

Water als bron van duurzame energie

Inspiratieatlas van mogelijkheden





Inhoud

| | |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| Inhoud | 3 |
| Voorwoord | 5 |
| Opgewekt uit water | 7 |
| 1. Beschrijving van technieken | 13 |
| 1.1 Energie uit zoet-zoutgradiënten | 15 |
| 1.2 Energie uit golven | 17 |
| 1.3 Energie uit aquatische biomassa | 19 |
| 1.4 Energie uit getijden | 21 |
| 1.5 Energie uit rivieren | 25 |
| 1.6 Energie uit warmte- en koudeopslag | 29 |
| 1.7 Energie uit aardwarmte | 31 |
| 1.8 Energie uit temperatuurverschil met het oppervlaktewater | 33 |
| 2. Bepaling van het energiepotentieel | 35 |
| 2.1 Energie uit zoet-zoutgradiënten | 36 |
| 2.2 Energie uit golven | 37 |
| 2.3 Energie uit aquatische biomassa | 38 |
| 2.4 Energie uit getijden | 39 |
| 2.5 Energie uit rivieren | 40 |
| 2.6 Energie uit warmte- en koudeopslag | 41 |
| 2.7 Energie uit aardwarmte | 42 |
| 2.8 Energie uit temperatuurverschil met het oppervlaktewater | 43 |
| 3. Conclusies en aanbevelingen | 45 |
| 3.1 Algemene conclusies en aanbevelingen | 46 |
| 3.2 Bron- en techniek specifieke conclusies en aanbevelingen | 48 |
| 3.3 Beoordeling potentie van de bronnen en technieken | 50 |





Voorwoord

Energie is van levensbelang voor mens en maatschappij. Fossiele brandstoffen worden echter steeds schaarser en duurder en belasten het klimaat. Daarom is het beleid van de Nederlandse overheid - en van vele andere landen - erop gericht het energiegebruik en de emissies in het milieu te verminderen. Dat wordt 'aanpak bij de bron' genoemd. De Nederlandse overheid wil in 2020 dertig procent reductie van CO²-emissie bereikt hebben ten opzichte van 1990. Voor die doelstelling wordt er geïnvesteerd in het efficiënter benutten van energie, het ontwikkelen van alternatieve, schonere, energiebronnen, en het reduceren van CO²-emissies bij fossiele brandstoffen.

Mede door de huidige hoge energieprijzen is er ook vanuit de private sector een groeiende belangstelling voor het investeren in en realiseren van deze doelstellingen. Veel van de beoogde oplossingen behelzen tegelijkertijd een energie- en een watervraagstuk.

Tijdens de bijeenkomst in mei 2007, georganiseerd in het kader van het 'Water Innovatieprogramma', is het thema water en energie goed op de kaart gezet. Vertegenwoordigers van bedrijfsleven, overheden en kennisinstellingen hebben daar gezamenlijk innovatieve watertechnologische oplossingen geïdentificeerd, die kunnen bijdragen aan een duurzamere energiehuishouding in Nederland en de wereld.

Veel thermische zonne-energie, warmte in de zomers en koude in de winters, kan extra gewonnen worden uit oppervlaktewater en ondiep grondwater. Aardwarmtewinning uit diepe aquifers biedt enorme kansen als duurzame energiebron. Daarnaast kan bespaard worden door slimmere benutting van restwarmte en -koude uit energiesystemen met fossiele brandstof.

Andere voorbeelden van onderbenutte en alternatieve energiebronnen zijn de waterkracht van rivieren, getijden en golfbewegingen, fysisch-chemische energie in zoet-zoutgradiënten in de kuststreken en biomassaproductie in aquaculturen. Om echt verder te komen zijn er werkende, betaalbare en in het milieu inpasbare innovaties nodig.

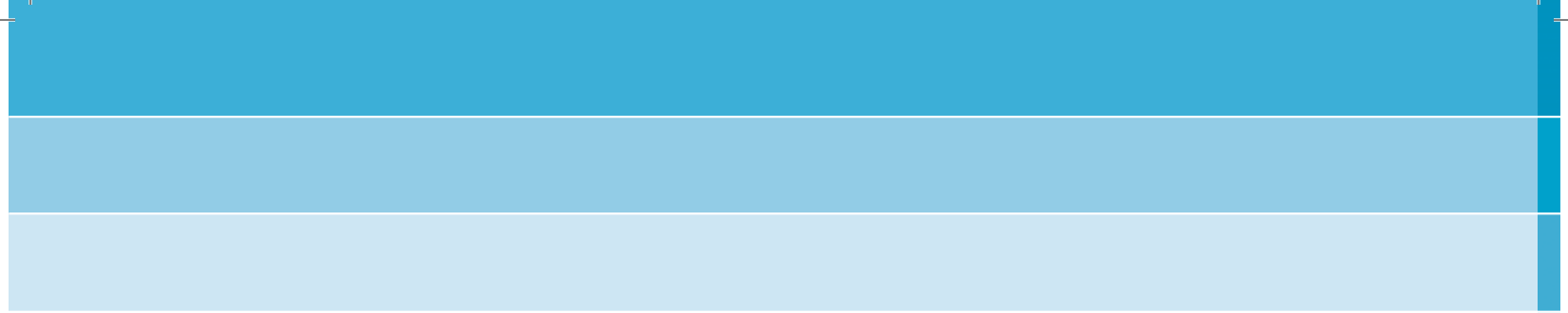
Deze inspiratieatlas is een eerste aanzet om de verschillende ideeën op het gebied van energie en water op haalbaarheid in Nederland in kaart te brengen. De haalbaarheid van de verschillende opties is getoetst op een manier die vergelijkbaar is met de methode die energiebedrijven hantieren voor fossiele brandstofvoorraden. De uitkomsten zijn indicatief. Ze zijn begrijpelijkerwijs nog niet gebaseerd op consensus en zullen later verder onderzocht worden en onderbouwd moeten worden.

Met deze eerste, extern getoetste en overzichtelijke, analyse wil Deltares bijdragen aan het agenderen en versneld in gang zetten van ontwikkelingen op het gebied van water en energie. De atlas maakt prominent zichtbaar wat de meest inspirerende en kansrijke innovaties zijn op de daarvoor meest geschikte locaties met het grootste energiepotentieel. Dit betekent dat kleinschalige installaties, ook al kunnen die lokaal wellicht een grote bijdrage leveren, hierin niet zijn opgenomen.

Ik wens u veel leesplezier bij deze eerste evaluatie van water als energiebron. Tegelijkertijd hoop ik dat overheden en bedrijfsleven geïnspireerd raken om initiatieven te ontplooien.

Ipo Ritsema
Deltares







Opgewekt uit water

Achtergrond

Het project 'Water als bron van duurzame energie, inspiratieatlas van mogelijkheden' is geïnitieerd vanuit het programma WINN - Waterinnovatie Rijkswaterstaat. Deltares is uitvoerend partner binnen het WINN-programma, dat gegroepeerd is rond drie thema's: Klimaat, veiligheid, ruimte en risico, Sediment als grondstof en Water & Energie.

Het besluit om energie te introduceren in het WINN-programma is mede gevoed door de ambitie van het huidige kabinet met betrekking tot energie. Het is de bedoeling dat in het jaar 2020 twintig procent van alle energie uit duurzame bronnen komt en dat de uitstoot van broeikasgassen met dertig procent is verminderd ten opzichte van 1990.

Rijkswaterstaat beschikt over een groot beheersgebied met geschikte locaties voor het opwekken van energie met water en heeft daarom de aanzet gegeven voor verschillende projecten waar deze vorm van duurzame energieopwekking het uitgangspunt vormt. Voor Rijkswaterstaat is dit een van de acties om haar aandeel te gaan leveren bij het behalen van de genoemde ambitie.

Binnen het WINN-thema Water & Energie bestaan drie categorieën projecten waarmee getracht wordt eventuele exploitatiemogelijkheden te onderzoeken, stimuleren en faciliteren: themaontwikkeling en visievorming, begeleiding, evaluatie en monitoring van pilot-projecten, en verkennende studies. Deze verslaglegging - een rapportage van het project 'Water als bron van duurzame energie' - is een verkennende studie.

Aanleiding

Rijkswaterstaat WINN is - naast de ontwikkeling van het thema, de begeleiding van diverse op stapel staande pilots en de uitvoering van een technologie scan - samen met Deltares het project **Inspiratieatlas, water als bron van duurzame energie** gestart. Dit project vloeit voort uit de wens van Rijkswaterstaat WINN om inzicht te hebben in het potentieel aan duurzame energie dat binnen het beheersgebied gewonnen kan worden. Aan Deltares is gevraagd inzichtelijk te maken waar er in Nederland met of uit water duurzame energie opgewekt kan worden. Dat kan op plaatsen waar 'gradiënten' in het water optreden. Voorbeelden hiervan zijn: verschillen in potentiële energie in het water, verschillen in chemische of biologische samenstelling en watertemperatuur. In de volgende hoofdstukken worden deze gradiënten - de bronnen - individueel toegelicht.



Projectorganisatie Deltares

Aansturing op bruikbare resultaten en belangenbehartiging voor Rijkswaterstaat is uitgevoerd door Rick Hoeksema van Rijkswaterstaat. Stroomlijning van de inzet, intern en extern Deltares, waaronder ook het laten uitvoeren van second opinions en reviews, is uitgevoerd door projectleider Marcel Bruggers van Deltares.

Verantwoording

Gezien de stand van de diverse methoden en technologieën en de aard van de berekeningen, was een gedegen wetenschappelijke aanpak in dit project niet mogelijk. Wegens het ontbreken van gegevens van en kennis over installaties, opstellingen en methoden die nog niet bestaan of nog niet intensief onderzocht zijn, zijn in de berekeningen op meerdere momenten aannamen op basis van 'engineering judgement' gedaan. De inzichten van de verschillende geraadpleegde personen en bedrijven, intern en extern Deltares, lagen soms dicht en soms ver uit elkaar. Er kunnen derhalve expliciet geen rechten ontleend worden aan de gepresenteerde waarden. De vele discussies die hieromtrent plaats hebben gevonden, hangen samen met het ontbreken van algemeen bewezen c.q. geaccepteerde wetenschappelijke kennis. In enkele gevallen staan de geraadpleegde personen niet achter bepaalde berekeningen. Daarom is ervoor gekozen niemand bij naam te noemen. Naast Deltares hebben ook TNO, CE Delft en ECN input geleverd, waar dankbaar gebruik van gemaakt is.

Doelstelling









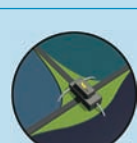

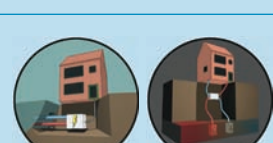












Het doel van dit project is:

- het aanzetten tot discussie en nader onderzoek over de potentie en haalbaarheid van energie uit water,
- het indicatief en op vergelijkbare wijze kwantificeren van de potenties van water als bron van duurzame energie in Nederland en
- het inventariseren van deels innovatieve technologieën die ontwikkeld zijn waarmee energie met water gewonnen kan worden

Deze atlas wil inzicht geven in water als een primaire bron of drager van energie. Het gaat dus om energie die direct aan de omgeving of natuur onttrokken of opgeslagen kan worden en niet aan secundaire bronnen als koelwater, of om conceptuele ideeën zoals een energie-eiland. Het gaat om oplossingen die significant zouden kunnen bijdragen aan het verduurzamen van de energiesector in Nederland. In 2007 bedroeg het jaarlijkse energieverbruik 3548 PJ, waarvan op dit moment 95 PJ (2,8%) duurzaam is. De bijdrage windenergie is 23 PJ.

Energiebronnen

Alle energie die de aarde ontvangt, en die er in opgeslagen ligt, is afkomstig van drie natuurlijke, primaire energiebronnen. Het betreft de zon met zonnestraling, de maan met de gravitatiekracht die zij veroorzaakt en de aarde zelf met de in de kern aanwezige warmte. Water in, op en onder de grond vangt direct en indirect veel van de energie op en beschikt daarom enorme hoeveelheden energie.

| Primaire bron | Fundamentele Kracht | Omzetting | Opslag | Bron-technologie combinatie | Omzetting | Bruikbare energie |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | zonnestraling door kernfusie | fotosynthese | aquatische biomassa |  | verbranding |   |
| | | ongelijkmatige verwarming land en water | windgolven |  | drijvers, rotors e.d. |  |
| | | verdamping en condensatie | rivierafvoer |  | turbines |  |
| | | verdamping en condensatie | ontzilt water |  | omgekeerde electrolyse en osmose |  |
| | | verwarming land en water | thermische energie |  | warmtewisselaars en direct gebruik |  |
| | | verwarming land en water | thermische energie |  | Carnot- / Kalinacyclus |  |
|  | gravitatiekracht door massa maan | ongelijkmatige aantrekking oceanen | getijdenverschillen |  | turbines |  |
| | | ongelijkmatige aantrekking oceanen | getijdenstromingen |  | rotors |  |
|  | straling door radioactief verval aardkern | verwarming aardkorst | verwarmde aquifers |  | turbines |   |



Zon

De grootste natuurlijke primaire bron is vanzelfsprekend de zon. De zonnestraling, die ontstaat door kernfusie in de zon, is de energie die het oppervlak van de aarde bereikt. Een deel van die energie kan door planten via fotosynthese omgezet worden in (aquatische) biomassa. De energie die uit biomassa gehaald kan worden, wordt voornamelijk geleverd door de erin opgeslagen koolstof en olie. Wanneer deze diep in de aarde aan steeds hogere druk en temperaturen wordt blootgesteld, ontstaat er via veen, bruinkool, kolen, olie en gas. Door verbranding kunnen biomassa en fossiele brandstoffen omgezet worden in voor ons bruikbare energie.

De zonnestraling zorgt er ook voor dat het oppervlak van de aarde verwarmd wordt. Door onder meer de draaiing van de aarde, wordt het oppervlak niet homogeen verwarmd en wegens verschillen in opnamecapaciteit en opnamesnelheid van het aardoppervlak, ontstaan temperatuurverschillen in het aardoppervlak. Het aardoppervlak, of dat nu water of land is, verwarmt op haar beurt de lucht die erboven hangt. Temperatuurverschillen in de lucht leiden tot verschillen in dichtheden, die zich manifesteren als hoge- en lagedrukgebieden. Hierdoor ontstaat wind en door de wrijving van deze wind met het water ontstaan golven. De kinetische energie in golven kan middels een diversiteit aan installaties omgezet worden tot elektrische energie.

De verwarming van het aardoppervlak leidt er ook toe dat water uit onder andere meren, zeeën, oceanen verdampt. De wolken die dit water bevatten, slaan gedeeltelijk neer in hoger gelegen delen van het landoppervlak, waar zij de bron vormen van de waterkracht van rivieren. Middels turbines in het stromende rivierwater, of in de in rivieren gelegen kunstwerken, kan elektriciteit opgewekt worden. Ook ontzilt het water door het proces van verdamping. Dit biedt de mogelijkheid om uit zoet-zoutgradiënten nabij de mondingen van rivieren in zee energie op te wekken.

De verschillen in opnamecapaciteit en opnamesnelheid van warmte tussen land en water zorgen voor temperatuurverschillen. In de zomer wordt de watertemperatuur welliswaar hoger, maar blijft in ieder geval lager dan de temperatuur op het land, en in de winter is dat precies andersom. De warmte of koude kan met behulp van warmtewisselaars gewonnen en met warmtepompen worden opgewekt. Na één seizoen opslag kan de warmte of koude benut worden.

De instraling van warmte op het wateroppervlak leidt tot verschillen in watertemperatuur in de verticaal, als gevolg

van thermische stratificatie. Toepassing van installaties die gebaseerd zijn op de Carnot-, of Kalinacyclus kunnen de gradiënt in temperatuur in diepere meren (vertegenwoordigend thermische energie) omzetten in mechanische energie. Bij grote verschillen in temperatuur, vanaf circa 20 graden, is het rendement voldoende om elektriciteit op te wekken. Deze situatie doet zich in Nederland niet of nauwelijks voor, vandaar dat dit type energieopwekking niet opgenomen is in het vervolg van deze rapportage.

Maan

De tweede primaire bron is de maan. Hoewel dit geen actieve 'zender' is van energie, zoals de zon en de aardkern dat wel zijn, brengt de aanwezigheid van de maan wel energie op. De gravitatiekracht die bestaat tussen aarde en maan, de rotatie van de maan om de aarde en de aarde om haar as, zorgt voor een ongelijkmatige aantrekkingskracht van de maan op de elementen van de aarde. Omdat de oceaan een dermate groot oppervlakte van de aarde beslaat, bestaan binnen dit lichaam continu verschillen in aantrekkingskracht, in zowel grootte als richting. Hierdoor wordt het getijde opgewekt dat zich bij de kust manifesteert met fluctuerende waterstanden en - onder andere in - mondingen van estuaria als getijdenstromen. Middels turbines en rotors kan de getijdenenergie omgezet worden in elektrische energie.

Aardkern

Ook de aarde levert, als laatste natuurlijke bron, energie. In de aardkern is warmte aanwezig die afkomstig is van processen tijdens het ontstaan van de aarde en door radioactief verval. Door straling, stroming en geleiding wordt een gedeelte van de warmte naar de aardkorst getransporteerd. In de aardkorst zijn op verschillende locaties en dieptes aquifers die heet water bevatten. Middels diepe boringen, in de orde van één tot enkele kilometers, is deze aardwarmte te bereiken. Vaak is de temperatuur hiervan dusdanig, dat middels turbines elektriciteit opgewekt kan worden. Daar waar geen aquifers zijn, kan ondermeer met gebruikmaking van circulatievloeistoffen eveneens de thermische energie gewonnen worden.

Aanwezigheid van energie in verschillende vormen, zoals potentiële (verval) en kinetische (stroming), elektrochemische (samenstelling en osmose), reactieve (chemische en elektrische) en thermische (warmte, koude) energie, vereisen inherent andere methoden waarmee deze energie onttrokken kan worden aan het water. De 'concentratie' van energie per eenheid van watervolume, de methode(n) die geschikt zijn deze energie te winnen, en de mate van

aanwezigheid ervan in Nederlandse wateren, bepalen ruwweg de potentie van de vorm van energie voor Nederland.

Definities van energievoorraden

Er zijn verschillende definities om energievoorraden te kwantificeren. De **potentiële voorraad**, ofwel alles wat in het natuurlijke systeem aanwezig is en dus in theorie benut kan worden, vormt de natuurlijke basisvoorraad. Met de technologische mogelijkheden – nu en in de nabije toekomst – is niet alle potentiële energie technisch winbaar. Dat zit hem in het rendement van de omzettingprocessen, de praktische beperkingen door de geometrie van de installaties, door noodzakelijke ruimte voor het plegen van onderhoud en veiligheid, en uiteraard door de omzettingen en wrijvingsverliezen van de installaties. De **technisch winbare voorraad** valt dus lager uit dan de voorraad potentiële energie. In werkelijkheid valt de voorraad nog lager uit omdat ook maatschappelijke argumenten vanuit milieu en sociale belangen een beperkende factor zijn voor het aantal en de omvang van winlocaties. Daarmee wordt de **maatschappelijk winbare voorraad** gedefinieerd. Een andere beperkende factor is de economische haalbaarheid. Locaties zijn alleen exploitabel wanneer de investeringskosten en operationele kosten lager zijn dan de inkomsten door energieverkoop. Er is dan sprake van **economisch winbare energievoorraden**. In onderstaande figuur is de relatie tussen deze voorraden gevisualiseerd.

In de inventarisaties is voor deze voorraden een eerste schatting gemaakt met de daaraan verbonden kansen in Nederland om duurzame energieoplossingen te realiseren. Daarmee zijn het nog geen bewezen voorraden of reserves; daarvoor zijn gedegen kwantitatieve reservestudies nodig. Ook het bepalen van de economisch winbare voorraad is nog niet mogelijk; deze dient per technologie in een nadere studie berekend te worden.

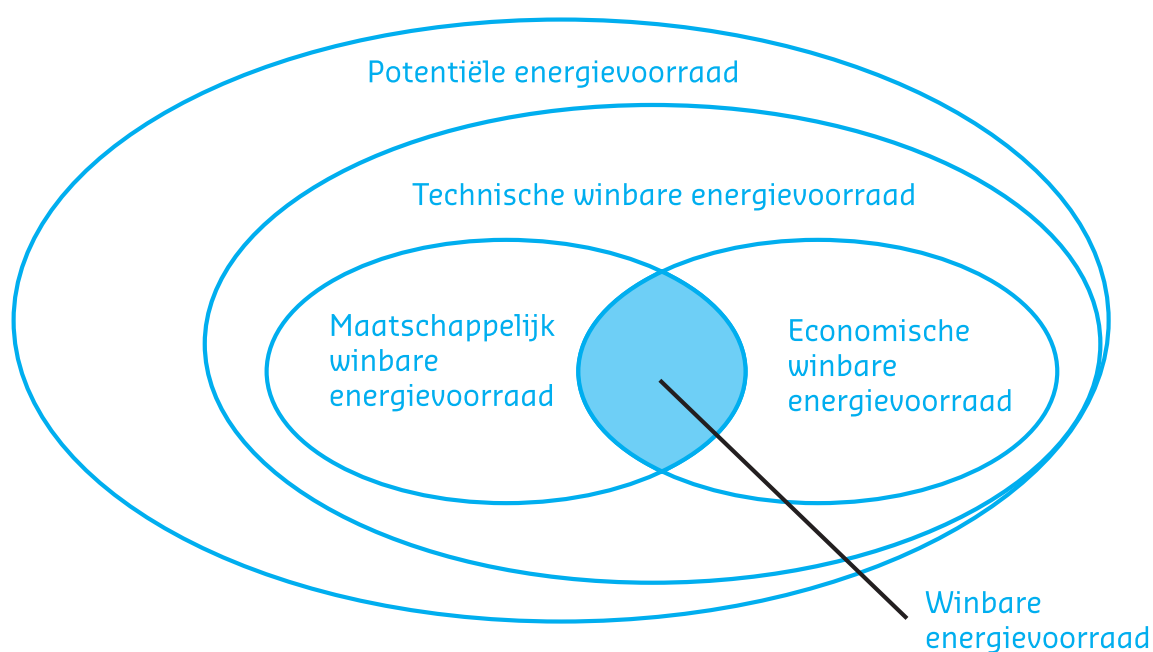
Behalve voor het produceren van energie kan water ook benut worden als energieopslagmedium. Dit is economisch vooral interessant wanneer vraag en aanbod niet op elkaar aansluiten. Deze rapportage laat die toepassing echter buiten beschouwing en beperkt zich tot de inventarisatie van mogelijkheden voor energieopwekking met of uit water.

Het maken van schattingen

Het maken van kwantitatieve schattingen van uit water winbare energie of energieopslagcapaciteit is een lastige opdracht. Een voorbeeld:

De golven in het Nederlandse deel van de Noordzee bevatten bij elkaar voldoende energie om te voorzien in een significant deel van de energiebehoefte van Nederland.

Er zijn intussen innovatieve methoden om deze energie te winnen met een bepaalde efficiëntie. De technisch winbare energievoorraad is dus enorm. Het staat echter buiten kijf



dat het maatschappelijk niet haalbaar is het gehele Nederlandse deel van de Noordzee uit te rusten met installaties die deze vorm van energie weten te transformeren tot elektriciteit. Dat is onmogelijk door ruimtebeslagen van scheepvaart, visserij, natuur, gaswinning en defensie. Het is dus van essentieel belang dat de criteria en aannames op basis waarvan de potenties berekend worden duidelijk zijn. Deze criteria en aannames bepalen namelijk hoe kansrijk de exploitatie van een energiebron is, de tijdshorizon waarbinnen exploitatie mogelijk geacht wordt en wat de daarmee verbonden technologische oplossingen zijn.

Ondanks het ontbreken van alle benodigde bewezen wetenschappelijke kennis, zijn op basis van 'engineering judgement' eerste schattingen gemaakt waaruit conclusies kunnen worden getrokken over de relatieve kansen van de verschillende opties op het gebied van waterenergie.

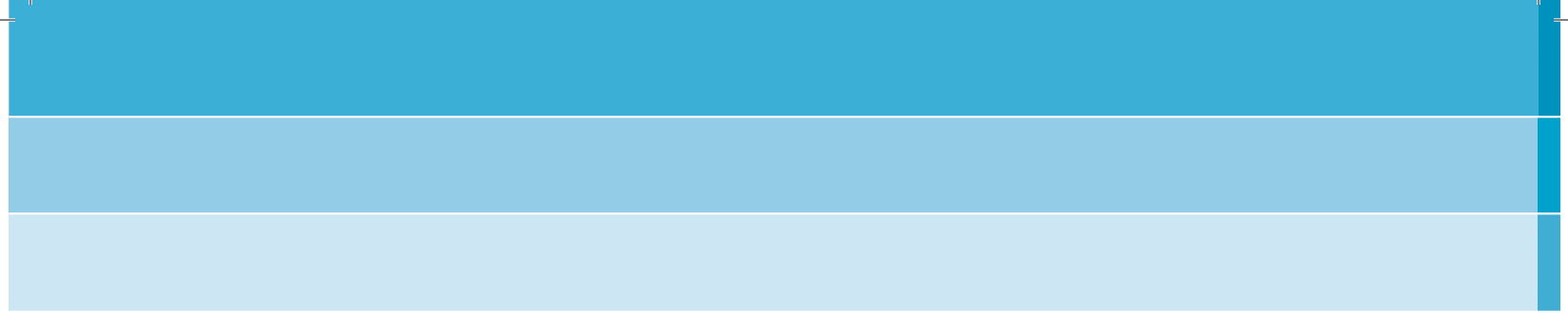
Leeswijzer

In het eerste hoofdstuk wordt beschreven op welke manieren er in ons kleine - en in dit geval gelukkig - natte Nederland een enorm potentieel aan schone energie 'aangeboord' kan worden. In hoofdstuk twee wordt per onderdeel de techniek beschreven en de cijfermatige onderbouwing gegeven. Hoofdstuk drie tenslotte geeft (voorzichtige) conclusies en aanbevelingen.

1 Beschrijving van technieken

Dit hoofdstuk geeft een beknopte beschrijving van negen verschillende technieken om energie op te wekken uit water. In hoofdstuk 2 staat een nadere uitwerking van deze technieken, inclusief berekeningen uit pilot-projecten en studies.







1.1 Energie uit zoet-zoutgradiënten

De potentiële voorraad

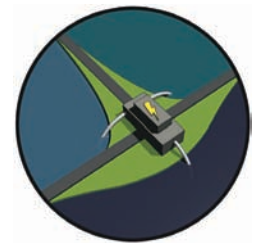
Aan het eind van de regenboog staat een pot met goud. Misschien voert dit beeld wat ver voor het opwekken van energie uit het verschil tussen zoet- en zoutwater, maar hier liggen daadwerkelijk goede kansen voor een rendabele manier van duurzame energieopwekking. Zoet-zoutgradiënten doen zich voor op locaties waar zoet- en zoutwater elkaar ontmoeten. Het meest aansprekende voorbeeld van een dergelijke locatie is de monding van een rivier in een zee of oceaan. Bij dit soort overgangsgebieden is de aanvoer van grote hoeveelheden zoet- en zoutwater doorgaans verzekerd, waardoor de potentie en de bedrijfszekerheid voor energieopwekking op deze locaties gunstig uitpakt, in vergelijking met andere plaatsen waar zoet- en zoutwater elkaar tegenkomen.

Jaarlijks stroomt gemiddeld 89.600 miljoen m³ zoet water de Noordzee in. Dat betekent dat er iedere seconde vanuit Nederland ongeveer 3000 m³ zoet water de zee in stroomt. Het theoretisch aanwezige osmotische drukverschil tussen zoet- en zoutwater ligt rond de 25 bar. Het potentiële vermogen ligt daarmee op 7000 MW, overeenkomend met een jaarlijkse energievoorraad ter grootte van circa 60 TWh, ca. 220 PJ. Ter indicatie: de bij benadering 7,2 miljoen Nederlandse huishoudens verbruiken in totaal tussen de 400 en 500 PJ per jaar. Bij volledige benutting van deze voorraad zou in de helft van de vraag voorzien kunnen worden!

Technische mogelijkheden

Het principe op basis waarvan energie onttrokken wordt bij zoet-zoutgradiënten is osmose. Osmotische verschijnselen treden op wanneer vloeistoffen met verschillende concentraties opgeloste stoffen in contact met elkaar komen. Zoals bij andere diffusieprocessen streeft de natuur naar evenwicht en gelijkheid in concentraties. Met behulp van een halfdoorlatend (semipermeabel) membraan tussen de twee vloeistoffen kan het osmotische potentiaalverschil gebruikt worden om osmotische energie te onttrekken.

Er zijn twee manieren om energie bij zoet-zoutgradiënten te onttrekken. Bij de ene methode worden ionen getransporteerd. Deze techniek staat bekend als Reversed Electro Dialysis (RED) of 'Blue Energy'. Bij de andere methode migreren de watermoleculen. Dat heet Pressure Retarded Osmosis (PRO). Het geleverde vermogen - en dus ook de jaargemiddelde energieproductie - is afhankelijk van de installatie en de aanwezige weerstanden, zoals de benodigde voorbehandeling, en verliezen over de membranen door pompen en eventueel door turbines. Zowel voor PRO als voor RED wordt gesteld dat een realistische productie rond de 0,7 MW per m³/s ligt. Dit betekent dat het totaal geïnstalleerde vermogen ruim 2000 MW kan bedragen, hetgeen overeenkomt met een technisch winbare energievoorraad van bijna 20 TWh of 65 PJ.



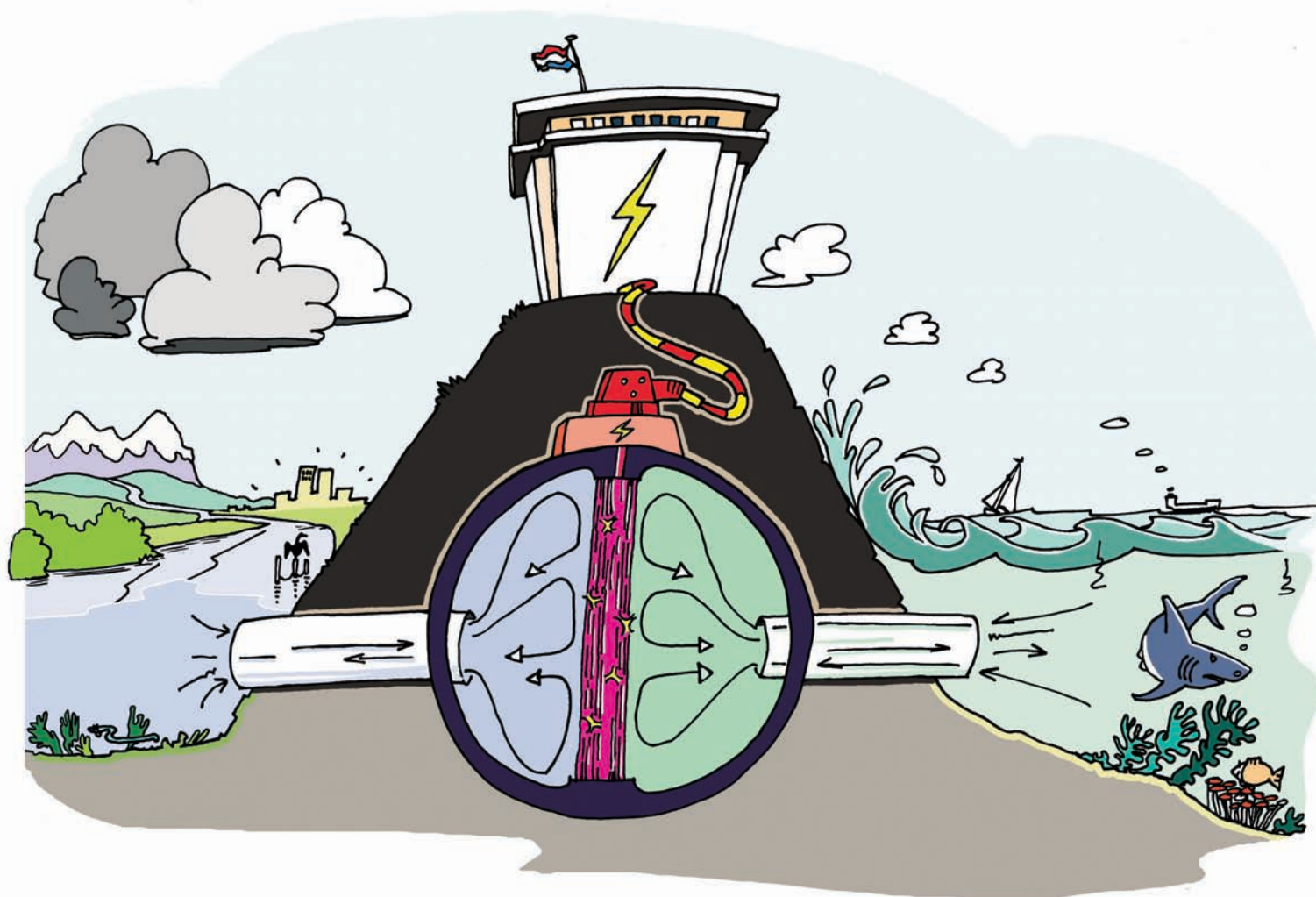
Maatschappelijk haalbaar verantwoord

Nederland beschikt nabij de Noordzee over een veelheid aan waterlichamen met zoet water. Helaas kunnen deze locaties niet allemaal geschikt worden gemaakt voor energiewinning. Geëvalueerd zijn die locaties die tenminste één procent van de zoetwaterafvoer van Nederland vertegenwoordigen. Concreet betreft dit die locaties die nabij een bestaande zoet-zoutovergang liggen en een jaargemiddelde aanvoer van zoetwater hebben van minimaal 25 m³/s.

Na evaluatie blijken de volgende locaties hieraan te voldoen:

- Afsluitdijk bij Den Oever
- Afsluitdijk bij Kornwerderzand
- Noordzeekanaal bij IJmuiden
- Nieuwe Waterweg bij Hoek van Holland
- Haringvliet bij de Haringvlietsluizen

In hoofdstuk 2 van deze inspiratieatlas staan de berekeningen en aannames voor deze locaties. In totaal lijkt een energiewinning van 6 TWh per jaar (22 PJ) haalbaar. Of deze hoeveelheid ook op commerciële basis geproduceerd kan worden, hangt sterk af van economische en bedrijfsmatige factoren. De - eventueel gesubsidieerde - prijs per kWh die op deze manier geproduceerd wordt, zou bijvoorbeeld niet hoger moeten zijn de huidige marktprijs. Bovendien kan een efficiënte bedrijfsvoering aanvullende eisen stellen aan de minimale of maximale bedrijfsgrootte.





1.2 Energie uit golven

De potentiële voorraad

De Noordzee wordt op diverse manieren gebruikt. Onder andere scheepvaart, visserij, defensie, olie- en gaswinning en natuurgebieden leggen beslag op gedeeltes van de Noordzee. Ook is de zee uiterst geschikt voor de nodige waterpret, ontspanning en - bij mooi weer - een verkoelende zeewind aan het strand. Surfers die op de brekende golven in de branding willen zoeven, zijn in Nederland minder goed af. Het bodemverhang dicht bij de kust is te ondiep om echt hoge golven te ontwikkelen. Ook de golven verder weg van de branding, de windgolven, zijn in de Noordzee relatief klein ten opzichte van de windgolven op oceanen. Dit wordt veroorzaakt door de geringe diepte (enkele tientallen meters) van de Noordzee. Desondanks bezitten golven enorme hoeveelheden energie.

Uit de verkoelende wind wekken we reeds energie op; in de Noordzee is inmiddels een eerste windmolenpark aangelegd ter hoogte van Castricum en Egmond aan Zee. De windgolven op de Noordzee worden echter nog niet ingezet voor energieopwekking. Oorzaak hiervan is dat met de huidige stand van de techniek commerciële exploitatie nog niet bewezen is. Enkele proeven worden wereldwijd al wel gedaan; vaak op locaties waar de golven meer dan vijf maal zoveel energie bevatten. Het voordeel van de Noordzee is dat de slijtageslag op golfenergie-installaties veel geringer is dan in de oceanen. De gemiddelde 'energie' die de golven in de Noordzee leveren, ligt rond de 10 kW per meter golf op dertig kilometer uit de kust. Dat kan dan minder zijn dan elders, maar iedere tien meter golf levert overigens (continu) net zoveel vermogen als een automotor van 140 pk. De Noordzee lijkt dus een prima proeftuin om de technieken verder te ontwikkelen. Afhankelijk van deze ontwikkelingen en van de energieprijzen zal blijken of commerciële exploitatie mogelijk wordt.

Zoals we windmolenparken in zee aanleggen, kunnen we ook golfenergie-installaties in zee aanleggen, al dan niet in de buurt van de reeds bestaande windmolenparken. Combinaties zouden natuurlijk hele mooie synergievoordelen bieden. Theoretisch beschikken de aankomende golven in het Nederland over een vermogen van 1700 MW (17.000 auto's). Dat komt op jaarbasis overeen met een energievoorraad ter grootte van circa 15 TWh (54 PJ). Dat is voldoende voor ongeveer 900.000 huishoudens per jaar.



Technische mogelijkheden

Golfenergie is op verschillende manieren te winnen. De meest doorontwikkelde golfenergie-installaties zijn gebaseerd op één van de volgende vier principes. Onttrekking van (een deel van) de golfenergie gebeurt via:

1. **Drijvers:** als gevolg van een passerende golf maakt een drijver, op of onder het wateroppervlak, een op- en neergaande, een heen- en weergaande en roterende beweging. Een of meerdere van deze bewegingen kunnen via conventionele overbrengingen omgezet worden in elektrische energie.
2. **Luchtdrukkamers:** een golf water komt binnen in een afgesloten kamer waardoor de in de kamer aanwezige lucht wordt samengeperst. Deze luchtstroom drijft een turbine aan.
3. **Aftopping van de golven:** Het bovenste gedeelte van een golf wordt in een installatie naar een hoger gelegen reservoir gekanaliseerd. De kinetische energie van het bovenste deel van de golf wordt omgezet in potentiële energie, waarna het water via een turbine naar zeeniveau stroomt en energie opwekt.
4. **Golfrotors:** De waterdeeltjes in golven maken een cirkelbeweging (zie 1) die via een combinatie van een verticale en/of horizontale rotor omgezet kan worden in een draaibeweging. Deze beweging kan via conventionele overbrengingen omgezet worden in elektrische energie.

De voordelen van golfenergie ten opzichte van andere soorten duurzame energie zijn, dat de energie meer

geconcentreerd en constanter aanwezig is en dat de voorspelbaarheid beter is. Bij toepassing van golfenergie-installaties op grote schaal, lijkt een technisch winbaar potentieel van 3 TWh (10 PJ) per jaar reëel.

Maatschappelijk haalbaar

De Noordzee staat niet uitsluitend ter beschikking voor energieopwekking. Zoals gezegd bestaat reeds een groot aantal ruimteclaims vanuit diverse functies (scheepvaart, visserij e.d). Vanwege infrastructurele voordelen en het voorkomen van onnodige ruimteclaims is het ruimtelijk combineren, waar mogelijk, van meerdere functies gewenst. De water- en windenergie op dezelfde locatie zal zowel economische als maatschappelijke voordelen geven. In het licht van genoemde ruimteclaims, de mogelijkheden tot combineren van functies en overige beperkingen, lijkt grofweg 50% van de Nederlandse kustlengte geschikt gemaakt te kunnen worden voor exploitatie van golfenergie. Gegeven de huidige inzichten in (verwachte) rendementen, is de maatschappelijk winbare voorraad van deze optie ongeveer 5,5 PJ (1 à 1,5 TWh) per jaar. Of deze voorraden daadwerkelijk economisch winbaar zijn, is niet goed te bepalen. Als echter locaties voor windenergie gebruikt zullen worden, dan zal de economische haalbaarheid sterk toenemen, omdat veel infrastructuur als toegang voor onderhoud en elektriciteitsnetwerken al is aangelegd. Hoeveel energie er gewonnen kan worden is op dit moment nog niet duidelijk, aangezien de techniek nog niet ver genoeg ontwikkeld is.





1.3 Energie uit aquatische biomassa

De potentiële voorraad

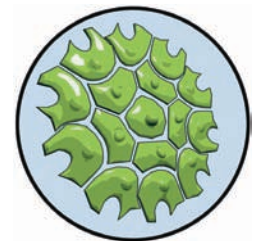
De dure en steeds schaarser wordende aardolie is feitelijk een biologisch product. Aardolie is namelijk onder andere ontstaan door bezinking van algen uit oceanen naar de oceanbodembodem. Op deze wijze zijn door de eeuwen heen dikke lagen dode algen op de bodem afgezet. Dit proces gaat nog steeds door. Alleen verbruiken we de olie tegenwoordig veel sneller dan er via dit natuurlijke proces weer kan worden aangemaakt. We gaan er dus niet duurzaam mee om. Op zoek naar duurzame energiebronnen wordt tegenwoordig ook veel biobrandstof gewonnen uit landbouwgewassen. Dit heeft echter nadelen, waaronder de concurrentie met de 'voedselbehoefte' van mensen.

Aquatische biomassa biedt extra mogelijkheden. Algen en wieren hebben een veel hogere primaire productie dan landgewassen en zijn uitermate geschikt als basis voor biobrandstof. Er is en wordt veel onderzoek uitgevoerd om een productiesysteem voor algen te ontwerpen waarbij de hoeveelheid gewonnen energie opweegt tegen de geïnvesteerde energie voor de groei. De productie van biodiesel uit algen wordt nog nergens commercieel uitgevoerd, maar er worden wel op grote schaal proefprojecten uitgevoerd. De meeste proefprojecten vinden plaats op land in open rondstromende systemen (zogenaamde 'raceway ponds') of in buisvormige bioreactoren. Er worden ook experimenten uitgevoerd met algenkweek in drijvende bassins en met de kweek van wieren rond windmolenparken. Onderzoeksvragen met betrekking tot de huidige systemen betreffen voornamelijk de economische en energetische haalbaarheid en de infectie van open systemen met ongewenste soorten. Voor open kweeksystemen op open (Rijks-)wateren moet bijvoorbeeld nog gekeken worden naar eventuele neveneffecten op de ecologie van de omliggende wateren en naar de benodigde infrastructuur voor aan- en afvoer van voedingsstoffen en algenproduct.

In Nederland zijn de oppervlaktewateren - sterker dan in andere landen - verrijkt met plantenvoedingsstoffen. We hebben daardoor meer dan genoeg algen in onze oppervlaktewateren. Dit geeft problemen met blauwalgenbloei, troebelheid en een slechte ecologische kwaliteit. Als we het overschot aan algen zouden kunnen oogsten, winnen we energie en verbeteren we tegelijkertijd de waterkwaliteit.

Technische mogelijkheden

Niet alle algensoorten zijn geschikt voor de winning van biodiesel. Het gaat vooral om de soorten die een hoog gehalte aan lipiden in zich hebben. Dit is slechts een klein gedeelte van de algen die in een natuurlijk systeem groeien. De bulk aan primaire productie is niet geschikt voor de productie van biodiesel, of is bijzonder inefficiënt hiervoor. Ook zijn algen



met een hoog lipidegehalte minder goede 'competitors' dan andere, minder geschikte, algensoorten. De huidige proefopstellingen met hoogwaardige gekweekte algen, waar weinig selectie van bruikbaar organisch materiaal hoeft plaats te vinden, bieden momenteel al wel interessante mogelijkheden.

Een alternatief voor bovenstaande mogelijkheid is gebaseerd op de accumulatie van koolstof in de aquatische biomassa en de verbrandingswaarde daarvan. De hier toe te passen technieken zijn afhankelijk van het type biomassa dat geogst moet worden, en zijn geënt op de kweek in afgeschermden bassins en reactoren. Wegens de verschillen in condities met kweek van biomassa in de Nederlandse binnenwateren en de Noordzee, worden de technieken niet nader toegelicht. Technisch gezien lijkt een jaarlijkse opbrengst van 190 PJ (50 TWh) realiseerbaar.

Maatschappelijk haalbaar

De productie van algen in open kweeksystemen op open water combineert slecht met andere gebruiksfuncties van het water. Hierdoor is het onwaarschijnlijk dat Nederlandse binnenwateren volledig ingezet worden voor algenkweek. Bovendien worden deze effecten versterkt doordat optimalisatie van deze energiebron hoogstwaarschijnlijk extra nutriënten in en hogere temperatuur van het water vereisen. Aan de andere kant bieden - eventueel te creëren - afgesloten wateren en de Noordzee wel mogelijkheden. Wanneer afgesloten en maatschappelijk verantwoorde kweekbassins (waterkassen) in Noordzee, Markermeer, IJsselmeer en Volkerak-Zoommeer gerealiseerd kunnen worden, is de verwachte energieproductie circa 7 PJ (2 TWh).





1.4 Energie uit getijden

1.4.1 Energie uit getijdenverschil

De potentiële voorraad

Twee keer per etmaal staat een groot deel van het strand onder water en twee keer per etmaal is er voldoende ruimte om er met duizenden tegelijk te vertoeven. Eb en vloed leveren het verschil in waterstand. Het begrip getijdenverschil wordt gedefinieerd als het waterstandsverschil tussen hoogwater en laagwater dat optreedt als gevolg van het getij. Deze cyclus levert, bij het stijgen en het zakken van het water, viermaal per etmaal, potentiële energie.

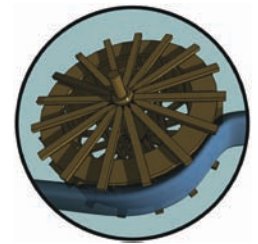
Het potentiële vermogen bij energiewinning uit getijverschil wordt bepaald door het watervolume dat door het getij verplaatst wordt, het getijdenverloop en het getijverschil tussen het in- en uitstroompunt. Langs de kust neemt het getijverschil vanaf Vlissingen in noordelijke richting af van vier meter tot circa een meter rond Den Helder. Hier bevindt zich een minimum, waarna het getijverschil richting Duitsland weer toeneemt tot circa anderhalve meter. Om het hydraulisch verval van getijden te benutten voor energieopwekking is een bassin nodig. Dit bassin kan van nature aanwezig zijn in de vorm van een estuarium of inham, of het kan kunstmatig worden gecreëerd. De totale potentiële energievoorraad is naar schatting 85 PJ (24 TWh), zie getijdenstroming.

Technische mogelijkheden

Om deze vorm van energie te winnen, moet het bekken afsluitbaar zijn. Tijdens de vloedperiode stroomt het bekken vol en wordt potentiële energie opgebouwd. Tijdens laagwater stroomt het bekken leeg via openingen in de afsluiting. De energieopwekking vindt dan op drie manieren plaats:

1. **Alleen bij hoogwater.** Het bekken vult zich tijdens de vloedperiode en bij hoogwater sluiten de sluisen. Bij laagwater loopt het bassin leeg door laag verval turbines. Met deze methode vindt er energieopwekking plaats gedurende 40% van de getijdencyclus.
2. **Alleen bij laagwater.** De sluisen sluiten bij laag water. Bij hoogwater vult het bekken zich met water dat door de turbines stroomt.
3. **Bij hoog- en laagwater.** Een combinatie van bovenstaande twee methodes. Dit vereist duurere turbines, maar dan kan ook een dubbele hoeveelheid energie opgewekt worden ten opzichte van de eerdere twee methodes

Theoretisch gezien is er langs de kust 1900 km² aan wateroppervlak (Haringvliet, Grevelingenmeer, Oosterschelde, Westerschelde, IJsselmeer en Lauwersmeer) onder invloed van het getij, of mogelijk zelfs onder invloed van het getij te stellen. Hiermee is ongeveer 11 PJ aan elektriciteit op te wekken.



Maatschappelijk haalbaar

De wateren langs de kust zijn niet allemaal geschikt voor energieopwekking uit getijverschil. Het IJsselmeer is nagenoeg uitgesloten wegens de maatschappelijke noodzaak van zoetwater. In verband met de achterliggende havens is het niet ook waarschijnlijk dat de Westerschelde afgesloten zal worden. Mogelijke locaties zijn te vinden in Haringvliet, het Grevelingenmeer, de Oosterschelde en het Lauwersmeer. Daarbij moet in ogenschouwen genomen worden dat de projecten niet in strijd zijn met geldende beleidsplannen, zij de veiligheid niet verminderen of in gevaar brengen, en niet in strijd zijn met andere functies van de gebieden. Maatschappelijk haalbaar wordt geacht 4 PJ per jaar.

1.4.2 Energie uit getijdenstroming

De potentiële voorraad

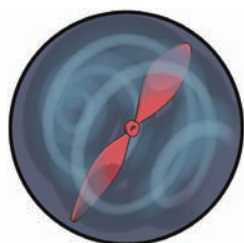
Het getij is één van de belangrijkste drijvende krachten voor de stroming van water. Zolang het water stijgt en daalt - en dat is eigenlijk voortdurend het geval - is er sprake van stroming van het water. Stromend water kan op vrij eenvoudige manier omgezet worden in elektrische energie. De werking van een waterstromingsturbine is vergelijkbaar met de werking van een windmolen. Voor Nederland zijn de Noordzee rond de Waddeneilanden en de delta het meest relevant. Voor een eerste schatting wordt de Nederlandse kustlijn benaderd wordt door een rechte lijn van 250 kilometer lang, en een gemiddelde diepte van de Noordzee van circa 20 meter. Bij een gemiddelde stroomsnelheid van 1 m/s levert dat een totale potentiële energievoorraad op ter grootte van 79 PJ (= 22 TWh).

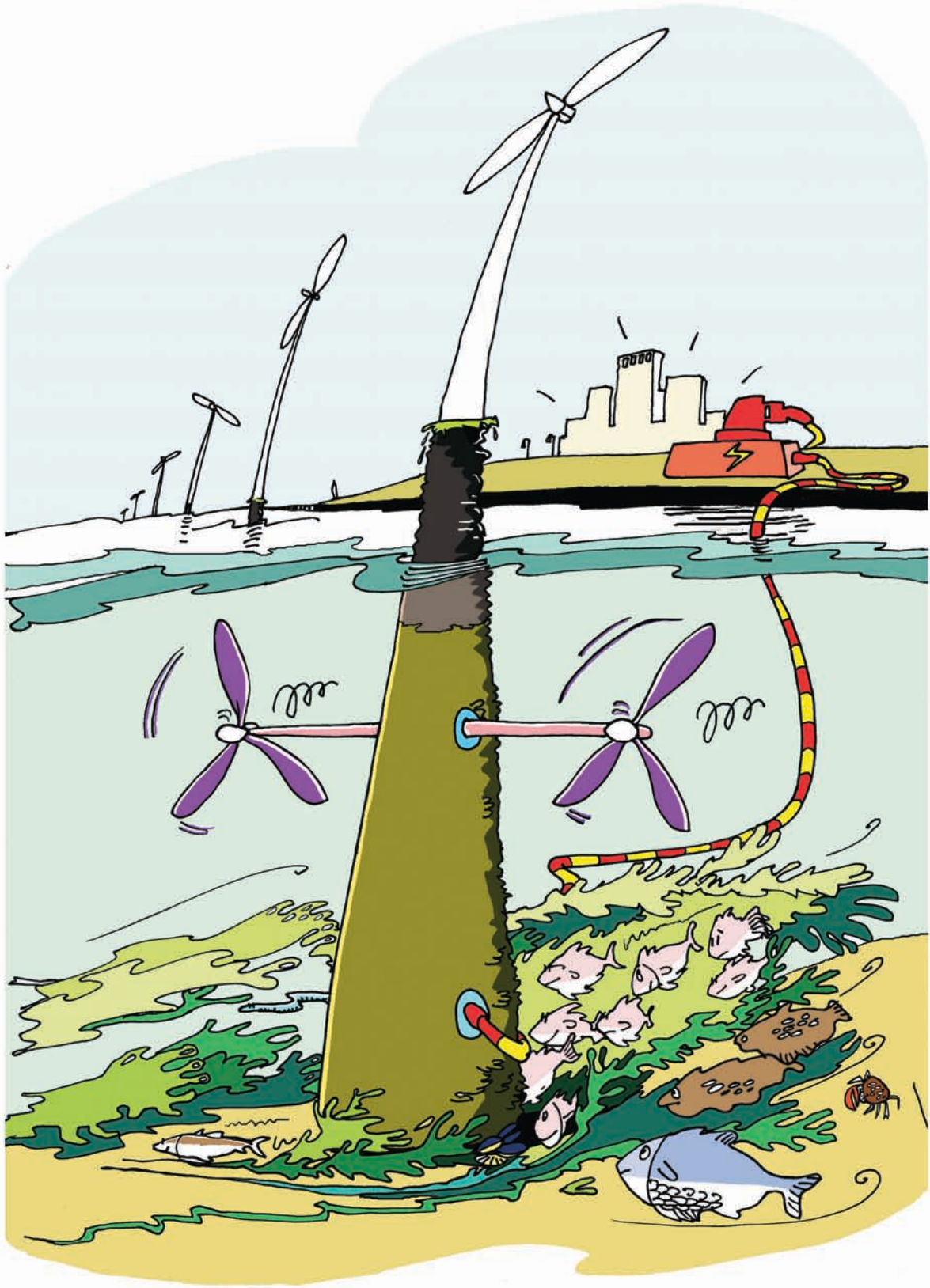
Technische mogelijkheden

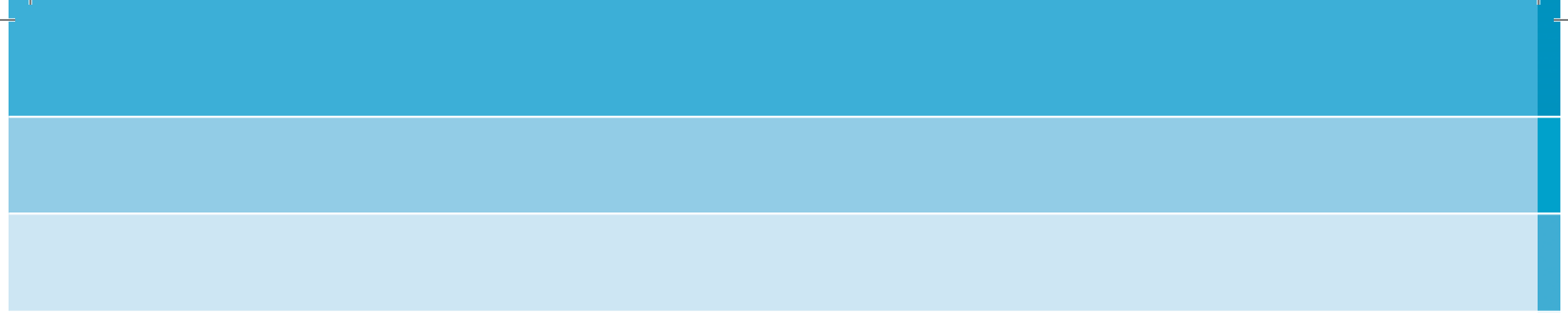
Door een rotor of turbine in de waterstroming te plaatsen, kan energie worden onttrokken. Dit manifesteert zich dan door een lagere stroomsnelheid, waterdruk of waterstand achter de turbine, dan vóór de turbine het geval is. Er zijn verschillende turbines ontworpen met een variërend rendement. Een waterstromingsturbine heeft in de praktijk een omzettingsrendement tussen de 10% en 40%. Welke turbine het meest geschikt is, hangt niet alleen van het rendement af, maar ook van de lokale omstandigheden. Hoeveel energie uit getijdenstroming gehaald kan worden, is afhankelijk van de stroomsnelheid van het water en het beschikbare oppervlak waar het door kan stromen. In principe is er voldoende technische kennis om de gehele potentiële energievoorraad te exploiteren. Bij huidige inzichten van rendementen kan ongeveer 5 PJ omzet worden in elektriciteit.

Maatschappelijk haalbaar

De beste mogelijkheden om energie uit getijdenstroming te winnen, bevinden zich op die plekken waar waterstroming zich concentreert. Op die plekken is namelijk de impuls (massa x snelheid) het grootst. Getijdengeulen en openingen in keringen zijn voorbeelden van dit soort locaties. Voorwaarde is wel dat de stroomsnelheid groter is dan 1 m/s en dat het water ter plekke dieper is dan tien meter. Uiteraard mag de installatie niet in de vaargeul liggen. In de Oosterschelde, Veersemeer, Grevelingenmeer, Haringvliet, Westerschelde en de Waddenzee zijn goede mogelijkheden om energie uit getijdenstroom op te wekken. Maatschappelijk haalbaar lijkt 3 PJ.







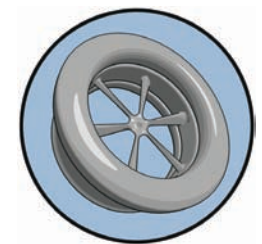


1.5 Energie uit rivieren

1.5.1 Energie uit stroming door stuwen en sluisen

De potentiële energievoorraad

Tussen het punt waar het water via de rivieren ons land binnenstroomt en waar het in zee uitstroomt, zit een verval. Voor de Rijn is dat ongeveer 10 meter en voor de Maas 45 meter. Om - onder andere de bevaarbaarheid te kunnen blijven garanderen - zijn er op diverse plaatsen in het Nederlandse rivierennetwerk stuwen en sluisen aangelegd. Dat gegeven biedt kansen voor energieopwekking zonder het landschap en/of de rivieren extra aan te tasten. De productie van elektriciteit uit afstromend water is afhankelijk van het verval en de hoeveelheid water dat door de rivier wordt afgevoerd. Gegeven het gemiddelde debiet dat door Rijn, Maas en overige rivieren wordt afgevoerd, en gegeven het verval dat het afstromende water overbrugt, is de potentiële voorraad 11 PJ (3 TWh) per jaar.



Technische mogelijkheden

Om de potentiële energie te winnen zijn kunstwerken nodig waar turbines in geplaatst kunnen worden. Zonder deze 'discontinuïteiten' in het rivierennetwerk is de energie diffuus verspreid aanwezig en daarmee nauwelijks winbaar.

De wijze waarop de technisch winbare energie berekend kan worden lijkt evident. Echter, tijdens perioden met hoge afvoer moet het water onvertraagd (ongestuwd) afgevoerd worden om overstromingsrisico's te beperken. In dat geval is het verval over de kunstwerken marginaal en de energiewinning inherent laag. Ook dient rekening gehouden te worden met een gevolg van een fluctuerende afvoer. Wanneer de riverafvoer lager is dan het geïnstalleerde vermogen, kan de centrale niet op volle toeren draaien en wanneer een waterkrachtcentrale onvoldoende (geïnstalleerd) vermogen heeft om alle energie uit het water te halen, kan niet alle aanwezige waterkracht omgezet worden in elektrische energie.

De Nederlandse rivieren beschikken, zoals gezegd, over tientallen stuw- en sluiscomplexen, maar die zijn niet alle geschikt voor energiewinning. Dat hangt af van het verval bij het kunstwerk - de hoogte waarover het water opgestuwd wordt - en het doorstromend debiet. Bij kleine vervallen en/of debieten is de energiewinning niet significant, waarmee de locatie minder geschikt is voor energiewinning uit waterkracht. Deze locaties kunnen echter wel lokaal van betekenis zijn wanneer enkele huishoudens hun energie ervan betrekken. Voor deze Inspiratieatlas wordt uitgegaan van een minimaal gemiddeld verval van meer dan één meter en een minimaal gemiddeld debiet van 25 m³/s, als criterium voor opname in de berekeningen. Op basis van 'engineering judgement' kan gesteld worden dat



het technisch haalbaar is om op jaarbasis een elektriciteitsproductie van 300 GWh te realiseren.

Maatschappelijk haalbaar

Een gedeelte van het Nederlandse rivierennetwerk is gestuurd voor de scheepvaart. In Nederland zijn tientallen stuwen en sluisen, waarvan de stuwen bij Driel, Amerongen en Hagestein, in de Nederrijn, respectievelijk de Lek, de bekendste zijn. Bij een stuw of (scheepvaart)sluis is het verval en daarmee de waterkracht geconcentreerd en kunnen waterkrachtinstallaties geïnstalleerd worden, die continu, of tijdens het schutproces, energie opwekken. Bij enkele wordt dit al gedaan, zoals bij Amerongen (Nederrijn; 10 MW), Hagestein (Lek; 1,8 MW), Linne (Maas; 11 MW) en Lith (Maas; 14 MW). Ook is een aantal kleine krachtcentrales geïnstalleerd, maar die leveren wegens een veel kleiner verval en doorstromend debiet een veel kleinere bijdrage. In totaal bedraagt de huidige gemiddelde jaarlijkse energieproductie 100 GWh. Nadere studies moeten uitwijzen of het mogelijk is dit op te schroeven tot 1 PJ (300 GWh).

1.5.2 Energie uit stroming door rivierkribben

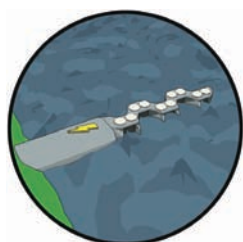
De potentiële energievoorraad

Volgens hetzelfde principe als bij de stroming door stuwen en sluisen is het mogelijk om energie op te wekken uit reeds bestaande aangepaste rivierkribben. Deze categorie wordt hier apart genoemd, omdat het een geheel nieuwe methode is. Energieopwekking bij stuwen en sluisen is reeds op veel locaties in binnen- en buitenland gerealiseerd, terwijl energieopwekking bij rivierkribben nog onbekend is en op geen enkele plaats (commercieel) wordt toegepast. Het potentieel van het afstromende water in Nederland is – zoals hiervoor gemeld – circa 3 TWh.

Technische mogelijkheden

Met name tijdens perioden van hoge waterafvoer kunnen stuwen en sluisen in de rivieren weinig onttrekken van het rivierwater. Voor een maximale doorvoer van rivierwater staan deze kunstwerken namelijk zo ver mogelijk open. Omdat er zo, ondanks de relatief grote stroomsnelheid, weinig verval is over de kunstwerken, is de energieopwekking inherent laag.

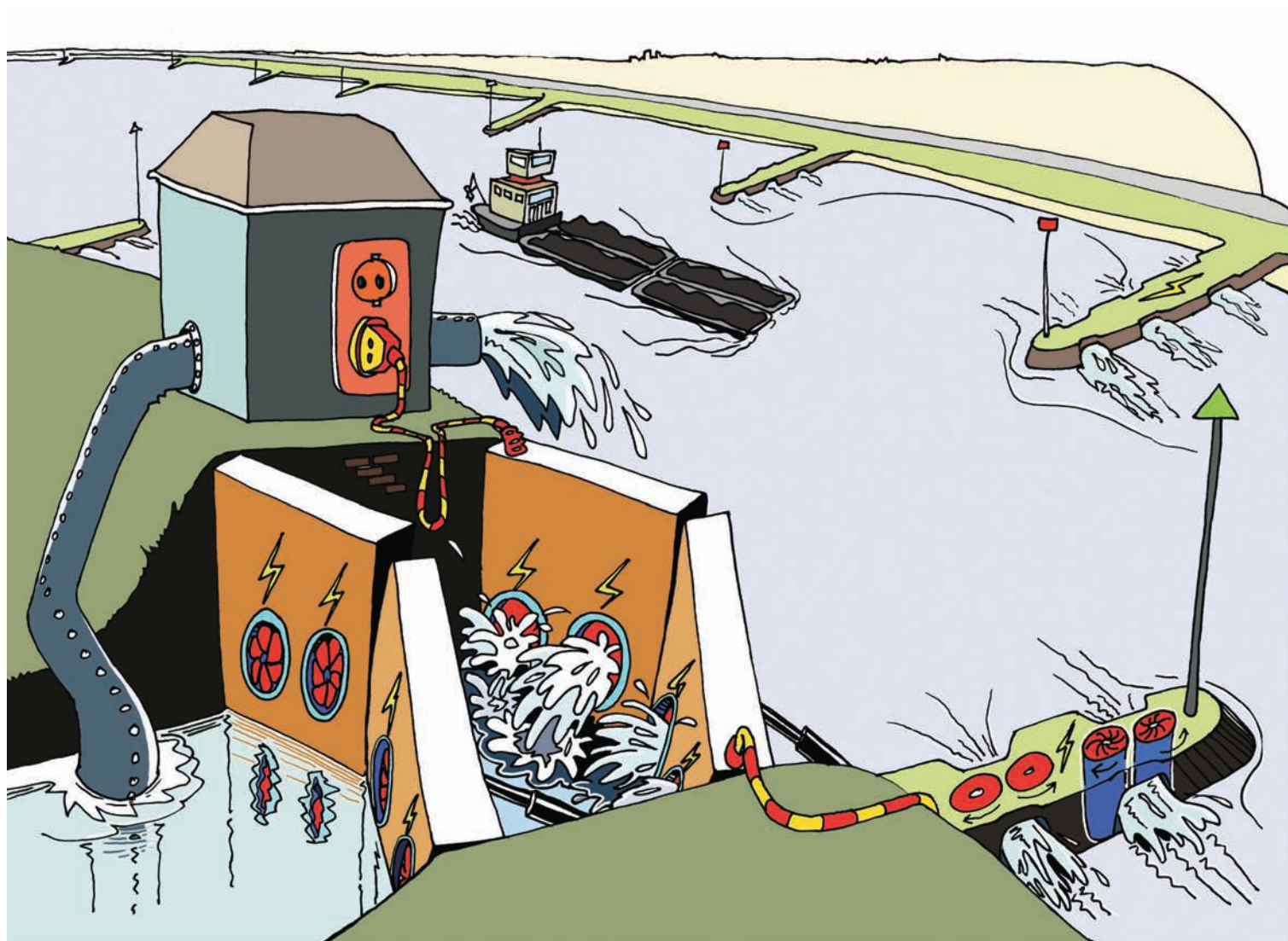
Bij kribben is dat anders. Tijdens laagwaterperioden dienen kribben ervoor te zorgen dat het doorstromend oppervlak van de rivier beperkt blijft, zodat de waterstroom geconcentreerd wordt en de benodigde vaardiepte in de vaargeul gehandhaafd. Tijdens hoogwaterperioden raken de kribben deels overstroomd, maar behouden ze hun opstuwende werking in de rivieren. Klassieke kribben zijn massieve constructies; ze kunnen niet anticiperen of reageren op veranderende omstandigheden. Vanuit het perspectief van veiligheid zou het gewenst zijn kribben tijdens hoogwaterperioden doorlatender te maken, zodat ze een grotere afvoer mogelijk maken bij gelijke waterstand. Wanneer nu een gedeelte van de krib verlaagd wordt en hierin afsluitbare turbines geplaatst worden, is het mogelijk zowel de afvoer door en over de krib te reguleren, alsook energie uit het doorstromende rivierwater te onttrekken. Wanneer de kribben in de riviertakken voorzien worden van turbines, wordt de technisch winbare voorraad geschat op 100 GWh.

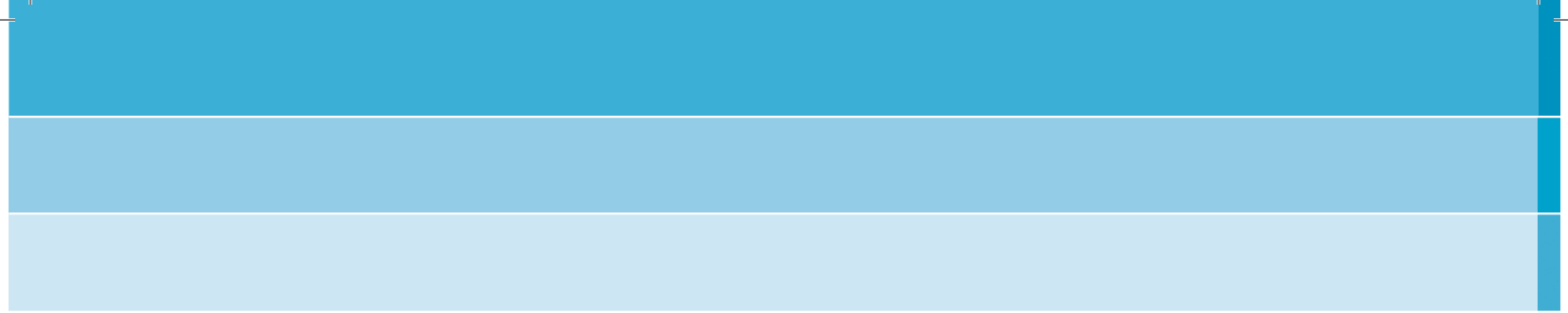


Maatschappelijk haalbaar

In de Nederlandse rivieren liggen in totaal meer dan 3500 kribben. Deze steken - afhankelijk van de geometrie van de rivier - ver of minder ver de rivier in. Het plaatsen van extra kribben is vanuit rivierkundig perspectief niet wenselijk en leidt tot onveilige situaties en onwerkbare omstandighe-

den. De turbinekribben passen het best op locaties met smalle uiterwaarden en dicht bij industriegebieden. Turbines hebben namelijk een industriële uitstraling. Geschat wordt dat 300 kribben geschikt zijn en dat zij in totaal jaarlijks 50 GWh kunnen produceren.



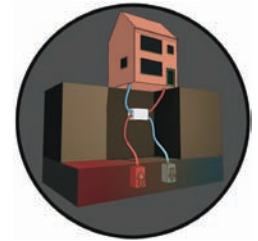




1.6 Energie uit warmte- en koudeopslag

De potentiële energievoorraad

Over het verkrijgen van energie uit zee- en rivierwater is in deze inspiratieatlas al veel opgemerkt. Een andere watergerelateerde bron van energie, die al op redelijke schaal in Nederland wordt toegepast, betreft de opslag van warm en koud water in de bodem. De temperatuur in de ondergrond is het hele jaar vrij constant. Dat betekent dat de ondergrond vergeleken met de omgevingstemperatuur in de zomer relatief koud is en in de winter relatief warm. Warmte- en koudeopslag (WKO) maakt gebruik van deze temperatuurverschillen en kan de primaire energiebehoefte bij het verwarmen of koelen van woningen (circa 40%) en kantoren (circa 90%) verminderen.



In principe is bijna heel Nederland geschikt voor (thermische) energie uit WKO. Het belangrijkste criterium voor de geschiktheid van een locatie is de mogelijkheid om voldoende debiet te kunnen halen. Dit is afhankelijk van de dikte van de watervoerende pakketten, maar ook van de 'doorlatendheid' van deze laag. Fijn zand heeft meer weerstand dan grof zand. Het is moeilijk om de maximale potentiële energievoorraad vast te stellen omdat een aantal factoren nog onbekend is. Maar in principe kan ervan uit worden gegaan dat de totale potentiële energievoorraad vele malen groter is dan de technisch winbare energievoorraad.

Technische mogelijkheden

Onderscheidend voor verschillende typen WKO-installaties is de interactie met het grondwater. Gesloten systemen maken gebruik van lussen of heipalen in de grond waarin koelvloeistof wordt rondgepompt. Deze systemen hebben geen invloed op de grondwaterstromingen, maar leiden wel tot het lokaal opwarmen/afkoelen van het grondwater. Deze systemen kunnen een diepte van tientallen meters tot meer dan honderd meter bereiken. Momenteel leveren ze vermogens van ongeveer 0,5 MW. Bij open systemen wordt het in de bodem aanwezige water zelf als medium gebruikt om de warmte te transporteren. Vaak wordt gebruik gemaakt van twee putten: een warme en een koude bron. In de zomer wordt het water uit de koude bron onttrokken en voor koeling in gebouwen gebruikt en vervolgens in de warme bron geïnjecteerd. In de winter wordt het water uit de warme bron onttrokken en voor verwarming van gebouwen gebruikt en vervolgens in de koude bron geïnjecteerd. Deze systemen leveren momenteel vermogens tot ongeveer 25 MW. Een andere mogelijkheid met twee putten is het continu oppompen uit de productieput en op enige afstand verder - om kortsluitstroming te voorkomen - te injecteren in de injectieput. Een andere variant van open systemen is het monobronstelsel waar de warme en koude bron boven elkaar liggen. Ze worden door een natuurlijk aanwezige laag van elkaar gescheiden. De ruimte in de ondergrond wordt - op basis van 'engineering judgement' en

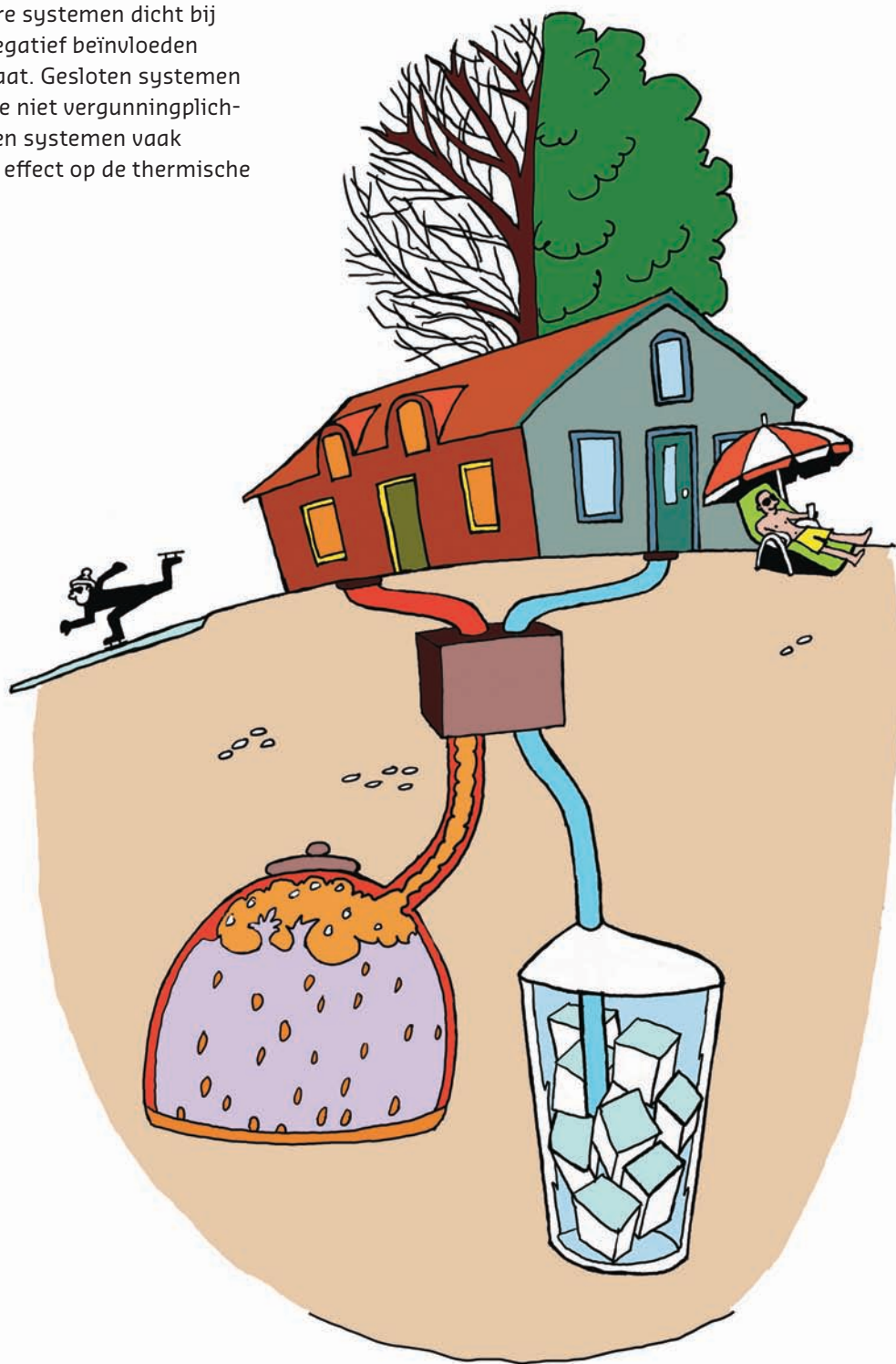


ervaringen - voldoende groot verondersteld om te voorzien in de totale warmte- en koudevraag van Nederland. De capaciteit wordt daarmee ook begrensd op deze actuele behoefte: 960 PJ jaar (270 TWh).

Maatschappelijk haalbaar

Zoals gezegd hebben WKO-systemen invloed op de (lokale) grondwaterstromingen en de thermische balans in de ondergrond. In geval dat er meerdere systemen dicht bij elkaar staan, kunnen deze elkaar negatief beïnvloeden waardoor het rendement omlaag gaat. Gesloten systemen vallen buiten regelgeving doordat ze niet vergunningplichtig zijn. Bovendien zijn deze gesloten systemen vaak aanmerkelijk kleiner, waardoor hun effect op de thermische balans ook kleiner is.

De maatschappelijke beperkingen zijn nog niet goed in kaart gebracht en het beleid en wettelijk kader zijn nog niet goed ingericht met het oog op exploitatie en vergunningverlening voor WKO-systemen. Desondanks is er al een behoorlijke praktijkervaring met WKO, en een maatschappelijke haalbaar geachte exploitatie zal ongeveer 290 PJ (80 TWh) thermische energie per jaar opleveren.





1.7 Energie uit aardwarmte

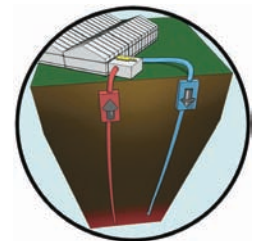
De potentiële energievoorraad

De kern van de aarde levert ons warmte en dus ook energie, als we dat zouden willen. Dat gegeven is al heel lang bekend, maar we hebben er nog niet veel mee gedaan. Een enkel systeem is in Nederland operationeel. Nu de fossiele brandstoffen schaarser en duurder worden en nu de overheid een garantiefonds instelt voor afdekking van onvermijdelijke risico's die met exploitatie van aardwarmte gepaard gaan, komt deze mogelijkheid beter in beeld.

Bij aardwarmte wordt warm water, dat zich in diep gelegen watervoerende lagen bevindt, gebruikt als energiebron. Het water is door warmte uit de kern van de aarde verwarmd. Vanaf het aardoppervlak gezien neemt in Nederland de temperatuur van het grondwater ruim drie graden per honderd meter in de diepte toe. Dat betekent dat op twee kilometer diepte de temperatuur ongeveer 70°C is. Vanaf drie kilometer is de temperatuur in principe voldoende om ook elektriciteit te produceren.

Op menselijke tijdschaal is de hoeveelheid energie in de aardkern onuitputtelijk, en mag gesteld worden dat de potentiële energievoorraad oneindig is. Wanneer echter een kleinere tijdschaal hanteert wordt, spelen het geleidingsvermogen en de opnamecapaciteit van het aardmateriaal op grote diepte een beperkende rol. Het gereïnjekteerde, afgekoelde water wordt namelijk gedurende de levensduur van een aardwarmtebron niet snel genoeg weer opgewarmd in de ondergrond. Hierdoor worden aardwarmtebronnen op een gegeven moment onrendabel. Dat komt doordat het afgekoelde water mee omhoog wordt gepompt en het vermogen navenant terugloopt. De gemiddelde levensduur van een aardwarmtebron is ongeveer dertig jaar. Er is een langere periode van – naar schatting – meer dan honderd jaar nodig om het afgekoelde water weer op temperatuur te krijgen, voordat het weer in gebruik kan worden genomen voor exploitatie.

Bij toepassing van aardwarmte als bron voor energie- of warmtevoorziening wordt, vanwege de diffuse verspreiding van de aardwarmtestroom-energie, uitsluitend aanspraak gemaakt op reeds opgeslagen warmte in de diepgelegen watervoerende lagen. De potentie van de Nederlandse reserves op het vaste land zijn geschat op 90.000 PJ. Bij een gemiddelde exploitatieduur van 30 jaar leidt dit tot een jaarlijks beschikbare energievoorraad van 3000 PJ (800 TWh).



Technische mogelijkheden

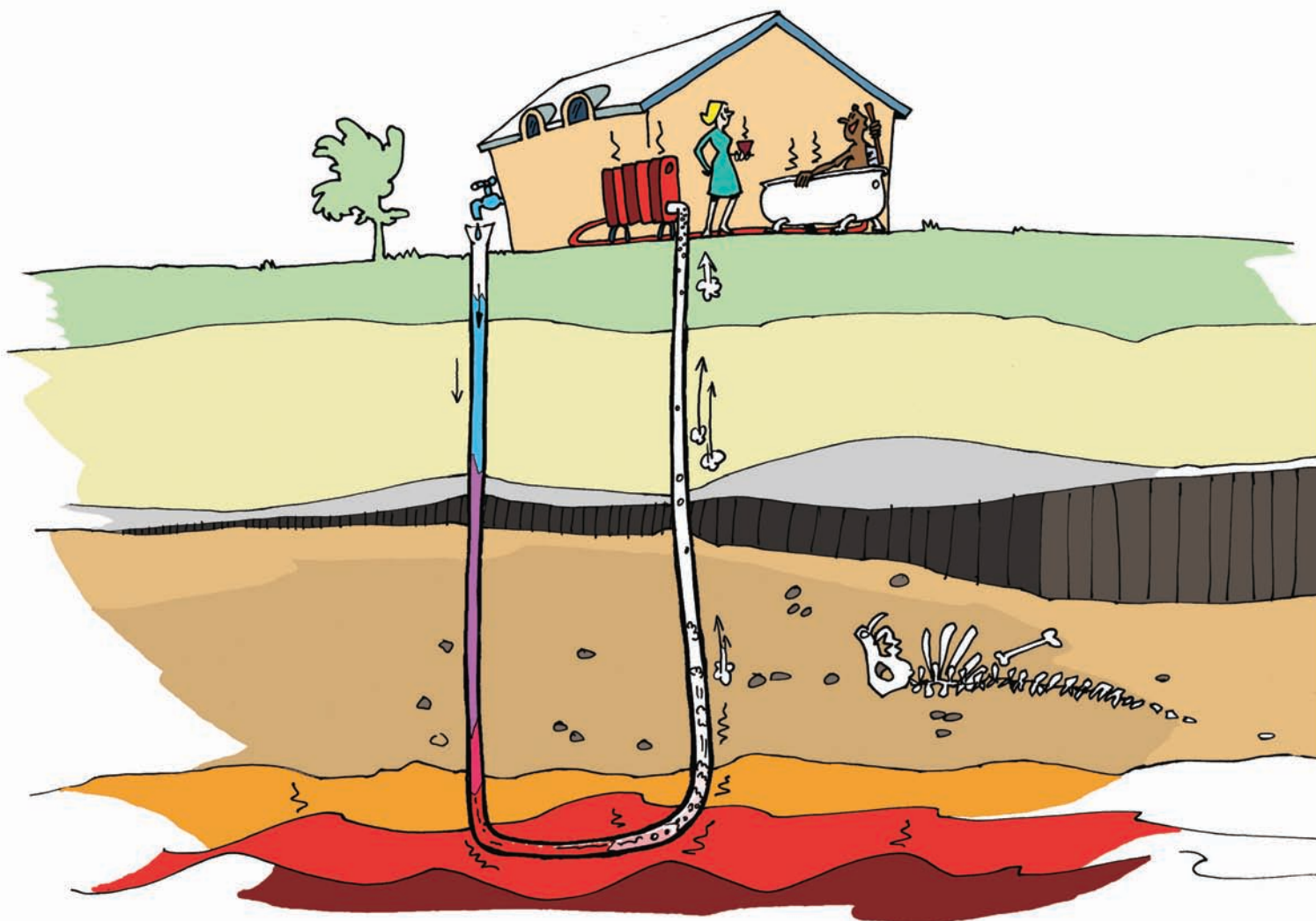
Voor het winnen van diepe geothermische warmte wordt warm water via een productieput opgepompt uit een goed doorlatende, watervoerende gesteentelaag. Aan het oppervlak wordt dit water langs een warmtewisselaar geleid, waarna het afgekoelde water via een injectieput wordt gereinjecteerd in (meestal) dezelfde watervoerende laag. De afstand tussen productieput en injectieput in de watervoerende laag moet voldoende groot zijn om thermische kortsluiting te voorkomen gedurende de levensduur van de installatie. De watervoerende zandsteenlagen zijn in Nederland dezelfde lagen als waaruit op veel plaatsen olie of gas wordt gewonnen. Op die plekken wordt het goed doorlatend gesteente een reservoir genoemd. De ligging van deze goed doorlatende zandsteeneenheden is globaal bekend uit kartering van de diepe ondergrond en gegevens van diepe boringen en seismiek, afkomstig uit de olie- en gasindustrie. Door de groeiende belangstelling voor aardwarmte worden minder bekende watervoerende

eenheden, zoals kalksteen, tegenwoordig ook beoordeeld als potentiële targets.

De totale potentiële voorraad is vrijwel geheel technisch winbaar, indien geen rekening gehouden wordt met boorbeperkingen en afstanden. Het rendementsverlies voor de pompenergie is marginaal, hetgeen zich vertaalt in een technisch haalbare opbrengst van eveneens 3000 PJ.

Maatschappelijk haalbaar

De winning van aardwarmte leidt tot weinig hinder en er worden weinig concrete conflicten verwacht. Op dit moment is de eerste aardwarmtewinning al een feit. Rekeninghoudend met een hoge maatschappelijke acceptatie en beperkingen in verband met interferentie met olie- en gaswinlocaties overtreft het potentieel de warmtevraag. De maatschappelijke winbaarheid wordt daarmee bepaald door de omvang van de warmtevraag: 960 PJ (270 TWh).





1.8 Energie uit temperatuurverschil met het oppervlaktewater

De potentiële energievoorraad

Deze vorm van duurzame energie sluit aan bij de eerder genoemde techniek van Warmte- en Koudeopslag (WKO), een techniek die voor de verwarming van huizen en kantoren al op diverse plaatsen wordt toegepast. Het temperatuurverschil tussen omgeving en water dicht bij de oppervlakte, of tussen omgeving en water in de diepere lagen van een waterlichaam, kan benut worden. Op tientallen meters diepte is de watertemperatuur vrijwel het hele jaar constant, terwijl water aan de oppervlakte fors opgewarmd kan raken door invallend zonlicht/warmte. Het temperatuurverschil van water op grotere diepte kan, afhankelijk van de geografische locatie en de diepte van het waterlichaam, meer dan tien graden zijn. De potentieel winbare energie uit waterlichamen als meren, plassen en de zee, bestaat uit de hoeveelheid winbare warmte voor verwarming en winbare koude voor de koeling van gebouwen.

In beginsel zijn alle waterlichamen geschikt voor warmte- en koudewinning. Dat komt doordat ze de temperatuur van de omgeving (gedeeltelijk) aannemen. Voorwaarde is wel dat de warmte of koude op enigerlei wijze opgeslagen moet worden, omdat in de warmere seizoenen koelcapaciteit nodig is en in de koudere seizoenen verwarming gewenst is. Het is mogelijk de warmte en koude op te slaan in de bodem, waarmee het een (energetische) aanvulling is op een eventueel bestaande WKO-installatie. Soms wordt ervoor gekozen om de aanwezige thermische energie, hetzij koude, hetzij warmte, instantaan te gebruiken. De bovenste lagen in de waterkolom zijn dan, na het eventueel opwerken van de temperatuur in warmtewisselaars, geschikt voor verwarming. Het minder opgewarmde watervolume kan vrijwel altijd direct ingezet worden om gebouwen te koelen.

Technische mogelijkheden

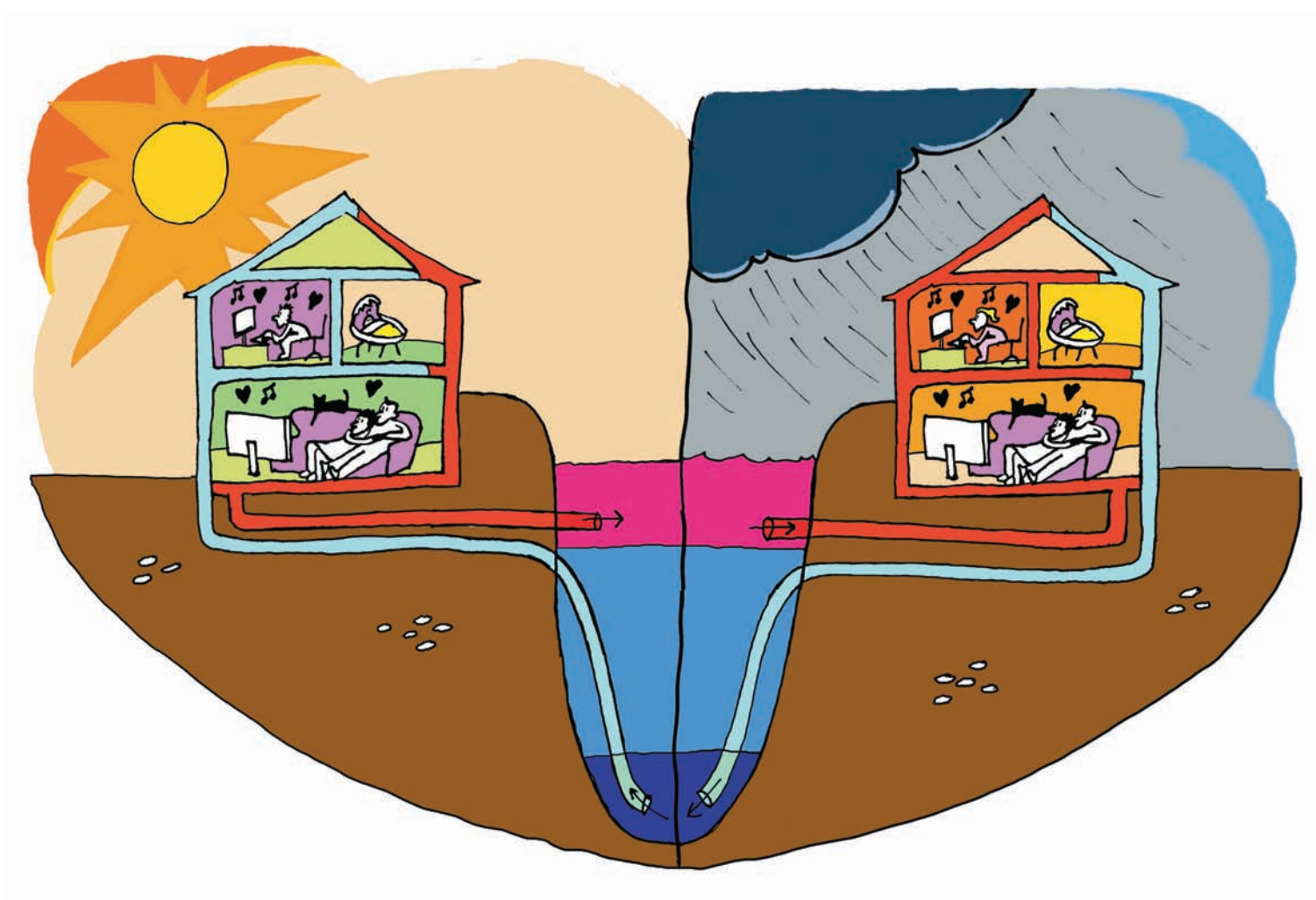
Uit een inventarisatie in Nederland blijkt dat de totale oppervlakte meren en plassen circa 500 km² bedraagt. De overige binnenlandse wateren zoals het IJssel- en Markermeer, het Rijn/Maas-estuarium en de rivieren hebben een oppervlakte van meer dan 2000 km². Daarnaast beslaat de Noordzee een oppervlakte van 57.000 km². De aanwezige warmte en/of koude in het water kan in beginsel geheel benut worden. Uiteraard is het onvoorstelbaar dat dat ook gebeurt. Slechts een heel klein deel van Noordzee, dat dicht bij de kust ligt, ligt binnen bereik voor verwarmingsinstallaties en koelinstallaties voor huizen en gebouwen. Voor de binnenlandse wateren geldt dat zij relatief dicht bij bebouwing liggen en dat deze dus voor een groot deel thermisch te benutten zijn. Wanneer ongeveer 1000 km² van de totale wateroppervlakte ingezet kan worden voor energiewinning, ligt het technisch potentieel op circa 20 PJ per jaar (5 à 6 TWh).



Maatschappelijk haalbaar

Wanneer meren gebruikt worden voor de aanvoer van koelwater, worden zij in geval van instantane benutting via de retourstroom thermisch belast. Dit kan tot een vergroting van de algenbloei en een algemene verslechtering van de waterkwaliteit leiden. Toepassingsmethoden zijn beschikbaar om dit tegen te gaan, door bijvoorbeeld de retourstroom dicht bij het wateroppervlak te lozen, waarmee de watertemperatuur aan de oppervlakte afneemt.

Deze methoden zijn mogelijk niet overal toepasbaar, en er moet rekening gehouden worden met de toepassing van bellenschermen om de algenbloei tegen te gaan. Bellenschermen bevorderen verticale stroming en leiden tot een minder gestratificeerd meer. Gesteld wordt dat het tegengaan van de algenbloei leidt tot een forse reductie in opbrengst: 10 PJ.



2 Bepaling van het energiepotentieel

Dit hoofdstuk toont de cijfers en berekeningen van de in het eerste hoofdstuk omschreven energiebronnen en winningstechnieken. De hieronder gepresenteerde scenario's, waarden en berekeningen zijn een eerste ordebenadering voor de bepaling van de energetische voorraden en funderen de in Hoofdstuk 3 gepresenteerde inschattingen.



2.1 Energie uit zoet-zoutgradiënten



De potentiële energievoorraad

De fundamentele processen die bij deze vorm van energieopwekking centraal staan, zijn osmose en omgekeerde elektrodialyse. Op locaties waar zoet- en zoutwater elkaar ontmoeten, kan met behulp van installaties die deze processen controleren energie gewonnen worden. Nederland beschikt over veel zoetwater en over onnoemelijk veel meer zoutwater. De aangevoerde hoeveelheid zoetwater stromend richting de Noordzee, is daarom de beperkende factor. Daarom wordt de potentiële energievoorraad op basis daarvan berekend.

De hoeveelheid zoetwater dat Nederland uitstroomt bij de kust wordt bepaald door de hoeveelheid water dat in de rivieren Nederland binnenstroomt en door het (netto) neerslagoverschot. De Rijn voert bij Lobith gemiddeld $70.400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar aan, de Maas bij Eijsden jaarlijks circa $7.400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De overige rivieren en beken worden geschat op een jaarlijkse aanvoer van $3.300 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Het neerslagoverschot in Nederland bedraagt rond de $8.500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per jaar. Samen maakt dat een jaarlijks volume van $89.600 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. De gemiddelde afvoer van zoetwater in Nederland bedraagt dus ongeveer $2.750 \text{ m}^3/\text{s}$. Het osmotische drukverschil tussen zoet- en zoutwater bedraagt ongeveer 25 bar. Dat betekent dat iedere kubieke meter zoetwater - bij voldoende aanwezigheid van zoutwater - een energie vertegenwoordigt van 2,52 MJ. Dit komt overeen met 0,7 kWh. Het totaal theoretisch energiepotentieel bedraagt daarmee 220 PJ per jaar (60 TWh). Omgerekend naar instantaan vermogen is dat 7000 MW.

Technisch winbare voorraad

Voor de winning van energie uit zoet-zoutgradiënten zijn twee technologieën beschikbaar, te weten: PRO (Pressure Retarded Osmosis) en RED (Reversed Electrodialysis). We gaan uit van de veronderstelling dat PRO ongeveer dezelfde verliezen heeft als RED. Die verliezen zijn gevat in het rendement van de stack 40%. Daarnaast dient een volgende reductie te worden toegepast, wegens verschillen tussen werkelijke afvoer en gemiddelde afvoer. Het is namelijk zeer waarschijnlijk dat een RED- of PRO-installatie niet alle afvoerschommelingen kan volgen die in werkelijkheid optreden. Als de werkelijke afvoer op een locatie beneden de gemiddelde afvoer ligt, is het evident dat de productie lager is dan op basis van gemiddelde afvoer het geval zou zijn. Als de werkelijke afvoer hoger ligt dan de gemiddelde afvoer, dan hangt het van de installatie af of deze hierin met de productie kan meegaan. Gesteld wordt dat dit niet te allen tijde het geval is en dat beide situaties leiden tot een extra reductie in de productie. Het geschatte aantal bedrijfsuren van een RED- of PRO-installatie bedraagt 6500 uur op jaarbasis. Samen met de 40% levert dat 65 PJ (20 TWh) aan technisch winbare voorraad per jaar. Omgerekend naar instantaan vermogen is dat 2000 MW.

Maatschappelijk winbare voorraad

De winbare voorraad wordt beperkt door de mate van beschikbaarheid van zoetwater. De afvoer bij de in hoofdstuk 1 genoemde locaties staat niet geheel ter beschikking van de energiewinning. Vanwege de noodzaak om de vereiste vaardiepte te handhaven, legt de scheepvaart momenteel al indirect beslag op een gedeelte van de afvoer. Hiernaast is een groot doorspoeldebiet vereist om de verzilting in de Nieuwe Waterweg tegen te gaan. Ook waterinnamen door waterschappen, landbouwbedrijven en drinkwaterproducenten maken gebruik van een deel van de afvoer. Wat is er wel beschikbaar? Die vraag is lastig te beantwoorden. Op basis van 'engineering judgement' wordt een derde van het afstromende

water beschikbaar geacht voor energieopwekking. Hiermee wordt het beschikbare debiet gesteld op 900 à 1000 m³/s. De maatschappelijk winbare voorraad is dan 22 PJ/jaar. Dat is jaarlijks 6 TWh bij een instantaan vermogen van ongeveer 700 MW.

2.2 Energie uit golven



De potentiële energievoorraad

De golven op de Noordzee ontstaan door wrijving met de wind. Hoe langer het traject waarover de wind waait, hoe meer energie er in de golven overgedragen wordt. Afhankelijk van de golfhoogte en periode bevatten golven meer of minder exploitabele energie.

Gemiddeld over het jaar bedraagt de significante golfhoogte ($H_{1/3}$) in het Nederlandse deel van de Noordzee één tot anderhalve meter, met een bijbehorende gemiddelde golfperiode ($T_{H1/3}$) van 5,8 s. Onder de significante golfhoogte wordt de gemiddelde hoogte verstaan van het hoogste éénderde deel van alle golfhoogtes in een golfveld. De gemiddelde golfperiode $T_{H1/3}$ geeft het gemiddelde van de golfperiodes van het hoogste derde deel van de golven aan. In het Nederlandse deel van de Noordzee ligt een aantal stations waar data over golven gemeten wordt (zie www.golfklimaat.nl). Op basis van deze data is de gemiddelde 'golfenergie' (eigenlijk is het geen energie, maar golfvermogen) per strekkende meter berekend. De jaargemiddelde 'golfenergie' neemt voor de Nederlandse kust toe van 5,5 kW/m op ongeveer 7,5 km van de kust, tot 10 kW/m, op circa 30 km van de kust. De potentiële voorraad energie is te bepalen door de energieflex naar de Nederlandse kust te integreren over de hele kustlijn, en over alle voorkomende golfhoogtes, golfperiodes en golfrichtingen. Hiervoor zijn golfstatistieken gebruikt van het K13 platform (zie www.golfklimaat.nl). Geïntegreerd geeft dit een jaarlijkse energievoorraad van ongeveer 54 PJ (15 TWh). Dit betekent een instantaan vermogen van 1700 MW.

Technisch winbare voorraad

De technisch winbare hoeveelheid energie is afhankelijk van de installatiedichtheid. In verband met de benodigde onderlinge afstand van de installaties, is langs de kustlijn een opbrengstreductie toegepast van 75%. Het rendement per installatie bedraagt naar eerste schatting 80%. Dat levert een technisch winbare hoeveelheid op van 10 PJ per jaar (3 TWh).

Maatschappelijk winbare voorraad

Ruimteclaims vanuit andere functies (zoals scheepvaart, visserij, defensie, natuur en olie- en gaswinning) van de Noordzee manifesteren zich in de vorm van beperkingen in de maatschappelijk winbare voorraad. De totale reductie die wordt gehanteerd is 50%. Hiermee komt de maatschappelijk winbare voorraad energie langs een lijn op 30 km uit de kust neer op 5,5 PJ/jaar (1,5 TWh, bij 170 MW).



2.3 Energie uit aquatische biomassa



De potentiële energievoorraad

Het totale potentieel van energie uit aquatische biomassa wordt bepaald door een aantal factoren: temperatuur, de hoeveelheid licht, de beschikbaarheid van nutriënten en het eventueel voorkomen van ziekten. Bij kweek in afgesloten bassins zijn deze zaken sterk beïnvloedbaar en is de energie-efficiency hoog. In deze studie wordt expliciet gekeken naar het potentieel van aquatische biomassa in 'natuurlijke' wateren. Toepassing van de genoemde maatregelen worden daarom slechts gedeeltelijk meegenomen in de berekening van het energetisch potentieel.

Wat wel meegenomen wordt is het type biomassa waarop wordt ingezet. Uitgegaan wordt van algen met een koolstoffactor van 100 gC/m² voor de Noordzee en 200 gC/m² voor de meren. Er wordt uitgegaan van een energetische inhoud 30 kJ/gC (dus 30 kilojoule per gram koolstof). In beginsel zijn alle open wateren geschikt om aquatische biomassa te laten gedijen. De voornaamste open wateren van Nederland zijn:

- Noordzee: 57.000 km²
- Markermeer: 700 km²
- IJsselmeer: 1.100 km²
- Volkerak-Zoommeer: 80 km².

Verder is van belang dat het energetisch potentieel hoger ligt dan wat uitsluitend op basis van koolstofgehalten berekend wordt. De aanname wordt gedaan dat de totale energetische inhoud een factor tien hoger ligt. De totale potentiële energievoorraad bedraagt dan 1800 PJ per jaar (500 TWh).

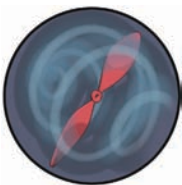
Technisch winbare voorraad

Aangenomen wordt dat de primaire productie van algen in de Noordzee 100 gC/m² blijft en niet of nauwelijks te optimaliseren is. Voor meren wordt de productie, omwille van mogelijkheden tot optimalisatie, onder andere door inzet van nutriënten, verhoogd tot 300 gC/m². Daarmee is de technisch winbare voorraad 190 PJ (53 TWh; 6000 MW).

Maatschappelijk winbare voorraad

De berekening van de maatschappelijk winbare voorraad gaat uit van maatschappelijke acceptatie bij exploitatie van 100 km² in de Noordzee, 200 km² in het Markermeer, 400 km² in het IJsselmeer en 80 km² in het Volkerak-Zoommeer. In dit scenario is met energiewinning uit aquatische biomassa jaarlijks 7 PJ energie voorradig (2 TWh; 220 MW).

2.4 Energie uit getijden



De potentiële energievoorraad

De rotatie van de aarde en maan zorgen ervoor dat getijden onze zeeën en oceanen domineren. De gravitatiekracht wordt omgezet in kinetische energie bij het tot stand komen (en aanhouden) van de waterstroming die zij veroorzaakt (de getijdenstroming).

De bepaling van de potentiële energievoorraad van getijdenstroming berust op de bepaling van potentiële energie die tweemaal daags richting Nederland komt. Het doorstroomde oppervlak wordt gedefinieerd door een verticaal vlak, parallel aan de kustlijn van Nederland, dat bij benadering 250 kilometer lang is met een gemiddelde diepte van 22 meter. In dat geval stroomt er, bij een gemiddelde snelheid van naar schatting 1 m/s, tweemaal per etmaal, bij vloed, circa 160 Tm^3 water door het oppervlak naar Nederland. Dit vertegenwoordigt een potentiële energievoorraad van 85 PJ (24 TWh). De potentiële energievoorraad die samenhangt met de getijdenverschillen in estuaria en inhammen maakt hier deel van uit.

Technisch winbare voorraad

Getijdenverschillen

Het wateroppervlak langs de kust dat onder invloed van het getij, of mogelijk anderszins onder invloed van het getij te stellen is, bedraagt 1900 km^2 (Haringvliet, Grevelingenmeer, Oosterschelde, Westerschelde, IJsselmeer en Lauwersmeer). De jaargemiddelde energieproductie is afhankelijk van de doorstroomopeningen, verliezen door wrijving en afname van het getijverschil in het bekken, het rendement van de turbines en natuurlijk de omvang van het bekken. Aangenomen wordt een gemiddeld getijverschil van 2 meter en een effectief hoogteverschil aan de 'binnenzijde' van de kering van 20%, dus 0,4 meter. De omzetting van een hydraulisch verval kan een hoog rendement leveren (tot circa 80%). Er zijn aanvullende methoden mogelijk om de continuïteit van energieopwekking te verbeteren. Dit kan door een extra bekken of door gebruik te maken van pompen die het getijverschil kunstmatig vergroten. De technisch winbare voorraad energie wordt geschat op 11 PJ/jaar.

Getijdenstroming

Het doorstroomde oppervlak wordt door het water gepasseerd met een snelheid van circa 1 m/s. Het rendement van een waterstromingsturbine bij een lage snelheid is 10%. Een correctiefactor moet bovendien worden toegepast in verband met omkerende stroming c.q. stroomfluctuatie. Deze wordt geschat op 70%. Dit levert een technisch winbare hoeveelheid energie op van 5 PJ/jaar.

Maatschappelijk winbare voorraad

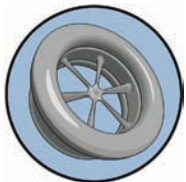
Getijdenverschillen

De wateren langs de kust zijn niet allemaal geschikt voor energieopwekking uit getijverschil. Het IJsselmeer is nagenoeg uitgesloten en in verband achterliggende havens is het niet waarschijnlijk dat de Westerschelde afgesloten zal worden. Mogelijke locaties zijn te vinden in Haringvliet, het Grevelingenmeer, de Oosterschelde en het Lauwersmeer. De beperking door vaarroutes en andere ruimtebeslagen en belangen wordt, samen met de beperkingen in verband met aanwezige infrastructuur, gesteld op 66%. Hiermee rekening houdend bedraagt de maatschappelijk winbare hoeveelheid energie 4 PJ.

Getijdenstroming

De beste mogelijkheden om energie uit getijdenstroming te winnen bevinden zich op die plekken waar waterstroming zich concentreert. Daar is namelijk de impuls (massa x snelheid) het grootst. Getijdengeulen en openingen in keringen zijn voorbeelden van dit soort locaties. Voorwaarde is wel dat de stroomsnelheid groter is dan 1 m/s en dat het water ter plekke dieper is dan tien meter. Uiteraard mag de installatie niet in de vaargeul liggen. In de Oosterschelde, Veersemeer, Grevelingenmeer, Haringvliet, Westerschelde, en de Waddenzee zijn goede mogelijkheden om energie uit getijdenstroom op te wekken. Maatschappelijk haalbaar lijkt 3 PJ.

2.5 Energie uit stroming in rivieren



De potentiële energievoorraad

Het potentiële vermogen van waterstroming in rivieren is gelijk aan de potentiële energie die het water bij binnenkomst in Nederland heeft (de kinetische energie aldaar wordt verwaarloosd). De instroom vanuit het Nederlandse achterland is hierin niet meegenomen.

De instromende volumes van de Nederlandse rivieren zijn gemiddeld:

- Rijn: $7.040 \cdot 10^6$ m³ per jaar
- Maas: $7.400 \cdot 10^6$ m³ per jaar
- Overige rivieren en beken: $3.300 \cdot 10^6$ m³ per jaar
- Neerslagoverschot: 270 m³/s

De hoogten van de instromende volumes bedragen naar schatting:

- Rijn: NAP +10 m
- Maas: NAP +45 m
- Overige rivieren en beken: NAP +25m
- Neerslagoverschot: NAP +5 m

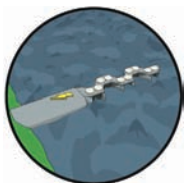
De totale potentiële energievoorraad van energie uit stroming in rivieren is hiermee berekend: 11 PJ per jaar (3 TWh).

Technisch winbare voorraad

De technische winbare hoeveelheid energie is afhankelijk van het rendement van een aantal kunstwerken op bepaalde plaatsen in de rivier. Het rendement van een turbine in een stuw of dam kan oplopen tot 85%. Het rendement van een onderwatermolen is bij benadering 35%, en een turbine die in een krib geplaatst is levert 55% rendement op. De reductiefactor in verband met stroomfluctuatie bedraagt 30%. De technisch winbare hoeveelheid energie is dan 2 PJ per jaar (400 GWh).

Maatschappelijk winbare voorraad

Omdat rivieren ook nog voor andere doeleinden gebruikt worden zoals scheepvaart, infrastructuur en andere belangen, zorgen dit soort factoren voor een reductie van 30%. Daarmee rekening houdend, bedraagt het maatschappelijk potentieel aan winbare energie 1 PJ per jaar (300 GWh).



2.6 Energie uit warmte- en koudeopslag



De potentiële energievoorraad

In principe is bijna heel Nederland geschikt voor (thermische) energie uit warmte en koudeopslag (WKO). Het belangrijkste criterium voor de geschiktheid van een locatie is de mogelijkheid om voldoende debiet te kunnen halen. Dit is afhankelijk van de dikte van de watervoerende pakketten, maar ook van de 'doorlatendheid' van deze laag. Fijn zand heeft meer weerstand dan grof zand. Het is moeilijk om de maximale potentiële energievoorraad vast te stellen omdat een aantal factoren onbekend is. In principe kan er in ieder geval vanuit worden gegaan dat maximale potentiële energievoorraad velen malen groter is dan wat technisch realiseerbaar is. Ter indicatie wordt het potentieel gelijkgesteld aan de huidige warmtevraag.

Technisch winbare voorraad

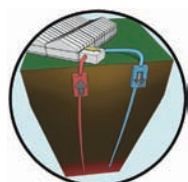
Voor de technisch winbare hoeveelheid energie uit WKO wordt ervan uitgegaan dat in iedere vierkante kilometer in Nederland (33.883 km²) één installatie geplaatst kan worden. Het gemiddelde vermogen per installatie is 3 MW, bij een gemiddelde gebruiksduur van 2000 uur per jaar. Het verlies aan thermische energie (weglekken) is kleiner dan 10%. Inclusief het benodigd vermogen voor pompen is het rendement in totaal 82%. Uitgaande van bovenstaande is er 960 PJ/jaar technisch winbaar, waarbij in acht genomen is dat het rendement bij open systemen lager is, in verband met eventueel noodzakelijke waterkwaliteitsbewaking.

Maatschappelijk winbare voorraad

Een aantal factoren zorgt voor reductie van de technisch winbare hoeveelheid energie. In het bijzonder worden genoemd bodembescherming, bescherming van het grondwater, het ontbreken van wettelijk beleid en/of een wettelijk kader. Daarnaast is het opwekken van energie uit WKO vooral toepasbaar bij nieuwbouw. Bij bestaande bouw leidt het tot grote kosten voor het aanleggen extra infrastructuur. Inclusief onvoorziene extra belemmeringen is de totale reductie 70% ten opzichte van wat technisch mogelijk is. Op basis daarvan wordt de maatschappelijk winbare voorraad gesteld op 290 PJ/jaar (80 TWh).



2.7 Energie uit aardwarmte



De potentiële energievoorraad

Het potentieel om energie te winnen uit aardwarmte is eindig. Dat heeft te maken met het feit dat de 'bron' voornamelijk bestaat uit reeds opgeslagen energie die in de loop van de tijd uit de aardkern naar de mantel is gestroomd en daar ligt opgeslagen. Er wordt uitgegaan van een voorraad van 90.000 PJ. Schattingen van de natuurlijke aanwas (recovery) van aardwarmte is circa 100 PJ per jaar. De benuttingduur van een bron is gesteld op 30 jaar, hetgeen inhoudt dat de duurzame voorraad 3000 PJ per jaar is.

Technisch winbare voorraad

De technisch winbare hoeveelheid energie ligt vrijwel gelijk aan het totale energetische potentieel. Aardwarmte is namelijk vrijwel geheel technisch winbaar. Dat komt doordat het rendementsverlies voor de pompenergie marginaal is. Dat betekent dat de technisch winbare hoeveelheid ook 3000 PJ per jaar is.

Maatschappelijk winbare voorraad

Het winnen van energie uit aardwarmte is technisch zeer goed uitvoerbaar en levert zelfs weinig hinder op. Toch zitten wel wat – kleine – haken en ogen aan. Er dient rekening gehouden te worden met de maatschappelijke acceptatie van graduele thermische uitputting van de bodem. Daarnaast dreigt er interferentie in de nabijheid van locaties waar olie en gas gewonnen wordt. Desondanks is de capaciteit van het Nederlands deel van de aarde als warmtebron stukken groter dan het Nederlands warmteverbruik. De maatschappelijk winbare voorraad wordt bepaald door de warmtevraag: 960 PJ per jaar (270 TWh).

2.8 Energie uit temperatuurverschil met het oppervlaktewater



De potentiële energievoorraad

Deze vorm van thermische energie kan gewonnen worden als op een moment de temperatuur van het water ongelijk is aan die van de omgeving. Vaak is dat zo vanwege de slechte geleidbaarheid van warmte door stilstaand water. Het temperatuurverschil, in combinatie met de hoeveelheid water dat gebruikt kan worden, bepaalt de potentiële voorraad.

Voor de bepaling van de winbare hoeveelheid thermische energie uit oppervlaktewater wordt uitgegaan van de totale oppervlakte aan water in meren en de zee in Nederland. Dat bedraagt voor meren en plassen 500 km² en voor de Noordzee 57.000 km². Het Markermeer, IJsselmeer en het Volkerak-Zoommeer meten tezamen circa 2000 km². Het gemiddelde temperatuurverschil tussen oppervlakte en waterbodem van het oppervlaktewater is 5°C. De soortelijke warmte van water is $4,18 \cdot 10^3$ J/kg per graad Celcius. Dat betekent een potentieel winbare voorraad, bij exploitatie van de bovenste meter, van alle Nederlandse wateren ter grootte van 1200 PJ/jaar.

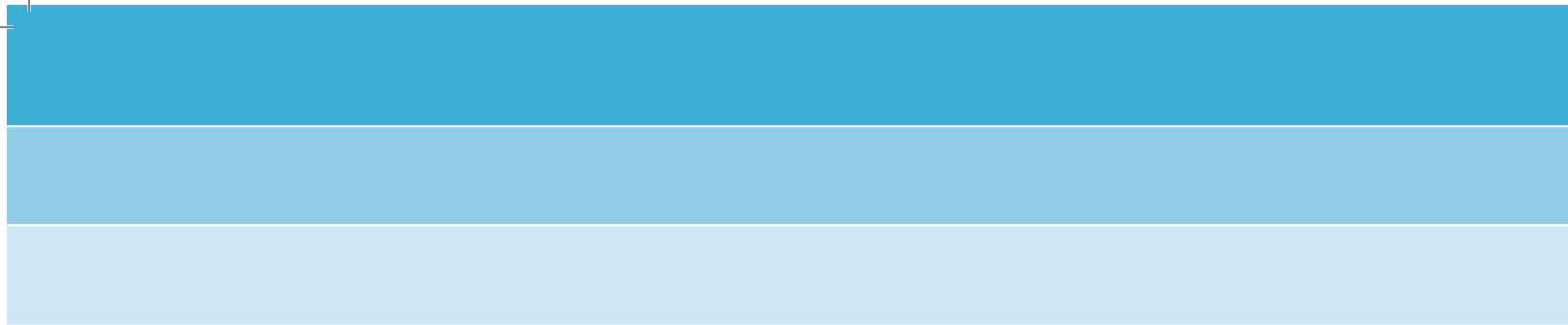
Technisch winbare voorraad

Het winnen van thermische energie moet dicht bij de gebruiker plaatsvinden, omdat er anders verliezen optreden als gevolg van transport en uitstraling. Ervan uitgaand dat 100 km² in de Noordzee, 200 km² in het Markermeer, 400 km² in het IJsselmeer, en 80 km² in het Volkerak-Zoommeer ingezet kan worden voor energiewinning, dan is daarmee in totaal 800 km² beschikbaar. Dat levert bij een gemiddelde exploitatiediepte van 3 meter een technisch winbare hoeveelheid energie op van 20 PJ per jaar.

Maatschappelijk winbare voorraad

De efficiëntiereductie in verband met het voorkomen van de gevolgen van thermische belasting door het toepassen van deze techniek is 50%. De maatschappelijke winbare voorraad bedraagt dan 10 PJ per jaar (3 TWh).





3 Conclusies en Aanbevelingen

De voorzichtige conclusies die getrokken kunnen worden uit de informatie van de vorige hoofdstukken, worden in dit hoofdstuk gegeven. Waar mogelijk worden aanbevelingen gedaan teneinde deze bron van energie optimaal te kunnen benutten.



3.1 Algemene conclusies en aanbevelingen

Het overzicht van de mogelijkheden en potenties van de beschouwde technieken, is gebundeld in de volgende tabel:

| PJ/jaar | zoet-zout gradiënt | stroming in rivieren | getijden-stroming /-verval | golf-beweging | aquatische biomassa | warmte-koude opslag | aard warmte | temperatuur verschil | totale energie opwekking |
|--------------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|---------------|---------------------|---------------------|-------------|----------------------|--------------------------|
| Totaal Energiepotentieel | 220 | 15 | 85 | 54 | 1800 | 1200 | 3000 | 1200 | 7570 |
| Technisch Winbaar | 65 | 2 | 15 | 10 | 190 | 960 | 3000 | 20 | 4262 |
| Maatschappelijk Winbaar | 22 | 1 | 7 | 5 | 7 | 290 | 960 | 10 | 1302 |

Het algemene beeld dat ontstaan is, duidt aan dat de totale potentie van energie in water tweemaal groter is dan de jaarlijkse energievraag van geheel Nederland (ca. 3550 PJ/jaar). De eerste schatting van de maatschappelijk winbare voorraden geven aan dat deze meer dan 30% van het jaarlijks energieverbruik in Nederland bedragen. Dit lijkt voldoende argument om nader onderzoek te doen naar deze energiebron en, specifiek, naar de verschillende technologische mogelijkheden en de kwantitatieve reserves (energievoorraden) van deze energiebronnen. De thermische varianten zijn het meest uitgebreid onderzocht. De resultaten zijn veelbelovend en verdienen een samenhangend actieplan. Wat betreft de andere alternatieve energiebronnen zijn er nog diverse onzekerheden, kansen en risico's die alleen door onderzoek en experimenten verkleind kunnen worden. Het verdient in dit vroege stadium van ontwikkeling van water als energiebron de voorkeur nadere studies uit te voeren over de volle breedte van de mogelijkheden bóven uitsluitend afzonderlijke steun aan bepaalde, potentievol geachte technologieën. Het argument voor deze stelling is dat integrale ontwikkeling versnippering voorkomt (een van de oorzaken waardoor niet alle mogelijkheden tot volle ontwikkeling dreigen te komen), synergie in deze 'sector' gestimuleerd wordt, er voldoende kritische massa is voor continuïteit, en dat er optimaal gebruik gemaakt kan worden van de grote innovatieve kracht die momenteel in de watersector zit. Met het faciliteren en stimuleren van proeven in het watersysteem - naast financiering van fundamenteel en toegepast onderzoek - kan veel ervaringskennis opgedaan worden die als waardevolle aanvulling op de theoretische c.q. wetenschappelijke kennis aangewend kan worden.

De huidige inzichten in de technische beperkingen, die vaak van praktische aard zijn, leiden ertoe dat de hoeveelheid winbare energie ongeveer gehalveerd wordt. Deze beperkende factor is ingeschat op basis van de huidige stand van de techniek en de huidige inzichten in energetische verliezen. Hiermee is de omvang van deze energievoorraad tijdsafhankelijk. Met het voortschrijden van de ontwikkelingen, creatieve inzichten en hopelijk ook met het opdoen van praktijkkennis, is het aannemelijk dat de technisch winbare voorraad in omvang toeneemt. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de eventuele fout in de schatting van de voorraad kleiner is dan de toename van de technisch winbare voorraad door (technologische) ontwikkelingen. In het bijzonder het toepassen van, en combineren met, technieken en technologieën uit andere sectoren is een vorm van innovatie met bewezen potentieel.

Maatschappelijke beperkingen, voornamelijk afkomstig van ruimteclaims door andere functies, leiden tot een verdere reductie van de winbare hoeveelheid. Ongeveer eenderde van de technisch winbare voorraad lijkt maatschappelijk gezien verantwoord en haalbaar. Hier moet wel vermeld worden dat de huidige institutionele en juridische kaders nog niet goed ingesteld zijn op energiewinning uit water. Ervaringen met WKO-installaties geven aanleiding tot deze stelling. Indien deze kaders niet aangepast worden aan deze - voor Nederland - vrij nieuwe bron van energie, zal de haalbare/winbare voorraad afnemen en zullen de kansen op optimale exploitatie kleiner worden. Naast de voor de handliggende maatschappelijke voordelen van duurzame energieopwekking, is een bijkomend voordeel dat de robuustheid van de diverse kunstwerken in en nabij het water toeneemt. Bruggen, sluisen en afsluitbare waterkeringen kunnen met hulp van energie uit water autonoom

functioneren, zonder dat deze afhankelijk zijn van eventuele storingen in het energienet. Ook kan energieopwekking uit een beperkte 'bron' van grote lokale invloed zijn. Het voorzien in energie van een kleine woonwijk zorgt niet voor een significant positiever beeld op de energiebalans, maar het past wel goed in het overheidsbeleid met het oog op decentrale opwekking van energie.

Meer dan bij de bepaling van de totale potentiële voorraad zijn aannamen gedaan bij het bepalen van de technisch en maatschappelijk winbare voorraden. Deze extra aannamen brengen extra onzekerheid met zich mee. Daarom is ervoor gekozen de tabel volledig op te stellen met in iedere cel maximaal twee significante getallen. Dit houdt in dat de nullen die op de derde of vierde positie in een cel staan, met uitzondering van de getallen in de rechterkolom, niet significant zijn.



3.2

Bron- en techniek specifieke conclusies en aanbevelingen

De vergelijking van de totale potentie van water als energiebron kan een slag verfijnd worden. In deze paragraaf wordt deze slag gemaakt. Onderstaande tabel legt, tussen de bron/techniek met de soort energie die zij oplevert, de relatie met het Nederlands verbruik van de betreffende soort energie. Water levert hoofdzakelijk twee soorten energie op: elektrische energie en thermische energie. Aquatische biomassa vormt in deze een buiten-categorie omdat het zowel voor opwekking van elektrische, thermische alsook mechanische energie (in de vorm van biodiesel) gebruikt kan worden. Gegeven de eerste ordebenadering die in dit rapport gehanteerd is, wordt de energetische opbrengst van aquatische biomassa geclassificeerd als elektrische energie.

Het jaarlijks verbruik van elektrische energie bedraagt 420 PJ/jaar en het thermisch verbruik bedraagt circa 960 PJ/jaar. Samen maakt dit niet de 3550 PJ/jaar, zoals eerder aangegeven, als zijnde het totale Nederlandse verbruik. Oorzaak is het ontbreken van met name vraag naar mechanische energie die door het verbranden van benzine, diesel, kerosine, ruwe olie en dergelijke vrijkomt. De volgende tabel geeft het overzicht van het relevante verbruik.

| Energievraag | PJ/jaar |
|-------------------------|---------|
| Totale Energievraag | 3550 |
| Energievraag elektrisch | 420 |
| Energievraag thermisch | 960 |

De relatie tussen de soort energie die opgewekt wordt en de technieken die daarvoor ter beschikking (zullen) staan, is gevat in onderstaande tabel. De tekst in de volgende paragrafen heeft hier betrekking op. De vermelde percentages zijn gebaseerd op de ratio tussen de potentiële, technische of maatschappelijke energievoorraad en de energievraag naar elektrische c.q. thermische energie.

| | zoet-zout gradiënt | stroming in rivieren | getijdenstroming /-verval | golf-beweging | aquatische biomassa | warmte-koude opslag | aard warmte | temperatuur verschil | totale energie opwekking |
|--------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------|---------------|---------------------|---------------------|-------------|----------------------|--------------------------|
| Totaal Energiepotentieel | 52% | 2,6% | 20% | 13% | 429% | 125% | 313% | 125% | 213% |
| Technisch Winbaar | 15% | 0,5% | 3,6% | 2,4% | 45% | 100% | 313% | 2,1% | 120% |
| Maatschappelijk Winbaar | 5,2% | 0,2% | 1,7% | 1,2% | 1,7% | 30% | 100% | 1,0% | 37% |

Zoet-zoutgradiënten

Wat opvalt in de tabel is het hoge potentieel dat deze technologie met zich meebrengt. In potentie kan 57% van de elektriciteitsvraag voorzien worden door benutting van de zoet-zoutovergangen. Deze zeer beloftevolle optie is nog in ontwikkeling, maar wordt zonder

twijfel financieel haalbaar geacht. Maatschappelijk gezien lijken er geen bezwaren te kleven aan exploitatie van de zoutgradiënt. Wel moet de gradiënt tussen zoet- en zout water zo groot mogelijk zijn voor een zo groot mogelijke opbrengst. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de harde scheidingen die in het watersysteem aanwezig zijn, zoals de afsluitdijk. Op plekken waar die er niet zijn, zoals in estuaria, moeten deze gerealiseerd worden. Ook kan de aanvoer van zoet- en zout water middels transportleidingen of kanalen verwezenlijkt worden, maar beide opties hebben grote invloed op de haalbaarheid. Economisch gezien zijn de membraankosten en –performance cruciaal. Naast de PRO- en RED-methode zijn concurrerende opties amper aanwezig.

Energie uit stroming in rivieren

Verval en debiet bepalen het totale potentieel van het water dat Nederland binnenkomt. Diverse technieken en technologieën zijn ontwikkeld en in ontwikkeling, zoals turbines in stuwen, sluizen, kribben, maar ook technologieën als waterlenzen en onderwatermolens. In verband met de benodigde doorstroming c.q. afvoer van het debiet is slechts een beperkt deel van de potentiële energie te benutten. Maatschappelijk is deze vorm van energiewinning geaccepteerd, getuige de reeds operationele waterkrachtcentrales in Nederrijn, Lek en Maas. Er is veel ervaring met wat wel mogelijk is en wat niet. Bij turbines in kribben geldt het voordeel van de extra regelbaarheid van de afvoer in combinatie met energieopwekking. De techniek bestaat ook voor een belangrijk deel al. De economische haalbaarheid hangt vaak af van de mogelijkheid aan te sluiten bij renovatieprojecten van kunstwerken en kribverlagingsprojecten waar de financiering al van geregeld is.

Energie uit getijden

De totale getijdenstroom is substantieel, maar de energie is zeer diffuus aanwezig. Technisch is deze energie te benutten met bi-directionele onderwatermolens, of rotors. Het rendement van de omzetting is laag vanwege de lage stroomsnelheid en de benodigde afstand tussen de molens in verband met interferentie. Het technisch potentieel is daardoor beperkt, ondanks het grote aantal te plaatsen units. De onderwatermolens zijn maatschappelijk acceptabel zolang de omgeving en de natuur niet verstoord worden tijdens de constructie- en exploitatiefase. Bij het wateroppervlak zijn de stroomsnelheden het grootst maar richting de bodem neemt de snelheid echter snel af. Deze optie lijkt vooralsnog uitsluitend interessant op plekken met hoge stroomsnelheid.

Energie uit golven op zee

Het beschikbare vermogen is afhankelijk van de golfhoogte en –frequentie. Het Nederlands Continentaal Plat biedt in potentie een grote exploitatie oppervlakte, maar de golfhoogte is beperkt. Vooral daardoor is de potentieel winbare energie beperkt. Er zijn vele technieken om de golfbeweging om te zetten in elektriciteit, maar het verwachte rendement moet nog in een proef bewezen worden. Bijkomend punt is de benodigde onderlinge afstand in verband met interferentie. De economische haalbaarheid kan zeer positief beïnvloed worden door het maken van combinaties met andere functies, zoals het opwekken van windenergie. Ook combinaties met onder andere technologieën als waterlenzen (golflenzen) bieden betere kansen. Nederland lijkt een geschikte proeftuin wegens het milde golfklimaat. Vooral de onderwatersystemen kunnen maatschappelijk acceptabel zijn bij voldoende diepte.

Energie uit aquatische biomassa

Op zich heeft aquatische biomassa een gigantisch potentieel. Warmte en voedingsstoffen zijn al aanwezig in het water. Technisch gezien zijn diverse systemen mogelijk. Het technisch potentieel wordt beperkt door de beperkte beheersbaarheid van het kweekproces, voornamelijk bij open systemen en bij het oogsten van de biomassa. Maatschappelijke belemmeringen zijn te verwachten vanuit het ruimtebeslag en de ruimtebeslagen van andere functies van het water. Ook staat de productie van algen in open water haaks op de wens schoon en veilig recreatiewater ter beschikking te hebben. Afgesloten bassins of bekkens bieden betere mogelijkheden, en ook is in bepaalde opties synergie met waterzuivering te realiseren.

Energie uit warmte- en koudeopslag

Een groot deel van de ondergrond van Nederland is geschikt voor WKO. Aandachtspunt is dat thermisch gezien de energie in balans moet zijn. Dit bepaalt de bovengrens van deze energiebron. Het energieverlies, dat zich manifesteert in de vorm van warmtelekkage en benodigd pompvermogen, is gering bij gebruikmaking van geschikte aquifers. De techniek is inmiddels redelijk bekend en bewezen met de performance in diverse systemen. Maatschappelijk is deze optie acceptabel, mits de bodem niet thermisch uitgeput wordt. Niet overal mag en kan geboord worden in verband met interferentie met andere WKO-systemen en met de olie- en gaswinning. Het juridisch instrument moet nog verbeterd worden om uitspraken te kunnen doen in WKO-gerelateerde kwesties. Economisch is WKO bij grotere nieuwbouwprojecten snel rendabel.

Energie uit aardwarmte

Het potentieel is enorm en blijft enorm bij een hersteltijd van dertig jaar. De onttrekking van aardwarmte kan namelijk sneller dan het natuurlijk herstel. Desondanks is de hoeveelheid thermische energie voldoende om te voldoen in de warmtevraag in Nederland. De benodigde techniek is relatief eenvoudig, maar de risico's bij boringen zijn groot. Het is van te voren lastig in te schatten of de aangeboorde laag voldoende warm is en of de doorlatendheid voldoende is om het benodigde debiet te laten circuleren. De techniek is maatschappelijk acceptabel mits er geen vervuiling plaatsvindt en de aardwarmte gematigd onttrokken wordt. De eerste installaties en pilots zijn operationeel en economisch ziet het er beloftevol uit.

Energie uit temperatuurverschil met het oppervlaktewater

De potentie wordt bepaald door het verschil in temperatuur tussen het aanwezige water en de omgeving. Door de grotere soortelijke warmte van water dan van land, liggen de temperaturen van beide uit fase. Dit verschil kan omgezet worden in thermische energie. Het enorme potentieel wordt veroorzaakt door de grote hoeveelheid water in de Noordzee. Te grote afstanden belemmeren c.q. voorkomen exploitatie, en ook rendementsverliezen in warmtewisselaars verkleinen de winbare hoeveelheid. De toe te passen techniek is niet ingewikkeld, maar het voorkomen van thermische vervuiling van het oppervlaktewater leidt tot forse belemmeringen. De techniek is maatschappelijk acceptabel indien dit niet gebeurt. Enige ervaring is reeds opgedaan met verschillende systemen.

3.3

Beoordeling potentie van de bronnen en technieken

De visuele weergave van de voorgaande paragrafen is vastgelegd in het volgende schema. Hierin is de potentie/kansrijkheid weergegeven op een schaal van rood bij grote potentie/kansrijkheid via groen tot blauw bij minder grote potentie/kansrijkheid. De tweede tabel geeft een exactere verklaring van de kleuren.

| PJ/jaar | zoet-zout gradiënt | stroming in rivieren | getijdenstroming /-verval | golfbeweging | aquatische biomassa | warmte-koude opslag | aard warmte | temperatuur verschil | totale energie opwekking |
|-------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------|--------------|---------------------|---------------------|-------------|----------------------|--------------------------|
| Totaal potentieel | rood | blauw | groen | groen | rood | rood | rood | rood | rood |
| Technisch winbaar | groen | rood | groen | rood | groen | rood | rood | groen | rood |
| Maatschappelijk winbaar | rood | rood | groen | rood | groen | rood | rood | groen | rood |

| Betekenis kleurscore | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Totaal potentieel | Technisch winbaar | Maatschappelijk winbaar |
| 20% (of meer) van het elektriciteitsverbruik of 100% (of meer) van de warmtevraag. | Relatief simpele technologie en al getest of bewezen, met redelijk rendement. | Amper nadelen of conflicten, wellicht zelfs voordelen. |
| 5% - 20% (of meer) van het elektriciteitsverbruik of 50% - 100% (of meer) van de warmtevraag. | In principe simpele technologie, maar nog niet bewezen of met een beperkt rendement. | Voor- en nadelen, conflict met overige gebruiken of balans nog niet helder. |
| 5% (of minder) van het elektriciteitsverbruik of 50% (of minder) van de warmtevraag. | Techniek nog in conceptfase of slecht rendement. | Geheel of overwegend onacceptabel of sterk conflicterend. |

Het mag in ieder geval duidelijk zijn dat aan de energievraag van Rijkswaterstaat, groot circa 1 PJ, ruimschoots voldaan kan worden met de Rijkswateren als duurzame energiebron.



