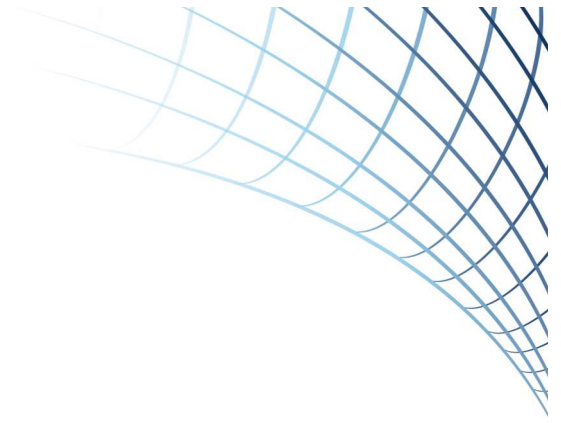




The future Dutch full carbon-free energy system



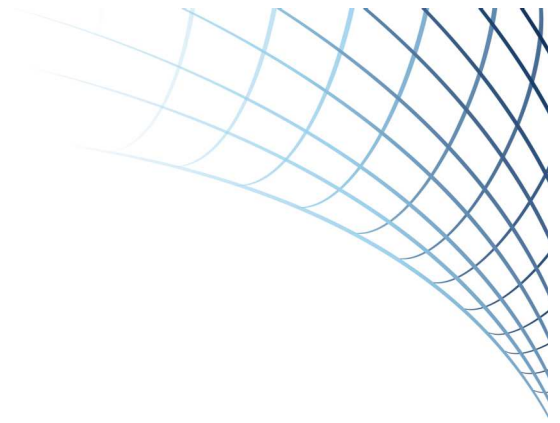
A design study

KIVI section Electrical Engineering

December 2017

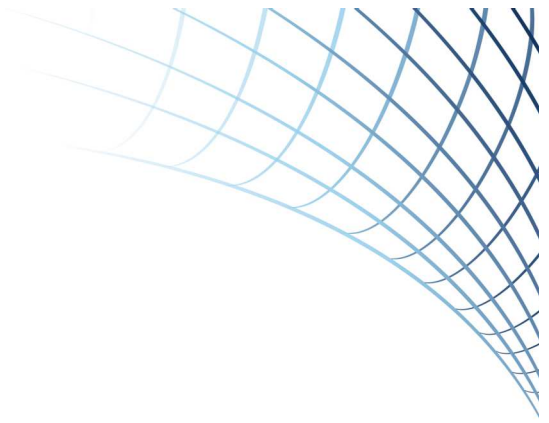
KIVI renewable energy study group: energyNL2050:
Eric Persoon, Steven Luitjens, Loek Boonstra, Paul van Moerkerken.

For possible comments contact: eric.persoon@upcmail.nl



Contents

Dutch summary	4
Summary	8
Introduction	12
1. The used energy sources: the main sources PV and Wind	13
2. The expected energy users	14
2.1 lighting and electrical appliances	
2.2 low temperature heat	
2.3 high temperature heat	
2.4 transport	
2.4.1 Road transport	
2.4.2 Train transport	
2.4.3 (International) shipping and fishery	
2.4.4 (International) Air transport	
3. The required mix of the energy sources	19
3.1 The required renewable energy sources	
3.2 The optimal ratio between Wind and PV energy resulting in minimal seasonal excess energy	
4. System flexibility: How to match supply and demand	22
4.1 Short term energy storage: the advantage of a "One say storage system"	
4.2 Backup power system: requirements and system aspects	
4.2.1 Backup power requirements	
4.2.2 Annual PV and wind electricity fluctuations	
4.2.3 Some system aspects	
5. Power generation requirements	25
6. System stability and controllability and import/export strategy	27
7. The implications on the location of the interconnect and conversion systems	28
8. Conclusion	29
9. Main sources of input for the design study	30
Appendix A: Detailed system diagram	32
Appendix B: Distribution of the demand over the year	33
Appendix C: Estimation of the required backup capacity with aid of the power duration curve of the variable energy sources wind and PV electricity	35



Dutch Summary

Met wind en zon komen we ver

De energievoorziening kan op basis van wind en zon, mits we dat combineren met grootschalige dagopslag en een fors volume aan waterstof als buffer. Dat is de kern van het energieplan dat is opgesteld door het KIVI-researchteam EnergyNL2050.

Het energieplan is samengesteld door dr.ir. Eric Persoon, ir. Loek Boonstra, ing. Paul van Moerkerken en dr.ir. Steven Luitjes. Dit researchteam baseert zijn energieplan op een lange reeks lezingen die het organiseerde met deskundigen uit de energiewereld, zowel van onderzoeksinstituten en universiteiten als van bedrijven. Eerder hadden ze al ideeën uitgewerkt voor alleen de elektriciteitsvoorziening, nu is er een duurzaam alternatief voor het complete energiesysteem. Hieronder volgt een samenvatting.

Wat wordt onze energiebehoefte?

Het KIVI-plan gaat ervan uit dat er in 2050 flink minder energie nodig is. Dat is vooral te danken aan het voorkomen van omzettingsverliezen en verandering van industriële processen. Zo heeft elektriciteit produceren met gas of kolen een maximaal rendement van zo'n 50 %, de rest verdwijnt als warmte. Met zonnepanelen en windturbines zijn die omzettingsverliezen veel kleiner, hooguit 10 %. Dat levert dus direct een besparing van zo'n 40 %. Dat geldt nog sterker voor transport: een auto op benzine of diesel haalt met moeite een tank-to-wheel efficiency van zo'n 25 %, bij elektrische aandrijving is dit 80 % voor een batterij-EV en voor een H2 brandstofcel-EV nog altijd meer dan 45 %.

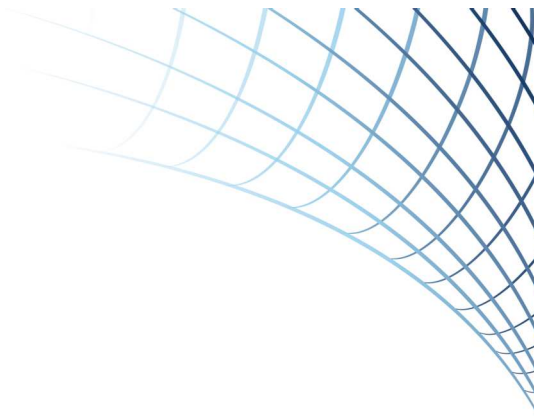
Iets soortgelijks geldt voor de bestaande industriële processen. Zo kost het raffineren van ruwe aardolie veel energie; dat hoeft in een fossielvrije energievoorziening niet meer. Destillatieprocessen die nu veel warmte gebruiken worden vervangen door scheidingstechnieken met behulp van membranen. Proces warmte tussen de 100-200 °C graden kan worden opgewekt met industriële warmtepompen die aanzienlijk minder energie nodig hebben dan bij verhitten met aardgas.

Alles bij elkaar gaat het plan ervan uit dat er in 2050 de helft minder energie nodig is dan in 2012. De tabel hieronder geeft een overzicht van de energievraag in 2015, de energievraag in 2050 zonder transitie naar duurzaam (Business as Usual), en de energievraag volgens het KIVI-plan.

De totale energievraag is vergelijkbaar met energie-scenario's van bijvoorbeeld Greenpeace en Urgenda, en veel gunstiger dan recente prognoses van het Planbureau voor de Leefomgeving en het energie-onderzoekscentrum ECN.

Om in die totale energiebehoefte te voorzien is er in 2050 een hoeveelheid van 400 TWh elektriciteit nodig (inclusief productie van waterstof (100 TWh) voor de hoge temperatuurwarmte en de transport-sector en omzettingsverliezen (60 TWh)). Momenteel is het elektriciteitsgebruik zo'n 120 TWh. Het energiesysteem zal dus verregaand elektrificeren. Die verandering gebeurt vooral bij het produceren van warmte, in het transport en bij industriële processen.

Energie2050	2015	BAU 2050	energieplan 2050
	TWh	TWh	TWh
Licht + apparaten	119	120	127
Netverliezen	4	4	19
Curtailement			2
Transport	155	170	70
Lage T warmte	200	211	43
Restwarmte			(40)
Hoge T warmte	160	168	78
Warmteverlies centrales	110	110	
Omzettings- en warmteverliezen			60
Totaal	748	783	399



Hoe komen we aan warmte?

Nu gaat dat met aardgas, en dat zal compleet veranderen. Voor de lage temperatuurwarmte van < 100 °C gaat dat voor een deel elektrisch gebeuren met warmtepompen, zoals die nu al in nul-op-de-meter gebouwen gebruikelijk zijn. Daarnaast zijn er warmtenetten. Die worden dan niet meer zoals nu gevoed door elektriciteitscentrales of afvalverbrandingsovens, maar door installaties die moeten koelen (pakhuizen, datacenters, supermarkten, enzovoorts), door de warmte die vrijkomt bij het produceren van de waterstof en door warmte die de industrie over heeft.

De hoge temperatuurwarmte van >100 °C in de industrie wordt elektrisch geproduceerd, zo nodig met waterstof.

Welke energie gebruikt het transport?

Elektrificatie van persoonsvoertuigen ligt voor de hand, daar is nu al een begin mee gemaakt. Elektrisch rijden is ook veel efficiënter dan rijden op fossiele brandstof.

Voor zwaar transport zou rijden op batterijen het transport nog eens extra zwaar maken. Daarom maakt die gebruik van waterstof en een brandstofcel waarin die waterstof wordt omgezet in elektriciteit. Dat gaat gepaard met omzettingsverliezen, de efficiency van de totale cyclus is zo'n 47 %, maar dat is altijd nog twee keer beter dan bij gebruik van diesel.

Bij de scheepvaart geldt hetzelfde: elektrisch varen met waterstof en een brandstofcel.

De luchtvaart is veel lastiger te elektrificeren, want daar speelt gewicht een doorslaggevende rol, en waterstof-tanks en batterijen zijn zwaar. Hier brengen synthetische brandstoffen uitkomst, gemaakt van CO₂ dat bijvoorbeeld vrijkomt bij gebruik van biomassa als grondstof in de chemische industrie. Er is dan grosso modo geen netto-uitstoot van CO₂.

Waarmee produceren we die energie?

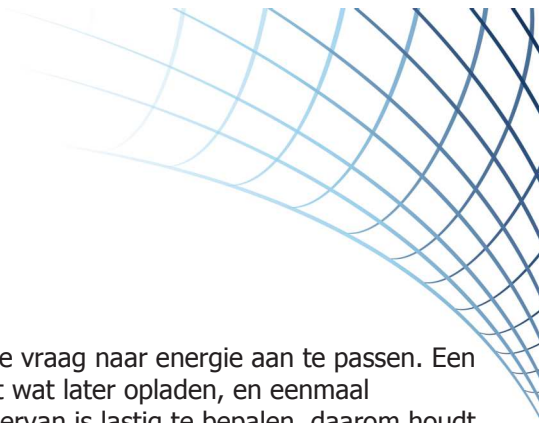
Wind en zon zijn de belangrijkste bron, zij leveren samen 85 %. Voor de rest komt 10 % van duurzame import, bijvoorbeeld in de vorm van waterstof uit landen die een overschot aan elektriciteit hebben, en 5 % komt van andere bronnen als geothermie, getijdencentrales, enzovoorts.

Zon levert zo'n 17 % van het totaal. Daarvoor is 78 GW aan zonnevermogen nodig. Ruimte daarvoor is te vinden op daken van woningen, kantoren en bedrijfsgebouwen, langs (spoor)wegen, en zonneparken op land of water.

Windenergie is goed voor 68 % van het totaal. Daarvoor komt 6 GW aan windturbinevermogen op land te staan, de doelstelling van het huidige energieakkoord. Meer windturbines op land is gezien de ruimtelijke impact niet haalbaar. Op de Noordzee komt 63 GW aan windvermogen. Door gebruik van windturbines met een vermogen van 10 – 15 MW, duidelijk veel groter dan die er nu staan, is een windparkdichtheid van 7 MW/km² haalbaar. Voor het gewenste windvermogen is dan een oppervlak van 9000 km² nodig. De windturbines leggen daarmee beslag op een zesde van het totale oppervlakte van Nederlandse deel van de Noordzee.

Wind en zon leveren niet constant

De opbrengst van zon en wind is niet constant. Zon wisselt sowieso per etmaal, daarnaast veranderen weersomstandigheden voortdurend, en is er een verschil in opbrengst tussen de seizoenen. Over een jaar gemiddeld is er met het opgestelde vermogen voor wind en zon in 2050 zo'n 5000 uren per jaar een overschot aan elektriciteit, de opbrengst zal gedurende zo'n 4000 uur in een jaar tekort schieten. Dat tekort kan soms wel een maand achter elkaar voortduren. Er zal dus het nodige moeten gebeuren om het energiesysteem in balans te brengen.



Vooral op kortdurende wisselingen, zoals dag nacht, is in te spelen door de vraag naar energie aan te passen. Een koelhuis kan ook wel een tijdje zonder stroom, de auto kan soms ook best wat later opladen, en eenmaal opgewarmd water kan in een geïsoleerd vat dagen mee. Het totale effect ervan is lastig te bepalen, daarom houdt het energieplan er nu geen rekening mee. Voor seizoenswisseling is vraagaanpassing sowieso niet geschikt. Wat moet er dan wel gebeuren?

Seizoenswisseling opvangen met de goede mix

Voor de seizoenswisselingen is gezocht naar een mix tussen zon- en windopbrengst die jaarrond optimaal produceert. Per seizoen verschilt de opbrengst van elk afzonderlijk flink: voor de zon is de verhouding tussen zomer- en winteropbrengst 7:3, voor wind 4:6. Tegelijkertijd is er vooral in de winter behoefte aan lage temperatuurwarmte: er moet in de winter dus meer energie worden geproduceerd dan in de zomer. De ideale wind-zon-mix blijkt nu 4:1, dus vier keer meer windenergie dan zonne-energie. Die verhouding zorgt ervoor dat de extra-productie van windturbines in de winter voldoende is om aan de extra wintervraag te voldoen en de lagere opbrengst van de zonnepanelen op te vangen. De noodzaak tot seizoensopslag wordt daardoor geminimaliseerd.

Korter durende wisselingen opvangen met dagopslag

Het dag-nachtritme van zonne-energie wordt voor een goed deel opgevangen met dagopslag. Overdag schijnt de zon en is er minder vraag, de batterij levert wat nodig is aan het begin van de avond. Die dagopslag kan ook snelle fluctuaties in wind- en zonopbrengst opvangen. Vooral voor de zonnepanelen is dat belangrijk, want die kunnen bij een zonnig weer zorgen voor een hoge piekopbrengst. Afgestemd op dat zonvermogen rekent het plan met een sterk gedecentraliseerde opslagcapaciteit in de orde grootte van 115 GWh, dat is de opbrengst die de panelen midden op de dag gedurende zo'n drie uur produceren wanneer overal de zon op z'n heetst schijnt. De opslag helpt zo de piekopbrengst op te vangen en kortdurende fluctuaties in de elektriciteitsproductie van wind en zon samen.

Een flink deel van die opslagcapaciteit kan worden geleverd door de accu van de elektrische auto. Om een idee van de omvang te krijgen: dat komt neer op 2 miljoen voertuigen met een batterij van 60 kWh, rekening houdend met de vooruitgang in batterijtechnologie. Ondenkbare is het niet, wanneer er in 2030 geen voertuigen meer mogen zijn die rijden op fossiele brandstoffen.

Langer durende wisseling met een back-up systeem

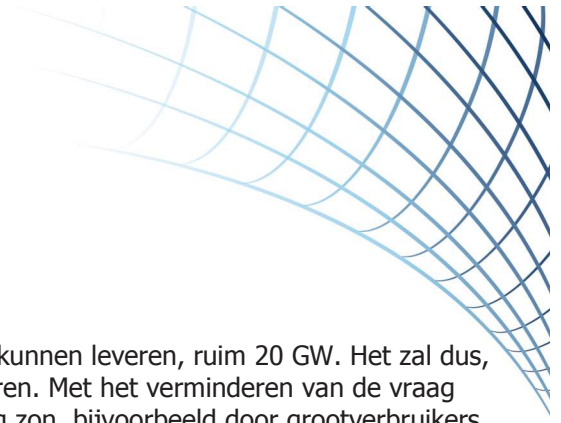
Dan zijn er nog de langer durende fluctuaties, bijvoorbeeld een maand lang nauwelijks opbrengst van wind en zon. Om het effect van dat soort langdurende fluctuaties in kunnen te schatten gebruikt het energieplan de opbrengststatistiek van wind en zon in ons land. Die geeft aan hoeveel uur er in het jaar maximaal wordt geproduceerd, hoeveel gemiddeld en hoeveel heel weinig tot haast niks.

Daaruit blijkt dat wind en zon gedurende 5000 uur een overschot leveren, en een kleine 4000 uur te weinig produceren. In het energieplan wordt dat overschot gebruikt om extra waterstof te produceren, dus bovenop de elektriciteit die al wordt gebruikt om in de waterstofvraag van industrie en zwaar vervoer te voorzien.

De periode dat er een tekort is heeft twee gevolgen. In eerste instantie is er nog wel voldoende stroom voor de directe elektriciteitsvraag, maar onvoldoende om in de waterstofvraag te voorzien. De opgebouwde waterstofreserve springt dan in. Daarvoor is dan ongeveer de helft van dat overschot nodig.

En dan is er een periode, in totaal zo'n kleine 1000 uur per jaar dat er ook voor de directe elektriciteitsvraag een tekort is. De rest van het waterstofoverschot wordt dan gebruikt om met brandstofcellen elektriciteit te produceren.

Dit laatste is dus het back-upsysteem dat standby staat wanneer gedurende een langere periode zon en wind het laten afweten. Uiteindelijk moet dat back-upsysteem in een hoeveelheid energie voorzien die 4 % is van wat



jaarlijks in totaal wordt geproduceerd. Het moet wel een flink vermogen kunnen leveren, ruim 20 GW. Het zal dus, net als elk back-upstelsel, jaarrond slechts beperkte tijd volop produceren. Met het verminderen van de vraag naar stroom in tijden van gebrek aan vermogen door windstilte of weinig zon, bijvoorbeeld door grootverbruikers, is in het plan geen rekening gehouden. Dit zou het back-up probleem wel aanzienlijk verminderen. Daarnaast kan import soelaas bieden.

Het energieplan rekent met gemiddelde opbrengsten van wind en zon. In de praktijk zullen die het ene jaar wat hoger zijn en het andere lager. Volgens de statistiek is de opbrengst in een 'slecht' jaar zo'n 6 % onder het gemiddelde. Doet dat zich voor, dan moet import soelaas bieden.