

http://www.risoe.dk/rispubl/reports/ris-r-1608_186-195.pdf

<http://www.emissieautoriteit.nl/emissiehandel/achtergrond-ronden-1/cdm-en-ji/kyoto-afspraken>

Realiseerbare Scenario's voor een Toekomstige Elektriciteits Voorziening, voor 100% gebaseerd op Duurzame Energie

Gregor Czisch, Institute for Electrical Engineering – Efficient Energy Conversion
University of Kassel, Germany, Phone/Fax: (+49) 561-804-6377/6434, E-Mail:
gczisch@uni-kassel.de
Gregor Giebel, Risø National Laboratory, Technical University of Denmark

Resumé

In het licht van de problemen met hulpbronnen en het klimaat lijkt het duidelijk dat we ons energiesysteem geheel moeten omschakelen naar duurzame energie. Maar de vraag rijst hoe we zo'n systeem moeten vormgeven, welke technieken we zouden moeten gebruiken, en natuurlijk hoe duur het zou mogen zijn. Deze vragen stonden centraal bij een onderzoek naar het gunstigste kostenplaatje voor een toekomstige duurzame energievoorziening in Europa en zijn naaste Aziatische en Afrikaanse omgeving. De resulterende scenario's zijn gebaseerd op een breed scala aan gegevens betreffende het elektriciteitsverbruik en duurzame vormen van energie. Een lineaire optimalisatie bepaald de beste systeemconfiguratie en op welk tijdstip de verschillende onderdelen aan te wenden. Het resultaat van de scenario's kan worden beschouwd als een wetenschappelijke doorbraak omdat het bewijst dat een volledig duurzame elektriciteitsvoorziening mogelijk is, zelfs met bestaande technologie, en tegelijkertijd betaalbaar voor onze nationale economieën. In het behoudende 'base case' scenario domineert windenergie de energieproductie, verspreid over gebieden met de meeste wind binnen het gehele voorzieningsgebied, verbonden met de centra van vraag naar energie via HVDC transport. Bovendien integreert het energienet op krachtige wijze de bestaande opslag van waterkracht om back-up te verschaffen, in gelijke mate bijgestaan door energie uit biomassa en ondersteund door zonthermische energie. De belangrijkste resultaten van de verschillende scenario's kunnen als volgt worden samengevat:

- Een volledig duurzame elektriciteitsvoorziening voor Europa en zijn omgeving is mogelijk en betaalbaar.
- Import van elektriciteit uit niet-Europese buurlanden kan een zeer waardevol en substantieel onderdeel uitmaken van toekomstige levering.
- Het effenen van de stroomproductie door het gebruik van hulpbronnen op locaties in verschillende klimaatzones verbetert de betrouwbaarheid van de aanvoer en vermindert de kosten.

- Een grootschalige samenwerking van veel verschillende landen maakt de weg vrij voor de mogelijkheid om de doelstellingen te verenigen van ontwikkelingsbeleid en klimaatpolitiek in een multilaterale win-win strategie.

Om de uitvoering te ondersteunen wordt een internationale uitbreiding van de ideeën van de Duitse feed-in wet voor energie (of soortgelijke andere stelsels waar ook ter wereld) voorgesteld voor het vervolgverdrag van het Kyoto klimaatakkoord.

1 Inleiding

Op de eerste Risø Energy Conference in 2003 [GiebelEtAl 2003] hebben we laten zien dat grootschalig transport van duurzame energie, met name windenergie, via HVDC (High-Voltage Direct Current) vanuit windrijke gebieden in Europa naar centraal Europa mogelijk is tegen een redelijke prijs en met grote ontwikkelingsvoordelen voor de installerende landen. Op de tweede Risø Energy Conference in 2005 [GiebelEtAl 2005] presenteerden we berekeningen die aantoonde dat vanwege de grote verschillen in hulpbronnen, het voordeliger kan zijn om hoger windpotentieel verder weg (in dit geval, Egypte) te gebruiken dan de middelmatige hulpbronnen in noord Europa, zelfs in aanmerking genomen het transport over grote afstanden. Intussen is sedert de Risø Energy Conference in 2003 zowel het wetenschappelijke bewijs als de persoonlijke bewustwording betreffende klimaatverandering en de menselijke bijdrage hieraan aanzienlijk gegroeid.

In deze verhandeling willen we een raamwerk presenteren voor de implementatie van de ideeën die we hebben laten zien in de voorgaande stukken, en de duidelijke voordelen van grootschalige distributie en transport van energie via een overlappend HVDC-net. Zo'n net van continentale grootte bovenop het bestaande hoogspanningsnet stelt Europa en de omliggende regio's in staat al hun elektriciteit uitsluitend uit duurzame hulpbronnen te produceren. Een optimalisatiemethode toont aan dat de totale kosten voor het nieuwe systeem vergelijkbaar zijn met die van het oude systeem. Windenergie wekt rond 70% van de totale productie op, terwijl waterkracht en biomassa het overige deel voor hun rekening nemen.

2 De Internationale Feed-in Wet voor Energie

De Duitse feed-in wet was een van de grootste 'succes stories' ter wereld voor nieuwe duurzame energie. Een internationale feed-in wet zou de wereldwijde verbreiding van dit succes zeer ten goede komen en zou, mits zorgvuldig op touw gezet, het gebruik van duurzame energie meer dan welke ander maatregel bevorderen. Eén mogelijkheid voor Duitsland zou zijn om de bestaande FIL (Feed-in law) uit te breiden tot een overeenkomst die geratificeerd kan worden door andere landen, of een soortgelijke regeling op de internationale agenda te plaatsen die in werking treedt zodra twee landen de overeenkomst getekend hebben.

De FIL verplicht de nutsbedrijven in Duitsland om elke levering van elektriciteit uit windenergie of andere duurzame bronnen aan het stroomnet te accepteren. Bovendien moeten de nutsbedrijven zorgen voor een passend elektriciteitsnetwerk, toereikend voor het opnemen van duurzame energie. Daarnaast verplicht de FIL de nutsbedrijven

om een duidelijk omschreven minimum feed-in tarief voor duurzame energie te betalen – afhankelijk van de soort duurzame hulpbron die gebruikt wordt bij de productie. Het totale bedrag wordt gespreid overeenkomstig het elektriciteitsverbruik van de klanten van het nutsbedrijf. Eén van z'n gevolgen was de snelle groei van stroomproductie uit windenergie, die Duitsland de wereldleider van windenergie maakte ondanks zijn meestal middelmatige hulpbron. Andere landen die veel succes boeken met windinstallaties hebben allemaal een dergelijke wet, bv. Spanje, Oostenrijk of Denemarken (hoewel daar het succes stopte na de drastische inperking van de betalingen door de centrum- rechtse regering, vijf jaar geleden). De meeste andere ondersteuningsmaatregelen hadden niet het succes dat sommige soorten feed-in wetten hadden. Dit effect is het duidelijkst in Groot-Brittannië waar, ondanks ruime aanwezigheid van windenergie, vele jaren weinig activiteit was op dit gebied.

De internationale feed-in wet voor energie moet meer gebruikt worden als een onderdeel van het energiebeleid en zijn effect dient te worden verbeterd. Kortom, of de FIL wordt uitgebreid, of er wordt een nieuwe reeks maatregelen gecreëerd, die de ontwikkeling van duurzame energie bevordert in de vorm van een internationale overeenkomst waarmee geïnteresseerde staten kunnen instemmen door ze te ratificeren. Samen stellen deze staten ten doel om een snelle groei te ontwikkelen van het gebruik van duurzame energie en binden ze zich voor lange tijd aan de overgang naar een duurzame CO₂-neutrale elektriciteitsvoorziening. De financiering van de elektriciteitskosten moet, zoals nu bij de FIL, naar rato overeenkomstig ieders elektriciteitsgebruik worden gespreid over de eindgebruikers binnen elk land. In afwijking van de Duitse FIL, meer overeenkomstig de Spaanse feed-in regeling, lijkt het redelijk dat slechts extra kosten boven een bepaald minimum door de nieuwe gemeenschap van verantwoordelijke staten betaald worden. Dit minimum wordt overeengekomen met elk land dat de overeenkomst ondertekent.

Deze internationale feed-in wet zou, tenminste op langere termijn, drie stappen moeten omvatten naar een passend internationaal effectief instrument. De eerste stap is het betalen voor de elektriciteit die in het stroomnet van elk land gepompt wordt. Daarvoor zou het nodig kunnen zijn dat binnen het verdrag overeen wordt gekomen dat de kosten voor uitbreiding van het elektrische netwerk ook worden opgenomen in het feed-in tarief als bv. de goede hulpbronnen zich ver weg bevinden van het bestaande netwerk en als het land niet in staat zou zijn om de uitgaven eenvoudig op te brengen. Het feed-in tarief moet zodanig opgebouwd zijn dat het energiespecifieke tarief lager is op winplaatsen van hogere kwaliteit, maar dat het tegelijkertijd het zoeken naar de beste winplaatsen stimuleert. De tweede stap moet mogelijk maken dat duurzame energie in het ene land geproduceerd wordt en geconsumeerd wordt in buurlanden, terwijl de derde stap zou moeten voorzien in het transport van duurzame energie naar derde landen. Dit brengt mee het ontwikkelen van regels met betrekking tot toegang voor derden in landen die niet hebben mede ondertekend. Deze derde stap is erop gericht om stapsgewijs een internationaal leveringssysteem voor duurzame stroom van de grond te krijgen. Door de drie stappen te volgen kan ervoor gezorgd worden dat ook landen met een laag energiegebruik of landen die om economische redenen niet gemakkelijk in staat zijn hun eigen duurzame potentieel te benutten, in ruime mate gebruik kunnen maken van gunstige groene stroom. Zo kan dit potentieel op internationaal niveau in dienst gesteld worden van het klimaat en het grondstoffenbeleid. Deze vorm van "FIL" kan dus bilateraal worden gestart tussen Duitsland en andere landen, of op Europees niveau of allerliefst als een internationale

overeenkomst waarbij met name een verankering binnen de VN geschikt lijkt. De tijd is hoe dan ook rijp om dit idee te gaan pousseren op de follow-up van het Kyoto verdrag. In 2009 wordt de in potentie beslissende 'Conference of the Parties' in Kopenhagen gehouden. We stellen daarom voor dat dit mechanisme ontwikkeld wordt als een nieuwe variant op het Clean Development Mechanism (CDM) of een derde instrument naast Joint Implementation (JI) en CDM.

Zo'n internationale "FIL" zou een vorm van ontwikkelingshulp kunnen worden voor staten in het zuiden en oosten van de Europese Unie en wereldwijd, en tegelijkertijd van voordeel zou zijn voor de betrokken rijkere geïndustrialiseerde landen door het gebruik van grote economische mogelijkheden en derhalve goedkope schone stroom. Daarbij zou een wezenlijk effect van een internationale "FIL" zijn dat het gunstigste locaties voor verschillende duurzame vormen van energie open stelt, die ondergebracht worden in een internationaal systeem dat goedkopere oplossingen voor klimaatbehoud oplevert dan pogingen van landen die op eigen houtje opereren. Internationale samenwerking op het gebied van stroomproductie en -transport opent de mogelijkheid voor een stroomvoorziening die alleen draait op duurzame energie, zelfs als alleen bestaande technologie wordt gebruikt en die slechts weinig duurder is of zelfs goedkoper dan de huidige stroomvoorziening. De hieraan ten grondslag liggende berekeningen zijn gebaseerd op de huidige, relatief hoge kosten van duurzame technologie. [Czisch 2005]. Bij min of meer optimaal gebruik van duurzame hulpbronnen en beschikbare technologie zou de prijs van elektriciteit waarschijnlijk liggen onder de huidige prijs van vergelijkbare stroom uit nieuwe centrales op fossiele brandstof. Zo zou de overstap naar duurzame energie zeer waarschijnlijk leiden tot economische besparingen die steeds groter worden naarmate opwekken van schone stroom goedkoper wordt door techno-economische vooruitgang. De leercurve parameter voor windenergie ligt bijvoorbeeld rond de 15%, wat wil zeggen dat voor elke verdubbeling van het geïnstalleerd vermogen (op de huidige voet vindt dit elke paar jaar plaats), de prijs van windenergie 15% daalt. Vergeet niet dat de prijs van de meeste duurzame energieproductie redelijk vast ligt nadat de aanvangsinvesteringen gedaan zijn. Hetzelfde kan niet gezegd worden van welke ander energieoptie die te maken heeft met het risico van brandstofprijsverhogingen.

Het volgende hoofdstuk houdt zich bezig met de voordelen van grootschalige uitwisseling van duurzame energie, die voortvloeit uit de invoering van de internationale FIL in Europa en omgeving.

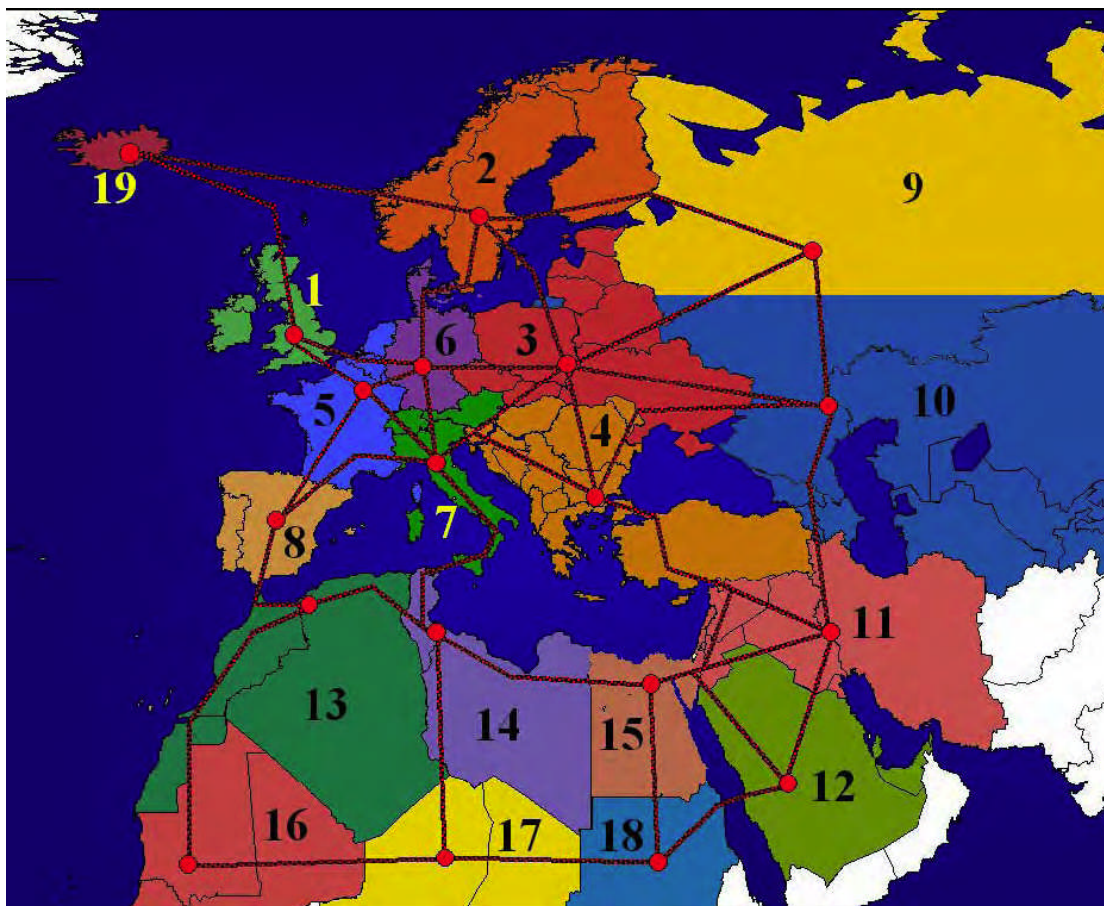
3. 100% Duurzaamheid: een Droom die werkelijkheid kan worden

Zowel het probleem van hulpbronnen als de omvang van de dreigende klimaatverandering maken een koerswijziging van ons gebruik van energiebronnen onontkoombaar. Los van de vraag op welk niveau het energieverbruik kan worden gestabiliseerd, is meer inzicht nodig in de technische en economische mogelijkheden voor toekomstige energievoorziening. Veelbelovende opties bestaan voor het gebruik van duurzame energie in zijn totale verscheidenheid.

[Czisch 2005] concentreert zich op het technische aspect van de elektriciteitsvoorziening als onderdeel van de energielevering. Stroomlevering wordt steeds belangrijker en kan worden gezien als de sleutel tot duurzame

energievoorziening. Wereldwijde stroomproductie door grote centrales is momenteel verantwoordelijk voor 10,5 Gt CO₂ ofwel bijna 45% van alle door mensen veroorzaakte CO₂ uitstoot uit fossiele brandstof ontstaat in grote krachtcentrales met ieder een jaarlijkse uitstoot van meer dan 0,1 Mt CO₂ [IPCC 2005]

In zijn onderzoek werden de mogelijkheden voor een grotendeels CO₂-neutrale elektriciteitsvoorziening voor Europa en zijn naaste omgeving onderzocht op basis van verschillende scenario's die een gebied bestrijken met ongeveer 1,1 miljard inwoners en een stroomverbruik van ongeveer 4000 TWh/a. Centraal stond de vraag hoe stroomlevering te ontwikkelen die leidt tot de goedkoopste oplossing. Er werd bijvoorbeeld gekeken naar scenario's die alleen gebruik maken van bestaande technologie. Ook werd onderzocht welke invloed het gebruik van enige nieuwe technieken- voor zover nog in ontwikkeling- zou kunnen hebben op toekomstige opties voor stroomlevering, aan de hand van wat voorbeelden. Het ontwerp van de toekomstige elektriciteitsvoorziening dient te voldoen aan de hoogst mogelijke criteria van objectiviteit, om een eerlijke vergelijking van verschillende scenario's mogelijk te maken.



Figuur 1: Mogelijkheid stroomleveringsgebied verdeeld in 19 regio's met een schematische voorstelling van potentiële elektriciteitstransport tracés met gebruik van HVDC naar de geografische bevolkingscentra van de regio's.

Om dit doel te bereiken werd een wiskundige optimalisatiebenadering gebruikt. Het doel van de optimalisatie was het vinden van het ideale systeem van krachtcentrales en elektriciteitsnetten, die de goedkoopste oplossing biedt voor een realistische vraag naar elektriciteit in de buurt van de huidige vraag. Als opties voor stroomproductie

werden onder andere het gebruik van duurzame energie uit waterkrachtcentrales, windenergie, energietorens [ABZ 2004], biomassacentrales zowel als zonne- en geothermische centrales bekeken. Afhankelijk van de geselecteerde voorwaarden resulteerde dit in verschillende scenario's die een breed fundament neerzetten voor toekomstige politieke beslissingen. De scenario's presenteren opties voor toekomstige organisatie van de elektriciteitlevering en tonen de uitwerking van verschillende – ook politieke voorwaarden.

Voordat het rekenwerk aan de scenario's kon beginnen moesten de verschillende mogelijkheden van duurzame energieën en hun karakteristieken worden vastgesteld in een hoge resolutie in tijd en ruimte. Hierdoor ontstond een betrouwbare databank die antwoorden kan verschaffen op vragen in relatie tot een brede duurzame energievoorziening, zonder zijn toevlucht te nemen tot onbewezen veronderstellingen. Ook de karakteristieken van de verschillende systemen van energieomzetting en transport moesten worden bestudeerd en besproken in samenhang met de hieraan verbonden kosten en mogelijkheden binnen het kader van de verhandeling.

We beginnen met een behoudend 'base-case'-scenario voor elektriciteitslevering die geheel steunt op duurzame energie, uitsluitend gebaseerd op nu beschikbare technologie en berekend volgens de huidige kosten van alle componenten. Dit 'base-case' scenario kan dus worden beschouwd als een soort conservatieve 'worst-case' schatting van onze toekomstige opties van duurzame energielevering.

Het resultaat van de optimalisering voor het 'base-case'-scenario is dat het grootste deel van de stroomproductie uit windenergie komt. Biomassa en nu bestaande waterkracht nemen het overheersende deel van de back-up functie voor hun rekening binnen het leveringsgebied dat onderling verbonden is door krachtige HVDC- kabels. De berekende prijs stroomproductie en HVDC- transport bedraagt ongeveer 4,65 €/kWh en ligt dus relatief dicht bij de huidige kosten van elektriciteit, geproduceerd volgens conventionele technologie.

In feite zijn ze lager dan de huidige prijzen op de elektriciteitsbeurs in Duitsland (Het maandelijkse gemiddelde voor goedkope Cal-08 in 2007 lag steeds ruwweg tussen 5,2 en 5.6 €/kWh [EEX 2007]). In alle scenario's speelt elektriciteitstransport een belangrijke rol, met uitzondering van de relatief dure door decentralisatie beperkende scenario's die grensoverschrijdend elektriciteitstransport via HVDC uitsluiten. Transport wordt gebruikt om fluctuaties af te vlakken van de weersafhankelijke elektriciteitsproductie uit duurzame hulpbronnen, om de beste productielocaties toegankelijk te maken voor algemeen gebruik en het gebruik mogelijk te maken van zowel waterkracht als gedecentraliseerde biomassa, met hun inherente opslagmogelijkheid en algemene inzetbaarheid binnen het voorzieningsgebied. Zo bewijst stroomtransport dat het één van de sleutels is voor een zuinige elektriciteitsvoorziening. Dit kan eens te meer worden geïnterpreteerd als een aansporing tot actie voor politieke besluitvormers, die dus weloverwogen internationale samenwerking zouden moeten nastreven bij het gebruik van duurzame energie en hierbij met name de kwestie van het internationale energietransport meenemen.

De scenario's vormen een gedetailleerde en betrouwbare basis voor cruciale politieke en technologische beslissingen inzake onze toekomstige energievoorziening. Ze tonen

aan dat – zelfs uitgaande van behoudende uitgangspunten- bij internationale samenwerking een uitsluitend duurzame energielevering mogelijk is, die zonder economische problemen van betekenis kan worden verwezenlijkt. Dit plaatst de verantwoordelijkheid voor toekomstige actie op het bord van de politiek. Een wezenlijke taak voor de beleidsmakers zou zijn het organiseren van de noodzakelijke internationale samenwerking en het ontwikkelen van juridische en economische instrumenten als de internationale FIL voor het omvormen van onze elektriciteitsvoorziening. Op die manier wordt niet alleen een redelijke weg ingeslagen naar CO₂-neutrale stroomvoorziening, maar bovendien wordt een schitterend perspectief geopend op de ontwikkeling van armere buurlanden van de Europese Unie.

4 Gedetailleerde resultaten van het scenario onderzoek

Verschillende concepten voor de levering van duurzame elektriciteit aan Europa en de aangrenzende gebieden zijn bestudeerd. In dit proces is rekening gehouden met het re-analyseren van gegevens van het ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) als meteorologische grondslag en de bevolkingsdichtheid als beperkende factor voor windenergie of het geschatte dakoppervlak in alle landen binnen het betrokken gebieden om het fotonvoltaische potentieel op daken te bepalen, in combinatie met gegevens betreffende zon-instraling van het ECMWF en National Centers for Environmental Prediction (NCEP) en het National Center for Atmospheric Research (NCAR), windsnelheden en ook temperaturen nodig voor bv. de stroomproductie door PV en CSP [ERA-15] [NCEP 1999]. Bovendien zijn andere duurzame bronnen als biomassa en waterkracht onderzocht of meegenomen op het niveau van de huidige kennis. Dit is allemaal ingevoerd in wiskundige optimalisatie routines waaraan de vraag is onderworpen welke duurzame hulpbronnen met hun individuele gedrag op verschillende tijdstippen, verschillende locaties en met verschillende opbrengsten gebruikt moeten worden, en hoe die geselecteerd moeten worden om een optimale kostenprestatie te bereiken. Een lineaire optimalisatie met ruwweg 2,45 miljoen voorwaarden en 2,2 miljoen vrije variabelen werd gebruikt om de beste combinatie voor elk scenario te vinden. De optimalisatie houdt rekening met het verloop op verschillende tijdstippen van de gezamenlijke consumptie van alle landen binnen elk individueel gebied (zoals ook te zien in figuur 1) evenals dat wat nodig is in relatie tot door grondstoflimieten beperkte productie. Beide groepen gegevens, vraag naar elektriciteit en gedrag in tijd van de productiemogelijkheden zijn verzameld voor optimalisatie (met gebruik van tijdsreeksen met intervallen van drie uur) voor alle 19 gebieden die voorzien moeten worden van stroom. Het optimalisatieproces garandeert dat het aanbod de vraag ten allen tijde dekt, en stelt vast of en in welke mate elke potentiële hulpbron gebruikt moet worden, en hoe elk onderdeel van het productiesysteem zal functioneren, inclusief de afmeting en werking van een HVDC- net dat over de infrastructuur van het huidige netwerk gelegd wordt. Het criterium van de optimalisatie is het minimaliseren van de totale jaarlijkse kosten van elektriciteit wanneer die in het regionale hoogspanningsnet gevoerd wordt, zodat die kosten direct vergeleken kunnen worden met die van gebruikelijke centrales die leveren aan het conventionele AC- hoogspanningsnet. Maar tegelijkertijd is de optimalisatie voor de economische bedrijfsvoering van alle centrales uitgevoerd met intervallen van drie uur of meer en tijdsreeksen die zich over

een jaar uitstrekken.

4.1 100% duurzaam base-Case Scenario

Het veelbelovende resultaat van het base-case scenario – dat uitgaat van een stroomleveringssysteem dat geheel is uitgevoerd met bestaande technologie, uitsluitend gebruik makend van duurzame energie voor de huidige prijs van alle onderdelen (zie [Czisch 2001] en [Czisch 2005] voor meer gedetailleerde informatie en onderliggende aannames) – laat zien dat elektriciteit kan worden geproduceerd en vervoerd naar het lokale netwerk voor een prijs onder 4.7 €/kWh, wat nauwelijks verschilt met de huidige conventionele stroomproductie. (Met gasprijzen in 2006 van ongeveer 3.5 €/kWh voor industriële gebruikers in Duitsland [EC 2007] heeft de elektriciteit van nieuw gebouwde combined-cycle gascentrales reeds een aanzienlijk hoger niveau van 7 - 8 €/kWh_{el} bereikt). In de resulterende optimale configuratie voor dit scenario komt bijna 70% uit windenergie opgewekt door windturbines met een berekend vermogen van 1040 GW. Een HVDC (High Voltage Direct Current) transportsysteem verbindt de gunstige windlocaties met de centra van vraag, terwijl ook op krachtige wijze bestaande waterkracht opslagfaciliteiten worden geïntegreerd, waardoor back-up vermogen beschikbaar komt, vermeerderd met regionale biomassa-energie en daarbij ondersteuning van zonthermische stroomproductie. Elektriciteit uit biomassa wordt geproduceerd tegen 6.6 €/kWh_{el} nadat opbrengsten uit de verkoop van warmte ingecalculereerd zijn. Dit resultaat ligt aanzienlijk boven het gemiddelde prijsniveau, maar toch is het back-up vermogen essentieel voor de reductie van de totale kosten van het gehele systeem. Ongeveer 42% van de opgewekte elektriciteit wordt tussen de regio's verstuurd via het HVDC- systeem waarbij het totale transportverlies uitkomt op 4.2% van de geproduceerde elektriciteit. Nog eens 3,6% verlies is productie die of niet verbruikt kan worden op het moment van productie of niet opgeslagen kan worden voor later gebruik in de gepompte opslagfaciliteiten en dus teveel geproduceerd is. Deze twee verliezen kunnen als zeer acceptabel worden beschouwd voor een stroomlevering die uitsluitend duurzame energie gebruikt.

4.2 Scenario met transportrestricties

Als daarentegen interregionaal transport niet toegestaan is in een restrictief gedecentraliseerd scenario groeit het teveel geproduceerde aanzienlijk tot 10% van de productie en extra back-up vermogen wordt nodig, alsmede back-up energie die andere grondstoffen gebruikt binnen afzonderlijke geïsoleerde gebieden om aan de vraag te voldoen, wat leidt tot grote extra onkosten. In één scenario leveren brandstofcellen aangedreven door herwinbare waterstof elektriciteit voor ongeveer 20 €/kWh_{el} (wat reeds tamelijk optimistisch is wanneer de waterstof wordt geproduceerd met duurzame energie), waardoor de gemiddelde nettoprijs van elektriciteit stijgt boven 8 €/kWh_{el}. Voor Regio 6 (Duitsland en Denemarken), zou de beperkende gedecentraliseerde (eiland) strategie leiden tot elektriciteitsprijzen boven de 10 €/kWh.

Een andere optie is de minimum hoeveelheid elektriciteit vast te leggen die lokaal moet worden geproduceerd zonder beperking van het transport. Eén scenario was doorgerekend waarbij elke regio 50% van de jaarlijkse vraag binnen eigen grenzen moet produceren. Hoewel in feite geen restrictie op transport, vermindert dit mandaat de totale getransporteerde hoeveelheid elektriciteit slechts relatief weinig tot 36% van de totale productie. De prijs van elektriciteit is 8,6% boven die in het base-case

scenario. Hierbij verandert productiemix naar meer windenergie en minder zonthermische productie.

4.2 Scenario's met gereduceerde kosten voor afzonderlijke onderdelen

Het effect van kostenwijzigingen voor afzonderlijke technologie en onderdelen werd ook onderzocht in speciale scenario's. Eén daarvan was gericht op het vinden van de prijs waarbij PV kostendekkend kan bijdragen aan stroomlevering. Daartoe is een reeks scenario's berekend waarbij de PV- kosten steeds gehalveerd zijn. Het resultaat was dat PV in de optimalisatie niet werd gekozen voordat de prijs daalde tot één achtste van de huidige kosten. Zo'n aanzienlijke prijsreductie voor PV stelt deze technologie in staat een aanzienlijke bijdrage te leveren aan de stroomlevering. Als alle andere kosten gelijk blijven zou de verlaging tot net boven de 12% (één achtste) van de huidige PV prijs een economisch levensvatbare 4% bijdrage aan de algehele elektriciteitsproductie mogelijk maken. De productie zou niettemin beperkt blijven tot de meest zuidelijke gebieden, met name tot Saudi Arabië en de landen in Zuidelijk Sahara ofwel de Regio's 12, 16, 17 en 18. Als de kosten slechts één zestiende bedroegen van het huidige niveau kon de PV technologie verantwoordelijk zijn voor ongeveer 22% van alle elektriciteitsproductie, wat de productiekosten met 10% vermindert tot 4,3 €/kWh ten opzichte van het base-case scenario. Zelfs in dit geval echter zou PV niet worden gebruikt in de noordelijke regio's 1,2,3,6,9 en 19, omdat die niet zouden bijdragen aan kostenreducties.

Als de kosten van spiegelvelden voor zonthermische centrales met de helft verminderd zouden worden – zoals verwacht in de nabije toekomst – zouden zonthermische centrales reeds 13% van alle stroomproductie voor hun rekening nemen. In dit geval zijn de totale elektriciteitskosten 4% onder die van het base-case scenario. Een kostenvermindering van de collectoropstelling tot 40%, samen met een vermindering van de opslagkosten tot twee-derde van het huidige niveau (nog duidelijk boven te bereiken opslagkosten volgens recent onderzoek, vermeld in [CS 2004]), zou hun bijdrage verhogen tot 28% van de geproduceerde elektriciteit, terwijl de kosten van stroomproductie – vergeleken met het base-case scenario – met 10% zouden dalen naar 4,3 €/kWh. Deze voorbeelden laten zien dat zonthermische stroomproductie een economisch aantrekkelijk perspectief biedt voor de toekomst dat tamelijk eenvoudig gerealiseerd kan worden gezien de regressiefactoren voor minimum kosten.

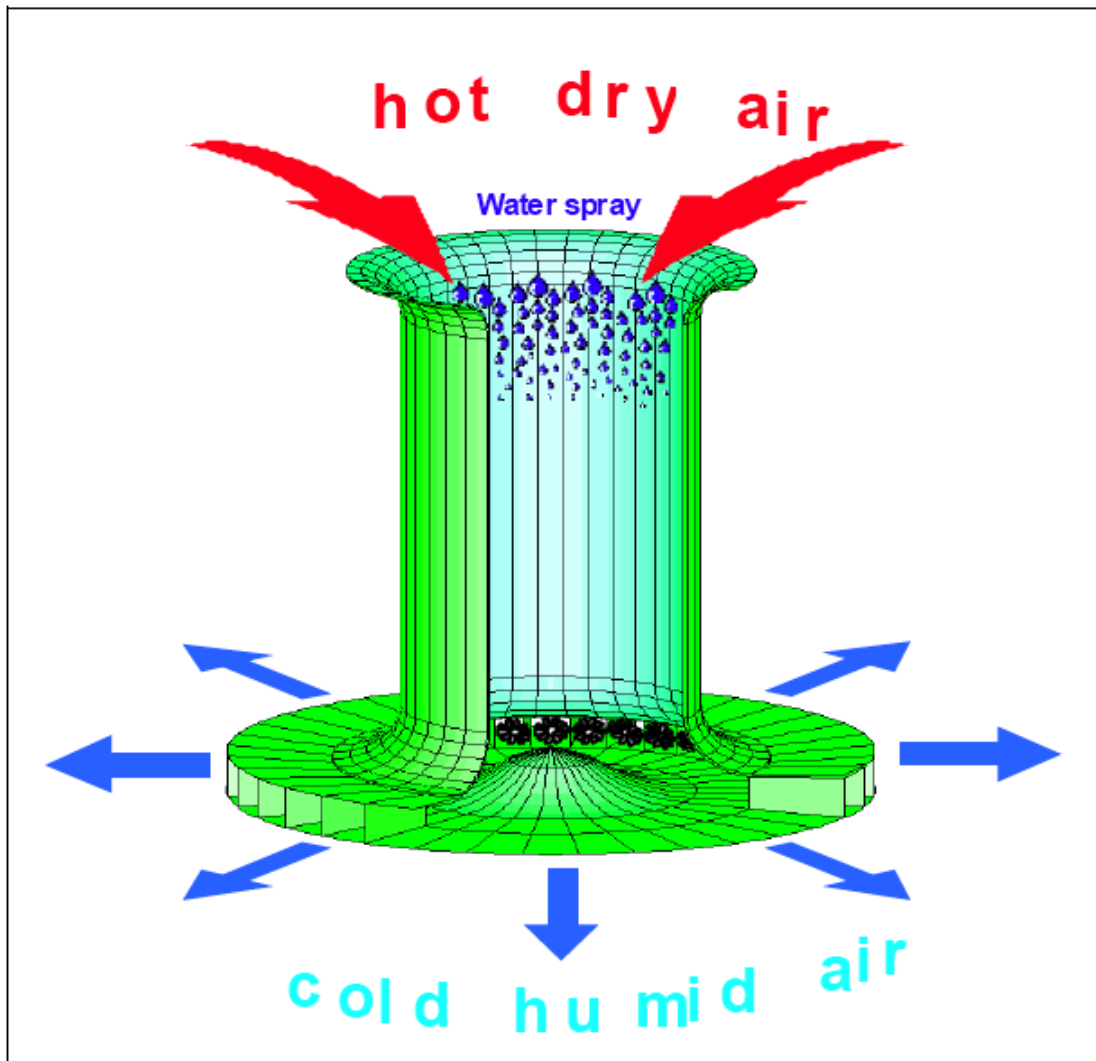
4.4 Waterkracht scenario te Inga in de Democratische Republiek Congo

De bouw van een grote waterkrachtcentrale op een uiterst gunstige locatie bij Inga in de Democratische Republiek Congo is ook onderzocht voor een van de voorgestelde scenario's (zie ook [Kan 1999]). De bouw van een waterkrachtcentrale met een vermogen van 38 GW rolde uit een rekenkundige optimalisatie. Deze zou de prijs van elektriciteit 5,3% omlaag brengen vergeleken met het base-case scenario als gevolg van goedkopere productie en bijkomstige systeemvoordelen. Een eerste reden voor de lage prijs van elektriciteit geproduceerd in Inga is de hoge gemiddelde belasting van de waterkrachtcentrale van 6900 FLH en de relatief lage te verwachten

investeringskosten op deze bijzonder gunstige locatie. Twee-derde van de stroomproductie te Inga wordt getransporteerd via een HVDC- systeem met een vermogen van 26 GW, dat de centrale verbindt met Regio 17 (Tsjaad en Niger), terwijl het restant in gelijke delen door twee HVDC- systemen met een gezamenlijk vermogen van 12 GW wordt geleid, die Inga verbinden met Regio's 16 en 18.

4.5 Scenario's met technologieën die nog in ontwikkeling zijn

Daar de invoering van het base-case en soortgelijke scenario's vele jaren duurt is een poging ondernomen om wat veelbelovende productietechnologieën op te nemen die reeds aan de horizon verschijnen. Een enigszins speculatief scenario omvat het gebruik van energietorens (zie [ABZ 2004] en [ACGZ 2006]). Als de veronderstellingen betreffende energietorens kloppen, speciaal de economische aannames, dan zouden – volgens de optimalisatie – deze centrales domineren met een productie gelijk aan 49% van het totale jaarlijkse stroomverbruik in het scenariogebied. De totale productiekosten zijn met iets minder dan 4.1 €ct/kWh ongeveer 12% minder dan in het base-case scenario. Zonthermische productie wordt in deze optimalisatie volledig vervangen, maar ook grote aandelen van de windenergie evenals een kleiner deel van het gebruik van biomassa. Dit scenario laat zien dat verdere ontwikkeling van deze technologie de moeite waard kan zijn. Daarom is onderzoek nodig, met als doel het verminderen van het financiële risico dat het bouwen van zo'n soort centrale mee brengt en de aandacht richten op alles wat nodig is om een prototype te bouwen van zo'n niet eerder geteste centrale. In het algemeen kan men uit dit resultaat afleiden dat zelfs voor speculatieve ideeën, die de mogelijkheid zouden kunnen hebben om energie te leveren tegen lage prijzen en uit andere duurzame bronnen, meer onderzoeks-subsidies en meer risicodragend kapitaal bestemd moet worden.



Figuur 2: Het principe van de energietoren. Hete lucht stroomt van boven in een grote koker, water wordt ingespoten om de lucht af te koelen, die naar beneden valt en een aantal turbines aandrijft op de bodem van de schacht.

4.6 Elektrisch transport binnen de scenario's

In alle scenario's – met uitzondering van de restrictieve en dure eilandconfiguraties – is elektriciteitstransport van groot belang. Het noodzakelijke convertervermogen (AC \leftrightarrow DC) voor het HVDC- netwerk bereikt in sommige gevallen waarden van meer dan 750 GW. Dit niveau correspondeert met ongeveer de helft van de geïnstalleerde productiecapaciteit van alle productiebedrijven in de scenarioregio's. Het net wordt gebruikt om pieken en dalen af te vlakken bij de verschillende hulpbron afhankelijke productie eenheden die duurzame energie gebruiken en om toegang te verschaffen tot waterkrachtcentrales zowel als verspreide biomassacentrales met hun intrinsieke opslagvermogen voor back-up toepassingen over een groot gebied. In het base-case scenario wordt bijvoorbeeld 42% van de opgewekte elektriciteit getransporteerd tussen de regio's binnen het leveringsgebied via het HVDC- systeem. Afgezet tegen de totale elektriciteitskosten bedraagt die van het transportsysteem 7%, waarvan het grootste deel van 5% gaat zitten in de elektriciteitleidingen. HVDC- transport heeft een hogere intrinsieke systeemstabiliteit dan AC-lijnen. Bovendien heeft het

transportsysteem een grote reservecapaciteit vanwege het feit dat de thermische limiet van de transportleidingen ongeveer twee keer het berekende vermogen is en omdat tussen bijna alle regio's in ontwerp twee of meer systemen parallel gebouwd worden. Maar niettemin kan indien gewenst relatief goedkoop meer reserve verkregen worden. Een wat extreem plan zou zijn om twee volledige systemen van transportkabels naast elkaar op te zetten. Dit zou betekenen dat de kosten van transportleidingen zou verdubbelen maar tegelijkertijd zouden de verliezen kleiner worden door de dubbele cross-section, zodat de totale kostenstijging slechts 3% zou zijn, waarbij een mate van immuniteit tegen stroomstoringen is verzekerd die ver uitstijgt boven wat verplicht is voor de huidige systemen.

5 De internationale FIL als implementatievector in Kyoto II

Het grootste deel van dit stuk hebben we gebruikt om te laten zien dat het mogelijk is om in alle vraag naar stroom te voorzien van 'Greater Europe' met behulp van duurzame energie en grootschalig transport van die elektriciteit. Dit schept een grote zone van onderlinge afhankelijkheid, zoals de EU een economische afhankelijkheid creëert onder Europese landen, die kan worden gezien als een stabiliserende factor. Anderzijds heeft een dergelijke onderlinge afhankelijkheid enige overeenkomst met de afhankelijkheden in het huidige op fossiele brandstof gebaseerde systeem. Maar met aanzienlijk meer verschillende duurzame hulpbronnen uit veel verschillende landen en derhalve met een intrensiek hogere stabiliserende verscheidenheid is de afhankelijkheid van elke partner afzonderlijk duidelijk verminderd in vergelijking met het door fossiele brandstof gestuurde systeem. Met de geleidelijke uitputting van fossiele hulpbronnen daalt de hoeveelheid vindplaatsen in het fossiele systeem. Daarentegen groeien de bronnen voor duurzame productie gestaag en raken dus in potentie meer verspreid naarmate de technologie vooruit gaat. Vanwege de aard van duurzame energie, die veel meer gespreid is en plaatselijk veel meer banen schept is bovendien de gecreëerde welvaart veel meer verdeeld over de bevolking. Als men zo'n grootschalige toepassing van duurzame energie voor elkaar kan krijgen zal dat daarom ten goede komen aan grotere delen van de betrokken landen en hun inwoners dan gewoonlijk bij olieopbrengsten het geval is.

Het huidige Kyoto protocol bevat twee belangrijke mechanismen voor het voorkomen van internationale CO₂-uitstoot: het Clean Development Mechanism CDM en Joint Implementation JI. Terwijl het CDM handelt tussen rijke en ontwikkelingslanden, beschrijft JI de aard van gemeenschappelijke CO₂-projecten tussen ontwikkelde landen. De Internationale FIL moet zowel tussen ontwikkelde landen onderling als met ontwikkelingslanden werken, en het is daarom voor de auteurs moeilijk te overzien of deze verankerd moet zijn in één van de twee mechanismen, CDM en JI, of dat de Internationale FIL een op zichzelf staand gereedschap moet worden in de komende onderhandelingsronde. De waarschijnlijk beslissende Conference of the Parties zal in 2009 in Kopenhagen worden gehouden, op uitnodiging van Deense Ministerie van Milieu. We lanceren dit idee nu om diepgravende discussie mogelijk te maken en tijd te winnen voor voorbereidende diplomatie in aanloop van de conferentie.

6 Verwijzingen

- [ABZ 2004] A. Arbib, M. Beyth, D. Zaslavsky; ENERGY TOWERS for Producing Electricity and Desalinated Water without a Collector, Technion, Haifa, Israel, 2004.
http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/projekte/ET-Brochure_Zaslavsky_200407.pdf
- [ACGZ 2006] T. Altman, G. Czisch, R. Guetta, D. Zaslavsky; Evaluation of the potential of electricity and desalinated water supply by using technology of "Energy Towers" for Australia, America and Africa, Special Project Interim Report, ECMWF, Reading, UK, 2006
<http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/projekte/ECMWF-IR-SPDEGPET200605.pdf>
- [CS 2004] G. Czisch, J. Schmid; Low Cost but Totally Renewable Electricity Supply for a Huge Supply Area – a European/Transeuropean Example –, WWEC 2004 – The 3rd World Wind Energy Conference Renewable Energy Exhibition – The 2nd Win Power Asia, Peking, October/November 2004,
<http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/projekte/WWEC2004.pdf>
- [Czisch 2001] G. Czisch; Global Renewable Energy Potential - Approaches to its Use
<http://www.iset.uni-kassel.de/abt/w3-w/fohlen/magdeb030901/overview.html>
- [Czisch 2005] G. Czisch; Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung - Kostenoptimierte Variationen zur Versorgung Europas und seiner Nachbarn mit Strom aus erneuerbaren Energien, Dissertation, University of Kassel, 2005
<http://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/handle/urn:nbn:de:hebis:34-200604119596>
- [EC 2007] EC, Directorate-General Energy and Transmission; Energy & Transport in figures - Statistical pocket book 2006, Brussels, Belgium 2007
http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/pocketbook/2006_en.htm
- [EEX 2007] European Energy Exchange; German Baseload Year Futures (Cal-08), 14.05.2007, <http://www.eex.de>
- [ERA-15] ERA-15, ECMWF Re-Analysis (ERA) Project; EZMW, Reading, United Kingdom 1996, <http://www.ecmwf.int/research/era/>
- [GiebelEtAl 2003] G. Giebel, N.G. Mortensen & G. Czisch; Effects of Large-Scale Distribution of Wind Energy in and around Europe. In: Risø International Energy Conference, Risø (DK), 19-21 May 2003 p. 115-124
<http://www.risoe.dk/rispubl/SYS/ris-r-1405.htm>
- [GiebelEtAl 2005] G. Giebel, M. Nielsen & B. Hurley; Is least cost wind power always local in Europe? A balancing act between more transmission and lower load factor. Paper on the 2nd Risø International Energy Conference, Risø (DK), 23-25 May 2005
http://www.risoe.dk/rispubl/SYS/syspdf/energconf05/session10_giebel.pdf
- [IPCC 2005]. IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),
<http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>
- [Kan 1999] K-W. Kanngießler; Nutzung regenerativer Energiequellen Afrikas zur Stromversorgung Europas durch Kombination von Wasserkraft und Solarenergie in: Strom für Europa durch Fernübertragung elektrischer Energie, hrsg. v. Brauch H.-G., Czisch G., Knies G., AFES-PRESS, Mosbach (1999)
- [NCEP 1999] NCEP/NCAR CDAS/Reanalysis Project, 1999
<http://wesley.wwb.noaa.gov/reanalysis.html>
- Risø-R-1608(EN)Risø