de totale primaire energievraag getoond voor zowel het basisscenario (II3050 scenario zonder aanpassingen), variant elektrisch en variant duurzaam gas. Aandachtspunten: (1) in deze grafiek wordt voor de collectieve warmtevraag (op het warmtenet) alleen primaire energievraag voor de flexibele warmtebronnen getoond, de werkelijke primaire energievraag ligt hoger (2) bij waterstof uit import zijn geen conversieverliezen in het buitenland meegenomen.



## Effect van het COP-omslagpunt op de primaire energievraag

In de vorige grafieken was te zien dat de totale primaire energievraag voor all-electric systemen (specifiek wanneer het gaat om een warmtepomp) lager is dan hybride systemen. Dit suggereert dat het gebruik van (all-electric) warmtepompen voordeliger is, vanuit energie-efficiëntie bekeken, dan het gebruik van hybride systemen. Een belangrijke variabele voor hybride systemen is het COP-omslagpunt.

Het COP-omslagpunt bepaalt wanneer de hybride lucht-warmtepomp overslaat van het 'all-electric' warmtepomp gedeelte naar het 'HR-ketel' gedeelte op duurzaam gas. Voor de hybride lucht-warmtepompen in beide II3050 scenario's 'Duurzaam gas' is gekozen voor een consistent omslagpunt van 2,6 COP voor ruimteverwarming (als de efficiëntie lager is dan 2,6 gaat de hybride warmtepomp over van de warmtepomp naar het HR-ketel gedeelte en maakt gebruik van duurzaam gas)<sup>4</sup>. Dit omslagpunt heeft als uitgangspunt de gemiddelde gas en elektriciteitsprijzen uit 2019, oftewel, als de efficiëntie onder een COP van 2,6 zakt is het gemiddeld duurder om elektriciteit te gebruiken dan om duurzaam gas in te zetten voor verwarming. Dit roept de vraag op of er ook een omslagpunt is waarbij het gebruik van hybride lucht-warmtepompen, in de varianten 'Duurzaam gas', wel efficiënter is (op basis van de primaire energievraag) dan het gebruik van all-electric lucht-warmtepompen, in de varianten 'Elektrisch'. Om dit te bepalen is in het Europese scenario — duurzaam gas het omslagpunt van de hybride lucht-warmtepompen gevarieerd (van 1,5 tot 4,0) en is op dezelfde manier de primaire energievraag bepaald. Als de totale primaire

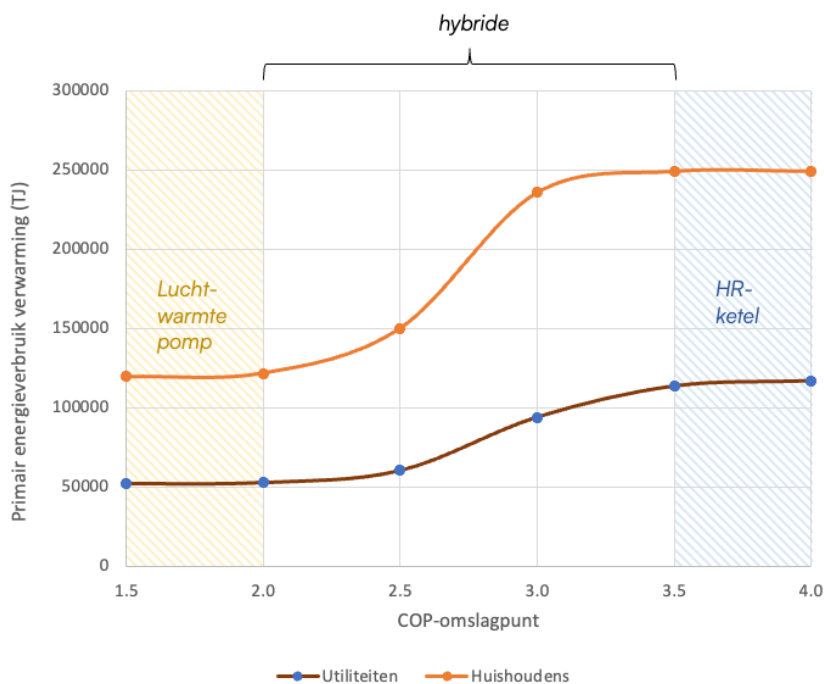
energievraag voor huishoudens daalt bij een hogere COP zou dit betekenen dat er een moment is waarop hybride systemen wel degelijk duurzamer zijn dan all-electric systemen.

In figuur 4 is de impact van de variatie in het omslagpunt op de totale primaire energievraag te zien. Hier is goed te zien dat er geen omslagpunt is voor hybride warmtepompen dat er voor zorgt dat de primaire energievraag daalt ten opzichte van een all-electric systeem. Dit is af te lezen aan het feit dat als het COP-omslagpunt lager is, en er dus vaker gebruik wordt gemaakt van het (lucht-) warmtepomp gedeelte, het primaire energiegebruik daalt. Hoe hoger het COP-omslagpunt en hoe vaker het HR-ketel gedeelte aanspringt, hoe hoger dus ook de totale primaire energievraag voor huishoudens en utiliteiten. Zo is goed te zien in figuur 4 dat bij een omslagpunt van 0-1,5 de primaire energievraag constant is omdat het HR-ketel gedeelte niet meer aanslaat (aangezien de COP eigenlijk nooit lager wordt dan 1,5 op basis van de buitentemperatuur<sup>5</sup>) en de hybride lucht-warmtepomp in feite een all-electric lucht-warmtepomp is geworden. Met andere woorden, de efficiëntie van een lucht warmtepomp is zo veel groter (ook bij koude dagen) dan de HR-ketel dat mogelijke conversieverliezen in de rest van het energiesysteem voor de productie van elektriciteit dit verschil niet meer kunnen opheffen (zie ook figuur 12 later in dit rapport). Als het COP-omslagpunt voor hybride systemen lager wordt ingesteld dan nu het geval is in de scenario's (COP-omslagpunt van 2.6) kan dit rond de 40% schelen in de primaire warmtevraag voor verwarming. (zie figuur 4).

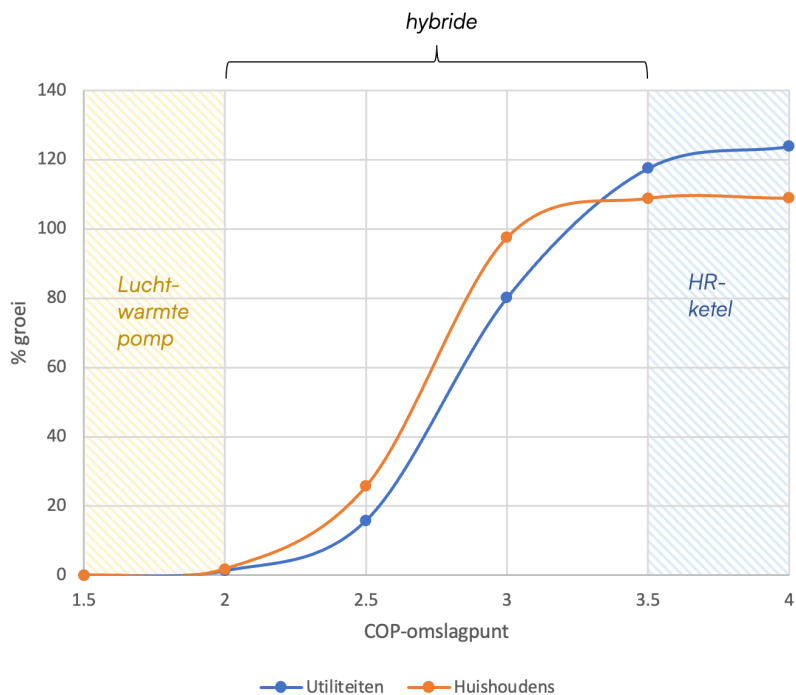
---

<sup>4</sup> Een omslagpunt van 2,6 betekent dat het warmtepomp gedeelte van een hybride systeem bij een temperatuur van rond de 5 graden omslaat naar het HR-ketel gedeelte (zie bijlage: 'Deskresearch COP' voor de grafiek die laat zien hoe de buitentemperatuur de COP van lucht-warmtepompen beïnvloed).

<sup>5</sup> Bij een COP van 1,5 is de buitentemperatuur ongeveer -10 graden Celcius (zie bijlage: 'Deskresearch COP').



Figuur 4 — Europees variant duurzaam gas — In deze grafiek wordt de primaire energievraag van de verschillende scenariovarianten met verschillende COP-omslagpunten getoond. Zowel voor utiliteiten als huishoudens neemt de primaire energievraag voor verwarmen toe als het COP-omslagpunt stijgt. Aan de linkerkant van de grafiek is de hybride lucht-warmtepomp praktisch een luchtwarmtepomp geworden omdat de COP niet onder de 1.5 — 2.0 komt. Aan de rechterkant van de grafiek is de hybride lucht-warmtepomp praktisch een HR-ketel geworden omdat de COP niet boven de 3.5 — 4.0 komt.

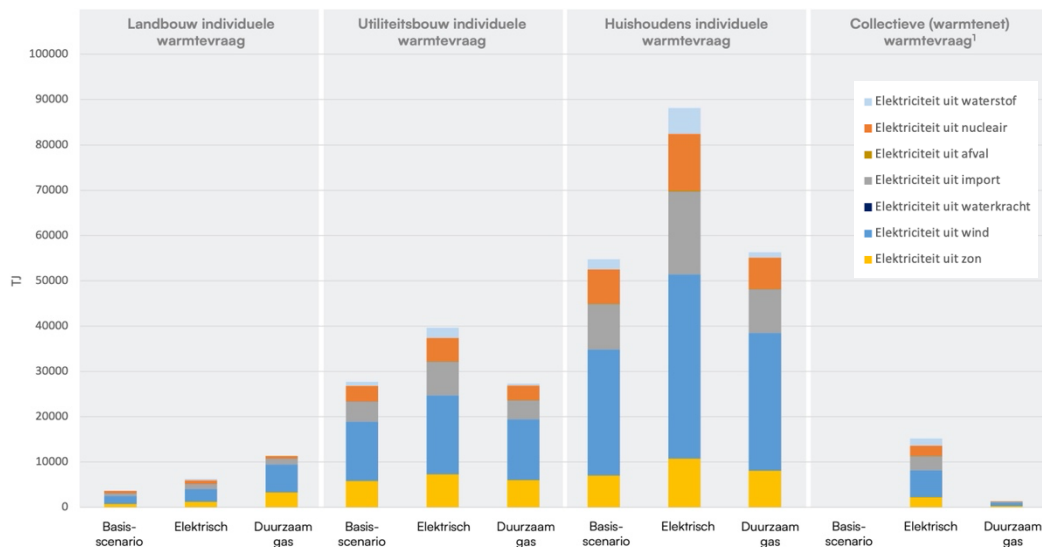


Figuur 5 — Europees variant duurzaam gas — in deze grafiek wordt de toename van de primaire energievraag ten opzichte van de totale warmtevraag met alleen een luchtwarmtepomp (bij COP-omslagpunt 1.5) getoond voor huishoudens. De primaire energievraag neemt toe tot dat punt heeft bereikt dat alleen nog het HR-ketel gedeelte aanslaat en de primaire energievraag is gestegen met ongeveer 120%. Aan de linkerkant van de grafiek is de hybride lucht-warmtepomp praktisch een luchtwarmtepomp geworden omdat de COP niet onder de 1.5 — 2.0 komt. Aan de rechterkant van de grafiek is de hybride lucht-warmtepomp praktisch een HR-ketel geworden omdat de COP niet boven de 3.5 — 4.0 komt.

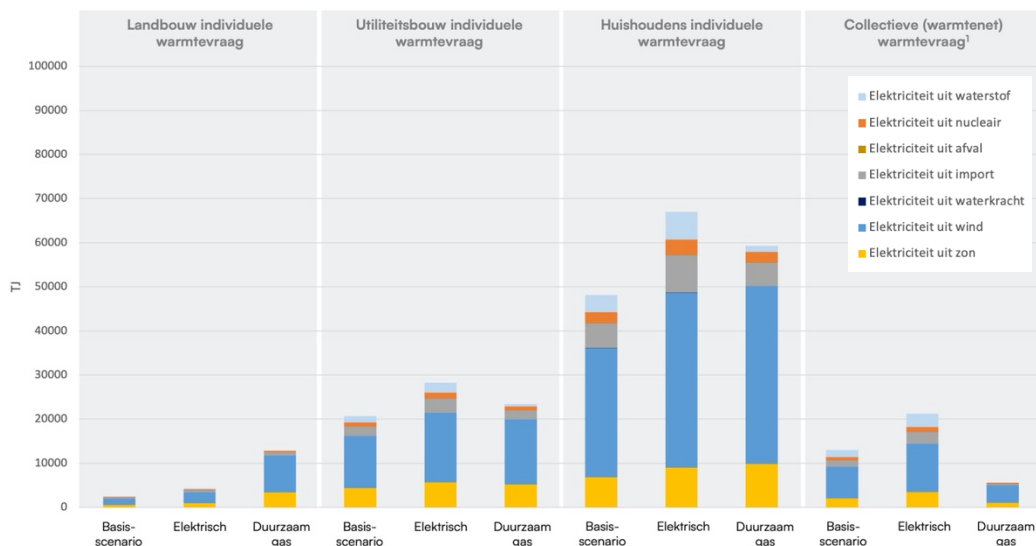
## Directe & indirecte elektriciteitsvraag

Naast de primaire energievraag is ook gekeken naar de verschillen in de totale directe & indirecte elektriciteitsvraag voor variant elektrisch en variant duurzaam gas. In onderstaande grafiek is te zien dat variant elektrisch een hogere elektriciteitsvraag heeft dan variant duurzaam gas met uitzondering van de landbouw. Dit valt te verwachten aangezien het hybride systeem vaker overschakelt naar het HR-ketel

gedeelte op waterstof voor individuele verwarming en op een waterstofketel voor collectieve verwarming. Wat in zowel het Europese en nationale scenario te zien is, is dat variant elektrisch meer gebruik maakt van elektriciteit uit import, nucleair of waterstofcentrales. Dit suggereert dat er vaker pieken ontstaan in variant elektrisch die moeten worden opgevangen door (flexibele) centrales en flexibiliteit middelen zoals het importeren van stroom uit het buitenland.



Figuur 6 — Europees — In deze grafiek wordt de totale directe en indirecte elektriciteitsvraag getoond naar aanleiding van de warmtebehoefte in de gebouwde omgeving en landbouw. De directe vraag is gebaseerd op de elektriciteitsvraag voor verwarming in beide varianten, de indirecte vraag refereert naar de elektriciteit die nodig is om waterstof te produceren voor variant duurzaam gas.



Figuur 7 — Nationaal — In deze grafiek wordt de totale directe en indirecte elektriciteitsvraag getoond naar aanleiding van de warmtebehoefte in de gebouwde omgeving en landbouw. De directe vraag is gebaseerd op de elektriciteitsvraag voor verwarming in beide varianten, de indirecte vraag refereert naar de elektriciteit die nodig is om waterstof te produceren voor variant duurzaam gas.

# Balans en tekorten op het elektriciteitsnet

Ondank dat variant elektrisch een lagere primaire energievraag heeft dan variant duurzaam gas betekent dit niet direct dat variant elektrisch ook optimaler is vanuit systeem perspectief. Variant elektrisch kan nog steeds suboptimaal zijn aan variant duurzaam gas als gebruik van voornamelijk all-electric systemen zorgen voor hoge pieken in het elektriciteit systeem. Dit zou betekenen dat ondanks de winst die gemaakt wordt in de primaire energievraag, er alsnog grote investeringen gedaan moeten worden in het elektriciteitsnet, (back-up) elektriciteitsproductie en flexibiliteit middelen. Om die reden is in dit onderzoek ook verder ingezoomd op de balans tussen vraag en aanbod en de mogelijke tekorten die ontstaan.

## Balans in vraag en aanbod

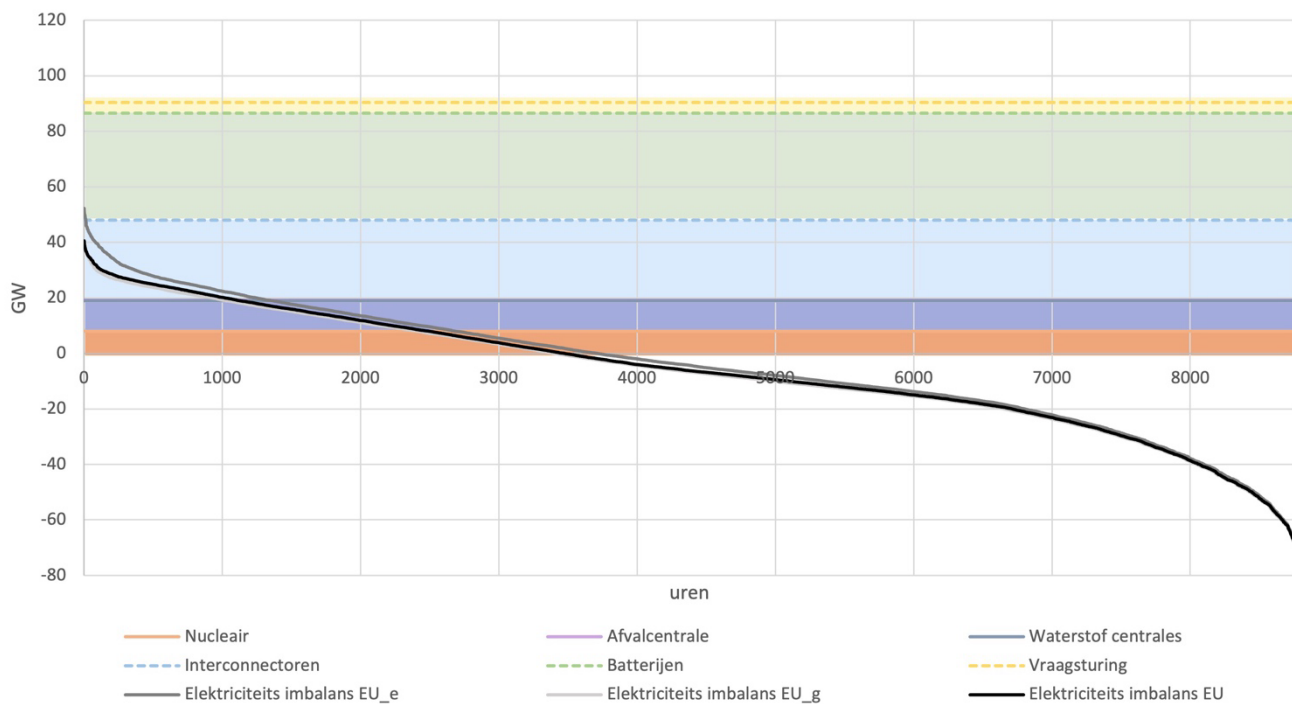
In de balans tussen vraag en aanbod wordt ervan uitgegaan dat de warmtevraag in de gebouwde omgeving en landbouw altijd moet worden ingevuld met het beschikbare aanbod. In zowel het Nationale als het Europese scenario wordt gebruik gemaakt van een deel flexibel vermogen (waterstofcentrales en nucleaire centrales) en een groot vermogen aan inflexibel vermogen (import, batterijen, vraagsturing, etc.). Zowel in variant elektrisch als in variant duurzaam gas is te zien dat de vraag naar elektriciteit voor verwarming tussen de 1000 uur en 1500 uur uitkomt boven het totale opgesteld flexibele vermogen. Er wordt dus in alle varianten en scenario's veel gebruik gemaakt van inflexibel vermogen. Daarentegen is wel te zien dat in variant elektrisch meer uren zijn met een hogere vraag naar elektriciteit, oftewel sprake is van een grotere en langere piekvraag. Zolang de zon op het juiste moment schijnt, de wind op het juiste

moment waait of flexibele middelen zoals batterijen of vraagsturing beschikbaar zijn, en er genoeg vermogen aan infrastructuur aanwezig is, is dit geen probleem. In het geval van variant elektrisch zien we dat in beide scenario's uren zijn waarin dit niet het geval is en een tekort optreedt. Dit komt grotendeels omdat de scenario's zijn ingesteld op een ander vraagprofiel maar dit betekent wel dat er voor variant elektrisch een groter vermogen elektriciteitsproductie of flexibiliteit middelen ingezet moet worden om te garanderen dat de vraag ingevuld kan worden.

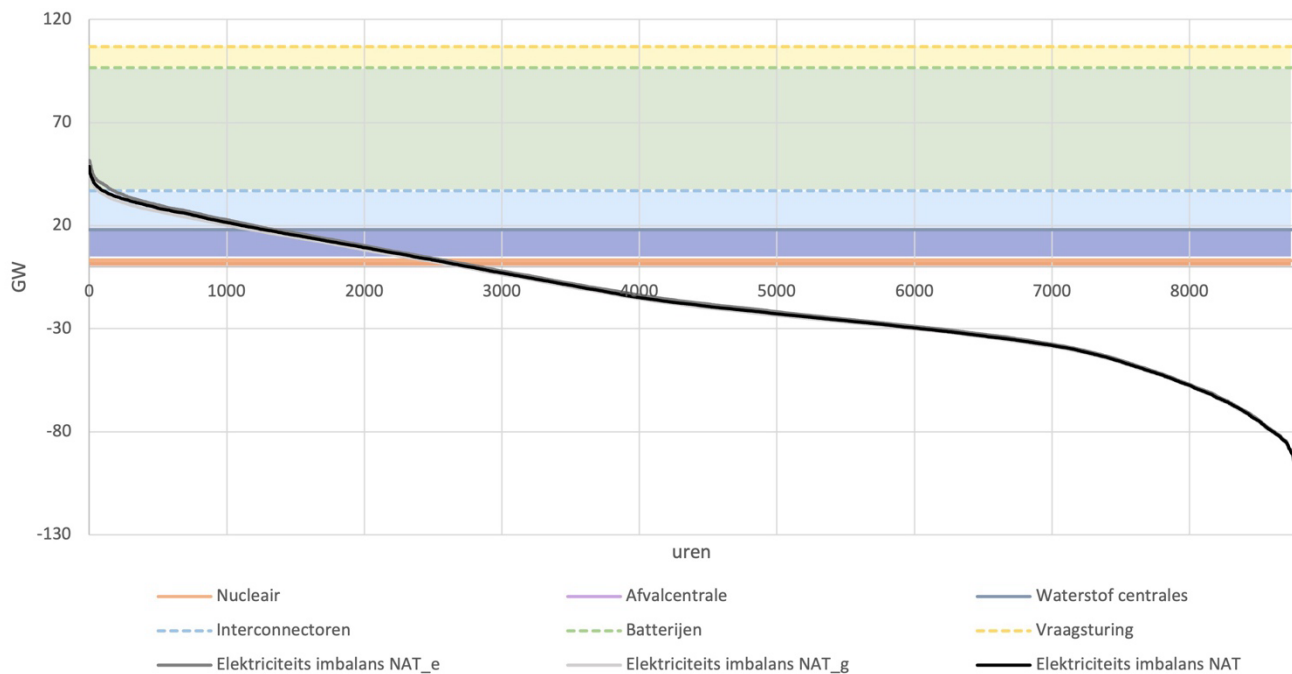
In het Europese scenario is bij variant elektrisch te zien dat er grotere pieken optreden. Bij het Nationale scenario zijn deze pieken veel kleiner. Dit komt door de relatief kleinere warmtevraag in het Nationale scenario door de toepassing van meer isolatie en ook de inzet van meer collectieve verwarmingsmiddelen die meer gebruik maken van bijvoorbeeld restwarmte.

### *Aandachtspunten:*

- In het Nationale en Europese scenario is veel tijd besteed aan het balanceren van de elektriciteit vraag en aanbod. In dit onderzoek is hier geen tijd aan besteed omdat alleen is gekeken naar de verschillen tussen de varianten en daaruit conclusies zijn getrokken en geen onderzoek is gedaan naar realistische uitkomsten en mogelijkheden.
- In dit onderzoek is alleen gekeken naar luchtwarmtepompen zonder enige vorm van seizoensopslag van warmte. Als bodemwarmtepompen worden ingezet of als er gebruik wordt gemaakt van seizoensopslag van warmte zullen er significant minder pieken optreden.



Figuur 8 — Europees — Load duration curve voor het basisscenario (EU), variant elektrisch (EU\_e) en variant duurzaam gas (EU\_g) met een representatie van het totaal opgesteld vermogen aan elektriciteit productie- en flexibiliteitsmiddelen.



Figuur 9 — Nationaal — Load duration curve voor het basisscenario (NAT), variant elektrisch (NAT\_e) en variant duurzaam gas (NAT\_g) met een representatie van het totaal opgesteld vermogen aan elektriciteit productie- en flexibiliteitsmiddelen.

Sector	Technologie	EUR - Basisscenario	EUR - Variant elektrisch	EUR - Duurzaam gas
Waterstofturbine	Vollasturen	698	805	665
	Beschikbaar vermogen	8100	8100	8100
	Maximaal geleverd vermogen	8100	8100	8100
Waterstofcentrale (STEG)	Vollasturen	1450	1550	1398
	Beschikbaar vermogen	1800	1800	1800
	Maximaal geleverd vermogen	1800	1800	1800

Tabel 1 — **Europees** — Inzet van regelbare waterstof centrales. Het beschikbaar vermogen is berekend door het opgesteld outputvermogen te vermenigvuldigen met de beschikbaarheid van de centrale.

Sector	Technologie	NAT - Basisscenario	NAT - Variant elektrisch	NAT - Duurzaam gas
Waterstofturbine	Vollasturen	847	917	778
	Opgesteld vermogen	10800	10800	10800
	Maximaal geleverd vermogen	10800	10800	10800
Waterstofcentrale (STEG)	Vollasturen	1950	1561	1427
	Beschikbaar vermogen	2700	2700	2700
	Maximaal geleverd vermogen	2700	2700	2700

Tabel 2 — **Nationaal** — Inzet van regelbare waterstof centrales. Het beschikbaar vermogen is berekend door het opgesteld outputvermogen te vermenigvuldigen met de beschikbaarheid van de centrale.

## Tekorten

Om meer duiding te geven welke mechanismen voornamelijk verantwoordelijk kunnen zijn voor mogelijke tekorten en de grootte van de tekorten in alle varianten, is in onderstaande grafieken de grootte van de tekorten en het tijdstip van tekorten gedurende de dag geplot. Hierin is te zien dat voor beide scenario's variant elektrisch significante tekorten optreden in vergelijking met variant duurzaam gas. In variant duurzaam gas treden geen tot minimale hoeveelheden tekorten op. Ook dit laat zien dat er bij de inzet van grote hoeveelheden luchtwarmtepompen in de gebouwde omgeving en landbouw ook een grotere behoefte is aan elektriciteitsproductie en flexibiliteit middelen. Dit kan oplopen tot rond de 14000 MW vermogenstekort in het Europese scenario. Dit is bijna gelijk aan de totale hoeveelheid regelbaar vermogen (waterstofcentrales en nucleaire centrales) dat in het Nationale scenario staan opgesteld en is dus significant.

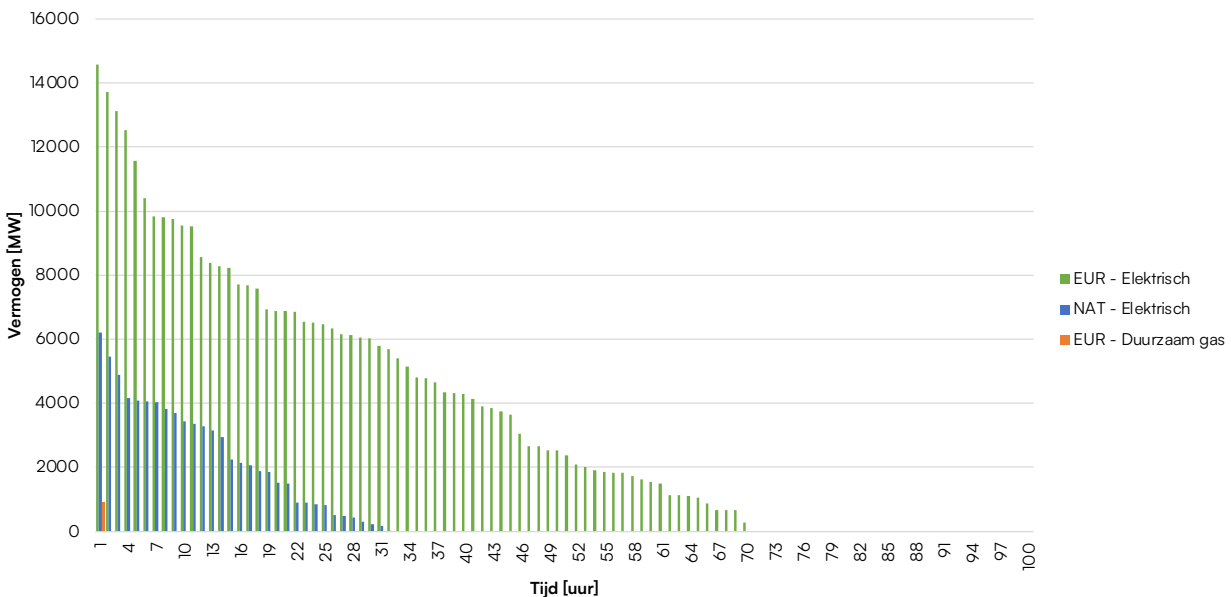
Zoals is te zien in de verdeling van deze tekorten over de dag treden er alleen tekorten op gedurende de ochtend of avond. Hierbij kan worden aangenomen

dat dit voornamelijk komt door de afwezigheid van zonne-energie in de uren dat er wel een verwarmingsvraag aanwezig is. Dit suggereert dat het niet effectief is om meer zonne-energie in te zetten om in de elektriciteit vraag voor verwarming te voorzien.

*Aandachtspunten:*

- De significante tekorten die, vooral in scenario Europees, optreden voor variant elektrisch komen omdat de scenario's in dit onderzoek niet in balans zijn gebracht. In het I13050 scenario Europees wordt bijvoorbeeld uitgegaan van een hogere waterstofvraag dan elektriciteitsvraag (bijvoorbeeld door de opstelling van een groter aantal hybride warmtepompen op waterstof) waardoor een significant hogere elektriciteitsvraag in variant elektrisch ook leidt tot een significante hoeveelheid tekorten. In het I13050 scenario Nationaal wordt al uitgegaan van een hogere elektriciteit vraag door de opstelling van meer lucht-warmtepompen voor verwarming wat zorgt voor relatief minder hoge tekorten (onder andere door de opstelling van meer vermogen wind en zon).

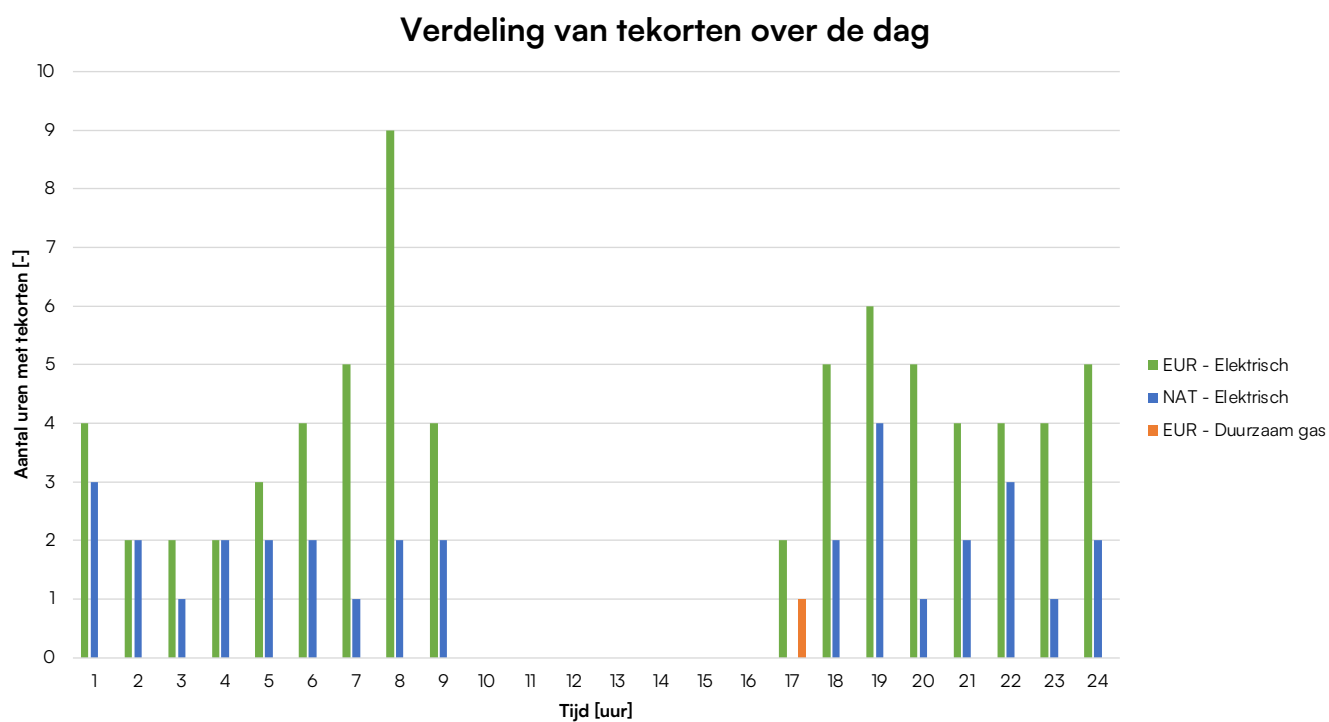
### Grootte van tekorten gesorteerd



Figuur 10 — Grootte van de tekorten per scenario & variant gesorteerd van groot naar klein. In het Europese scenario variant elektrisch is een maximaal vermogenstekort van rond de 14000 MW, dit is ongeveer 15% van het totaal opgesteld vermogen aan elektriciteitsproductie en flexibiliteit middelen.

Variabele	Eenheid	EUR - Basisscenario	EUR - Variant elektrisch	EUR - Variant duurzaam gas	NAT - Basisscenario	NAT - Variant elektrisch	NAT - Variant duurzaam gas
Aantal uren met tekorten	uur	0	70	1	0	32	0
Maximale uurlijkse totale elektriciteitsvraag	GW	100	108	100	121	124	121
Maximale uurlijkse tekorten	GW	0	15	1	0	6	0
Volume jaarlijkse totale elektriciteitsvraag	GWh	470895	478208	469711	557539	561909	555128
Volume jaarlijkse tekorten	GWh	0	368	1	0	75	0

Tabel 3 — Overzicht van de grootte van tekorten per scenario en variant.



Figuur 11 — Verdeling van alle uren met tekorten over de dag voor alle scenario's en varianten. De tekorten ontstaan met name wanneer de zon niet schijnt.



# 3. Een optimaal energiesysteem

Conclusie en discussie

---

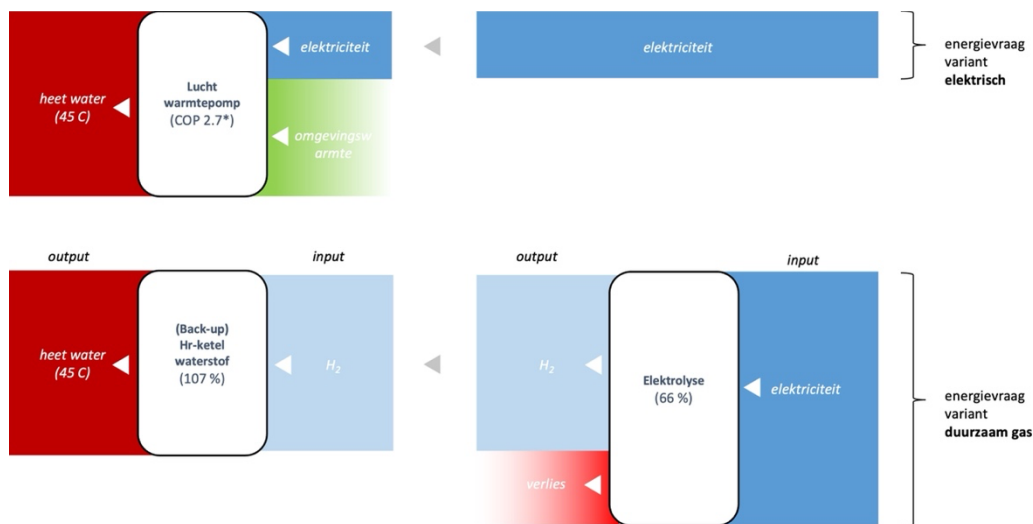
# Conclusies

Elektrisch verwarmen met een warmtepomp in de gebouwde omgeving en landbouw is vanuit systeem perspectief efficiënter als het gaat om het primaire energiegebruik. Tegelijkertijd kunnen warmtepompen, voornamelijk luchtwarmtepompen, zorgen voor grotere pieken op het elektriciteitsnet.

Elektrisch verwarmen met een warmtepomp zorgt voor een vermindering van de totale energievraag en daarbij een vermindering van de grondstoffen die nodig zijn om te voorzien in de warmtevraag (exclusief de grondstoffen die nodig zijn om te voorzien in de infrastructuur, productie of flexibiliteit middelen). Dit komt voornamelijk door het gebruik van omgevingswarmte die, ook op koude dagen, zorgt voor een hoge efficiëntie. Daarnaast zorgen grote hoeveelheden wind en zon voor een zeer efficiënte manier van elektriciteitsproductie. Bij een grote hoeveelheid hybride luchtwarmtepompen is de inzet van het HR-ketel gedeelte in verhouding minder efficiënt omdat hier geen gebruik wordt gemaakt van omgevingswarmte. Daarnaast is bij gebruik van waterstof als duurzaam gas ook nog conversieverlies aanwezig bij de omzetting van elektriciteit of gas naar waterstof. Als er groen gas gebruikt wordt hoeft hier in theorie geen omzettingsverlies aan te pas te komen. Nog steeds zou in dat geval een verwarmingssysteem met

warmtepompen, en dus omgevingswarmte, hoogstwaarschijnlijk efficiënter zijn door de hogere efficiëntie van warmtepompen in combinatie met veel vermogen aan wind en zon. Deze conclusie geldt niet voor de (collectieve) e-boiler die geen gebruik maakt van omgevingswarmte en hierdoor een enorm efficiëntie verlies maakt. Bij het gebruik van een e-boiler om de piekvraag in te vullen is er daarom wel degelijk een hogere primaire energievraag dan wanneer er gebruik wordt gemaakt van een waterstofketel.

Ondanks dat variant elektrisch in beide scenario's een lagere primaire energievraag heeft, heeft variant elektrisch in beide gevallen een hogere (piek)vraag naar elektriciteit. Dit betekent dat er meer behoefte is aan bijvoorbeeld infrastructuur, productiemethoden of flexibiliteit middelen om te zorgen dat er op het juiste moment voldoende elektriciteit aanwezig is om in de totale vraag te voorzien in verhouding tot variant duurzaam gas. In dit geval is het hoogstwaarschijnlijk minder nuttig om alleen extra zon-pv neer te zetten gezien de tekorten die vooral in de nacht ontstaan wanneer de zon niet schijnt. In combinatie met opslag of door gebruik van (andere) flexibiliteitsmiddelen en elektriciteitsproductie kunnen tekorten eventueel worden voorkomen.



Figuur 12 — Gebruik van de luchtwarmtepomp heeft een hogere primaire efficiëntie ten opzichte van een hybride warmtepomp op waterstof (en waarschijnlijk ook op groen gas) door de relatief hoge efficiëntie van de luchtwarmtepomp, zelfs in de winter (bij een temperatuur van 5 graden is de COP rond de 2.7 zoals getoond in dit figuur). Dit verschil wordt in het geval van waterstof verergerd door conversieverliezen eerder in de keten (bijvoorbeeld bij elektrolyse). Conversieverliezen bij elektriciteit productie voor warmtepieken, helemaal in het geval van zon en wind, zullen dit verschil niet kunnen uitwissen.

# Discussie

In dit onderzoek is een eerste aanzet gedaan om te verkennen welke systeemeffecten belangrijk zijn in de afweging tussen verschillende verwarmingstechnieken. Het doel van dit onderzoek was om inzicht te generen welk verwarmingssysteem beter past bij een optimaal energiesysteem waarin duurzaamheid, efficiëntie en robuustheid centraal staan. Hierbij is specifiek gekeken naar de primaire energievraag en de impact op het elektriciteitssysteem door implementatie van een all-electric oplossing of hybride variant met duurzaam gas. Om een volledig beeld te krijgen van de belangrijkste systeemeffecten voor de optimale inrichting van het toekomstig energiesysteem met betrekking tot verwarming is verder onderzoek nodig. Interessante onderzoeksrichtingen hierin zijn de balans in vraag en aanbod van duurzaam gas (waterstof of groen gas), het gebruik van andere verwarmingstechnieken (eventueel inclusief seizoensopslag) en het maken van variaties op de context scenario's (weerjaren, importcurves, isolatie, etc.).

In dit onderzoek is gekeken naar de uitkomsten van twee extreme varianten van verwarming in de gebouwde omgeving en landbouw binnen twee verschillende (I13050) contextscenario's. Ondanks dat de uitkomsten inzicht geven in de mogelijke effecten van all-electric of hybride verwarming, blijft dit een beperkte blik op de werkelijkheid. Zo zijn er een aantal aspecten die een grote invloed kunnen hebben op de duurzaamheid, efficiëntie en robuustheid van het toekomstige energiesysteem onderbelicht.

Allereerst is er voornamelijk ingezoomd op de systeemeffecten in de balans tussen vraag en aanbod van elektriciteit. De balans in **vraag en aanbod van duurzaam gas** (waterstof of groen gas) is hier niet

verder onderzocht. Ook hier kunnen tekorten optreden en daarnaast is groen gas maar in beperkte hoeveelheid aanwezig.

Ten tweede is er aan de vraagzijde de luchtwarmtepomp en de hybride luchtwarmtepomp op waterstof als uitgangspunt genomen. Vanuit de primaire energievraag geredeneerd zijn beide systemen in verhouding tot andere systemen relatief inefficiënt. Zo zal een **bodemwarmtepomp** of systeem waarbij **seizoensopslag** is meegenomen velen malen efficiënter zijn en dus in verhouding tot een hybride systeem (in de uren dat de HR-ketel aanspringt) van een veel lagere primaire energievraag genieten. Daarentegen is een **hybride luchtwarmtepomp op groen gas** ook efficiënter dan een hybride warmtepomp op waterstof vanwege de conversieverliezen die bij waterstof ontstaan (bijvoorbeeld door elektrolyse).

Ten derde is in dit onderzoek gebruik gemaakt van de I13050 scenario's die maar een paar van de velen mogelijke manieren schetst over de inrichting van het toekomstige energiesysteem. In de verandering van het COP-omslagpunt was al goed te zien dat het aanpassen van één aspect in het energiesysteem een groot verschil kan maken in de uiteindelijke uitkomsten. Interessante aspecten om te variëren zijn bijvoorbeeld de gebruikte **weerpatronen** en **importprofielen** (andere weerpatronen en importprofielen kunnen meer of minder tekorten veroorzaken), de hoeveelheid **isolatie** (hierdoor kunnen bijvoorbeeld pieken gematigder worden en wordt variant elektrisch hoogstwaarschijnlijk aantrekkelijker) of andere **productie- of flexibiliteitsmiddelen** (die eventuele pieken beter kunnen opvangen of kunnen voorzien in voldoende groen gas).

# Bijlagen

---

# Scenariosamenstelling

## Europees variant elektrisch & Europees variant duurzaam gas

Sector	EUR - Basis	EUR - Variant elektrisch	EUR - Variant duurzaam gas
<b>Finale warmtevraag</b>	<b>583</b>	<b>581</b>	<b>579</b>
Huishoudens*	267	267	264
Utiliteitsbouw*	128	129	127
Landbouw*	60	56	59
Warmtenet**	129	128	129
<b>Finale warmtevraag elektriciteit</b>	<b>124</b>	<b>188</b>	<b>112</b>
Huishoudens	53	88	42
Utiliteitsbouw	27	40	25
Landbouw	4	6	6
Warmtenet	40	54	40
<b>Finale warmtevraag waterstof</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>112</b>
Huishoudens	11	0	97
Utiliteitsbouw	0	0	0
Landbouw	0	0	0
Warmtenet	0	0	15

Tabel 4 - Finale warmtevraag (inclusief heet water); \* inclusief vraag warmtenet; \*\* inclusief transportverliezen

Sector	Technologie	EUR - Variant elektrisch	EUR - Variant duurzaam gas
Huishoudens	Luchtwarmtepomp <sup>1</sup>	85.0%	-
	Hybride luchtwarmtepomp (waterstof)	-	85.0%
	Warmtenet (collectieve warmtevraag)	15.0%	15.0%
Utiliteitsbouw	Luchtwarmtepomp <sup>1</sup>	85.0%	-
	Hybride luchtwarmtepomp (waterstof)	-	85.0%
	Warmtenet (collectieve warmtevraag)	15.0%	15.0%
Landbouw	Water warmtepomp	50.0%	-
	Waterstofketel	-	50.0%
	Warmtenet (collectieve warmtevraag)	50.0%	50.0%
	Hybride power-to-heat boiler	-	2000 MW

Tabel 5 - Europees — Scenario input voor variant elektrisch en variant duurzaam gas

Sector	Technologie	EUR - Variant elektrisch	EUR - Variant duurzaam gas
Warmtenet (collectieve (warmtevraag)	Regelbare bronnen		
	Collectieve water warmtepomp		-
	Waterstofketel	-	7000 MW
	E- boiler	7000 MW	
	Niet-regelbare bronnen		
	Geothermie	1450 MW	1450 MW
	Restwarmte industrie	21 PJ	21 PJ
	Power-to-heat boiler	3000 MW	3000 MW
	Power-to-heat warmtepomp	2000 MW	2000 MW

Tabel 6 — Europees — Scenario-input voor de warmtevoorziening van het warmtenet

## Nationaal variant elektrisch & Nationaal variant duurzaam gas

Sector	NAT - Basis	NAT - Variant elektrisch	NAT - Variant duurzaam gas
<b>Finale warmtevraag</b>	<b>626</b>	<b>623</b>	<b>620</b>
Huishoudens*	249	249	247
Utiliteitsbouw*	113	114	112
Landbouw*	59	56	58
Warmtenet**	204	204	204
<b>Finale warmtevraag elektriciteit</b>	<b>162</b>	<b>198</b>	<b>129</b>
Huishoudens	48	67	31
Utiliteitsbouw	21	28	18
Landbouw	2	4	4
Warmtenet	90	99	77
<b>Finale warmtevraag waterstof</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>97</b>
Huishoudens	0	0	75
Utiliteitsbouw	0	0	0
Landbouw	0	0	0
Warmtenet	0	0	22



Sector	Technologie	NAT - Variant elektrisch	NAT - Variant duurzaam gas
Huishoudens	Luchtwarmtepomp <sup>1</sup>	70.0%	-
	Hybride luchtwarmtepomp (waterstof)	-	70.0%
	Warmtenet (collectieve warmtevraag)	30.0%	30.0%
Utiliteitsbouw	Luchtwarmtepomp <sup>1</sup>	70.0%	-
	Hybride luchtwarmtepomp (waterstof)	-	70.0%
	Warmtenet (collectieve warmtevraag)	30.0%	30.0%
Landbouw	Water warmtepomp	35.0%	-
	Waterstofketel	-	35.0%
	Warmtenet (collectieve warmtevraag)	65.0%	65.0%
	Hybride power-to-heat boiler	-	2000 MW

Tabel 7 – **Nationaal** – Scenario input voor variant elektrisch en variant duurzaam gas

Sector	Technologie	NAT - Variant elektrisch	NAT - Variant duurzaam gas
Warmtenet (collectieve warmtevraag)	Regelbare bronnen		
	E-boiler	7000 MW	-
	Waterstofketel	-	7000 MW
	Niet-regelbare bronnen		
	Geothermie	2300 MW	2300 MW
	Restwarmte industrie	20 PJ	20 PJ
	Power-to-heat boiler	3000 MW	3000 MW
	Power-to-heat warmtepomp	2000 MW	2000 MW

Tabel 8 - **Nationaal** — Scenario-input voor de warmtevoorziening van het warmtenet

# Resultaten

## Europees variant elektrisch & Europees variant duurzaam gas

Variabele	Eenheid	EUR - Basisscenario	EUR - Variant elektrisch	EUR - Variant duurzaam gas
<b>Primaire energievraag verwarming*</b>				
Woningen	PJ	147	122	169
Utiliteiten	PJ	60	54	64
Landbouw	PJ	20	8	36
Warmtenet**	PJ	15	23	16
<b>Indirecte / directe energievraag verwarming - elektriciteit</b>				
Woningen	PJ	55	88	56
Utiliteiten	PJ	28	40	27
Landbouw	PJ	4	6	11
Warmtenet**	PJ	0	15	1
<b>Elektriciteitsoverschotten</b>	<b>PJ</b>	<b>958.000</b>	<b>1.072.249</b>	<b>919.634</b>
<b>Benodigd piekvermogen totaal**</b>	<b>GW</b>	<b>49</b>	<b>52</b>	<b>49</b>

Tabel 9 - Additionele gegevens resultaten ; \* exclusief omgevingswarmte \*\* warmtenet betreft alleen de flexibele vraag; \*\*\* voor het totale scenario

## Nationaal variant elektrisch & Nationaal variant duurzaam gas

Variabele	Eenheid	NAT - Basisscenario	NAT - Variant elektrisch	NAT - Variant duurzaam gas
<b>Primaire energievraag verwarming*</b>				
Woningen	PJ	85	85	127
Utiliteiten	PJ	34	35	44
Landbouw	PJ	14	5	26
Warmtenet**	PJ	44	29	22
<b>Indirecte / directe energievraag verwarming - elektriciteit</b>				
Woningen	PJ	48	67	59
Utiliteiten	PJ	21	28	23
Landbouw	PJ	2	4	13
Warmtenet**	PJ	13	21	6
<b>Elektriciteitsoverschotten</b>	PJ	1.043.225	1.104.454	978.110
<b>Benodigd piekvermogen totaal***</b>	GW	49	52	49

Tabel 10 — Additionele gegevens resultaten ; \* exclusief omgevingswarmte \*\* warmtenet betreft alleen de flexibele vraag; \*\*\* voor het totale scenario

# Parameters warmtetechnologie

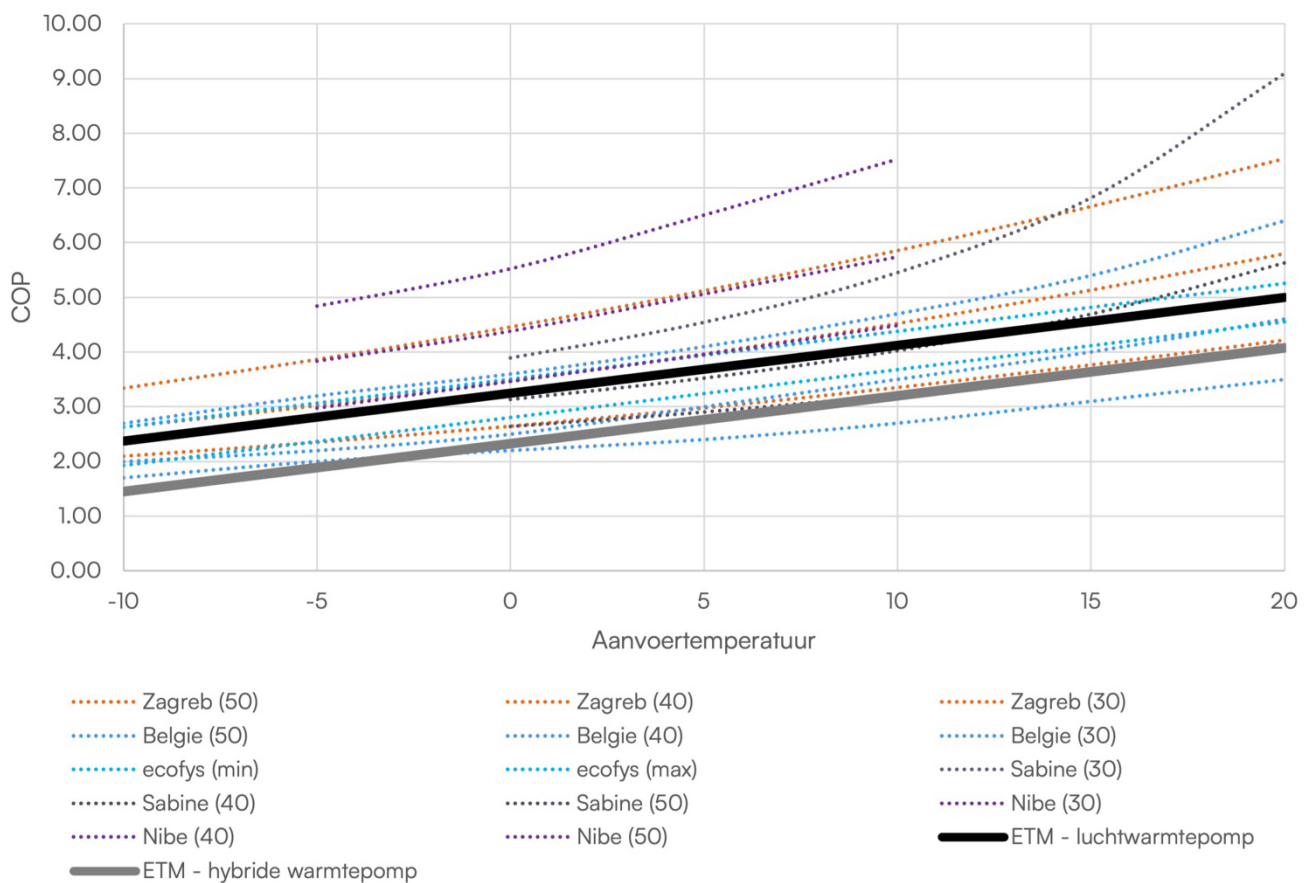
In het ETM wordt de COP van warmtepompen uurlijks bepaald op basis van de aanvoertemperatuur voor verwarming en heet water. De aanvoertemperatuur wordt (voor luchtwarmtepompen) bepaald door de uurlijkse weersomstandigheden. Voor luchtwarmtepompen is de formule voor bepaling van de COP voor verwarming als volgt:  $3.25 + 0.0875 * T$ . Voor hybride warmtepompen wordt uitgegaan van een lagere COP:  $2.323 + 0.0578 * T$ . Voor een zuivere vergelijking is de efficiëntie van de luchtwarmtepomp gelijkgetrokken met het luchtwarmtepomp gedeelte van de hybride warmtepomp. Zie hier de documentatie van de COP van warmtepompen in het ETM: <https://docs.energytransitionmodel.com/main/heat-pumps>.

## Efficiëntie gebruikte technologieën:

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| ▪ Water-warmtepomp landbouw      | 4.5  |
| ▪ Lucht-warmtepomp               | <i>uurlijks bepaald (afhankelijk van scenario), rond de 3.6 SCOP</i> |
| ▪ Hybride warmtepomp (waterstof) | <i>uurlijks bepaald (afhankelijk van scenario), rond de 4.5 SCOP</i> |
| ▪ E-boiler warmtenet             | 100% (LHV)   |
| ▪ Waterstofketel                 | 110% (LHV)   |
| ▪ P2H boiler                     | 100% (LHV)   |

# Deskresearch COP

Om zeker te weten dat de efficiëntie die gehanteerd worden voor de luchtwarmtepomp in deze studie overeenkomen met ander wetenschappelijk onderzoek over de efficiëntie van luchtwarmtepompen is een korte deskresearch gedaan. Hieruit is gebleken dat de huidige berekening van de COP op basis van de aanvoertemperatuur voor de luchtwarmtepomp in het ETM is redelijk gemiddeld is in verhouding tot andere studies. De huidige berekening van de COP op basis van de aanvoertemperatuur voor de hybride warmtepomp is laag. In deze studie is de COP van de hybride warmtepomp overgenomen voor de luchtwarmtepomp.



Figuur 13 — COP van de luchtwarmtepomp en hybride luchtwarmtepomp in het ETM in verhouding tot andere studies. De uitvoertemperatuur voor de luchtwarmtepomp is achter elk onderzoek genoteerd. Voor de hybride luchtwarmtepomp in het ETM is dit 45 graden, voor de luchtwarmtepomp in het ETM is dit 35 graden.

# Modellering in het Energietransitiemodel

## Modellering van de warmtevraag in het ETM:

- Individuele warmtevraag wordt op uurbasis berekend en ingevuld aan de hand van de gekozen warmtevoorziening
- Hybride warmtepomp voor huishoudens en utiliteitsbouw is temperatuur-gestuurd: de COP van de warmtepomp is afhankelijk van de buitentemperatuur, als de COP te laag wordt, gaat de waterstofketel aan
- Hybride boiler voor de landbouw is prijsgestuurd: als de elektriciteitsprijs in een bepaald uur hoger is dan de betalingsbereidheid (willingness to pay), dan gaat de boiler over van elektriciteit naar waterstof
- Dit betekent dat voor de hybride boiler in de landbouw, mits de betalingsbereidheid juist gekozen is, er per definitie geen elektriciteit wordt geconsumeerd ten tijde van piekvraag
- Voor de hybride warmtepomp voor huishoudens en utiliteitsbouw is dat niet per definitie het geval
- Collectieve warmtevraag wordt samengesteld door het deel van de warmtevraag uit de vraagsectoren dat op warmtenetten is aangesloten
- Warmtenetten worden als een 'koperen plaat' gezien: alle vraag wordt op één hoop gegooid, zonder geografische uitsplitsing
- Eerst wordt niet-regelbaar aanbod ingezet om op uurbasis in de collectieve warmtevraag te voorzien
- Vervolgens wordt het regelbare aanbod ingezet om in de resterende vraag de voorzien: dit gaat met name om de piekvraag
- Seizoensopslag is opgesteld in het scenario en fungeert ook als een vorm van regelbaar aanbod

**Documentatie over berekening warmtevraag:** <https://docs.energytransitionmodel.com/contrib/fever>

**Documentatie over hybride warmtepomp (temperatuur-gestuurd):**

<https://docs.energytransitionmodel.com/main/heat-pumps#hybrid-heat-pumps>

**Documentatie over hybride boiler (prijsgestuurd):** <https://docs.energytransitionmodel.com/main/electricity-conversion#power-to-heat>

**Documentatie over warmtenetten:** <https://docs.energytransitionmodel.com/main/heat-networks/>

## Modellering van flexibiliteit in het ETM:

- Voor interconnectoren geldt dat er een enkele prijs is, de prijs in het buitenland, die gelijktijdig als marginale kosten en betalingsbereidheid fungeert
- Voor vraagsturing in de industrie is er een minimale prijs die ze bereid zijn te ontvangen om productie af te verlagen
- Voor batterijen geldt dat er een prognose-algoritme wordt ingezet, waardoor de batterijen niet meer prijsgestuurd zijn, maar verschillen tussen pieken en dalen in de residual load curve slim proberen te benutten

Documentatie over (in)flexibiliteit: <https://docs.energytransitionmodel.com/main/flexibility#definitions-of-flexible-and-inflexible-supply-and-demand>

Documentatie over de balans van vraag en aanbod in het elektriciteitssysteem:

<https://docs.energytransitionmodel.com/main/merit-order>

Documentatie over import van elektriciteit via interconnectoren: <https://docs.energytransitionmodel.com/main/costs-imported-electricity/>

Documentatie over vraagsturing in de industrie: <https://docs.energytransitionmodel.com/contrib/load-shifting>

Documentatie over prognose-algoritme voor batterijen: <https://docs.energytransitionmodel.com/main/battery-forecasting>



# Overzicht & links scenario's

EUR - basisscenario:	<a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032954">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032954</a>
EUR - variant elektrisch:	<a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032956">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032956</a>
EUR - variant duurzaam gas:	<a href="https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14790">https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/14790</a>
NAT - basisscenario	<a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032945">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032945</a>
NAT - variant elektrisch	<a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032948">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032948</a>
NAT - variant duurzaam gas	<a href="https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032949">https://energytransitionmodel.com/scenarios/1032949</a>

# Quintel

## Contact

---

info@quintel.com

+31 20 303 30 04

Keizersgracht 639-H  
1017 DT Amsterdam

quintel.com