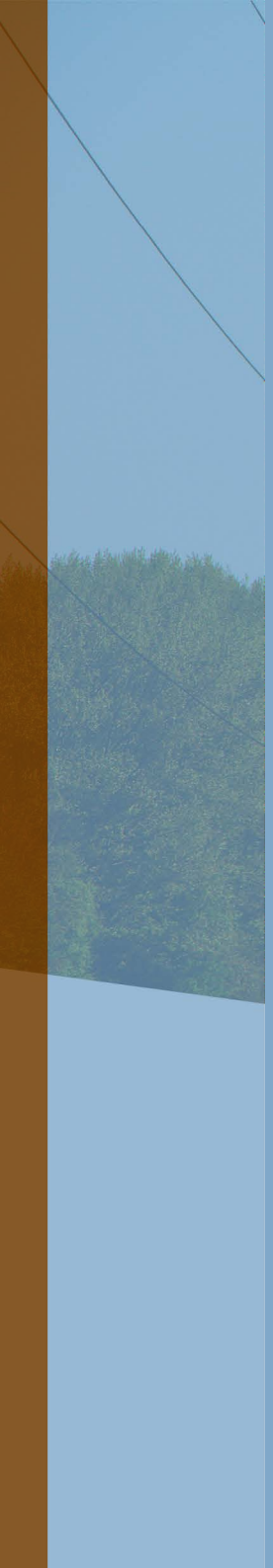
Lectorale rede



dr. ir. Edwin Tazelaar

DE ENERGIETRANSITIE: PLAATS, TIJD, KWALITEIT

HZ UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Een hernieuwbaar energiesysteem
biedt een oplossing voor plaats, tijd én kwaliteit.
Alleen dan kan het duurzaam succesvol zijn:

De energietransitie: plaats, tijd en kwaliteit

Edwin Tazelaar
Lector *hernieuwbare energie*

Inaugurele rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van lector
aan de HZ University of Applied Sciences op 29 oktober 2026.

Lectorale rede

VOORWOORD

Geacht college van bestuur, geachte ambtgenoten, collega's, vakgenoten, familie, vrienden, kennissen en geïnteresseerden.

Tijdens de ingeleide was het nummer 'Haba na Haba' van gitarist Tommy Emmanuel te horen. Dit is door de jaren heen min of meer mijn lijflied geworden.

'Haba na haba' komt uit het Swahili en betekent 'stap voor stap'. Zoals in het spreekwoord 'Haba na haba, hujaza kibaba'. In het Nederlands: beetje bij beetje, vult zich de (graan)pot.

Dat geldt ook voor onze energietransitie: stap voor stap komen we verder. Maar we moeten wel blijven lopen. Allemaal.

Met mijn werk, in de rol van lector en met deze rede hoop ik daar een bijdrage aan te leveren.



dr. ir. Edwin Tazelaar

Inhoud

VOORWOORD 3

1. HET DRAAIT OM PLAATS, TIJD EN KWALITEIT 5

2. ONZE ENERGIEVRAAG 7

3. DE ENERGIETRANSITIE 9

4. TRIAS ENERGETICA 12

5. PLAATS, TIJD, KWALITEIT 14

6. IMPLICATIES 25

7. DE ACTUALITEIT: HYBRIDE WARMTEPOMP 30

8. WATERSTOF 32

9. AFSLUITING 34

DANKWOORD 36

REFERENTIES 37

COLOFON 38



1. HET DRAAIT OM PLAATS, TIJD EN KWALITEIT

Wereldwijd werken we aan een transitie van onze energie-voorziening. Van fossiele energiebronnen als aardgasbellen, kolenmijnen en aardolievelden, naar duurzame bronnen als zon, en afgeleiden daarvan zoals wind en waterkracht. Van fossiele energiedragers als aardgas, kolen en benzine, naar hernieuwbare energiedragers als elektriciteit, warmtenetten en waterstof. Dat is onze huidige energietransitie.

Kijken we naar de laatste decennia, dan zijn we vooral bezig geweest met het oogsten van duurzame energie: zonne-collectoren, zonnepanelen, windturbines, restwarmte. Maar met het toenemende aanbod van duurzame energie komen drie begrippen steeds prominenter boven drijven als noodzakelijk voor een technisch geslaagde energietransitie. Drie begrippen: **plaats, tijd en kwaliteit**.

Het vervolg van deze intreerede is een toelichting op deze drie begrippen, met als doel ze te onthouden en toe te passen. Daarbij beperken we ons tot hernieuwbare energiedragers die voldoende volwassen zijn om in het nu grootschalig ingezet te kunnen worden: warmtenetten, elektriciteit en waterstofgas.

Maar laten we eerst kijken waar we vandaan komen.



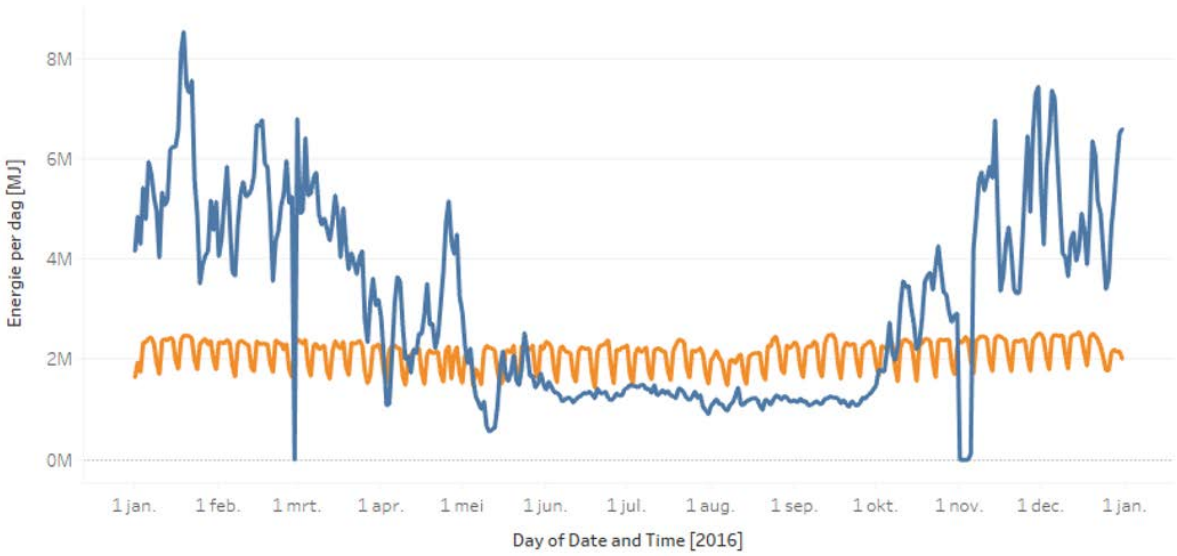


2. ONZE ENERGIEVRAAG

Het begint met onze energievraag. Ter illustratie de energievraag van een stad in Oost-Nederland met 30.000 inwoners.

We zien in deze grafiek de vraag naar elektriciteit in oranje, en de vraag naar aardgas in blauw. De vraag naar elektriciteit en aardgas over een jaar zijn op dezelfde verticale as weergegeven naar hun hoeveelheid energie: Joules. Dat maakt ze vergelijkbaar. Het betreft wat oudere data uit 2016, wat het voordeel heeft dat we de vraag naar aardgas redelijkerwijs kunnen interpreteren als de vraag naar warmte, en dat de vraag naar elektriciteit nog weinig elektrische auto's of warmtepompen bevat.

Figuur 1 Energievraag van een stad in Oost-Nederland (2016)



Wat we uit deze jaargrafiek leren is dat onze primaire elektriciteitsvraag over het jaar gezien redelijk constant is en de variaties vooral over de week spelen. Zo is de elektriciteitsvraag in deze stad in het weekend lager.
De warmtevraag laat echter een enorme variatie over de maanden van het jaar zien. Dat is typisch voor onze breedtegraad met zijn seizoenen: is er minder zon, dan hebben we een grotere warmtevraag. Ook is de piek in de warmtevraag zeker 4 keer zo hoog als de piek in de elektriciteitsvraag.

Dat brengt ons tot het volgende inzicht:

- Onze vraag naar elektriciteit kent dominant een weekpatroon.
- Onze vraag naar warmte kent dominant een jaarpatroon.

Op dit inzicht komen we later terug.



3. DE ENERGIETRANSITIE

Doel van de energietransitie is om onze vraag naar energie in te vullen met duurzame energie en dus met hernieuwbare energiedragers.

Maar wat zijn de argumenten om dat met duurzame energie en met hernieuwbare energiedragers te willen doen?

Het belangrijkste argument voor de energietransitie is een leefbaar klimaat. De zorgen over ons klimaat bestaan al lang. Een van de eersten die het verband legde tussen veranderingen in ons klimaat en menselijk handelen was de Zweedse wetenschapper Svante Arrhenius. Dat was in 1896.

Dit was 92 jaar lang vooral een inzicht gedeeld onder klimaatwetenschappers. Tot 1988. Dat jaar besprak NASA directeur en klimaatwetenschapper James Hansen in een hoorzitting met de Amerikaanse senaat het effect van menselijk handelen op ons klimaat. Als resultaat van deze hoorzitting kwam ons klimaat prominent op de politieke agenda.

Onderhand zijn we weer 38 jaar verder, en ons klimaat is nog steeds het belangrijkste argument om te investeren in een energietransitie:

- **Klimaat:** Houdt de aarde bewoonbaar voor toekomstige generaties. We moeten geen roofbouw plegen op onze toekomst. Maar let op: onderhand zijn wij zelf die toekomstige generatie aan het worden.

Sinds de inval van Rusland in Oekraïne zijn er naast het argument klimaat twee argumenten bijgekomen:

- **Energie-onafhankelijkheid:** Onze afhankelijkheid van andere mogendheden voor de invulling van onze energievraag pakt bedreigender uit dan gewenst. Voor onze eigen energievoorziening grotendeels onafhankelijk zijn voorkomt dat we onbedoeld worden gereduceerd tot wingewest van een ander land: economisch kolonialisme.
- **Innovatiekracht:** De voormalig Italiaanse premier Draghi formuleerde dit in 2024 als volgt: Europa moet nu innoveren of straks inkopen. Dat geldt zeker voor de Europese energietransitie: Of zelf innoveren of straks inkopen uit regio's als Azië, het Midden-Oosten en Noord-Amerika. Dat geldt niet alleen voor de energie zelf, maar ook voor de producten rond energie, zoals zonnepanelen en batterijen.

Meer filosofisch beschouwd is er een opmerkelijk verschil tussen het eerste argument en de twee latere argumenten. Waar het eerste argument verwijst naar internationale samenwerking en vertrouwen en een wereldwijd belang, vinden het tweede en derde argument hun oorsprong juist in het gebrek aan vertrouwen en in regionale belangen. Hoewel dit een belangrijke observatie is, beperken we ons hier tot de meer technische implicaties van de energietransitie.

De conclusie blijft dat er argumenten genoeg zijn om de energietransitie prioriteit te geven. En er is over de jaren heel wat gebeurd,

ook in Zeeland. Zo staat Zeeland met 7,1 PJ op de derde plaats in de ranking van provincies voor het invullen van het eigen elektriciteitsverbruik met duurzame bronnen als zon en wind. Dat is mooi, maar het heeft wel wat jaren geduurd om hier te komen.

Wat dat betreft valt er een kanttekening te maken bij de tijdspanne die wij als welvarend land nodig hebben om tot breedgedragen inzichten te komen. Daardoor zijn we niet altijd op tijd. Een goed voorbeeld van dit tempo is onderstaand krantenartikel, dat verslag doet van praktijkgericht onderzoek naar zonne-energie. Dit artikel is door de landelijke kranten gepubliceerd in 1993, dus 33 jaar geleden. Dit laat zien dat we problemen op het elektriciteitsnet zagen aankomen. Praktijkgericht onderzoek heeft waarde.

In het jaar 2017 is voor het eerst 2,2% van onze elektriciteitsvraag gedekt door elektriciteit uit zonnepanelen. En inderdaad, vanaf 2017 is de drukte op het elektriciteitsnet een steeds grotere zorg geworden.

Dit tempo is onze maatschappelijke realiteit. Wanneer we dit tempo accepteren en toch enige snelheid in onze energietransitie willen houden, betekent dit dat we ons geld niet moeten zetten op technische beloften die zich nog niet hebben bewezen. Houd het praktisch, maak gebruik van bewezen techniek. Dus ga voor hernieuwbare energiedragers als warmtenetten, elektriciteit en waterstof.

Figuur 2 Krantenartikel 1993: Netproblemen bij meer dan 2,2% elektriciteit uit zonnepanelen

Zonne-energie geeft problemen

Grootschaliger gebruik van zonne-energie leidt tot hogere kosten waar tot nu toe geen rekening mee is gehouden. Dit blijkt uit een onderzoek van de Kema.

In de Derde Energienota van minister Wijers wordt uitgegaan van een toename van de inzet van zonne-energie in de elektriciteitsvoorziening. Dit vraagt om forse aanpassingen van het elektriciteitsnet. Tot dusverre is er geen rekening gehouden met de kosten die dit met zich meebrengt. Omdat de technische aard van de aanpassingen nog onbekend is, is er geen schatting van de kostenstijging te maken.

Kema-onderzoeker E. Tazelaar noemt de uitkomst verontrustend. De 2,2% die de zonne-energie volgens de energienota in 2015 in de totale energievoorziening voor haar rekening moet nemen, vraagt grote aanpassingen.

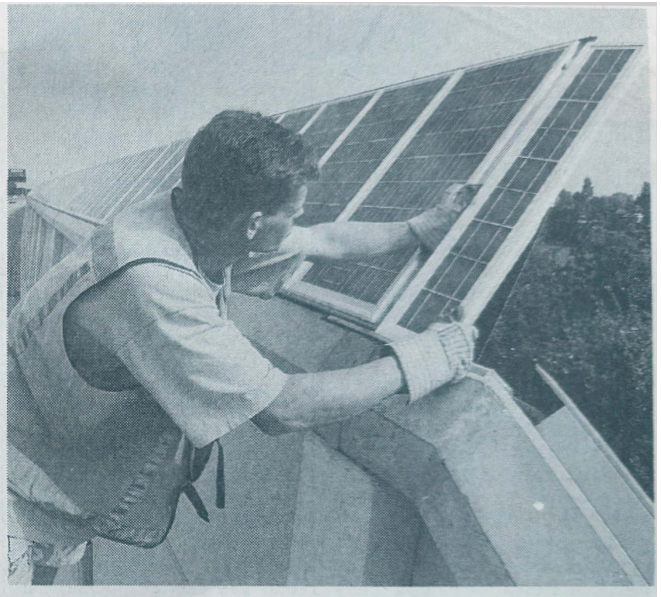
De gevolgen van het aanbod van windenergie zijn daar nog niet bijgeteld. Hier doet zich hetzelfde probleem in iets kleinere omvang voor.

De oorzaak van het probleem is dat zonnepanelen en windmolens geen constante hoeveelheid energie leveren. Bij veel zon levert een paneel bijna negen keer zoveel dan gemiddeld. Bij een wolkje voor de zon keldert het aanbod flink. Het elektriciteitsnet moet echter een constante hoeveelheid stroom leveren.

Om dat te garanderen leveren de grote centrales minimaal de helft van de capaciteit. Bij een zonnepiek zou de 2,2% zonnecapaciteit met gemak de andere helft vullen. Dan moeten duurzame bronnen als windenergie en kleine warmtekrachtcentrales worden stilgelegd. De oplossing is het net aan te passen om de pieken schone energie op de een of andere manier nuttig op te vangen.

De KEMA combineerde bekende gegevens over zonnestraling, het gedrag van de panelen en capaciteit aan zonne-energie zoals die in de derde Energienota staan. 'Het is veel sneller een probleem dan was voorzien', aldus Tazelaar. 'Naast het neerzetten van zonnepanelen moet dus nog veel meer gebeuren. Dat is onvoldoende onderkend.'

Volgens hem betekent dit niet de ondergang van zonne-energie. 'Als de milieukosten in de kostprijs van energie worden meegenomen, springt zonne-energie er goed uit. De aanpassingen aan het net kosten geld. De vraag is of je dat in de kostprijs van zonne-energie moet verrekenen. Maar dat is een politieke vraag.'



De overheid wil dat zonne-energie meer toegepast wordt. Met de kosten voor aanpassingen aan het elektriciteitsnet is vooralsnog geen rekening gehouden. FOTO: DUKSTRA

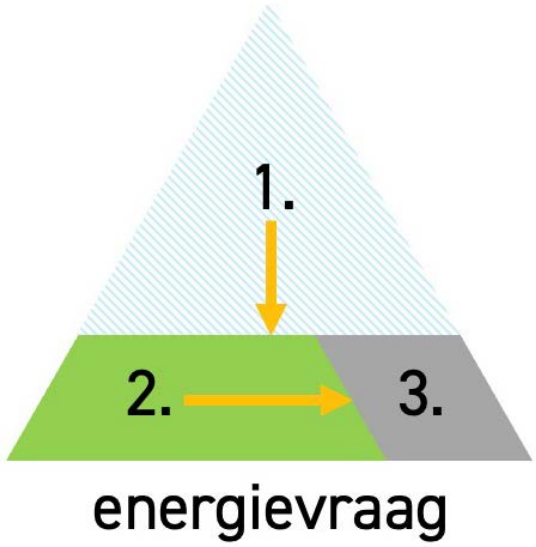


4. TRIAS ENERGETICA

Dus hoe gaan we verder? Hoe geven we de energietransitie vorm, op landelijk, provinciaal en gemeentelijk niveau? Daarin vormt de 'trias energetica' een goede leidraad.

De trias energetica is een stappenplan dat in 1979 vorm kreeg in Delft. Rond 1996, dankzij Erik Lysen van het toenmalige Novem, heeft het brede bekendheid gekregen.

Figuur 3 Trias energetica



Deze trias energetica stelt drie stappen voor:

1 Beperk je energiegebruik
2 Gebruik hernieuwbare energiebronnen
3 Vul de resterende energievraag zo efficiënt mogelijk in met niet-hernieuwbare, dus fossiele, energiebronnen.

Dit stappenplan zien we ook in de praktijk terug. Zowel op landelijk niveau als op gemeentelijk niveau:

1 Zo wordt het beperken van onze energievraag gestimuleerd met regelgeving en subsidies. Denk bijvoorbeeld aan de regels in het bouwbesluit, tegenwoordig het besluit bouwwerken leefomgeving genoemd. Of de verplichting voor het voeren van energielabels voor apparaten en huizen. Maar naast regels zijn er ook financiële prikkels zoals subsidies voor het isoleren van woningen.
2 Ook het invullen van onze energievraag met hernieuwbare energie in plaats van fossiele brandstoffen wordt gestimuleerd met regels en subsidies. Denk aan subsidies voor warmtepompen (van aardgas naar elektriciteit) en batterij elektrische auto's (van diesel en benzine naar elektriciteit). Daarbij gaan beide stimuleringsmaatregelen ervan uit dat er nu of later groene elektriciteit wordt gebruikt.

En daar groeit het scheef.

Om dat uit te leggen gaan we terug naar de drie begrippen waar we deze rede mee begonnen, en waar we in een succesvolle energietransitie niet omheen kunnen: **plaats, tijd en kwaliteit.**



5. PLAATS, TIJD, KWALITEIT

5.1 PLAATS

Laten we beginnen met het begrip plaats. Duurzame energie wordt vaak niet geoogst op dezelfde plaats als waar de vraag naar energie is. Dus is er de noodzaak duurzame energie te transporteren. Uiteraard met een hernieuwbare energiedrager en de bijbehorende energie-infrastructuur:

- Duurzame warmte via de infrastructuur van warmtenetten,
- Groene elektriciteit via de infrastructuur van elektriciteits-netten en
- Groene waterstof via de infrastructuur van gasnetten.

De zwaarste **warmtenetten** in Nederland kunnen tot 250 MW aan warmte transporteren over afstanden tot 30 km, bij benadering de technisch haalbare afstand.

Ten opzichte van andere energie-infrastructuur zijn de kosten hoog en is het ruimtebeslag per hoeveelheid getransporteerde energie, groot. Maar het is de enige infrastructuur om lokaal restwarmte uit bijvoorbeeld afvalverbranders nuttig in te zetten voor de verwarming van woningen en gebouwen. Zonder warmtenetten geen benutting van restwarmte.

De zwaarste **elektriciteitsnetten** zijn de hoogspanningsnetten. Deze kunnen vermogens tot circa 2 GW door Nederland transporteren. Voor grotere afstanden en grotere vermogens moeten we naar spanningen hoger dan 380 kV of naar gelijkspanning.

Het ruimtebeslag van hoogspanningsnetten is per hoeveelheid getransporteerde energie bescheidener dan van warmtenetten. Desondanks valt het in Nederland niet mee om een hoog-spanningstracé te realiseren. Zo zien we op de foto een klein poldertje in de Oosterschelde, nodig om het nieuwste tracé tussen Zeeland en Noord-Brabant gesloten te krijgen. Dit is een goede indicatie van de inspanning die geleverd moet worden om het elektriciteitsnet te verzwaren.

De beheerder van ons hoogspanningsnet TenneT vraagt dan ook tientallen miljarden om het hoogspanningsnet als transportnet geschikt te maken voor de huidige vraag en aanbod van elektriciteit. Zo'n € 10.000 per Nederlander. Dat zijn enorme bedragen. Maar wie de geschiedenis van ons elektriciteitsnet kent verbaast dit niet.

Ons hoogspanningsnet is ooit als koppelnet ontworpen en aangelegd: Een systeem waarmee regionale elektriciteits-voorzieningen onderling wat elektriciteit konden uitwisselen. Zo verzorgde de PZEM centrale in Vlissingen de elektriciteits-voorziening van Walcheren en de Bevelanden, maar konden snelle, maar kleine, wisselingen in de vraag worden opgevangen door het koppelnet naar andere regio's in Nederland. Het koppelnet als een systeem om kleingeld uit te wisselen, niet om grote transacties te doen.

Figuur 4 Warmtenetten, elektriciteitsnetten, gasnetten

Warmtenet



< 250 MW
< 30 KM

Elektriciteitsnet



< 2.000 MW
< 400 KM

(Waterstof) Gasnet



< 10.000 MW
< 1.000 KM

Maar we groeien naar een grotere elektriciteitsvraag met minder maar grotere elektriciteitscentrales en internationale verbindingen. Het oorspronkelijke koppelnet wordt een transportnet. Het moet niet verbazen dat ons dat heel wat kost, zowel in geld als in ruimte. Wat ons wel mag verbazen is het gemak waarmee we denken dat met netverzwaring onze uitdagingen zijn opgelost. Het helpt ons hoogstens op het aspect plaats.

Ons **gastransportnet** kan per verbinding een vermogen van circa 10 GW aan aardgas transporteren over virtueel onbeperkte afstanden. Denk bijvoorbeeld aan de Zeepipe tussen Noorwegen en België die voor de kust van Walcheren loopt, of de Nord Stream 1 en 2 tussen Rusland en Duitsland die in 2022 groot in het nieuws waren.

Van de natuurkunde leren we dan ook dat het transport van energie het effectiefste gaat via molecuulverbindingen. Ook het ruimtebeslag per afstand en getransporteerde hoeveelheid energie is het meest bescheiden.

Maar het soort getransporteerd gas bepaald wel of het duurzaam is. Aardgas is geen duurzame energiedrager, want niet onbeperkt beschikbaar en bijdragend aan de opwarming van de aarde. Waterstofgas is dat wel. Vandaar dat de Gasunie via haar dochtermaatschappij Hynetwork Services werkt aan een ringnet voor waterstofgas door Nederland, de zogenaamde waterstof backbone.

Tabel 1 Energiedragers scoren op plaats

Energiedrager	Energie op de juiste plaats (transport)		
Warmtenet	< 250 MW < 30 km		
Elektriciteit	< 2.000 MW < 400 km Koppelnet → Transportnet Netcongestie		
Waterstof	< 10.000 MW > 1.000 km		

We kunnen de eigenschappen van de drie besproken hernieuwbare energiedragers en hun infrastructuur op het begrip plaats samenvatten in de volgende tabel.

Gerelateerd aan de omvang van de energievraag in Nederland, scoort het transport van warmte slecht, van elektriciteit redelijk en van waterstofgas goed.

We helpen onszelf er dus mee om energiebronnen, zowel duurzaam als niet-duurzaam, zo dicht mogelijk bij de vraag naar energie te realiseren. Het ruimtelijk inpassen van energie-infrastructuur heeft in het verleden al heel wat projecten onhaalbaar gemaakt. Dus houd aanbod en vraag van duurzame energie zo lokaal mogelijk. Beter zonnepanelen op het dak van je huis dan groene elektriciteit inkopen in Frankrijk. Met andere woorden: **Eigen energie eerst**.

5.2 TIJD

Geoogste duurzame energie moet niet alleen naar de juiste plaats worden getransporteerd, het moet ook op het juiste moment worden geleverd. Zo komen we bij het begrip tijd.

We hebben gezien dat dankzij de ligging van Nederland onze warmtevraag gedomineerd wordt door de seizoenen. Het aanbod van wind- en zonne-energie, maar ook van restwarmte of geothermie, loopt daar niet mee in de pas. Om toch duurzame energie op het juiste moment te kunnen inzetten hebben we dus opslag nodig. Opslag van energie over de seizoenen.

In zijn algemeenheid kent ieder energiesysteem opslag tussen productie en gebruik, om vraag en aanbod op elkaar af te stemmen. Denk aan de berg kolen naast de kolencentrale, de ondergrondse tank voor benzine bij het tankstation en de stapel houtblokken achter de schuur voor de houtkachel. Toch zie je dat in het publieke debat opslag van energie over de seizoenen weinig aandacht krijgt. Het lijkt alsof het niet meer in onze genen zit. Net als seizoensgroenten. Dankzij onze welvaart zijn seizoensgroenten tegenwoordig altijd beschikbaar, zoals elektriciteit en aardgas. Toch is het niet zo heel lang geleden dat opslag van energie in ons collectieve denken zat.

Ter illustratie een foto van mijn grootvader in de moestuin achter mijn ouderlijk huis aan de Nieuwe Vlissingseweg in Middelburg. Een foto waarschijnlijk gemaakt tussen 1955 en 1960. We zien hier mijn opa in de tuin bij de seizoensgroenten. Met een stropdas aan wat vast voor de foto zal zijn geweest. Maar de reden van de foto is het kolenhok achter het schuurtje. Deze werd jaarlijks gevuld met kolen van de kolenhandelaar gevestigd in Sint-Laurens. Zo kon mijn opa en later mijn vader in de schuur de kolenkit vullen om bij kou de kolenkachel te laten branden. We zien hier energieopslag geïntegreerd in het dagelijks leven. Maar hernieuwbaar zijn kolen niet.



Figuur 5 Grootvader Tazelaar en het kolenhok

Een **warmtenet** fungeert wel als hernieuwbare energiedrager. En deze warmte kan over seizoenen worden opgeslagen in de vorm van ondergrondse buffering, zoals een WKO, een Warmte/Koude Opslag. Deze vorm van opslag is overigens niet gegarandeerd een succes. De aanleg kan lokaal niet mogelijk blijken of mislukken, bijvoorbeeld door de stroming van grondwater.

Ook **gas** laat zich over de seizoenen opslaan. Denk aan de opslag bij Norg en bij Grijpskerk waarvan de vulgraad de laatste twee jaren zelfs het nieuws haalt. Ook waterstofgas laat zich grootschalig over maanden opslaan, nationaal in bijvoorbeeld oude zoutcavernes bij Zuidwending, maar net als propaan ook lokaal zoals bij het ziekenhuis in Elst.

Tabel 2 Energiedragers scoren op opslag

Energiedrager	Energie op de juiste plaats (transport)	Energie op het juiste tijdstip (opslag)	
Warmtenet	< 250 MW < 30 km	Ondergronds/WKO: niet overal mogelijk	
Elektriciteit	< 2.000 MW < 400 km Koppelnet → Transportnet Netcongestie	Geen seizoensopslag Gascentrales als back-up	
Waterstof	< 10.000 MW > 1.000 km	Gastank Zoutcaverne	

Qua opslag is elektriciteit de uitzondering op de regel. In Nederland laat elektriciteit zich niet voor langere tijd opslaan. Accusystemen zoals thuisbatterijen zijn geschikt voor uren tot enkele dagen en voor pumped hydro hebben we in Nederland weinig ruimte en weinig hoogteverschillen. Ook dit is een consequentie van onze ligging op de wereldbol.

Om toch vraag en aanbod van elektriciteit zo goed mogelijk op elkaar af te stemmen zetten we regelbaar vermogen in: elektriciteitscentrales die snel kunnen starten en stoppen. Deze functie van regelbaar vermogen kunnen we in Nederland alleen met gascentrales op de gewenste schaal invullen. Met de opkomst van zonnepanelen, windturbines en grote centrales die constant moeten draaien om technisch of economisch haalbaar te zijn, worden deze gascentrales nog essentiëler om ons elektriciteitsnet in de lucht te houden. En zolang we aardgas als brandstof voor deze centrales gebruiken kunnen we dit niet hernieuwbaar noemen.

Met deze reflectie over de functie van opslag voor elk van onze hernieuwbare energiedragers, kunnen we deze waarderen op het begrip tijd.

Doordat warmte slechts beperkt transporteerbaar is, heeft een warmtenet een lokale functie in het fysiek bij elkaar brengen van aanbod en vraag naar warmte. Dus ook de opslag van warmte heeft slechts een lokale functie. Combineren we dat met de lokale omstandigheden waardoor warmteopslag in de ondergrond niet overal in Nederland technisch mogelijk is, dan is de conclusie dat warmteopslag gemiddeld scoort.

Elektriciteit laat zich in Nederland niet zonder conversie over de seizoenen opslaan en scoort op het aspect van opslag dus slecht.

Alleen waterstofgas kan lokaal en net als aardgas nationaal op grote schaal worden opgeslagen. Maar let wel, nationale opslag van waterstofgas in zoutcavernes is nog geen werkelijkheid.

5.3 KWALITEIT

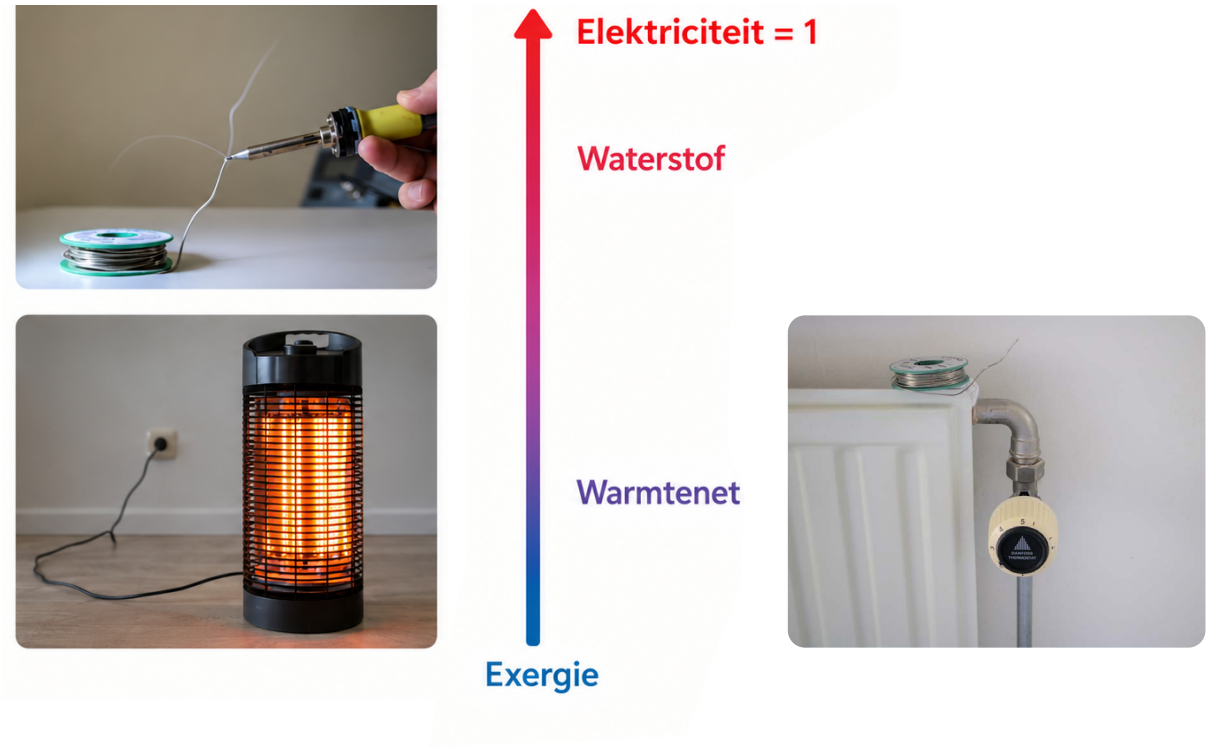
Als derde het begrip kwaliteit. Dit begrip behoeft wat meer toelichting.

Een belangrijke kwaliteit van een energiedrager is de exergie. Exergie is de nuttige kwaliteit van een energiedrager. Je mag het zien als de temperatuur die je maximaal met een klein beetje van de energiedrager kunt maken.

De exergie van een energiedrager zegt dus niet hoeveel energie er beschikbaar is, maar wat je er nuttig mee kunt doen.

Van onze hernieuwbare energiedragers heeft elektriciteit de hoogste exergie, met een waarde van 1. Je kunt met elektriciteit iedere temperatuur maken: een elektrische soldeerbout van 20 Watt maakt een temperatuur van 350°C. Daar kun je tin mee smelten. Maar met een elektrische radiator kun je eveneens een ruimte verwarmen naar 20°C.

Figuur 6 Exergie: wat kun je nuttig met de energie



Ook met **waterstofgas** kun je tin smelten. En een ruimte verwarmen. De exergie waarde van de energiedrager waterstofgas is dan ook hoog. Maar niet zo hoog als van elektriciteit. Een goede indicatie hiervan zijn de omzettingsrendementen van onderlinge conversies. Elektrische energie kan geconverteerd worden naar energie opgeslagen in waterstofbindingen met een omzettingsrendement van circa 80%. De conversie andersom van waterstofgas naar elektriciteit ligt met 40% een stuk lager. Dat is een goede indicatie dat de kwaliteit van elektriciteit hoger is dan die van waterstof.

Een radiator aangesloten op een warmtenet warmt op zijn best op tot 90°C. Daar kun je onmogelijk tin mee smelten. Maar een ruimte verwarmen gaat prima.

Een warmtenet is dus beperkt qua toepassingen. Je kunt er in de voedingsindustrie geen potten of flessen mee steriliseren. Om die functie duurzaam in te vullen zal toch naar waterstof of elektriciteit moeten worden gekeken.

Ook de omzetting van warmte naar elektriciteit of naar waterstof is niet mogelijk. De exergie van een warmtenet is dan ook aanzienlijk lager dan van elektriciteit of waterstof.

Een hoge exergie biedt de eindgebruiker veel toepassingsmogelijkheden: elektriciteit kan zowel tapwater verwarmen als een stofzuiger laten werken.

Daar staat tegenover dat energiedragers met een hoge exergie moeilijker efficiënt uit andere bronnen te produceren zijn. Zo zet

Tabel 3 Energiedragers scoren op kwaliteit

Energiedrager	Energie op de juiste plaats (transport)	Energie op het juiste tijdstip (opslag)	Energie van de juiste kwaliteit (exergie)
Warmtenet	< 250 MW < 30 km	Ondergronds/WKO: niet overal mogelijk	Conversie naar E: niet Beperkt tot verwarming
Elektriciteit	< 2.000 MW < 400 km Koppelnet → Transportnet Netcongestie	Geen seizoensopslag Gascentrales als back-up	Exergie = 1
Waterstof	< 10.000 MW > 1.000 km	Gastank Zoutcaverne	Conversie naar E: < 40%

een zonnepaneel slechts 21% van zonlicht om in elektriciteit, terwijl een zonnecollector gemiddeld 40–50% omzet in warm tapwater. Beide leveren warm tapwater, maar alleen het zonnepaneel produceert elektriciteit voor de stofzuiger.

Zo blijft elektriciteit de Rolls Royce onder de hernieuwbare energiedragers. Maar ook elektriciteit kent beperkingen als het gaat om kwaliteit. Elektriciteit moet aan kwaliteitseisen voldoen, zoals een sinusvormige spanningvorm met een frequentie van 50 Hz en een spanningniveau van 230 VAC plus of min 10%.

Doordat we het elektriciteitsnet steeds vaker tot op de grens benutten en er intensief aan het elektriciteitsnet wordt gewerkt, groeit de kans dat niet aan deze kwaliteitseisen wordt voldaan. Zoals bijvoorbeeld op 8 september 2026 in Middelburg, toen de netspanning onbedoeld opliep tot 289 Volt. Dit leidde tot stilstaande liften, brand in meterkasten en schade aan apparaten, maar ongetwijfeld ook tot een versnelde veroudering van assets in het elektriciteitsnet.

Desondanks blijft elektriciteit qua gemak voor de eindgebruiker ongeëvenaard.

Met deze informatie kunnen we de drie hernieuwbare energiedragers waarderen op het begrip kwaliteit. Warmtenetten scoren laag. Hun toepassing beperkt zich tot het verwarmen van gebouwen of glastuinbouwkassen. Waterstof scoort beter. En elektriciteit blijft op kwaliteit het best scoren.





6. IMPLICATIES

6.1 VAN TRADITIONEEL ...

Plaats, tijd en kwaliteit. Daar gaat het om bij een succesvolle energietransitie.

Laten we vanuit plaats, tijd en kwaliteit kijken naar het energiesysteem van de stad in Oost-Nederland die we eerder tegenkwamen. Deze stad had in 2016 een zeer succesvol energiesysteem. Met aardgas en elektriciteit als energiedragers en een gasnet en elektriciteitsnet als infrastructuur. Met een uitstekende leveringszekerheid en voldoende leveringscapaciteit op zowel het gasnet als het elektriciteitsnet. Dus hoe scoort dit energiesysteem op plaats, tijd en kwaliteit?

De warmtevraag varieert sterk over de seizoenen, maar wordt ingevuld met aardgas. Dit aardgas wordt nationaal opgeslagen en het nationale en lokale gasnet hebben voldoende capaciteit om ook de piek in de winter te kunnen leveren. Aardgas scoort daarmee goed op de begrippen **plaats** en **tijd**.

De elektriciteitsvraag varieert met een weekpatroon. Waar elektriciteit slecht scoort op seizoensopslag is dat in 2016 nog geen praktische beperking. De transportcapaciteit van het stedelijke elektriciteitsnet past bij de vraag. Het is niet nodig, maar pieken in de vraag kunnen met accusystemen worden geschoren, wat dankzij het weekpatroon in de vraag daadwerkelijk ruimte op het lokale net oplevert en zelfs het hoogspanningsnet ontlast.

Tabel 4 Traditionele energiedragers elektriciteit en aardgas scoren op plaats, tijd en kwaliteit

Energiedrager	Energie op de juiste plaats (transport)	Energie op het juiste tijdstip (opslag)	Energie van de juiste kwaliteit (exergie)
Elektriciteit	< 2.000 MW < 400 km Koppelnet → Transportnet Netcongestie	Geen seizoensopslag Gascentrales als back-up	Exergie = 1
Aardgas	< 10.000 MW > 1.000 km	Nationale aardgasreserves	Conversie naar E: < 40%

De tekortkomingen van elektriciteit op **plaats** en **tijd** vormen nog geen beperking, mede omdat de levering van de kwalitatief laagwaardige warmte via de aardgasinfrastructuur loopt. De beschikbare energiedragers passen dus bij de benodigde **kwaliteit** in de energievraag.

In dit traditionele energiesysteem resulteert de samenhang tussen elektriciteit en aardgas in een robuust energiesysteem. Maar, dit systeem scoort niet goed op klimaat, energie-onafhankelijkheid en innovatiekracht. Dus hoe verder?

6.2 ... NAAR HERNIEUWBAAR

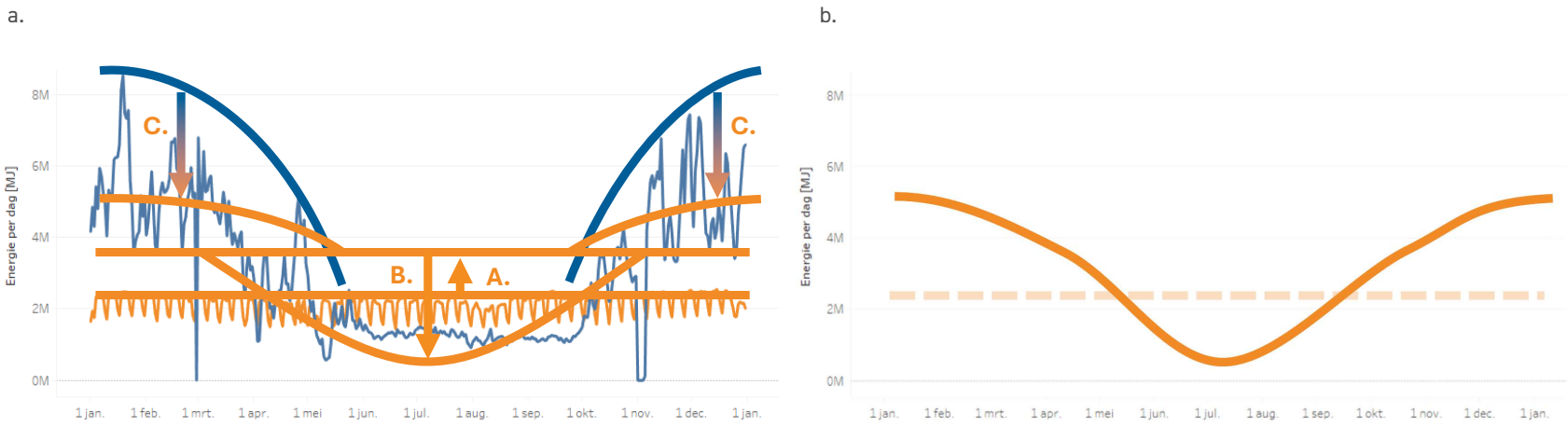
Laten we een doorkijkje geven hoe deze stad er in 2026 voor staat.

Stap één van de trias energetica: Ook deze gemeente zet eerst in op het verlagen van de energievraag door subsidies op isolatiemaatregelen. Vanuit de nationale overheid worden zonnepanelen en warmtepompen gestimuleerd. De maatregelen hebben enig effect, maar onvoldoende om de gestelde doelen te halen.

In de kantlijn zorgen de isolatiemaatregelen ervoor dat het enige restwarmteproject in de gemeente financieel wel erg onaantrekkelijker wordt en daarom wordt geschrapt.

Dus verder met stap twee van de trias energetica: Het inzetten van duurzame bronnen. Om inwoners te stimuleren over te stappen op batterij elektrische auto's, wordt het proces voor het plaatsen van laadpalen gestroomlijnd. Maar dan stokt het. De gemeente ontdekt dat ze weinig mogelijkheden heeft om het oogsten van meer duurzame energie in de gemeente te stimuleren. Zoekgebieden voor windturbines zijn in de hele provincie geschrapt vanwege horizonvervuiling en groen gas oplossingen als waterstof ervaart de gemeente als boven haar bereik.

Figuur 7 a. Veranderingen in de elektriciteitsvraag door de gemeentelijke energietransitie, en b. resulterend patroon van de elektriciteitsvraag.



A. Toename batterij elektrisch vervoer
B. Toename zonnepanelen
C. Toename warmtepompen

Het effect van deze ontwikkelingen heeft grote gevolgen voor het elektriciteitsnet:

- De laadpalen stimuleren de aanschaf van batterij elektrische auto's maar verhogen ook de elektriciteitsvraag.
- De zonnepanelen verlagen de elektriciteitsvraag in de zomer, soms zelfs tot negatieve waarden.
- De warmtepompen verhogen de elektriciteitsvraag in de winter.

De elektriciteitsvraag heeft zich van een weekpatroon tot een jaarpatroon ontwikkeld. Batterijsystemen en flex- of slimme oplossingen kunnen dit niet voorkomen. En dus groeit de benodigde transportcapaciteit om deze ontwikkelingen bij te houden tot boven de bestaande capaciteit. Dit leidt tot netcongestie in de hele gemeente en uiteindelijk de provincie.

Leggen we de ontstane situatie langs de begrippen plaats, tijd en kwaliteit dan kunnen we het volgende constateren:

- **Plaats:** Er is vanuit gegaan dat het elektriciteitsnet de benodigde elektriciteit zou kunnen transporteren. Dit pakt anders uit. Maar bedrijven en particulieren hebben al geïnvesteerd in zonnepanelen, batterij elektrische auto's en warmtepompen dus de enige route vooruit is netverzwaring. Het is hopen dat de netbeheerder het kan bijbenen. Maar dat gaat in concurrentie met andere gemeenten. Ook moet de netbeheerder concurreren op een krappe arbeidsmarkt van technici. Daarnaast blijkt de netbeheerder inderdaad een beheerorganisatie te zijn. Het bedrijf omvormen naar een projectontwikkelaar van netten gaat dan ook niet vanzelf.

- **Tijd:** De elektriciteitsvraag heeft zich van weekpatroon tot jaarpatroon ontwikkeld. Binnen de gemeente is juist in de winter weinig duurzame elektriciteit beschikbaar en zoekgebieden voor windturbines zijn geschrapt. Seizoensopslag van elektriciteit heeft geen aandacht gehad, en is zeker niet beschikbaar binnen bereik van het geplaagde stedelijke elektriciteitsnet. Regelbaar vermogen van aardgascentrales moet dit gat vullen. Daardoor levert de verschuiving van aardgasketels naar warmtepompen geen grote CO2 reductie: het gebruik van aardgas is van individuele Cv-ketels verschoven naar aardgascentrales.

- **Kwaliteit:** Door voor alle functies te kiezen voor de energiedrager met de hoogste kwaliteit, elektriciteit, kan men moeilijk terug naar andere energiedragers die wel over de seizoenen kunnen worden opgeslagen en geen last hebben van netcongestie.

Met andere woorden: de zaak groeit scheef.

Had dit anders gekund? Zeker, maar dat had niet gekund op gemeentelijk niveau alleen. Want ga er als gemeenteambtenaar maar aan staan. Verantwoording nemen voor de implementatie van de energietransitie, terwijl ons energiesysteem zich beweegt tussen een warmtenet op buurtniveau en een koppelnet op internationaal niveau. Met binnen de gemeente conflicterende belangen, tussen de energietransitie en bijvoorbeeld ruimtelijke verordeningen. Ik geef het je te doen.

Een toetsing op plaats, tijd en kwaliteit had wel inzichten opgeleverd. Zo zou het zijn opgevallen dat energievisies met name seizoensopslag van duurzame elektriciteit niet adresseren. Daarom voor iedereen verantwoordelijk voor de uitvoering van onze energietransitie een makkelijk te onthouden inzicht:
vraag om opslag, seizoensopslag



7. DE ACTUALITEIT: HYBRIDE WARMTEPOMP

We trekken het voorgaande door naar de actualiteit: De verplichting om per 1 januari 2029 bij vervanging van de aardgasketel een hybride warmtepomp aan te schaffen. Deze maatregel valt op omdat het een middel afdwingt en niet een te bereiken doel.
Een warmtepomp is een sympathiek apparaat. Het onttrekt laagwaardige warmte uit ventilatielucht, opgeslagen regenwater of desnoods buitenlucht en maakt het geschikt voor het verwarmen van een goed geïsoleerde woning. Maar dit kost wel hoogwaardige elektriciteit. Wanneer we deze maatregel toetsen op plaats, tijd en kwaliteit, waar zien we dan de grootste uitdagingen?

Met de **kwaliteit** aan de gebruikerskant zit het goed. De kwaliteit van de warmte uit de bron is laag. Maar dankzij elektriciteit kunnen we deze kwaliteit voldoende verhogen om een goed geïsoleerd huis te verwarmen. Daar hebben we wel hoogwaardige duurzame elektriciteit voor nodig en kiezen voor de energiedrager met de hoogste kwaliteit is slecht omkeerbaar. Dus duurzame elektriciteit zal beschikbaar moeten zijn.

Die duurzame elektriciteit zal van haar bron naar de **plaats** van de vraag moeten worden getransporteerd. De hybride warmtepomp zelf past meestal binnen de bestaande huisaansluiting, maar alle hybride warmtepompen in een wijk passen samen niet in de netaansluiting. Het net moet dus door de maatregel extra worden verzwaard. Hier zijn gelukkig miljarden voor gereserveerd, maar we weten dat we nu al moeite hebben de huidige ontwikkelingen bij te houden met netcongestie tot gevolg. De maatregel levert dus grote uitdagingen op plaats.

Blijft de vraag of de duurzame elektriciteit op de juiste **tijd** beschikbaar is. Dat is de grootste uitdaging. Want seizoensopslag van duurzame elektriciteit is niet beschikbaar en regelbaar vermogen draait op aardgas en levert dus geen duurzame elektriciteit.

Dit wil niet automatisch zeggen dat we de verplichting om hybride warmtepompen te plaatsen niet moeten doen. Het laat vooral zien dat je alle uitdagingen die volgen uit een maatregel moet aanpakken en niet een selectie. Want dan groeit het scheef.

We concluderen dus dat hybride warmtepompen voorschrijven en netverzwaring doorvoeren samen geen compleet pakket van maatregelen vormt. Maar laten we even filosoferen hoe we dit pakket zouden kunnen aanvullen zodat het wel compleet is.

De crux van regelbaar vermogen uit aardgascentrales is dat we aardgas in tegenstelling tot elektriciteit wel over de seizoenen op kunnen slaan. Het is alleen niet duurzaam. Wanneer we de gascentrale laten draaien op groene waterstof wordt het wel duurzaam en is ook seizoensopslag mogelijk. Dan moeten we nog investeren in een grotere productie of import van groene waterstof en in extra netverzwaring. Maar het is een weg vooruit.

Kijken we echter naar alle moeite van extra netverzwaring en de ecologische voetafdruk van alle apparaten die hiervoor nodig zijn, dan kun je je oprecht afvragen of het inzetten van waterstofgas in Cv-ketels in woningen niet een veel milieuvriendelijke en betaalbaardere weg vooruit is.


Ik rijd
op waterstof
REVIVE
prezero
0800 366 69 99 I inzamelwijzer.prezero.nl

8. WATERSTOF

En zo komen we opnieuw bij waterstof. De EU heeft waterstof al sinds 2003 als hoeksteen in haar energiebeleid. En ook de natuurkunde liegt niet. Toch is waterstof nog niet doorgebroken.

Na deze intreerede begrijpt u waarschijnlijk ook waarom: We hebben moeite tempo te maken. Dat past bij wie we als maatschappij geworden zijn: We hebben het goed en dus is er veel te verliezen. Dat maakt stappen maken spannend. Maar we kunnen het wel. We konden het in 1960 met de gastransitie en we konden het in 1987 met het gat in de ozonlaag.

- Misschien denkt u dat waterstof duur is. En ja, het is duurder dan aardgas. Maar onze gasinfrastructuur is per Joule factoren goedkoper dan onze elektriciteitsinfrastructuur. En onderhand is vrachtverkeer op waterstof goedkoper dan diesel.

- Misschien denkt u dat waterstof gevaarlijk is. En ja, waterstof is zoals elke energiedrager niet intrinsiek veilig. Maar qua veiligheid is het minimaal vergelijkbaar met aardgas en er komen jaarlijks meer mensen in het ziekenhuis door elektriciteits-gerelateerde incidenten dan door aardgas-gerelateerde incidenten.

Daarom het nadrukkelijke advies: groei niet scheef en *stop waterstof in de gereedschapkist*. Want alleen met waterstof kunnen we in Nederland seizoensopslag van hoogwaardige duurzame energie realiseren. Maar laten we daarbij de realiteit onder ogen zien van het tempo dat we aan kunnen. Dus waterstof stapje voor stapje introduceren. **Haba na haba**. Maar wel blijven lopen. Want met waterstof in ons energie-systeem scoren we op zowel plaats, tijd als kwaliteit.



9. AFSLUITING

Daarmee komen we terug bij de begrippen waar we mee begonnen: **Plaats, tijd en kwaliteit**.

Vanuit deze begrippen kwamen we op functies en eigenschappen **transport, opslag en exergie**.

Deze functies kunnen we realiseren met de hernieuwbare energiedragers **elektriciteit, warmtenetten en waterstof**.

En waarom worden we daar beter van?
Vanwege ons **klimaat, onze energie-onafhankelijkheid en onze innovatiekracht**.

Een complexe puzzel. Toch moeten deze begrippen afgevinkt kunnen worden om tot een succesvolle energietransitie te komen. Daar willen we u als HZ graag bij helpen. Om te beginnen met een score-kaart met al deze begrippen.

Mocht u privé of professioneel betrokken zijn bij de energie-transitie, pak deze kaart erbij. Wanneer in uw energievisie alle termen een plek hebben gekregen, heeft u een grote kans een toekomstbestendig duurzaam energiesysteem te realiseren.

Ik wens u veel positieve energie!

Ik heb gezegd.

Edwin Tazelaar
Middelburg, 29 oktober 2026

Figuur 8 Begrippenkaart voor een succesvolle energietransitie

Plaats	**Opslag**	**Waterstof**
Warmtenet	**Energie onafhankelijkheid**	**Kwaliteit**
Klimaat	**Elektriciteit**	**Exergie**
Transport	**Tijd**	**Innovatiekracht**

DANKWOORD

Er is veel waar we dankbaar voor kunnen zijn. Ondanks alle uitdagingen waar we voor staan. En ook ik kan voor veel dankbaar zijn.

Als ik terugkijk, denk ik bij dankbaarheid altijd aan mensen. Mensen waar ik van heb geleerd, waar ik samen mee heb geleerd of waarvan ik onbedoeld heb geleerd.
Aan mensen die me onvoorwaardelijk hebben gesteund en mensen die me vastberaden hebben gemaakt. Ik kan ze onmogelijk allemaal noemen. Daarom beperk ik me tot diegene aan wie ik de meeste dank verschuldigd ben, en dat is mijn lieve vrouw Anita. Anita, dankjewel.

Ook als ik vooruit kijk kan ik al dankbaar zijn. Met de HZ als werkgever, met de collega's, nieuwe partners en nieuwe relaties in Zeeland. En vooral met ons team Delta Power waar ik met trots meewerkend voorman van mag zijn. Daarom beperk ik me ook hier. Tot Collin, Gerrit, Herman, Karin, Meisam, Roel en Sharon: zonder jullie geen team Delta Power!



REFERENTIES

Bayliss, C., & Hardy, B. (2012). *Transmission and distribution electrical engineering* (4th ed.). Elsevier.

Esposito, L., et al. (2024). *Hydrogen storage solutions for residential heating: A thermodynamic and economic analysis with scale-up potential*. International Journal of Hydrogen Energy, 79, 579–593.

Europese Commissie. (2020, 8 juli). *Een waterstofstrategie voor een klimaatneutraal Europa* (COM(2020) 301 final).

Gandía, L. M., Arzamendi, G., & Diéguez, P. M. (Eds.). (2013). *Renewable hydrogen technologies: Production, purification, storage, applications and safety.* Elsevier.

Gerwen, R. J. F. van, Tazelaar, E., van Waveren, A., & Polman, E.A. (1995, juni). *Duurzame energie de wijk in*. Energie Techniek.

James Hansen. (z.d.). In Wikipedia. Geraadpleegd oktober 2026

Lysen, E. H. (1996). *The Trias Energica: Solar energy strategies for developing countries*. In A. Goetzberger & J. Luther (Eds.), EuroSun '96: 10. Internationales Sonnenforum. Proceedings (pp. 20–24).

Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening. (2026, 7 oktober). *Kamerbrief over voorgenomen normering slimme, hybride warmtepompen*. Tweede Kamer der Staten-Generaal.

Netbeheer Nederland. (2026). *Financiële impact van energiebeleid voor netbeheerders (FIEN)*. netbeheernederland.nl

Nijmeijer, A. (2026, 8 juni). *Stroomstoring treft 25.000 adressen in en rond Middelburg*. PZC.

Oberhofer, M. (2026, 16 september). Overvoltage event of 8 September 2026, Middelburg (NL). DaqOpen.

Papa, T., Entrop, B., de Geus, J., van Leeuwen, R., Bernard, J., Tazelaar, E., Asare-Bediak, B., Blankenborg, S., & Doomernik, J. (2025). *Duurzame energietechniek: Technologie voor de energietransitie* (6e ed.). Boom.

Provincie Zeeland. (2025, april). *Energievisie Zeeland: Definitief ontwerp*.

Rant, Z. (1956). *Exergie, ein neues Wort für „technische Arbeitsfähigkeit". Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 22(1), 36–37

Ringelberg, S. (2021). *De Nederlandse aardgastransitie: Lessen voor de energietransitie van de 21ste eeuw*. Eburon.

Rose, P. (zang) & Emmanuel, T. (componist). (2010). *Haba na haba* (vocal) [Lied]. Op Little by little. CGP Sounds.

Svante Arrhenius. (z.d.). In Wikipedia. Geraadpleegd oktober 2026

Tazelaar, E. (1994). *Landelijk meetnet dynamica zoninstraling* [KEMA-rapport].

Van Oirsouw, P., & Cobben, J. F. G. (2011). *Netten voor distributie van elektriciteit*. Phase to Phase.

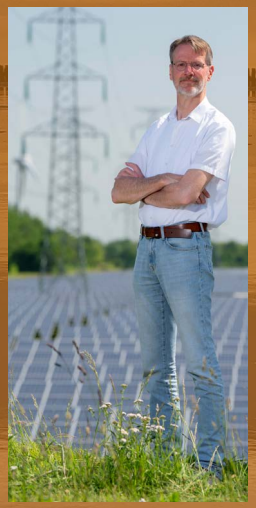
Zonne-energie geeft problemen. (1993, 16 augustus). ANP.

COLOFON

Uitgave
HZ University of Applied Sciences,
onderzoeksgroep Delta Power,
29 oktober 2026

Foto's
Edwin Tazelaar
Infrasite
Hynetwork
Pexels

Grafische vormgeving
Janca Huysmans, graphicjam.nl



Edwin Tazelaar groeide op in Middelburg. Na zijn studie elektrotechniek aan de Technische Universiteit Eindhoven startte hij als onderzoeker bij KEMA, met als doel bij te dragen aan een duurzame energie-infrastructuur. Hij werkte daar aan het karakteriseren van elektriciteit uit zonnepanelen, het automatiseren van PAFC brandstofcelsystemen en het inpassen van warmtekrachtkoppeling in bestaande warmtenetten. Via Philips Semiconductors kwam hij aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen te werken als parttime coördinator van een Engelstalige masteropleiding Control Systems Engineering en als parttime onderzoeker op waterstoftechniek. In 2013 promoveerde hij aan de Technische Universiteit van Eindhoven op het energiemanagement van brandstofcelhybride aandrijflijnen. Als onderdeel daarvan heeft hij bijgedragen aan de eerste waterstofhybride auto op kenteken in Nederland. Aansluitend heeft hij bij netbeheerder Liander gewerkt aan verouderingsmodellen van hoogspanningscomponenten en aan waterstof als energiedrager ter ondersteuning van het elektriciteitsnet. In 2018 werd hij één van de oprichters en technisch directeur van HyMatters, gericht op advisering en engineering rond waterstoftechniek. Sinds 2025 is hij werkzaam als lector hernieuwbare energie bij de HZ onderzoeksgroep Delta Power. Zijn doel is al die jaren hetzelfde gebleven: bijdragen aan een duurzame energie-infrastructuur.

edwin.tazelaar@hz.nl



UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES