

**OPSLAG VAN ENERGIE****voor het bruikbaar maken van energie uit zon en wind**

Maarten de Groot, december 2015

1. **PRODUCTIE VAN ENERGIE.** Een (bijna) volledig duurzame energievoorziening is alleen mogelijk als de meeste energie komt van zon en wind. Het aandeel van energie uit biomassa moet beperkt moeten blijven, omdat de productie van biomassa onevenredig veel landoppervlak eist en vaak ten koste gaat van de voedselproductie. Wat er aan biomassa geproduceerd wordt moet bovendien vooral gebruikt worden als grondstof voor kunststoffen (plastics en dergelijke). De overige vormen van duurzame energie zullen de komende halve eeuw geen grote rol kunnen spelen.
2. **GEBRUIKSVORMEN.** Energie zal in de verre toekomst, net als nu, voornamelijk gebruikt worden in de volgende vier vormen:
  - a. Elektriciteit voor verlichting en apparaten.
  - b. Lage temperatuur warmte of koude voor gebouwen, kassen e.d.
  - c. Hoge temperatuur warmte voor industriële processen.
  - d. Transportbrandstof of –accu’s: energie opgeslagen in materie met hoge energiedichtheid.Het moment waarop de geproduceerde energie gebruikt wordt is bij de laatste gebruiksvorm nooit gelijk aan het moment van productie en bij de andere drie vaak slechts in beperkte mate. De mogelijkheden om het moment van gebruik aan te passen aan de productie is beperkt. Eveneens beperkt is de mogelijkheid om actueel gebruik aan te passen aan actuele productie door energie uit te wisselen binnen Europa (Biesboer, punten 1 en 4). Daarom zal bij een (bijna) volledig duurzame energievoorziening veel van de energie uit zon en wind opgeslagen moeten worden op manieren die geschikt zijn voor de vier gebruiksvormen.
3. **GROOTSCHALIGE OPSLAG IS NOG NIET RENDABEL.** Opslag van energie in de vorm van uit elektriciteit geproduceerd gas/vloeistof met hoge energiedichtheid (Power-to-Gas, P2G) zal op den duur (2050?) waarschijnlijk een cruciale rol spelen, omdat gas en vloeistof makkelijk opgeslagen en getransporteerd kunnen worden en vervolgens geschikt zijn voor alle gebruiksvormen. P2G is echter nog duur. Dat geldt ook voor andere opslagtechnieken geschikt voor de gebruiksvormen a en d. Ze vereisen hoge investeringen die rond 2030 alleen rendabel kunnen worden voor specifieke toepassingen, zoals mobieltjes en elektrische personenauto’s. Opslag van energie in de vorm van warmte en koude bij lage temperaturen (boven 0°C en onder 100°C of iets meer) is relatief goedkoop. Daarom kan Power-to-Heat (P2H) de komende jaren een grote vlucht nemen voor gebruiksvorm b. In hoeverre dat ook geldt voor gebruiksvorm c, is niet bekend. Opslag in de vorm van warmte is zeker niet geschikt voor gebruiksvorm d, of het dat wel is voor gebruiksvorm a (P2H2P) is nog onduidelijk.
4. **PERIODE TOT 2030.** Tot 2030 kan de ontwikkeling van hernieuwbare energie ook zonder grootschalige energieopslag nog wel doorgaan. Immers, in 2030 hoeven hernieuwbare energiebronnen niet meer dan 30% van de energie te leveren. Als biomassa daarvan 1/3 levert, hoeven zon en wind niet meer dan 20% van alle energie te leveren. De fluctuaties daarvan kunnen dan nog worden opgevangen door een combinatie van P2H, een verzaamd Europees elektriciteitsnetwerk, enige afstemming van de vraag op de productie en een meer flexibele elektriciteitsproductie met fossiele of biobrandstoffen: “In de fossiele wereld is de berg kolen of [...] de opslag” (Biesboer, punt 8). Zie verder DNV GL e.a. 25 maart 2015.
5. **LANGE DUUR.** Op de lange duur zal de gewenste groei van energie uit zon en wind echter niet mogelijk zijn zonder een sterke ontwikkeling van energieopslag. Juist omdat die zo lastig is en nog zo weinig aantrekkelijk voor marktpartijen, is het nodig om die ontwikkeling al de komende jaren met overheidsbeleid te versnellen.
6. **BELEID KOMENDE JAREN.** Het beleid zal zich de komende jaren vooral moeten richten op:
  - I. Ontwikkeling van Power-2-Heat met bijbehorende opslag van warmte en koude (WKO). Dat impliceert ondermeer afstemming van de wet- en regelgeving voor elektriciteit op die van warmte en omgekeerd en stimuleren WKK’s waarbij de verhouding tussen de productie van elektriciteit en warmte gevarieerd kan worden.

- II. Ontwikkeling van decentrale energieopwekking met decentrale opslag. Dat impliceert ondermeer bevordering van een systeem van een voor iedereen fluctuerende elektriciteitsprijs die de fluctuerende marktwaarde representeert.
- III. Elektriciteitsmarkt zodanig aanpassen dat het lonend wordt voor centrales op fossiele of biobrandstoffen om alleen elektriciteit te leveren bij weinig zon en wind.
- IV. Ontwikkeling van Power-2-Gas in combinatie met opslagvormen (zoals de decentrale) die de hoogfrequente fluctuaties in productie en verbruik van elektriciteit kunnen opvangen. Dat impliceert ondermeer dat gasapparaten en het gasnetwerk, waar niet vervangen door een warmtenetwerk, afgestemd moeten worden op het gebruik van andere gasmengsels, zoals bijmengen waterstof. Als gasproductie mogelijk is in vrij kleine eenheden kan het hoofd-gasnetwerk, naast het hoofd-elektriciteitsnetwerk, een belangrijke rol blijven spelen bij het transport van energie binnen Europa.
- V. Meefinancieren van (Europees), precompetitief onderzoek dat nuttig kan zijn voor de ontwikkelingen onder I, II en III.

#### **Ad 1 ZON & WIND OP DEN DUUR MEEST BELANGRIJK**

Zie "Stappenplan voor duurzame energieproductie", hoofdstuk 5 "Energiescenario's Nederland in 2050", paragraaf 5.8 "Conclusies" 4 en 5. Zie ook Mulders uitspraak: "Ik voorzie om verschillende redenen geen groot aandeel van biomassa en kernenergie of grootschalige CO<sub>2</sub>-opslag" (Biesboer).

#### **Ad 2 ENERGIE OPSLAAN VOOR TRANSPORT, ELEKTRICITEIT EN WARMTE/KOUDE**

Enige scenario's voor 2050 worden besproken in "Stappenplan voor duurzame energieproductie", hoofdstuk 5 "Energiescenario's Nederland in 2050", figuur 5.2. Daaruit blijkt dat energie voor transport (energievorm d) waarschijnlijk 30% - 50% van het totale energieverbruik zal hebben en elk van de drie overige vormen waarschijnlijk een aandeel van 10% - 30%.

#### **Ad 2a Elektriciteit voor verlichting en apparaten**

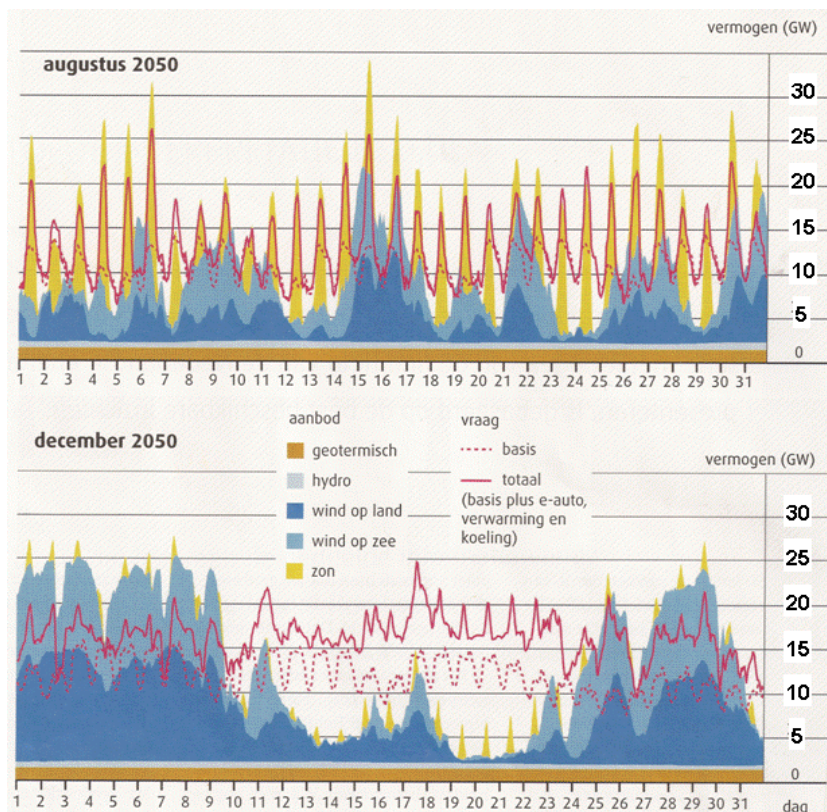
Elektriciteit is een heel geschikte energievorm voor verlichting en vele apparaten (machines, treinen, computers enz). Tot die apparaten behoren ook warmtepompen, die moeten draaien op het moment dat behoefte is aan gebruiksvorm b. Ook het gebruik van andere apparaten en verlichting fluctueert, vooral met een periode van een etmaal. De productie van elektriciteit uit zon en wind fluctueert nog sterker. De fluctuatie van gebruik en de fluctuatie van productie zijn grotendeels onafhankelijk van elkaar, zodat ze elkaar soms afzwakken, maar soms ook versterken.

Een voorbeeld daarvan is geïllustreerd in onderstaande figuur van Boonstra en Persoon (De Ingenieur van november 2014, blz 24). Zij hebben die figuur ontleend aan een studie van het Fraunhofer Instituut, dat de weerkarakteristieken in de maanden augustus en december 2007 gebruikte om voor die maanden de opbrengst te voorspellen van energie uit zon en wind in het Duitsland van 2050. De vermogens aangegeven op de verticale as zijn vermenigvuldigd met  $\frac{1}{4}$  om de situatie van Nederland weer te geven. Boonstra en Persoon hebben aangenomen dat het totale elektriciteitsverbruik in Nederland ("basis") stijgt met  $\frac{1}{3}$  (voor e-auto en warmtepompen ten behoeve van verwarming en koeling) tot ongeveer 500 PJ/jaar (= 15 GW gemiddeld). Verder hebben ze aangenomen dat die elektriciteit geheel met duurzame energie wordt opgewekt:  $\frac{1}{2}$  uit wind (7,5 GW),  $\frac{1}{3}$  uit zon (5 GW) en  $\frac{1}{6}$  uit overige bronnen (2,5 GW).

Uit de figuur is ondermeer het volgende af te lezen:

- De bijdrage van energie uit zon is behoorlijk groot is in augustus, maar heel bescheiden in december
- De bijdrage van energie uit wind kan wel een paar weken terugvallen tot 30% van het gemiddelde per jaar, juist als het gebruik extra hoog is (paar decemberweken met weinig wind en flinke vorst?)
- Bij de fluctuaties van het verschil tussen energieproductie en energieverbruik kan onderscheid gemaakt worden tussen fluctuaties met een periode van een etmaal (vooral door zon en verbruik), fluctuaties met een periode van 5 tot 15 dagen (vooral door de wind) en fluctuaties met een periode van één jaar (seizoensfluctuaties, vooral door zon, maar ook door wind en verbruik)
- Bij de fluctuaties met periode etmaal bedraagt het amplitude orde 5 GW ( $\frac{1}{3}$  van gemiddeld gebruik), bij die met periode 5 tot 15 dagen 7,5 GW ( $\frac{1}{2}$  van gemiddeld gebruik) en bij die met periode jaar

bedraagt het amplitude orde 2,5 GW (1/6 van gemiddeld gebruik).



Een indruk van de opslagcapaciteit waarmee die fluctuaties kunnen worden opgevangen volgt uit de volgende berekeningen (zie bijlage):

- Opslagcapaciteit voor de periode van een etmaal bedraagt orde  $1/2 \times 5 \text{ GW} \times 24 \text{ uur} = 60 \text{ GWh} = 0,2 \text{ PJ}$  nodig is ofwel 0,05% van het totale jaarverbruik.
- Opslagcapaciteit voor de periode van 7 tot 14 dagen bedraagt orde  $1/2 \times 7,5 \text{ GW} \times 14 \text{ dagen} = 1.260 \text{ GWh} \approx 5 \text{ PJ}$  nodig is ofwel 1% van het totale jaarverbruik.
- Opslagcapaciteit voor de periode van een jaar bedraagt orde  $1/2 \times 2,5 \text{ GW} \times 1 \text{ jaar} \approx 11.000 \text{ GWh} \approx 40 \text{ PJ}$  ofwel 8% van het totale jaarverbruik.

Volgens Fraunhofer is een opslagcapaciteit die een maand lang in de elektriciteitsvraag kan voorzien (8% van het jaarverbruik) voldoende zijn om het elektriciteitsvoorziening het hele jaar rond stabiel te laten functioneren.

#### Ad 2b Lage temperatuur warmte of koude

In de komende decennia zal veel gedaan worden aan de warmte-isolatie van gebouwen. Daardoor zal de behoefte aan lage-temperatuurwarmte en koude wellicht afnemen tot orde 300 PJ/jaar, waarvan 2/3 voor warmte en 1/3 voor koeling. Het verbruik van lage-temperatuurwarmte wordt gekenmerkt door fluctuaties met een periode van een etmaal (verwarming 's nachts uit, tapwater voor douche), fluctuaties met een periode van een jaar ('s zomers verwarming uit, koeling aan) en periodes van enige dagen of weken met extreme buitentemperaturen. De behoeftes in de tuinbouw fluctueren met weer en seizoenen. Daarom is opslag van warmte en koude, bijvoorbeeld in het grondwater, van groot belang. Het gaat dan om een totale opslagcapaciteit van orde 200 PJ aan warmte en 100 PJ aan koude.

Een belangrijk deel van de warmte of koude zal met behulp van warmtepompen onttrokken worden aan de omgeving (vooral grond- en oppervlaktewater). Voor het laten draaien van die pompen (op het moment van de betreffende behoefte) zal een hoeveelheid energie nodig zijn van orde 100 PJ/jaar. De daarvoor benodigde opslag is al besproken bij gebruiksvorm a.

Extra warmte tijdens vorstperiodes zal de komende decennia voor een belangrijk deel opgevangen worden door bijstook van fossiele of biobrandstoffen. Of het op den duur efficiënt zal zijn ook die warmte

via warmtepompen aan de omgeving te onttrekken is nog onzeker.

### Ad 2c Hoge temperatuur warmte

De hoeveelheid hoge-temperatuurwarmte zal op den duur ook flink afnemen door verhoging van de efficiëntie van industriële processen, wellicht tot orde 300 PJ/jaar. Sterke fluctuaties in verbruik zijn hier niet te verwachten. In eerste instantie zullen fossiele of biobrandstoffen die warmte blijven leveren, waarbij voor warmtenetten bruikbare restwarmte ontstaat. Maar in de toekomst zal ook meer hoge-temperatuurwarmte met elektriciteit worden geproduceerd, deels direct, deels met warmtepompen, die hun warmte aan warmtebuffers onttrekken. Zie de 5 cases besproken door Berenschot e.a. in "Power to Products". Het is nog onduidelijk hoeveel extra warmte opslagcapaciteit vereist is om op deze manier energie uit zon en wind te benutten. Wellicht ook weer orde 0,05% voor dag/nachtfluctuaties, 1% voor week-fluctuaties en 8% voor zomer/winterfluctuaties.

### Ad 2d Transport

In 2050 zal in Nederland orde 1000 PJ/jaar gebruikt worden voor transport. Anders dan elektrische treinen, moeten vliegtuigen, schepen, vrachtauto's, bussen en personenauto's hun energiebron met zich meevoeren. Daarom is voor transportbrandstoffen/accu's een hoge energiedichtheid vereist.

Benzine, kerosine en vele andere fossiele brandstoffen hebben een hoge energiedichtheid, zowel gemeten naar massa (J/kg) als naar volume (J/m<sup>3</sup>). Gemeten naar massa geldt dat ook voor petroleumgas en aardgas. Maar gemeten in volume is dat niet het geval. Daarom kunnen die stoffen alleen gebruikt worden als ze sterk zijn samengeperst, liefst tot vloeistof (LPG, Liquefied Petroleum Gas) en/of afgekoeld (LNG, Liquefied Natural Gas). De hoge-druktanks en koelsystemen vormen een extra ballast bij het transport. De hoge druk levert ook een extra risico op. De vraag is of de energie uit zon en wind economisch opgeslagen kan worden in vergelijkbare vloeistoffen (bv methanol, ammoniak) of gassen (bv waterstof, methaan).

"Gewone" accu's hebben een veel lagere energiedichtheid dan fossiele brandstoffen: orde 1/100. Er worden wel accu's ontwikkeld die een flink hogere energiedichtheid hebben en die ontwikkeling gaat nog steeds door, zodat volledig elektrische personenauto's nu al commercieel aantrekkelijk zijn. Voor vrachtauto's geldt dat (nog?) niet, omdat die veel meer energie verbruiken waardoor erg veel accu's nodig zou zijn, hetgeen veel ballast betekent en hoge kosten. Dat laatste belemmert ook het gebruik van accu's in de scheepvaart.

Gezien de geringe fluctuaties in gebruik wordt ook hier de benodigde opslagcapaciteit voor het grootste deel bepaald door de fluctuatie in de productie door zon en wind: orde 0,05% voor etmaalfunctuaties, 1% voor fluctuaties van 10 dagen en 8% voor fluctuaties met periode van een jaar.

### Ad 2 Samenvatting shatting totaal benodigde opslag

Voor gebruiksvorm b (lage temperatuur warmte en koude) zal een opslagcapaciteit in de vorm van warmte nodig zijn van orde 200 PJ en de in de vorm van koude van orde 100 PJ.

Voor energie die beschikbaar komt in de vorm van elektriciteit uit zon en wind is de volgende opslagcapaciteit nodig:

PERIODE	CAPACITEIT	CAPACITEIT in % VAN JAARPRODUCTIE 2000 PJ/jaar
etmaal	1 PJ	0,05 %
10 dagen	20 PJ	1 %
jaar	160 PJ	8 %

Mulder (Biesboer, punt 3) verwacht dat Nederland 15% van de jaarproductie aan opslagcapaciteit nodig heeft, dat wil zeggen 540 PJ, omdat hij kennelijk uitgaat van een jaarproductie van 3600 PJ, meer dan het huidige gebruik. Hij verwacht dat ongeveer de helft van die energie voor warmte wordt gebruikt. Dus misschien zal bijna de helft van de opslagcapaciteit van 540 PJ bij hem in de vorm van warmte of koude kunnen worden opgeslagen. Maar dan nog komt hij uit op een ongeveer tweemaal zo hoge schatting van de opslagbehoefte als hier gepresenteerd: 15% in plaats van 8%. Dat hangt wellicht samen met zijn idee

dat zon een veel groter aandeel in de energievoorziening zal hebben dan wind.

### **Ad 3 GROOTSCHALIGE OPSLAG IS NOG NIET RENDABEL**

Hieronder worden eerst de karakteristieken van enige opslagsystemen geschetst. Daarna volgt een korte beschouwing over de haalbaarheid.

#### **KARAKTERISTIEKEN POWER-TO-GAS (P2G)**

Bij P2G wordt in de eerste plaats gedacht aan de productie van waterstof via elektrolyse. Daarvan kan een deel omgezet worden in methaan (aardgas) en een deel in methanol, ammoniak of een andere vloeistof. Een deel van het waterstof kan direct in het gasnet gebruikt worden; methaan kan dat zondermeer. Het grote voordeel van gas is dat het makkelijk in grote hoeveelheden kan worden opgeslagen. Zo heeft Duitsland nu al mogelijkheden om gas op te slaan voor 3 maanden gebruik. De zo opgeslagen energie is 200 maal zo groot is als die van alle Duitse waterbekkens (PAC) samen (Stern, febr.2014). Vloeistoffen zijn geschikt als transportbrandstof.

Maar investeringen voor een elektrolyser zijn vrij hoog. En er zijn vrij hoge investeringen nodig voor elke verdere omzetting, terwijl telkens forse verliezen optreden (omzetting in warmte!). De kosten zullen wellicht flink dalen, maar het is nog niet duidelijk wanneer een "positieve business case" mogelijk is.

ECN & DNV GL (juli 2014) concluderen dat P2G op den duur een "robuuste rol" zal spelen (orde 2 tot 20 GW<sub>e</sub> ofwel 60 tot 600 Pj/jr), maar ook dat het niet voor 2030 rendabel zal zijn, en dan alleen als de elektrolyzers tenminste orde de helft van het jaar continu draaien. Daardoor lijkt P2G niet geschikt om alleen gebruikt te worden om de fluctuaties in productie van energie uit zon en wind op te vangen. Mulder (Biesboer punt 7) is het daar overigens niet mee eens.

#### **KARAKTERISTIEKEN ACCU**

De capaciteit van (dure) Li-ion accu's die in elektrische auto's worden gebruikt, bedraagt thans ongeveer 0,1 kWh/kg = 0,36 MJ/kg (Ingenieur, 3 februari 2012, blz 21). Dat is ongeveer 1% van de capaciteit van benzine. Die elektrische energie wordt wel veel efficiënter in bewegingsenergie omgezet dan mogelijk is met benzine, waardoor een middenklasse auto nu een met een accu van orde 250 kg een capaciteit kan hebben van orde 25 kWh = 90 MJ. Er wordt hard, en met succes, gewerkt aan accu's met een hogere capaciteit. Een verhoging van die capaciteit tot ongeveer 200 MJ per auto is over orde 20 jaar wellicht mogelijk.

Personenauto's worden niet permanent gebruikt, waardoor hun accu's deels gebruikt kunnen worden voor opslag: accu laden als er veel elektriciteit beschikbaar is (bijvoorbeeld in de nacht bij flinke wind) en weer elektriciteit leveren aan het net als daar veel vraag naar is en de auto op dat moment toch niet gebruikt wordt. Als er in de toekomst ruim 2 miljoen volledig elektrische personenauto's zijn en die gemiddeld voor 50 MJ (ongeveer ¼ van de toekomstige capaciteit) voor opslag ingezet kunnen worden, bedraagt de effectieve opslagcapaciteit 0,1 PJ. Dat is orde de helft van de benodigde capaciteit voor etmaalf fluctuaties ten behoeve van gebruiksvorm d (elektriciteit voor verlichting en apparaten).

Huiseigenaren met PV zonnecellen kunnen accu's installeren om de zelf opgewekte elektriciteit op te slaan. Dat wordt aantrekkelijk als de prijs van elektriciteit ook voor hen fluctueert en de kosten van accu's laag genoeg wordt in verhouding tot de prijsfluctuaties. Stel dat een huiseigenaar met zijn zonnepanelen 2000 kWh/jr produceert. Op zonnige zomerdagen is dat dan wellicht 20 kWh/etmaal. Stel dat hij voor 1000 kg aan traditionele (goedkope) loodaccu's installeert met een capaciteit van 0,03 kWh/kg. Die nemen de ruimte in van een gangkast. Dan kan hij daarmee 30 kWh ≈ 100 MJ opslaan. Dat is voldoende voor de etmaalf fluctuaties in elektriciteit en misschien ook de fluctuaties van ongeveer een week die ontstaan door de afwisseling van zonnig en somber weer en door zijn eigen verbruik. Maar zeker niet voldoende om de fluctuatie van een jaar te overbruggen. Als 1 miljoen huishoudens in Nederland een opslagcapaciteit hebben van 30 kWh, betekent dat een opslagcapaciteit van 0,1 PJ, een significante bijdrage aan de benodigde capaciteit voor opslag ten behoeve van de etmaal fluctuaties (bijvoorbeeld voor gebruiksvorm a), maar nauwelijks voor de fluctuaties met langere periode.

#### **KARAKTERISTIEKEN POMP ACCUMULATIE CENTRALE (PAC)**

Pomp Accumulatie Centrales bestaan uit een waterbekken met hoog waterniveau, dat via een buis en pompen/turbines verbonden is met een waterbekken met laag niveau. Elektrische energie kan worden opgeslagen door water uit het lage bekken omhoog te pompen naar het hoge. Het kan weer teruggewonnen worden door het water via de turbine terug te laten stromen. In berggebieden worden veel stuwmeren gebruikt als hoog bekken en een ander (natuurlijk) meer als laag bekken. In Europa is niet veel plaats voor nog meer stuwmeren.

Het is denkbaar dat er voor de Nederlandse kust één tot hooguit 10 PAC's worden gebouwd met de omvang van Vlieland (40 km<sup>2</sup>). Een voorbeeld daarvan is geschetst in de Ingenieur van 14 september 2012 (blz 28-31). Het bekken met laag waterniveau ontstaat door de bouw van een ringvormige dijk. Het waterniveau in dit "valmeer" kan zakken tot 40m onder zeeniveau. Het hoge bekken wordt gevormd door de zee rondom. De opslagcapaciteit is 0,06 PJ. Er zouden 15 tot 20 van dergelijke PAC's nodig zijn om de volledige etmaalfuncties op te vangen en honderden voor de fluctuatie met periode 5 tot 15 dagen, een ondenkbare optie.

Een variant is de Ondergrondse Pomp Accumulatie Centrale (OPAC). Een recent plan daarvoor is afkomstig van de Limburgse ondernemer Jan Huynen (Dirkse, febr.'15). Het lage bekken is een kunstmatige grot (of gangenstelsel) op 1400 m diepte (graniet in Limburg?) met een inhoud van 2.500.000 m<sup>3</sup>; het hoge een meertje met de zelfde inhoud (bijvoorbeeld een meer ter grootte van een zandwininput met oppervlak van ruim 10 ha en een diepte van 25m). De opslagcapaciteit is 0,03 PJ.

#### KARAKTERISTIEKEN WARMTEOPSLAG EN POWER-TO-HEAT, P2H

Zonne-energie kan direct omgezet worden in warmte met zonnecollectoren (decentraal) of met "Concentrated Solar Power" (CSP, centraal). Elektriciteit uit zon en wind kan indirect worden omgezet in warmte of koude door die aan de omgeving te onttrekken met behulp van warmtepompen. De resulterende warmte of koude kunnen vervolgens meteen gebruikt worden, dan wel opgeslagen worden. Na opslag kan warmte als zodanig worden gebruikt (eventueel via warmtepompen op hogere temperatuur of via warmtewisselaars op lagere temperatuur), maar ook weer omgezet worden in elektriciteit, al gaat dat laatste met veel verliezen gepaard. Over opslagmogelijkheden in de vorm van warmte of koude het volgende.

Om 70.000 woningen in Amsterdam en Almere een weekend (zonder vorst) van warmte te voorzien, bouwt Nuon een gigantische thermofles met een diameter van ruim 25m en een hoogte van ongeveer 50m (Warmtenetwerk nr. 19, lente 2014). De fles is gevuld met water dat een maximum temperatuur van 125°C kan krijgen (vloeibaar door hoge druk). Daaraan kan warmte onttrokken worden waardoor de temperatuur daalt tot bijvoorbeeld 25°C. De opslagcapaciteit komt dan overeen met bijna 0,01 PJ. Per woning is dat 130 MJ (warmte van 3 à 4m<sup>3</sup> aardgas). Voor alle woningen in Nederland (orde 7 miljoen) zouden 100 van dergelijke flessen nodig zijn.

Een variant is het "Ecovat" (Warmtenetwerk nr. 21, winter 2015). Dat bestaat uit een soort vijver, zuiver rond met verticale wanden van beton (diepwanden) en een deksel er op. Het water in de vijver is stilstaand. Het kan maximaal 90°C zijn. De omringende grond zorgt voor de warmte-isolatie. Buizen in de wand zorgen voor warmtewisseling. Voorbeeld is een "ecovat" met een diameter van 60m en een diepte van 22m. Als de temperatuur kan variëren van 25°C tot 90°C bedraagt de opslagcapaciteit 0,016 PJ. Als het water in de zomer op 90°C wordt gebracht met zon (zonnwarmte of PV en warmtepompen), kan het in de winter ruim 800 goed geïsoleerde woningen (met warmtebehoefte van 20 GJ/jaar) volledig van warmte voorzien. Om alle woningen in Nederland op deze manier te verwarmen zouden bijna 10.000 van dergelijke vaten nodig zijn (25 in elke gemeente): opslagcapaciteit 160 PJ. De warmtebehoefte van één goed geïsoleerde woning kan men ook dekken met een "ecovat" onder de achtertuin met diameter 5m en een diepte van 6m, rekening houdend met meer warmteverliezen als gevolg van door de kleinere inhoud.

#### HAALBAARHEID OPSLAGSYSTEMEN

De haalbaarheid van de grootschalige introductie van opslagsystemen wordt veelal afgemeten aan het verschil tussen opbrengsten en kosten, zoals geschat voor de toekomstige situatie.

Bij praktisch elk systeem zitten de kosten vooral in de investering en niet zozeer in het gebruik ervan. Er is een verschil tussen systemen waarbij het grootste deel van de investering zit in de omzetting van elektriciteit in een andere vorm, zoals P2G, en in systemen waarbij de investering vooral zit in het opslaan

zelf, zoals accu, vliegwiel, waterbekken, samengeperste lucht, ecovat. In het eerste geval zijn de kosten grofweg recht evenredig met de omzettingcapaciteit (eenheid €/kW); in het tweede met de opslagcapaciteit (eenheid €/MJ of €/kWh).

Bij alle systemen hangen de opbrengsten samen met de fluctuatie van de elektriciteitsprijs. Opslag vindt alleen plaats als er veel elektriciteit beschikbaar is en daardoor de elektriciteitsprijs laag is. Bij de eerste groep systemen (P2G) is vooral het totaal aantal uren per jaar dat de elektriciteitsprijs voldoende laag is van belang. Bij de laatste is ook de frequentie van groot belang. Opslag voor de fluctuatie tijdens een etmaal levert 365 maal per jaar geld op; opslag voor de fluctuatie van zomer naar winter slechts 1 maal per jaar.

Een economisch optimum kan wellicht verkregen worden door een combinatie van enerzijds P2G, waarvan het aantal €/kW alleen laag kan zijn bij voldoende draaiuren per jaar, anderzijds accu's (of waterbekkens of ..) waarvan het aantal €/kWh alleen laag kan zijn bij frequent laden en ontladen, waardoor ze de etmaalfluctuaties op kunnen vangen ten behoeve van de P2G-eenheden.

De investeringskosten van elektrolyzers voor P2G bedragen orde €100/kW (Jepma sept. 2015; klopt dit??). Ze zullen in de toekomst wellicht rendabel zijn als ze tenminste orde de helft van het jaar (4.380 uur) continu draaien. Dat wordt mogelijk als P2G gecombineerd wordt met andere opslagsystemen die tenminste de etmaalfluctuatie opvangen en liefst ook de fluctuatie van orde 10 dagen. Bij een afschrijving over 10 jaar zijn de kosten voor de investering per geleverde hoeveelheid energie  $\text{€}100 / (10 \times 4.380) = \text{€}0,002/\text{kWh} = \text{€}0,0006/\text{MJ}$  ofwel €0,02 per uitgespaarde m<sup>3</sup> aardgas (??).

De investeringskosten voor accu's die mogelijk geschikt zijn voor het opvangen van decentraal opgewekte elektriciteit met zon PV, bedragen thans ongeveer €800/kWh. De verwachting is dat die kunnen dalen naar €200/kWh = €56/MJ (Ingenieur, 1 nov. 2013, blz 9). Dan moet bovengenoemde huiseigenaar 30 x 200 = €6.000 investeren. Als hij daarmee dan 100 keer per jaar een etmaalfluctuatie van 20kWh opvangt met een prijsverschil van €0,1/kWh, is de opbrengst  $100 \times 20 \times 0,1 = \text{€}200/\text{jaar}$  en duurt het zeker 30 jaar voordat hij zijn investering heeft terugverdiend.

De aanlegkosten van een Pomp Accumulatie Centrale in de vorm van een valmeer op de Noordzee met opslagcapaciteit van 18 GWh = 0,06 PJ, worden geschat op €3 miljard euro, hetgeen overeenkomt met €170/kWh = €46/MJ. De begroting van Jan Huynen voor 'zijn' OPAC leidt tot praktisch dezelfde kosten. Bij een afschrijving over 20 jaar en 360 keer cycli per jaar met gemiddeld de halve opslagcapaciteit, bedragen de kosten voor de investering per geleverde hoeveelheid energie  $\text{€}170 / (20 \times 360 \times 0,5) = \text{€}0,05/\text{kWh} = \text{€}0,014/\text{MJ}$ .

Als de aanlegkosten van een groot "ecovat" als boven beschreven 3 miljoen euro bedragen volgt een prijs van €0,2/MJ. Als het vat gebruikt voor de cyclus van zomer en winter en het een levensduur van 30 jaar heeft, moeten de investeringskosten grofweg verdeeld worden over de 30 keer dat warmte of koude geleverd wordt. De kosten per geleverde hoeveelheid warmte of koude bedragen dan  $\text{€}0,2/30 = \text{€}0,007/\text{MJ}$  ofwel €0,24 per uitgespaarde m<sup>3</sup> aardgas (36 MJ/m<sup>3</sup> aardgas).

Conclusies:

- Opslagsystemen als accu's, o.a die van elektrische personenauto's, PAC's en dergelijke zijn mogelijk op den duur haalbaar om de etmaalfluctuaties voor gebruiksvorm d (electriciteit) op te vangen; misschien zelfs ook nog die voor gebruiksvorm a (transportbrandstof). Voor fluctuaties met langere periode zijn ze waarschijnlijk niet geschikt.
- P2H lijkt op betrekkelijk korte termijn haalbaar om alle fluctuaties in de productie op te vangen voor gebruiksvorm b (lage temperatuur warmte en koude). Voor de gebruiksvormen c (hoge temperatuur warmte) en d (electriciteit voor verlichting en apparaten) is dat niet duidelijk. Wel lijken WKK-systemen die de verhouding tussen de productie van electriciteit en warmte kunnen variëren, een belangrijke bijdrage te kunnen leveren aan de haalbaarheid.
- P2G lijkt, in combinatie met opslagsystemen voor het opvangen van de hoogfrequente fluctuaties, op den duur haalbaar voor gebruiksvorm a (transportbrandstof) en misschien ook wel c en d.



**LITERATUUR**

- Berenschot, Ce Delft en ISPT, sept. 2015. “Power to Products”
- Biesboer, “Groene gevolgen”. De Ingenieur van oktober 2015, blz 36-39.
- Boonstra en Persoon. De Ingenieur van november 2014, blz 24.
- David Dirkse, februari 2015. <http://www.davdata.nl/opac.html>
- DNV GL, TUDelft en Berenschot, 25 maart 2015. “Routekaart energieopslag 2030”
- ECN & DNV GL, juli 2014. “De rol van Power-to-Gas in het toekomstige Nederlandse energiesysteem”, ECN-O-14-010.
- Catrinus Jepma, sept.2015. “Power-to-gas: rekenen graag!”, [www.energiepodium.nl/opinie](http://www.energiepodium.nl/opinie)
- F. Mulder, H. Postma, E. Klop en H.J. Visser, oktober 2015. Naar een hoog aandeel van duurzame energie – Opslag is noodzaak voor afstemmen vraag en aanbod. NL-Ingenieurs.
- Michael Sterner, 5 febr.2014. Verwachting Duits onderzoek: “Power-to-gas over tien jaar rendabel” [www.energiepodium.nl/nieuws](http://www.energiepodium.nl/nieuws)

**BIJLAGE: BEREKENING OPSLAGCAPACITEIT T.B.V ELEKTRICITEIT VOOR VERLICHTING EN APPARATEN****VEREENVOUDIGINGEN**

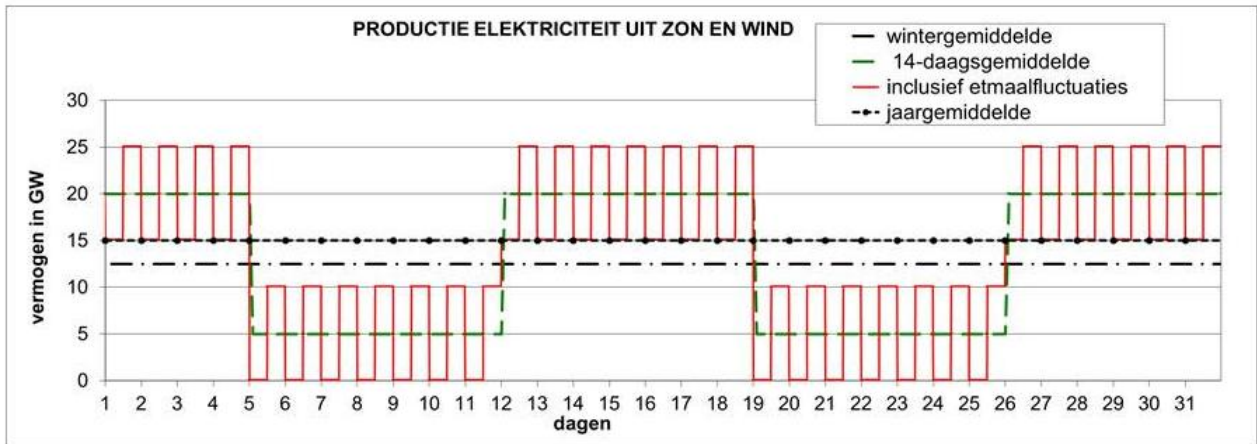
- Fluctuatie geproduceerde elektriciteit met 3 periodes, elk met eigen periode (etmaal, 16-dagen, jaar) en eigen amplitude (5GW, 7,5GW, respectievelijk 2,5GW), steeds volgens “kantelen”-patroon (geen sinus, geen zaagtand).
- Gemiddelde productie = 15GW. Een en ander resulteert in de productie weergegeven in figuur B1 voor de maand december.
- Geen fluctuatie gebruikte elektriciteit.
- Gemiddelde productie = gemiddeld gebruik. Alle productie boven 15GW wordt opgeslagen. Wanneer de productie lager is, wordt die aangevuld met elektriciteit uit opslag.
- Er zijn 3 opslagsystemen, één voor elke periode.

Het opslagsysteem voor zomer-winter opslag (periode jaar) wordt in de zomer gevuld constant met 2,5GW, zodat het aan het eind van de zomer (6 maanden) gevuld is met  $2,5\text{GW} \cdot 365/2 \cdot 24\text{uur} = 11.000 \text{ GWh} \approx 40 \text{ PJ}$ . In de winter wordt het systeem geleegd constant met 2,5GW, zodat het aan het eind van de winter juist helemaal leeg is. Combinatie van de productie uit zon en wind met de levering van elektriciteit van en naar dit systeem levert het beeld op van figuur B2

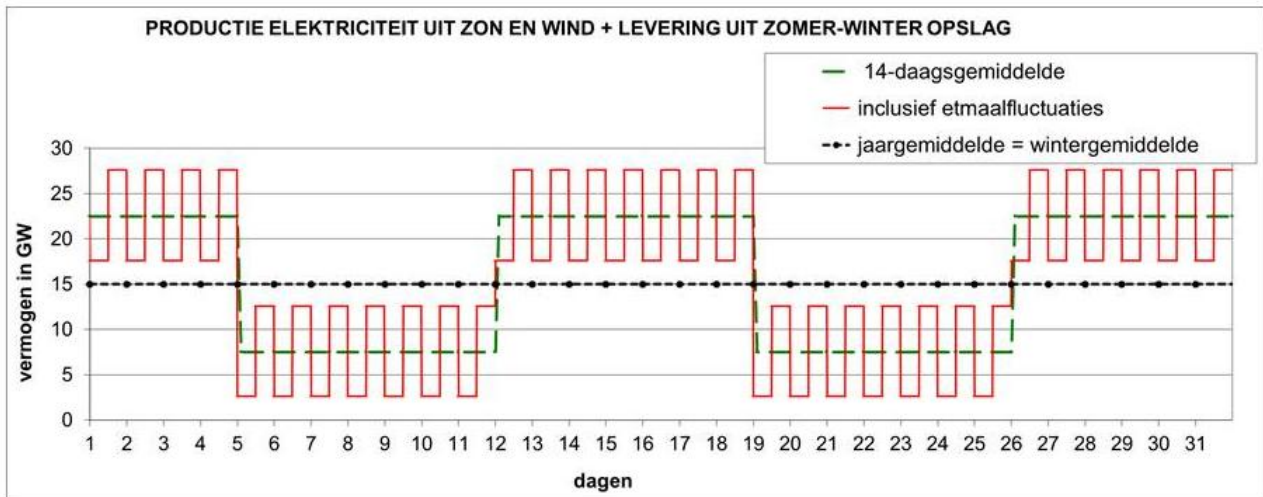
Het systeem voor de 16-daagse fluctuatie wordt op de 8 dagen van hoge produktie gevuld met constant 7,5GW, zodat het aan het eind van die periode gevuld is met  $7,5\text{GW} \cdot 16/2 \cdot 24\text{uur} = 1.440 \text{ GWh} \approx 5 \text{ PJ}$ . In de daarop volgende dagen wordt het opslagsysteem weer geleegd constant met 7,5GW, zodat het aan het eind van 8 dagen juist helemaal leeg is. Combinatie van de productie uit zon en wind met de levering van elektriciteit van en naar dit systeem en het systeem voor zomer-winter opslag levert het beeld op van figuur B3: een gelijkmatige levering van elektriciteit met alleen een dag en nacht fluctuatie.

Het systeem voor de dag-nacht fluctuatie wordt overdag gevuld met constant 5GW, zodat het aan het eind van de dag gevuld is met  $5\text{GW} \cdot 24/2 \text{uur} = 60 \text{ GWh} = 0,2 \text{ PJ}$ . In de nacht wordt het opslagsysteem weer geleegd constant met 5GW, zodat het aan het eind van de nacht juist weer helemaal leeg is.

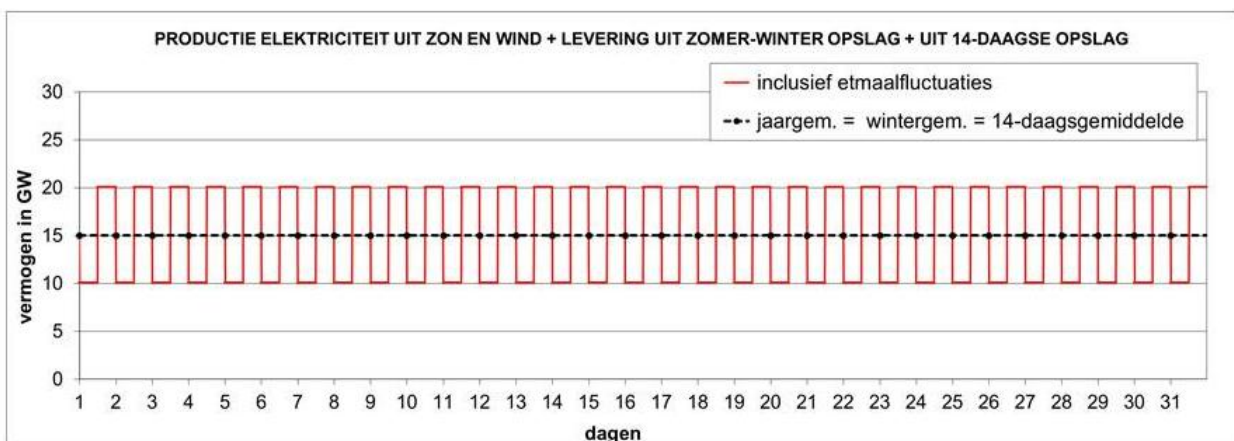




Figuur B1



Figuur B2



Figuur B3