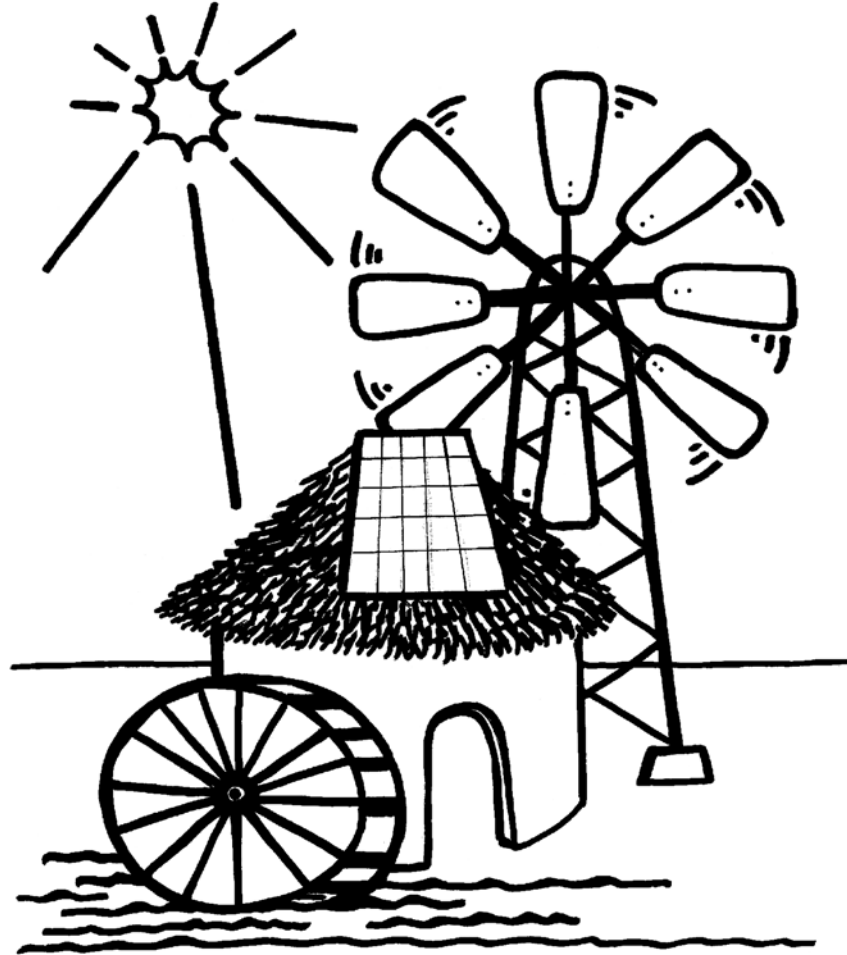


cursus Duurzame Energie in ontwikkelingslanden



Bundel behorende bij de cursus.

Mei 2003

Uitgegeven door: studievereniging MONSOON en de Werkgroep OntwikkelingsTechnieken, Universiteit Twente

Werkgroep OntwikkelingsTechnieken (WOT)

Universiteit Twente

postbus 217

7500 AE ENSCHEDE

Studievereniging MONSOON

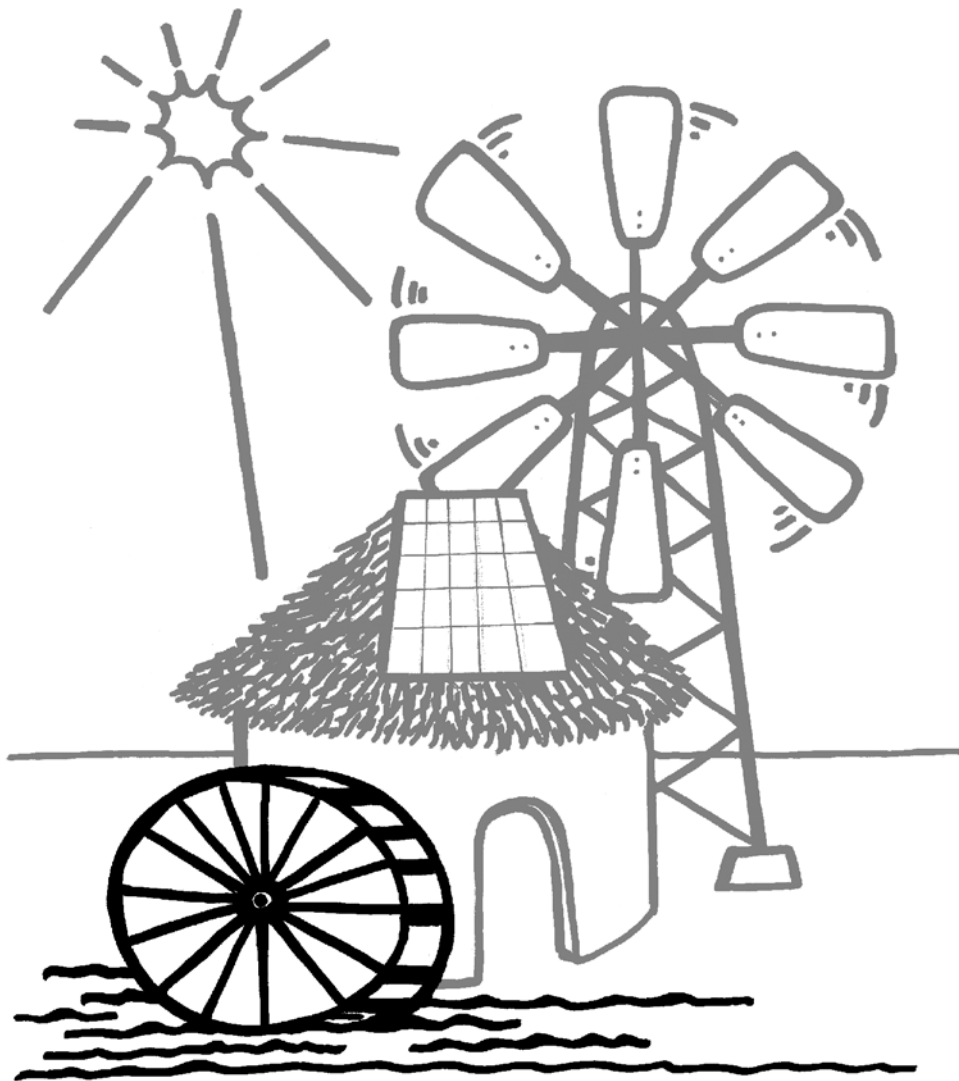
Universiteit Twente

postbus 217

7500 AE ENSCHEDE

Hoofdstuk 2

Waterkracht



cursus Duurzame Energie in ontwikkelingslanden
samengesteld door Ferdinand Kroon

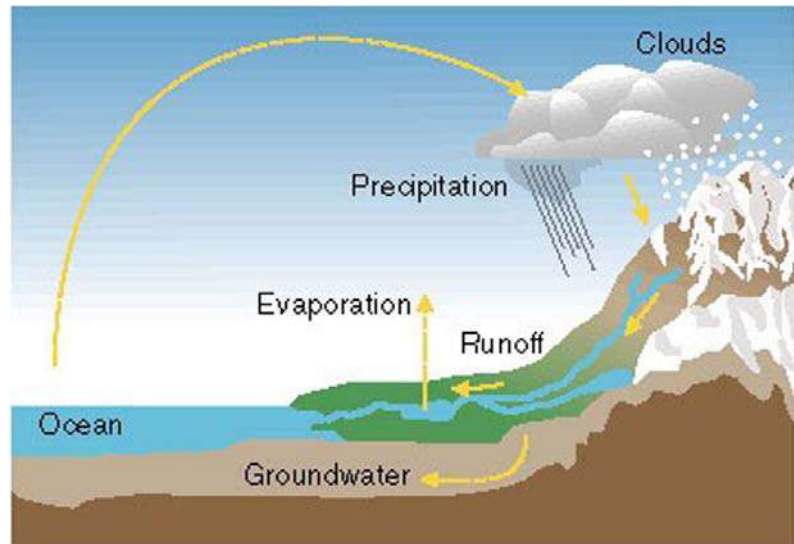
2. WATERKRACHT	3
2.1 INLEIDING	3
2.1.1 <i>Geschiedenis</i>	3
2.1.2 <i>Voor- en nadelen</i>	3
2.1.3 <i>Potentieel</i>	4
Van water naar Watt	4
2.1.4 <i>Grootschalige waterkracht</i>	5
Werking	5
Pumped storage plants	6
Variaties in watertoevoer	6
Haalbaarheid	6
2.1.5 <i>Kleinschalige waterkracht</i>	6
Werking	7
Variaties in watertoevoer	7
2.1.6 <i>De context</i>	8
De context voor grootschalige waterkracht projecten	8
De context voor kleinschalige waterkracht projecten	8
2.2 METEN VAN VERVAL EN DEBIET	9
2.2.1 <i>Het meten van het verval</i>	9
Waterpaskijker en theodoliet	9
Inclinometer	10
Waterslang en drukmeter	10
Waterpas en rechte lat	10
Waterslang en meetlat	10
Overige methodes	10
2.2.2 <i>Debietmeting</i>	11
Afdammen van de rivier	11
Meetdam	11
Zout-methode	11
Snelheids- en profielmeting	12
Stroomsnelheidsmeter	12
2.3 CIVIELE WERKEN	13
2.3.1 <i>Systeem layout</i>	13
2.3.2 <i>Dammen en keerdammen</i>	14
2.3.3 <i>Vispassages</i>	14
2.3.4 <i>Waterinlaat</i>	14
2.3.5 <i>Het kanaal</i>	15
De bezinkingstank	15
Overloop	15
Reservoir voor de drukpijp	15
2.3.6 <i>Drukpijp</i>	15
2.4 TYPES TURBINES	16
2.4.1 <i>Impuls turbines</i>	16
Waterraderen	16
Pelton turbine	17
Turgo turbine	17
De Ghatta en de Multi-Purpose Power Unit	17
Crossflow of Michell-Banki turbine	18
2.4.2 <i>Reactie turbines</i>	19
Francis turbine	19
Propeller en Kaplan turbines	20
2.4.3 <i>Keuze van turbine</i>	20

2.5 TOEPASSING.....	21
2.5.1 <i>Mechanische energie</i>	21
Directe aandrijving.....	21
V-snaren.....	21
Aandrijfriemen en katrollen.....	21
Ketting en tandwielen.....	21
Versnellingen.....	21
2.5.2 <i>Elektriciteitsopwekking</i>	22
Snelheidscontrole.....	22
2.6 IMPLEMENTATIE.....	23
2.6.1 <i>Fases bij de invoering</i>	23
Planning.....	23
Implementatie.....	23
Bedrijfsvoering.....	23
2.6.2 <i>Problemen bij de invoering</i>	24
2.7 WATERRAMMEN.....	25
2.7.1 <i>Geschiedenis</i>	25
2.7.2 <i>Werking</i>	26
2.7.3 <i>Gebruik</i>	27
2.7.4 <i>Types</i>	27
2.8 KOSTEN EN OPBRENGSTEN.....	28
2.8.1 <i>Economische aspecten</i>	28
Investerings.....	28
Inkomsten.....	29
Bedrijfs- en onderhoudskosten.....	29
2.8.2 <i>Waterrammen</i>	29
2.9 ONDERHOUD.....	30
2.9.1 <i>Civiele werken</i>	30
2.9.2 <i>Turbines</i>	30
2.10 LITERATUUR.....	31

2. Waterkracht

2.1 Inleiding

Waterkracht ontstaat uit de waterkringloop; De zon verdampt water uit oceanen, zeeën, meren en rivieren waardoor vochtige lucht ontstaat. Boven land stijgt deze vochtige lucht op en worden er wolken gevormd. Met name in heuvels en bergen komt dit als neerslag weer naar beneden. Door rivieren stroomt het water onder invloed van het hoogteverschil weer terug naar zee. De kracht van dit stromend en vallend water kan op verschillende manieren omgezet worden in bruikbare energie. Met behulp van een waterturbine kan de kracht in een draaiende beweging worden omgezet. Door de as van de turbine te koppelen aan een generator wordt elektriciteit opgewekt. De draaiing van de as kan ook direct gebruikt worden in een molen. Met behulp van een waterram kan de kracht gebruikt worden om direct water te verpompen. Naast deze toepassingen zijn er andere mogelijkheden om van waterkracht gebruik te maken. Waaronder golfenergie en energie uit getijdestromingen, we gaan hier in dit hoofdstuk niet op in.



De waterkringloop

2.1.1 Geschiedenis

Het gebruik van stromend of vallend water als energiebron kent een lange geschiedenis. Waterkracht is in het verleden veelvuldig ingezet voor het mechanisch bewerken van allerlei grondstoffen, zoals het malen van graan en het zagen van hout. Traditioneel werd de energie van water omgezet met waterraderen. Deze waterraderen werden al gebruikt in de tweede of derde eeuw voor Christus. In het begin van de negentiende eeuw kreeg het gebruik van waterkracht een nieuwe impuls door de uitvinding van de waterturbine om elektriciteit mee op te wekken.

Kleinschalige waterkracht was de meest gebruikte vorm van elektriciteitsopwekking aan het begin van de 20^{ste} eeuw. In 1924 waren er bijvoorbeeld in Zwitserland ongeveer 7000 kleinschalige waterkrachtcentrales in gebruik. Het verbeteren van de transportmogelijkheden van elektriciteit door middel van hoogspanningsleidingen zorgde ervoor dat de interesse in kleinschalige waterkracht geleidelijk verdween. Verhoging van de energieprijzen, een milieubewustere gedachte en verbetering van de technologie zorgden voor een hernieuwde interesse in de technologie van kleinschalige waterkracht, die begon in China. Schattingen zeggen dat er daar tussen 1970 en 1985 zo'n 76.000 kleinschalige waterkrachtcentrales gebouwd zijn.

2.1.2 Voor- en nadelen

Waterkracht is een zeer schone vorm van energie. Ze gebruikt het water slechts, nadien is het water beschikbaar voor andere doeleinden, zij het op een lager niveau. Het omzetten van de potentiële energie van water in mechanische energie is een technologie met een zeer hoge efficiëntie (in de meeste gevallen het dubbele van conventionele thermische energiecentrales). Het gebruik van waterkracht kan een bijdrage leveren aan besparingen op het verbruik van uitputbare energiebronnen. Elke 600 kWh elektriciteit die met een waterkrachtcentrale wordt gegenereerd komt overeen met het equivalent van 1 vat olie (bij een omzetting van olie in elektriciteit met een efficiëntie van 38%).

De belangrijkste voordelen van waterkracht zijn:

- het vermogen is meestal continu aanwezig,
- de hoeveelheid beschikbare energie is (redelijk) voorspelbaar,
- geen verbruik van brandstoffen en weinig onderhoud waardoor de bedrijfskosten erg laag zijn en er geen substituten (zoals diesel) ingevoerd hoeven te worden,
- het is een robuuste technologie met een lange levensduur (zonder veel extra investeringen kan een installatie tot 50 jaar meegaan).

Hier tegenover staan de volgende nadelen:

- de technologie is locatiespecifiek,
- de plaats waar waterkracht aanwezig is, is vaak niet de plaats waar de opgewekte energie nodig is,
- er zit een maximum aan het op te wekken vermogen (dit stelt grenzen aan de vraag naar energie).

Voor kleinschalige en grootschalige waterkracht zijn er nog specifieke voor- en nadelen. Deze zullen verderop ter sprake komen.

2.1.3 Potentieel

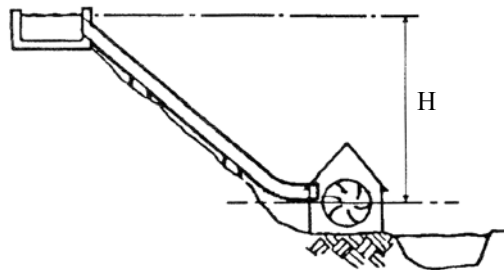
Het energie-potentieel aan waterkracht wordt bepaald door het volume van de afstroming van water door rivieren en de afstand die het water naar beneden valt voor het de oceaan weer bereikt. Schattingen voor het totale potentieel aan waterkracht in de wereld lopen uiteen van 36.000 tot 50.000 terawatt-uur per jaar (TWh/jaar), wat enkele malen meer is dan de totale uitvoer van elektriciteitscentrales in de wereld.

Realistisch beschouwd kan worden aangehouden dat 10.000 tot 20.000 TWh/jaar potentieel economisch te exploiteren is. In 1995 was 2.380 TWh/jaar geëxploiteerd waarvan 2.265 grootschalig, en 115 kleinschalig.

Van water naar Watt

Om het vermogenspotentieel van een rivier te bepalen, is het noodzakelijk het verval en het debiet te weten. Het debiet van een rivier is de hoeveelheid water (in m³) dat per seconde door een dwarsdoorsnede van de rivier stroomt. Debieten worden uitgedrukt in kubieke meter per seconde (m³/s). Het verval is het verticale hoogteverschil (in meters) waarover het water valt.

Het theoretische vermogen (P) dat aanwezig is bij een gegeven verval van het water is recht evenredig met het verval H en het debiet Q.



$$P = 9,8 \cdot Q \cdot H \text{ (kW)}$$

Met P in kiloWatt, Q in m³/s en H in meters.

Dit aanwezige vermogen wordt door de waterkrachtcentrale omgezet in mechanische energie en elektriciteit. De efficiëntie van een turbine is over het algemeen niet hoger dan 80%. Daarbij komen nog verliezen van energie door wrijving in de buis en beperkte efficiëntie van de apparatuur die aangedreven wordt. Hierdoor zal het uiteindelijk opgewekte vermogen een gedeelte zijn van het aanwezige vermogen. Grofweg kan uit gegaan worden van een efficiëntie van 50% voor kleinschalige toepassingen. Het theoretisch vermogen moet dan dus met 0,50 vermenigvuldigd worden.

Voorbeeld: Een rivier met een verval van 10 meter met een debiet van 0,3 m³ per seconde zal bij benadering leveren: (9,8 x 0,3 x 10 x 0,5 =) 15 kiloWatt.

2.1.4 Grootschalige waterkracht

Grootschalige waterkrachtcentrales beschikken over dammen met daar achter grote stuwmeren. Hierin kunnen grote hoeveelheden water opgeslagen worden die op het moment van aanbod niet gebruikt worden. Water uit natte periodes kan op deze manier in droge periodes (of zelfs droge jaren) gebruikt worden. Het water wordt gebruikt om elektriciteit op te wekken. Het stroomt door een turbine die gekoppeld is aan een elektriciteitsgenerator. Naast dammen zijn allerlei hulpconstructies nodig zoals overlopen, afsluiters, inlaat voor het water naar de turbines en voorzieningen voor schepen en vissen om de dam te passeren. De meeste dammen in de wereld zijn oorspronkelijk gebouwd zonder een elektriciteitsopwek-functie maar kunnen zeer eenvoudig hiervoor geschikt worden gemaakt.

In de jaren 60 en 70 leken grootschalige waterkrachtcentrales de oplossing voor het energievraagstuk in ontwikkelingslanden. Er werden dan ook volop stuwmeren en waterkrachtcentrales aangelegd. Voorbeelden hiervan zijn Aswan in Egypte, Tarbela in Pakistan en Cahora Bassa in Mozambique.

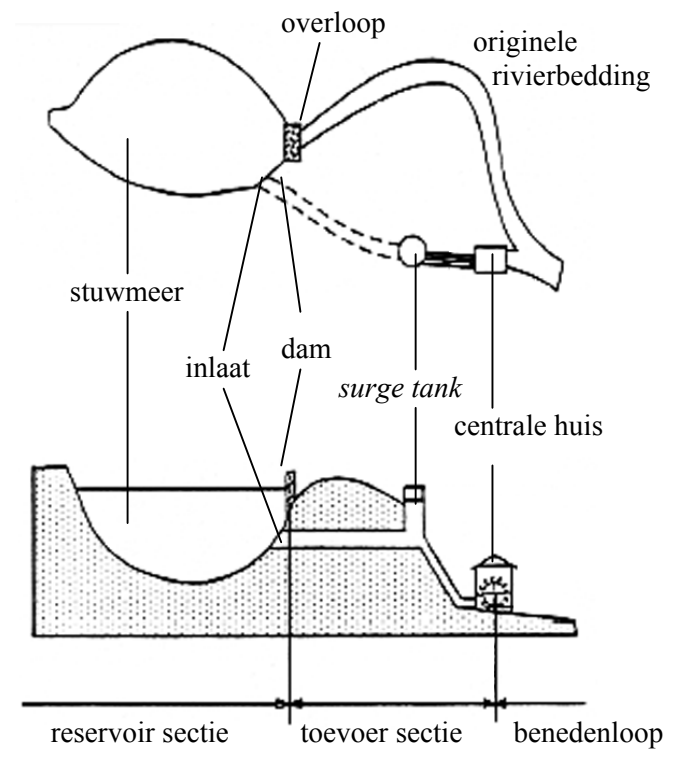
Het enthousiasme voor dergelijke projecten is tegenwoordig nagenoeg verdwenen. De extreem hoge financieringskosten, de lange terugverdientijd en de hoge milieukosten zijn hiervan de oorzaak. Vooral de milieukosten wegen zwaar bij grootschalige waterkrachtcentrales. Als voorbeeld hiervan kan het Kariba-meer, op de grens tussen Zimbabwe en Zambia, dienen. Toen de stuwdam klaar was, en men het meer vol liet lopen, verdween er meer dan 5000 km² land onder water en waren 57.000 mensen gedwongen een nieuw onderkomen te vinden. Grootschalige waterkrachtcentrales leiden tot onacceptabel hoge milieu- en sociale kosten: ondergelopen vruchtbaar land (langs een rivier is het land vaak vruchtbaar), gedwongen verhuizingen van plattelandsbevolking en het gevaar van aan stilstaand water gerelateerde ziekten als bilharzia en malaria.

Enkele andere mogelijke effecten van grootschalige waterkracht zijn;

- De begroeiing (biomassa) op de ondergelopen grond van een stuwmeer kan onder water gaan rotten. Dit zorgt voor veel uitstoot van methaan (broeikasgas).
- Effect op het klimaat. Het regent vaker in de buurt van een stuwmeer.
- Effect op seismische activiteit. Door het gewicht van het stuwmeer kunnen er aardbevingen ontstaan.

Werking

Waterkrachtinstallaties hebben hun specifieke elementen die aangepast dienen te worden aan de situatie van de locatie. In de figuur zijn de belangrijkste elementen van een installatie aangegeven. De dam blokkeert de rivier benedenstrooms met als doel het opslaan van water. De overloop reguleert de maximale hoeveelheid water en zorgt ervoor dat vloedgolven de dam kunnen passeren. De inlaat zorgt voor de toevoer van water naar de turbines en dient beschermd te worden met een vuilrooster. De tunnel en de drukpijp vervoeren het water naar het centrale huis met de turbines. Een zogenaamde 'surge-tank' bevindt zich tussen de inlaat en de turbine(s) om fluctuaties in druk en waterniveau te dempen. Na het verlaten van het centrale huis bevindt het water zich weer op het niveau van de rivier.



elementen van een grootschalige waterkracht installatie

Pumped storage plants

Pumped storage plants zijn speciale versies van waterkracht installaties waarbij in de uren met verminderde vraag elektriciteit gebruikt wordt om water van een laag niveau naar een hoger niveau te pompen. Gedurende de piekvraag naar elektriciteit kan dit water weer worden gebruikt om elektriciteit op te wekken. In plaats van conventionele turbines worden hiervoor reversibele pompen gebruikt die zowel het omhoog pompen als het energie opwekken voor hun rekening nemen. Wereldwijd zijn enkele honderden van dit soort installaties gebouwd, met name in ontwikkelde landen.

Variaties in watertoevoer

Ondanks de bouw van een stuwdam is het zeer goed mogelijk dat de fluctuaties in de watertoevoer zodanig zijn dat er niet gedurende het gehele jaar een continue energieopwekking mogelijk is. Een goed voorbeeld van zo'n sterk fluctuerende rivier is de Limpopo op grens tussen Zimbabwe en Zuid Afrika: gedurende de drie droogste maanden van het jaar stroomt er 1 % van de jaarlijkse afvoer door deze rivier, terwijl de natste drie maanden 85 % voor hun rekening nemen!

Dit soort fluctuaties zouden natuurlijk op te vangen zijn door het bouwen van een hogere, grotere dam, maar dit leidt vaak tot enorm hoge kosten en milieuschade. Twee betere oplossingen zijn het koppelen van de dam met een ander reservoir met andere watertoevoer-karakteristiek (door middel van het koppelen van de waterlopen dan wel door het koppelen van de elektriciteitsnetten) en thermische aanvullend vermogen voor periodes van onvoldoende hydraulisch vermogen.

Haalbaarheid

Grootschalige waterkrachtinstallaties vragen een enorme kapitaalinvestering die alleen op lange termijn terug verdiend kan worden. De lange bouwtijd van een dam met de bijbehorende installaties legt kapitaal lang vast zonder dat er inkomsten tegenover staan.

Een bouwtijd van tussen de 3½ en 7½ jaar (voor respectievelijk 20 en 2000 MW vermogen) is niet ongebruikelijk. Daarnaast is een overschrijding van de oplevertermijn met zo'n 25 % ook niet uitzonderlijk. Dit alles maakt een waterkrachtinstallatie erg gevoelig in schommelingen in rentestanden en wijzigingen in de economische situatie. Hier tegenover staat wel een lange levensduur van het geheel.

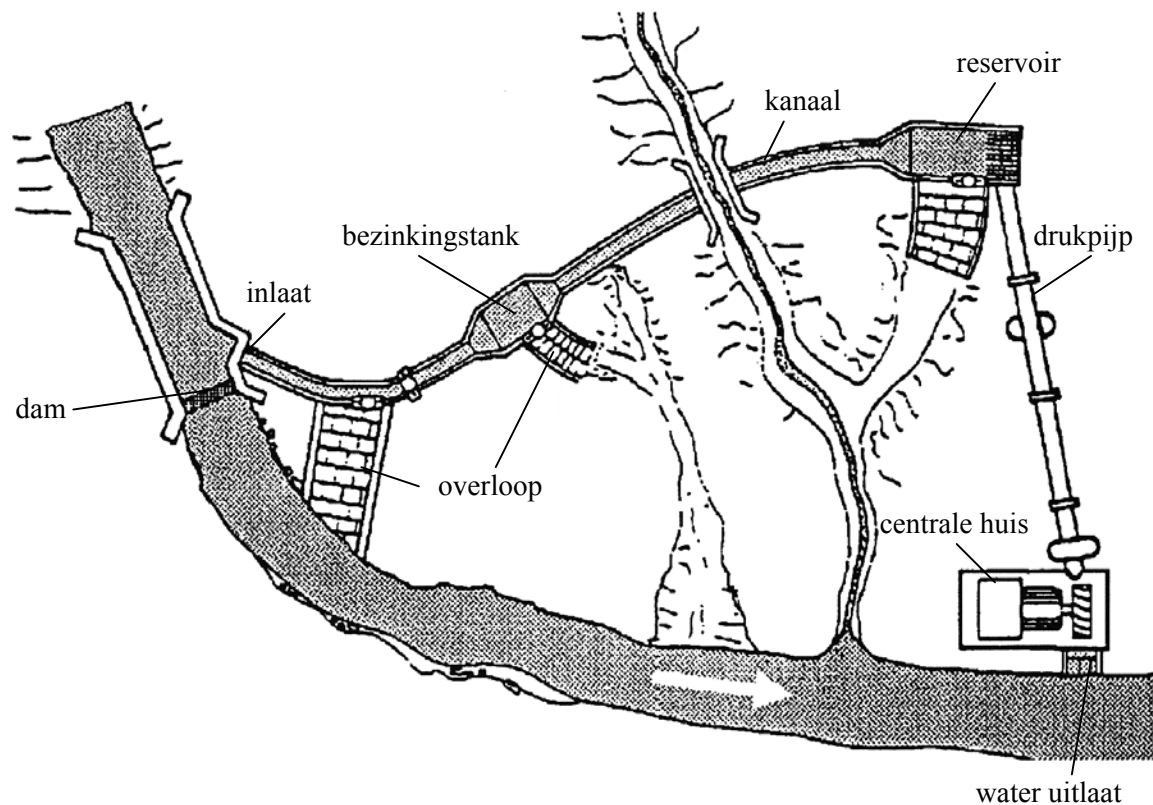
2.1.5 Kleinschalige waterkracht

Uit de voorgaande paragrafen blijkt dat het opzetten van waterkrachtcentrales veel negatieve gevolgen en grote onzekerheden met zich mee brengt. Dit houdt echter geenszins in dat waterkracht geen toekomst heeft. Naast waterkrachtinstallaties die bestaan uit een dam met een stuwmeer, bestaan er ook kleinschalige toepassingen van waterkracht. Het gebruik van kleinschalige waterkracht kent nauwelijks nadelen: geen kostbare energietransporten, geen afhankelijkheid van geïmporteerde brandstoffen en geen noodzaak tot technisch complex onderhoud. Kleinschalige waterkracht kan gedecentraliseerd gebruikt worden (zoals bijvoorbeeld bij het gebruik van dieselgeneratoren), lokaal geïmplementeerd en geleid worden. Het maakt rurale ontwikkeling mogelijk op basis van zelfvoorziening en met gebruik van lokale natuurlijke hulpbronnen.

De door een kleinschalige waterkrachtcentrale opgewekte energie kan gebruikt worden voor de aandrijving van machines voor de verwerking van landbouwproducten (malen, rijstpellen, olie-extractie en dergelijke), lokale verlichting, aandrijving van waterpompen en allerhande huisnijverheid.

Werking

De volgende figuur geeft de onderdelen van een kleinschalige waterkrachtinstallatie weer.



elementen van een kleinschalige waterkracht installatie

Het dammetje leidt water van de rivier door een opening aan de zijkant van de rivier, de zogenaamde inlaat, in het kanaal. Een bezinkingstank verwijdert zwevende deeltjes uit het water. Het kanaal volgt zoveel mogelijk de hoogtelijnen om verlies aan verval te vermijden. Het water komt via het reservoir in een pijp (de drukpijp) die het water naar de turbine geleidt. In de turbine wordt de energie van het water omgezet in mechanische energie die gebruikt kan worden om allerlei machines (inclusief eventueel een elektriciteitsgenerator) aan te drijven. Het duidelijkste verschil met grootschalige installaties is het ontbreken van een grote dam met daar achter een stuwmeer.

Variaties in watertoevoer

De hoeveelheid beschikbaar water varieert vaak veel in de verschillende seizoenen, speciaal in tropische klimaten. Hierdoor kan door het ontbreken van een grote dam vaak slechts een deel van het potentieel benut worden.

2.1.6 De context

Ter vergelijking wordt hierna de context voor grootschalige waterkrachtinstallaties vergeleken met die van kleinschalige toepassingen.

De context voor grootschalige waterkracht projecten

1. grote gecentraliseerde vraag naar energie (grootschalige industrieën, stedelijke gebieden),
2. internationale, nationale en regionale elektriciteitsnetwerken,
3. grote ondernemingen of staatsbedrijven met hoog opgeleid en goed betaald personeel,
4. lange termijn planning en grote constructies met moderne, complexe technologieën,
5. afhankelijk van het aanwezige potentieel kan het een belangrijke bijdrage leveren aan de energiebehoefte van een land,
6. van het aanwezige potentiële vermogen wordt tot 90% benut.

De context voor kleinschalige waterkracht projecten

1. gedecentraliseerde, kleine vraag naar energie (kleine industrie, boerderijen, huishoudens en rurale gemeenschappen),
2. distributienetwerk met lage spanningen (eventueel sub-regionaal netwerk),
3. eigendom van een individu, corporatie of gemeenschap met het gebruik van redelijk geschoold personeel,
4. korte planningstermijnen en constructie periode met gebruikmaking van lokale materialen en vaardigheden,
5. afhankelijk van het gegenereerde vermogen kan het een zeer grote invloed hebben op de lokale leefgemeenschappen (groter dan puur de geleverde hoeveelheid energie),
6. het gedeelte van het aanwezige potentiële vermogen dat benut wordt ligt rond de 10% omdat weinig gegevens over de afvoer van de rivier bekend zijn.

2.2 Meten van verval en debiet

Een eerste vereiste voor een succesvolle kleinschalige waterkrachtcentrale is het vinden van de best mogelijke locatie. Het verval en het debiet zijn twee belangrijke details bij een locatieonderzoek. In deze paragraaf zal op enkele methoden om het verval en debiet te meten ingegaan worden.

2.2.1 Het meten van het verval

Het verval is het verschil in horizontale hoogte tussen het hoogste en het laagste aanwezige waterniveau. Bij het onderzoeken of in een bepaalde situatie waterkracht toegepast kan worden is het aanwezige verval van groot belang. Bij een eerste globale haalbaarheidsstudie naar waterkracht kan een schatting van het aanwezige verval voldoende zijn. Bij een meer gedetailleerde studie zal men ook het verval nauwkeuriger moeten bepalen.

Niet alle methoden zijn in iedere situatie bruikbaar. Bepaalde methoden voldoen heel goed bij kleine vervallen, maar zijn te ingewikkeld voor grote vervallen. Ook het omgekeerde komt voor.

Het is aan te bevelen om voor hetzelfde verval meerdere verschillende metingen te verrichten en ze onderling te vergelijken. Voor het bepalen van een verval dient in een tijdsplanning voldoende ruimte opgenomen te worden. Na het meten van het verval dient niet van een mogelijke locatie voor waterkracht vertrokken te worden voor de verschillende metingen van het verval met elkaar vergeleken zijn.

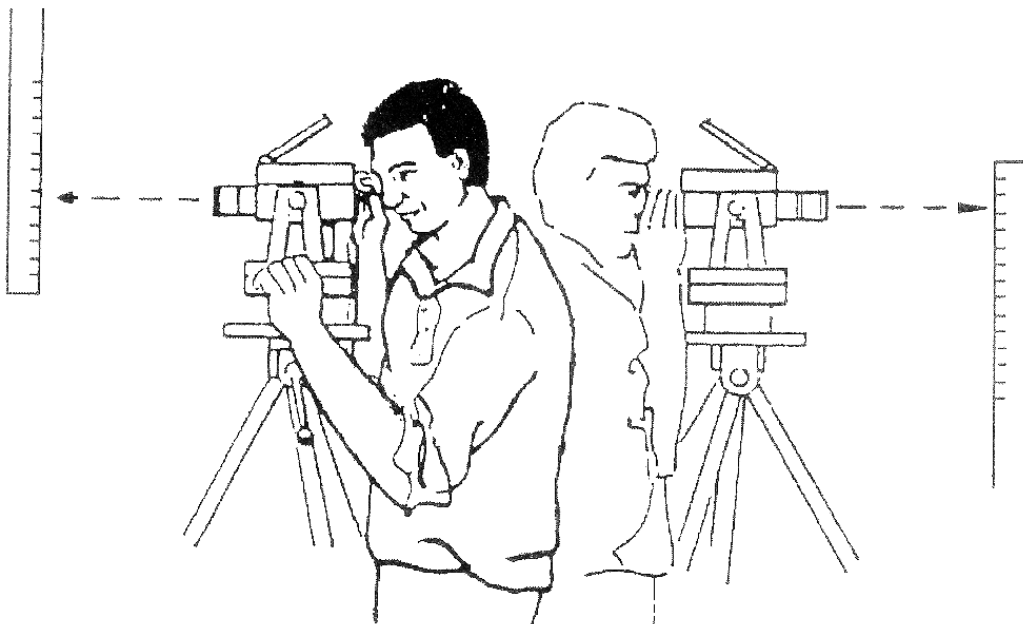
De hoeveelheid water in een rivier kan het aanwezige verval beïnvloeden. Vooral bij kleinere vervallen kan dit effect voor de nodige afwijkingen zorgen in het gemeten verval.

Waterpaskijker en theodoliet

Waterpaskijkers en meetlatten worden gebruikt om het verval in stappen te meten. Een waterpaskijker is een instrument waarbij de bediener in een horizontale lijn kan kijken naar een door een collega vastgehouden maatstaf. De grootte van de stappen waarin een verval gemeten kan worden is gelimiteerd door de lengte van de meetlat (normaal niet meer dan drie meter) en de steilheid van de helling. Voor het gebruik van een waterpaskijker is een vrije doorkijk zonder obstakels vereist.

Met waterpaskijkers kan alleen horizontaal gekeken worden, theodolieten hebben daarnaast ook de mogelijkheid verticale en horizontale hoeken te meten. Dit kan de meetprocedure aanzienlijk versnellen.

Zowel voor een waterpaskijker als een theodoliet is het noodzakelijk te beschikken over bekwaam personeel dat kan deze instrumenten bedienen.

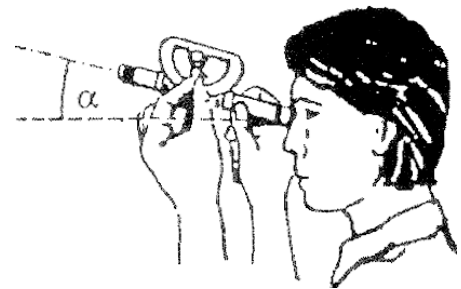


het gebruik van een waterpaskijker en meetlatten.

Inclinometer

Een inclinometer is een uitgebreide handwaterpas. Met dit instrument is het mogelijk de hoek af te lezen tussen de standplaats van de bediener en een punt op de helling. Geoefende personen kunnen met dit soort meters eenvoudig en snel een verval opmeten. Een vergissing is echter zeer eenvoudig gemaakt en moeilijk te achterhalen. Het verdient dan ook de aanbeveling meerdere metingen uit te voeren.

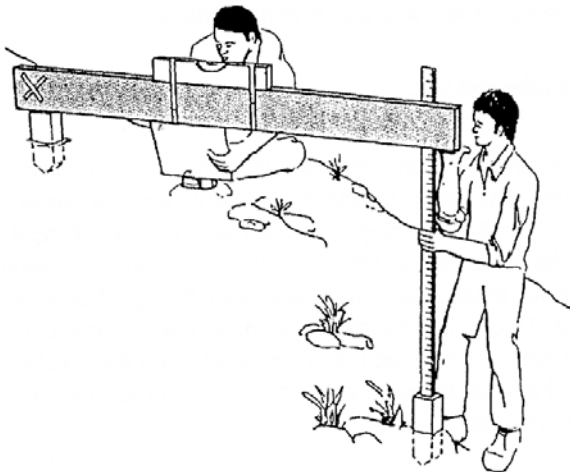
De totale fout in een gemeten verval is persoonsafhankelijk, maar zal tussen de 2 en de 10 % liggen.



inclinometer

Waterslang en drukmeter

Een van de meest eenvoudige vormen om een verval te meten is met behulp van een waterslang en een drukmeter. Een met water gevulde slang met aan het uiteinde een waterdrukmeter wordt gebruikt om het hoogteverschil te meten. Deze methode is te gebruiken bij grote en kleine niveauverschillen. De methode is redelijk betrouwbaar, de meest voorkomende fouten zijn luchtbelletjes in het water en beschadigde meters die geijkt moeten worden.



vervalmeting met een plank en een waterpas

Waterpas en rechte lat

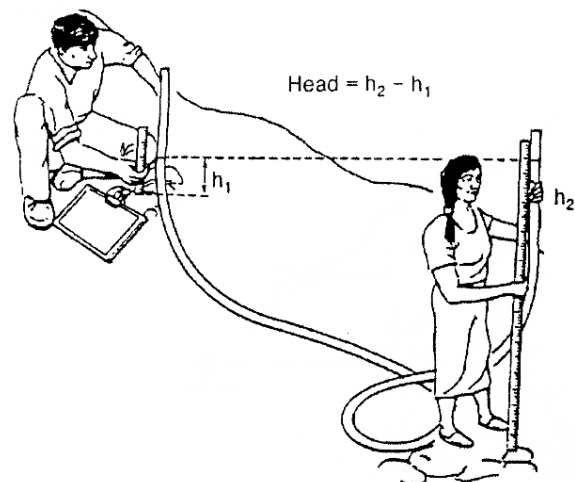
Een zeer eenvoudige, maar tijdrovende manier om het verval te meten is met een waterpas en een rechte plank. De figuur hiernaast toont hoe deze methode uitgevoerd moet worden. Met behulp van de waterpas wordt de plank steeds horizontaal gehouden om het hoogteverschil te overbruggen. De lengte van de plank bepaald de steilheid die de helling minimaal moet hebben om deze methode toe te kunnen passen. Als bij elke meting de plank omgedraaid wordt, is de totale fout in de orde van 2%.

Waterslang en meetlat.

Deze methode werkt op dezelfde wijze als de methode met de plank en de waterpas. Het horizontale niveau wordt hier bereikt door het gebruik van een waterslang.

Overige methodes

Andere methodes voor het meten zijn het gebruik van kaarten en hoogtemeters. Kaarten zijn slechts bruikbaar om een globale indruk van het aanwezige verval te krijgen. Er zijn echter niet altijd kaarten beschikbaar met de vereiste nauwkeurigheid. Hoogtemeters kunnen gebruikt worden om een globale schatting te maken van het aanwezige verval. Het verdient aanbeveling meerdere meters naast elkaar te gebruiken en de uitkomsten te middelen om zo de fout te verkleinen.



vervalmeting met een waterslang en een meetlat

2.2.2 Debietmeting

Naast het verval dient ook de waterafvoer van de rivier waaraan de kleinschalige waterkrachtcentrale gesitueerd is bepaald te worden. Voor het meten van het debiet zijn verschillende methoden te gebruiken. Enkele zullen hier kort behandeld worden.

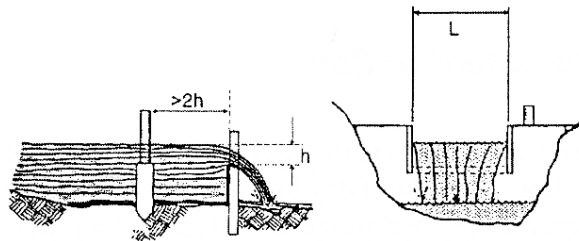
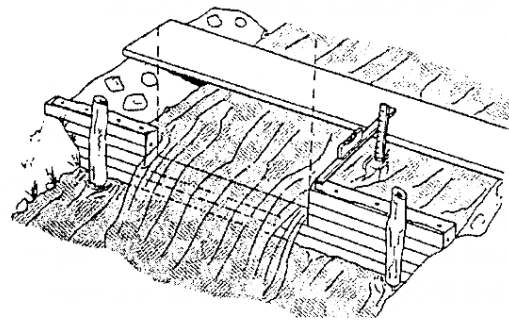
Afdammen van de rivier

Deze methode is te gebruiken bij kleine waterhoeveelheden. In de rivier wordt een tijdelijke dam geplaatst en al het water dat over de dam stroomt wordt in emmers of oude olievaten opgevangen. Het debiet (in liters per seconde) is te vinden door de inhoud van het vat of de emmer te delen door de vultijd.

Meetdam

Een veel toegepaste meetmethode is het bouwen van een meetdam. Het meetprincipe berust op het feit dat de overstorthoogte van het water over de dam een maat is voor het debiet. Het verschil in hoogte van het water voor de dam en het waterniveau bij de overstort van de dam is evenredig met het debiet. Dit hoogteverschil wordt gemeten door ruim voor de dam een meetlat te plaatsen die de hoogte van het water ten opzichte van de overstort aangeeft. Deze meetwijze wordt geïllustreerd in de figuur hiernaast.

De meetdam moet worden geplaatst in een rustig deel van de rivier, moet verticaal staan en loodrecht op de stroomrichting geplaatst worden. Tijdelijke meetdammen kunnen het beste worden gemaakt van hout, meer permanente dammen van steen of beton.



Meetdam voor het meten van het debiet

Zout-methode

De zout-methode is een redelijk nauwkeurige (fout $< 7\%$) en eenvoudige methode om snel het debiet van een rivier te bepalen. Een emmer met zeer zout water wordt in de rivier gelegd. De wolk zout water die zo in de rivier ontstaat spreidt zich uit terwijl deze stroomafwaarts stroomt. Op een zeker punt stroomafwaarts zal de wolk de gehele breedte van de rivier beslaan. Het voorste gedeelte van de wolk zal licht gezout zijn, net als de staart van de wolk. Het centrum zal de grootste zoutconcentratie hebben. Deze zouthed kan gemeten worden met een elektrische geleidingsmeter. Als we te maken hebben met een smalle rivier zal de wolk zich niet zo ver kunnen verspreiden en zal de elektrische geleiding van het water hoog zijn. Hierdoor zijn lage debieten te herkennen aan een hoge geleidbaarheid (en andersom).

Des te langzamer het water stroomt des te langer duurt het voordat het zout een bepaalde doorsnede gepasseerd is. Het debiet is dus omgekeerd evenredig met de passeersnelheid van de wolk.

Uit de te meten concentratie en de passeersnelheid is het debiet van de rivier te bepalen.

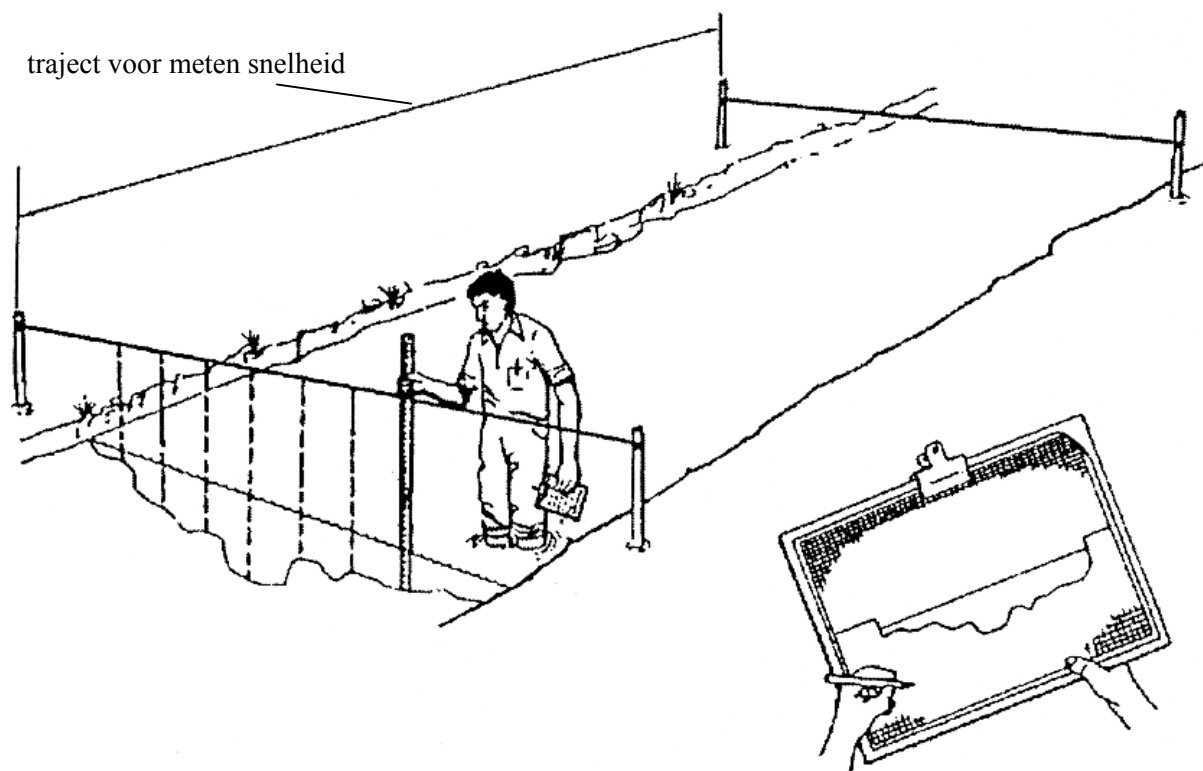
Snelheids- en profielmeting

Bij deze methode wordt de snelheid van het water gemeten en het dwarsprofiel van de rivier bepaald. Voor de snelheidsmeting worden twee meetpunten langs de rivier uitgezet. Bij het eerste meetpunt wordt een drijver, bijvoorbeeld een stuk hout, in de rivier gelaten. De tijd die de drijver nodig heeft om de afstand tussen de twee meetpunten af te leggen wordt gemeten. Hieruit volgt de snelheid. Er dient rekening gehouden te worden met het feit dat de snelheid van het water aan de waterspiegel groter is dan die vlak bij de bodem.

Bij beide meetpunten wordt het profiel van de rivier gemeten. Hiertoe wordt een draad dwars over de rivier gespannen. Op regelmatige afstand langs deze draad wordt met een meetlat de diepte van de rivier bepaald. Met behulp van deze gegevens wordt vervolgens de oppervlakte van de rivierdoorsnede berekend.

Het debiet is uitgedrukt in m^3/s , is de oppervlakte van het dwarsprofiel vermenigvuldigd met de snelheid;

$$Q (\text{m}^3/\text{s}) = A (\text{m}^2) \cdot v (\text{m/s})$$



het bepalen van de dwarsdoorsnede van de rivier

Stroomsnelheidsmeter

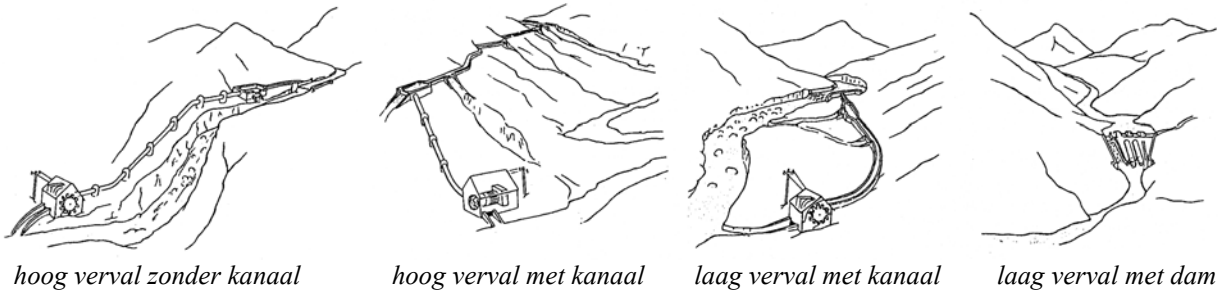
Een stroomsnelheidsmeter bestaat uit een propeller die in de stroom gehouden wordt. Het aantal omwentelingen van de propeller wordt geteld, hieruit volgt de stroomsnelheid van het water.

2.3 Civiele werken

De componenten van een waterkrachtcentrale bestaan uit de civiele werken en de mechanische en elektrische onderdelen zoals de turbine. In deze paragraaf wordt de eerste categorie behandeld. In de volgende paragraaf wordt de tweede categorie behandeld. We richten ons daarbij op kleinschalige waterkracht.

2.3.1 Systeem layout

Er zijn meerdere mogelijkheden voor de *layout* van een kleinschalige waterkrachtinstallatie. De onderstaande figuur toont een viertal gebruikelijke oplossingen.



Bij het ontwerpen van een kleinschalige waterkrachtcentrale dienen eerst alle mogelijkheden voor een *layout* naast elkaar gezet te worden. Vaak blijkt al direct dat bepaalde oplossingen afvallen in verband met de te verwachten kosten. Goedkope arbeidskrachten maken het vaak rendabel lange kanalen te graven en korte drukpijpen toe te passen. In de eerste fases van het ontwerp van een kleinschalige waterkrachtcentrale moeten de volgende essentiële punten in beschouwing worden genomen.

1) het gebruik van het beschikbare verval

Het totaal aanwezige verval kan niet geheel gebruikt worden voor de omzetting in mechanische energie. Het kanaal en de drukpijp reduceren het maximaal bruikbare gedeelte van het verval doordat er verliezen optreden als gevolg van wrijving.

2) variaties in debiet

Het debiet van een rivier varieert over de loop van het jaar, vooral in ontwikkelingslanden met een duidelijk te onderscheiden natte en droge tijd. Een waterkrachtcentrale wordt echter ontworpen voor een vast debiet. Er dient gekozen te worden tussen het niet benutten van de piekafvoer (dimensionering op minimale debiet), of de turbine stil te leggen als er te weinig water is (dimensionering op piekdebiet, zodat er soms niet genoeg water is om de turbine te laten draaien). Als een kanaal meer water bevat dan de centrale verwerken kan, dient er gezorgd te worden voor een goede afvoer van het overtollige water door middel van overlaten.

3) sediment

De meeste rivieren voeren sediment mee. Harde deeltjes kunnen vitale onderdelen van de turbine beschadigen en door afzettingen kunnen de inlaat en het kanaal geblokkeerd raken. Voorzorgsmaatregelen zijn dus noodzakelijk.

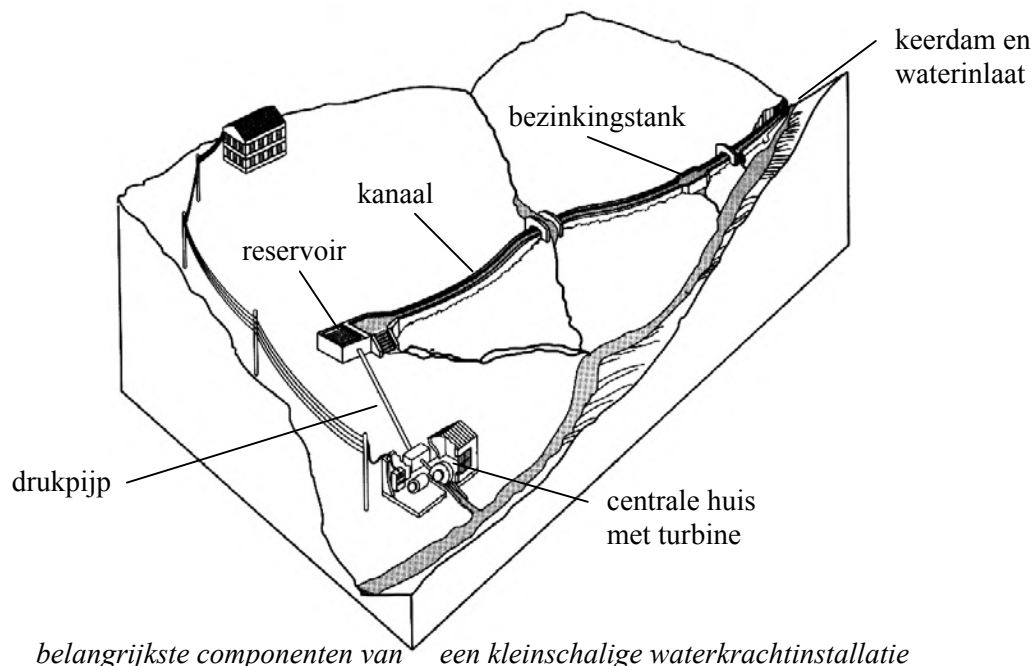
4) overstromingen

Veel rivieren in tropische landen kennen periodes met piekafvoeren waarbij het debiet in zeer korte tijd enorm kan toenemen. Dammen, inlaten, kanalen en overlopen dienen hiertegen bestand te zijn.

5) turbulentie

Alle delen van een kleinschalige waterkrachtcentrale dienen zodanig ontworpen te zijn dat turbulentie in het water zoveel mogelijk voorkomen wordt omdat dit gepaard gaat met energieverliezen. Veranderingen van diepte en breedte van het kanaal dienen hierom geleidelijk plaats te vinden.

Een waterkrachtcentrale moet de benodigde hoeveelheid water stroomopwaarts van de rivier aftappen. Hiervoor zijn civiel technische werken nodig. Aan deze werken kan een groot gedeelte van het budget voor een kleinschalige waterkrachtcentrale op gaan. Op de onderstaande figuur zijn de verschillende componenten aangegeven. Zie ook de figuur op pagina 7.



2.3.2 Dammen en keerdammen

Dammen slaan water voor langere tijd op, terwijl keerdammen het water van de rivier de waterinlaat in geleiden. In rotsachtige rivieren kunnen natuurlijke keerdammen het water de waterinlaat in geleiden. Voor kleinschalige waterkracht worden zelden dammen gebouwd. Wel komt het voor dat kleine dammen gebouwd worden die tevens andere functies hebben, zoals opvangen van grote hoeveelheden water om overstromingen te voorkomen, irrigatie of het op peil houden van het waterniveau om onder andere de visstand op peil te houden.

2.3.3 Vispassages

Dammen in natuurlijke waterlopen vereisen voorzieningen voor vissen om stroomopwaarts te kunnen trekken. Vispassages zijn hiervoor noodzakelijk. Voor vispassages zijn drie vormen mogelijk; natuurlijke stroom, vijver-passage en visladder. Vispassages dienen te voldoen aan vier voorwaarden:

- 1) voldoende mogelijkheid voor de vissen om de dam te passeren (door middel van een gelijkmatige waterstroom),
- 2) zo min mogelijk verbruik van water,
- 3) een ingang die gemakkelijk te vinden is voor vissen,
- 4) solide en duurzaam gebouwd.

2.3.4 Waterinlaat

De inlaat van een waterkrachtcentrale wordt ontworpen om een bepaald deel van de rivierstroom af te tappen. Dit gedeelte kan oplopen tot 100% als alle beschikbare water via de turbine geleid wordt.

Aan een inlaat worden de volgende eisen gesteld:

- 1) de gewenste hoeveelheid water moet afgetapt worden,
- 2) de piekafvoer van de rivier moet de inlaat en de bijbehorende dam kunnen passeren zonder hieraan schade toe te brengen,
- 3) het voorkomen dat grote hoeveelheden los materiaal het kanaal binnen stromen d.m.v. een rooster,
- 4) mogelijkheid tot het verwijderen van opgehoopt sediment. Hieruit volgt dat de positionering en de vorm van de inlaat zeer belangrijk zijn.

2.3.5 Het kanaal

Het kanaal geleidt het water van de inlaat naar het reservoir voor de drukpijp. De lengte van dergelijke kanalen is afhankelijk van de lokale situatie en kan aanzienlijk zijn. In Nepal komen kanalen voor van een paar kilometer om een verval te creëren van 10 tot 30 meter. In sommige gevallen is het noodzakelijk of goedkoper een lang kanaal en een korte drukpijp toe te passen. In andere situaties kan een kort kanaal met een lange drukpijp beter voldoen.

In het kanaal zijn een aantal elementen opgenomen die hierna kort behandeld zullen worden. Dit zijn:

- de bezinkingstank,
- overlopen,
- het reservoir voor de drukpijp.

De bezinkingstank

In het kanaal dient een bezinkingstank opgenomen te zijn. Het belangrijkste doel hiervan is het reduceren van de hoeveelheid meegevoerd sediment omdat dit de turbine kan beschadigen. De werking van de bezinkingstank berust op snelheidsreductie van het water. Door het kanaal plaatselijk te verbreden en te verdiepen neemt de stroomsnelheid van het water af en daarmee ook de draagcapaciteit voor sediment.

De afmetingen van de bezinkingstank zijn een compromis tussen de gewenste reductie van het sedimenttransport en de kosten om de tank aan te leggen. Uitgaande van de maximale toelaatbare grootte van een meegevoerd deeltje in het water na het verlaten van de bezinkingstank en de stroomsnelheid van het water kunnen de afmetingen van de bezinkingstank uitgerekend worden.

Overloop

Gedurende hoge waterstanden of bij het sluiten van de turbinetoevoer zal er meer water het kanaal binnen stromen dan het kan verlaten. Het overtollige water zal proberen een uitweg te vinden via de rand van het kanaal. Dit water dient geleid te worden door middel van een overloop omdat anders ernstige erosie kan optreden. Via een overloop kan het water op een gecontroleerde manier terug naar de rivier vloeien.

Reservoir voor de drukpijp

Voor de ingang van de drukpijp bevindt zich een bassin. Dit is bedoeld om de laatste zwevende deeltjes te laten bezinken voor het water de drukpijp in gaat. Afhankelijk van de afmetingen van het reservoir kan het ook dienen als opslag voor water om variaties in het debiet van de rivier op te vangen.

2.3.6 Drukpijp

De drukpijp is de pijp die het water onder druk transporteert naar de turbine. De drukpijp is vaak één van de meest kostbare elementen van een kleinschalige waterkrachtcentrale. Soms wordt tot 40% van het budget voor een groot verval installatie opgeslokt door de drukpijp. Veel gebruikte materialen voor de drukpijp zijn staal, ijzer, plastic (PVC of HDPE) en beton.

Bij kleinschalige waterkracht moet gedacht worden aan een diameter tussen 5 cm en 60 cm. De diameter van de drukpijp is een afweging tussen kosten en vervalverlies. De verliezen in de pijp als het gevolg van wrijving nemen enorm af met het toenemen van de diameter van de pijp. Hier tegenover staan grote kostentoeenames bij grotere pijpdiameters.

De ontwerpfilosofie is om eerst de beschikbare pijpopties te inventariseren en dan een maximaal toelaatbaar vervalverlies vast te stellen. Een goed uitgangspunt is 5% van het bruto verval. Op grond hiervan kan men kosten en gederfde inkomsten door het verminderde netto verval gaan evalueren.

2.4 Types turbines

Een turbine zet de energie in de vorm van vallend water om in roterende kracht. Deze roterende kracht kan rechtstreeks gebruikt worden om machines aan te drijven, of worden omgezet in elektriciteit. De keuze voor een bepaald soort turbine is afhankelijk van de kenmerken van de plaats waar de turbine gebruikt moet gaan worden. Elke turbine heeft een specifieke combinatie van verval, stroomsnelheid en rotatiesnelheid voor een optimale efficiëntie. Vaak vereisen de door de turbine aan te drijven machinerieën een bepaalde snelheid. De snelheid van de turbine moet hieraan aangepast zijn.

Waterkracht turbines zijn te rangschikken in twee groepen, namelijk reactie en impuls turbines. Bij reactie turbines bevindt de rotor van de turbine zich geheel onder water. De aandrijvende kracht is hier het drukverschil tussen het water voor en na de turbine. De belangrijkste types reactie turbines zijn bekend onder de namen Francis- en Kaplan-turbines. Bij impuls turbines wordt de drijvende kracht ontleend aan de kinetische energie van het (vallende) water. Deze energie wordt omgezet in beweging doordat het water een turbineschoep raakt onder atmosferische druk. Het belangrijkste type impuls turbine is de Pelton-turbine.

2.4.1 Impuls turbines

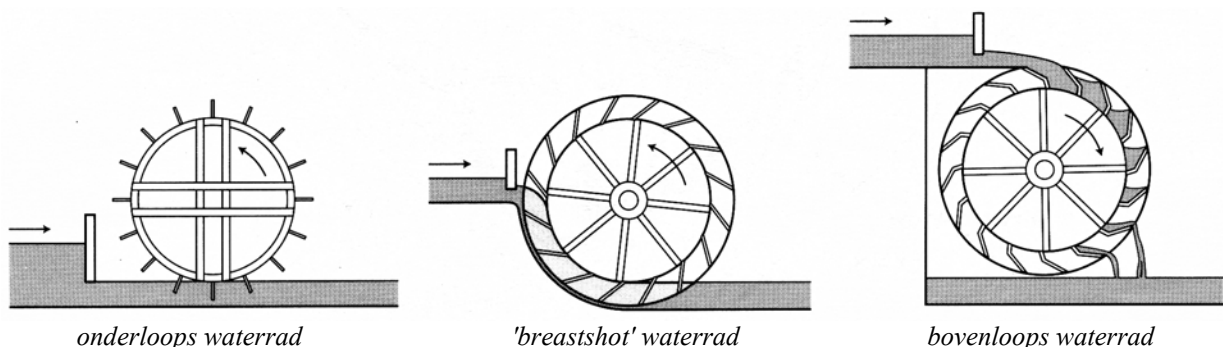
Impuls turbines zijn over het algemeen meer geschikt voor toepassing in kleinschalige waterkrachtcentrales dan reactie turbines, vanwege de volgende voordelen:

- grotere tolerantie voor zand en andere in het water meegevoerde deeltjes,
- betere toegang tot de bewegende delen (onderhoud),
- geen drukdichte verbindingen rond de as,
- eenvoudiger te fabriceren en te onderhouden en
- een betere efficiëntie bij partiële belasting.

Het grootste nadeel is dat impuls turbines nagenoeg onbruikbaar zijn voor situaties met een klein verval vanwege hun lage specifieke snelheid, een te grote versnelling zou dan nodig zijn om machines aan te drijven.

Waterraderen

Waterraderen werden traditioneel gebruikt voor waterkrachtcentrales. In het algemeen zijn de raderen gemaakt van hout, zijn zwaar en vergen veel materiaal. Een maximale efficiëntie van 60% kan bereikt worden. De vermogen/kracht verhouding is hoog en het maximale vermogen dat met een waterrad te verkrijgen is ligt om en nabij de 100 kW (hiervoor is dan wel een rad nodig met een diameter van 10 meter). Er zijn drie types, zoals in onderstaande figuur aangegeven is.



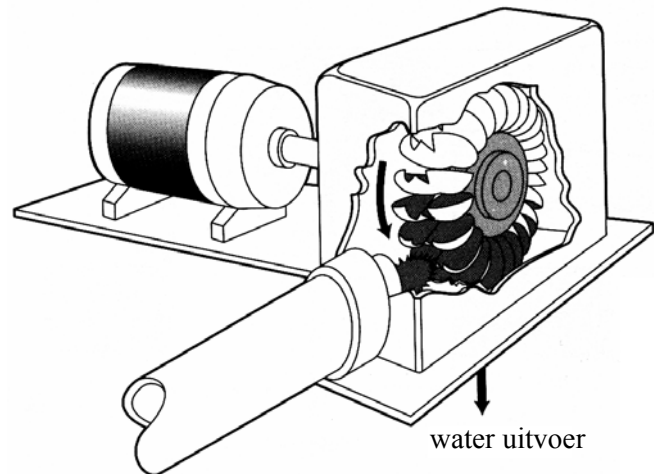
Onder andere in de Himalaya wordt gebruik gemaakt van primitieve waterraderen met een **verticale** as. Door de lage massa/vermogen ratio wordt een hoge snelheid bereikt die het gebruik van versnellingen overbodig maakt. Evenmin zijn overbrengingssystemen nodig om maalstenen aan te drijven. Het maximale vermogen is echter gelimiteerd tot een paar kW.

Pelton turbine

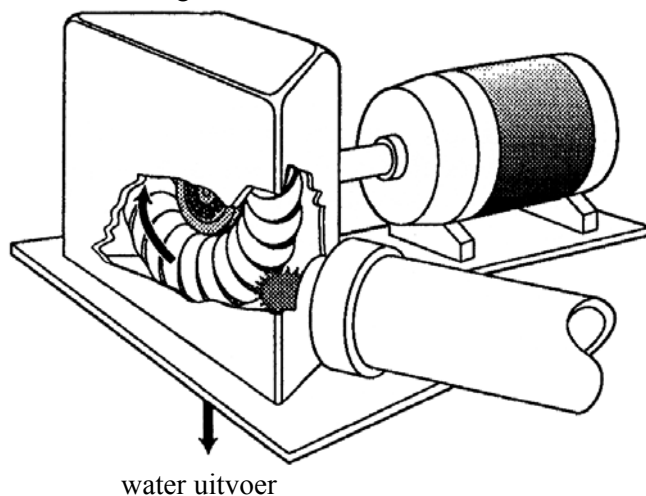
De technologie van het traditionele waterrad is verbeterd terug te vinden in de Pelton turbine. De turbine bestaat uit een wiel met daar aan dubbele lepel-vormige schoepen. Een waterstraal met hoge snelheid raakt deze schoepen en zorgt voor een roterende beweging. Een spuitmond zorgt voor de gewenste waterstraal. De vorm van de schoepen is zodanig gekozen dat de hoogst mogelijke overdracht van kinetische energie bereikt wordt. Uit het midden van de schoepen is een klein stukje verwijderd om de waterstraal de mogelijkheid te geven de volgende schoep te bereiken.

In grote waterkrachtcentrales worden Pelton turbines alleen gebruikt voor vervallen boven de 150 meter, maar voor kleinschalige toepassingen kunnen Pelton turbines gebruikt worden bij vervallen vanaf 20 meter. Beneden deze waarde wordt de rotatiesnelheid van een Pelton turbine te laag en de diameter te groot. Indien de afmetingen van de turbine en de lage rotatie snelheid geen probleem vormen in een specifieke situatie dan kan een Pelton turbine zelfs bij kleine vervallen efficiënt gebruikt worden.

Als een grotere rotatie snelheid gewenst is bestaat er de mogelijkheid het rad aan te drijven met meerdere waterstralen. Hierdoor kan een kleinere diameter volstaan of wordt de snelheid hoger. Bijkomend voordeel is een betere efficiëntie bij partiële belasting omdat dan één of meerder waterstralen afgesloten kunnen worden.



Pelton turbine



Turgo turbine

Turgo turbine

De Turgo turbine is een verbeterde versie van de Pelton turbine. De schoepen van een Turgo turbine delen de waterstraal niet in tweeën, maar buigen hem bijna 180° af. De waterstraal nadert de turbine meestal onder een hoek van 20 graden en verlaat de turbine aan de andere zijde dan waar hij binnen is gekomen. Een Turgo turbine draait, onder gelijke omstandigheden, twee maal zo snel dan een Pelton en meet daarbij maar de helft van de diameter. De Turgo turbine heeft een efficiëntie van meer dan 90% en is toepasbaar bij vervallen vanaf 10 meter.

De Ghatta en de Multi-Purpose Power Unit

De Ghatta is een traditioneel Nepalees waterrad, het is een verticale as turbine waarbij het water het waterrad van boven nadert. De turbine wordt gemaakt van hout zodat de bouw en reparaties eenvoudig zijn uit te voeren. Als gevolg van dit ontwerp is de efficiëntie erg laag en is het vermogen beperkt tot een maximum van 12 kW.

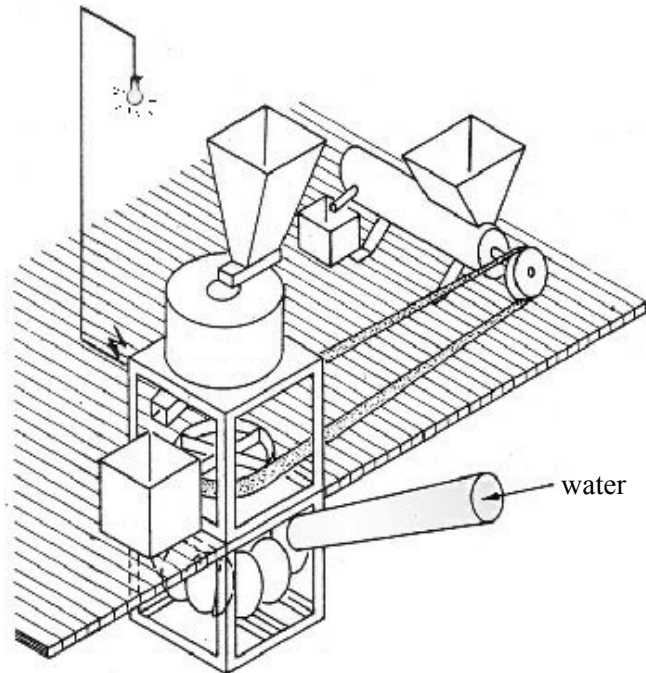
Uit deze traditionele Ghatta is de verbeterde Ghatta ontwikkeld. Het houten waterrad werd verbeterd en later vervangen door metalen exemplaren met ronde schoepen. Doordat de impuls overdracht door het water verbeterd is verdubbelt het vermogen.

De Multi-Purpose Power Unit (MPPU) zit chronologisch gezien tussen de Ghatta en de verbeterde Ghatta in. De term multi-purpose slaat op het feit dat de MPPU zodanig geconstrueerd is dat er een heel scala aan machines op aan gesloten kan worden. Het concept van de MPPU is globaal hetzelfde als van de verbeterde Ghatta: een verticale as met een vaste en een roterende maalsteen. Qua technische complexiteit, prestaties en kosten zit de MPPU tussen de verbeterde Ghatta en de crossflow turbine in.

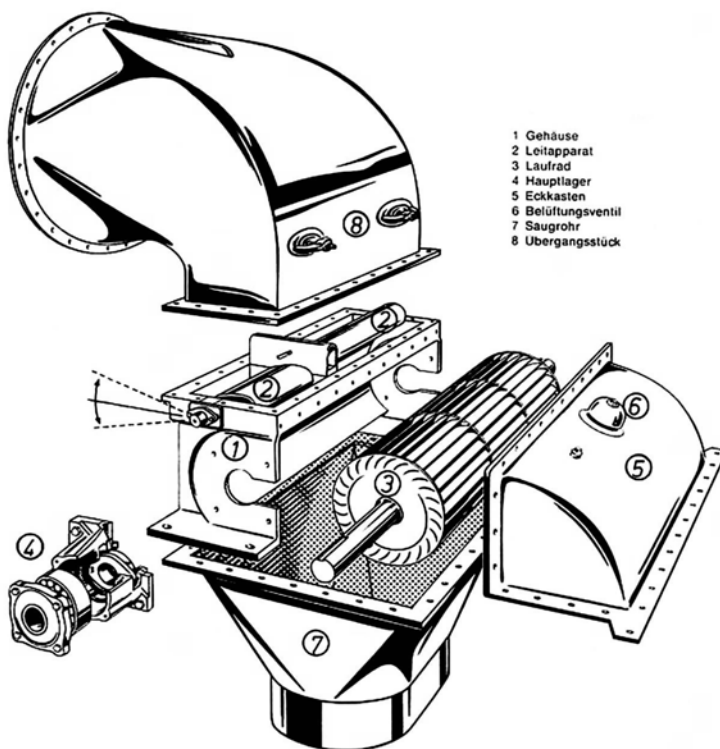
Alle onderdelen zijn van metaal in plaats van hout. Het waterrad is van hetzelfde type als in de verbeterde Ghatta. De open aanvoer van water bij Ghatta is vervangen door een drukpijp en een aanpasbare spuitmond. De wrijvingskrachten zijn verminderd en de controle mogelijkheden vergroot.

Bij het ontwerp van de MPPU is niet gestreefd naar een maximale efficiëntie maar naar een ontwerp dat algemeen toepasbaar is. De gehele installatie is zo eenvoudig en goedkoop mogelijk gehouden en speciale aandacht is besteed aan de transporteerbaarheid.

Het maximale vermogen ligt rond de 14 kW.



Multi-Purpose Power Unit



Crossflow turbine

Crossflow of Michell-Banki turbine

Het belangrijkste kenmerk van de *crossflow* turbine is dat de waterstraal de schoepen twee keer passeert. Ze worden veel toegepast omdat ze relatief makkelijk te maken zijn in een simpele werkplaats. Het water stroomt eerst van buiten naar het centrum van de rotor om daarna, na het passeren van de lege ruimte in de rotor, weer naar buiten te stromen. Overdracht van energie gebeurt dus twee keer: bij het binnen komen van de rotor en bij het verlaten van de rotor.

De *crossflow* turbine is geschikt voor vervallen van twee tot meer dan 100 meter, het geleverde vermogen varieert hierbij van 7 tot meer dan 200 kW. Door de breedte van de inlaat aan te passen kan de *crossflow* turbine gebruikt worden bij verschillende debieten. De diameter van de rotor hoeft hierbij niet aangepast te worden. Een belangrijke eigenschap van de *crossflow* turbine is de redelijk constante efficiëntie van ongeveer 83%.

2.4.2 Reactie turbines

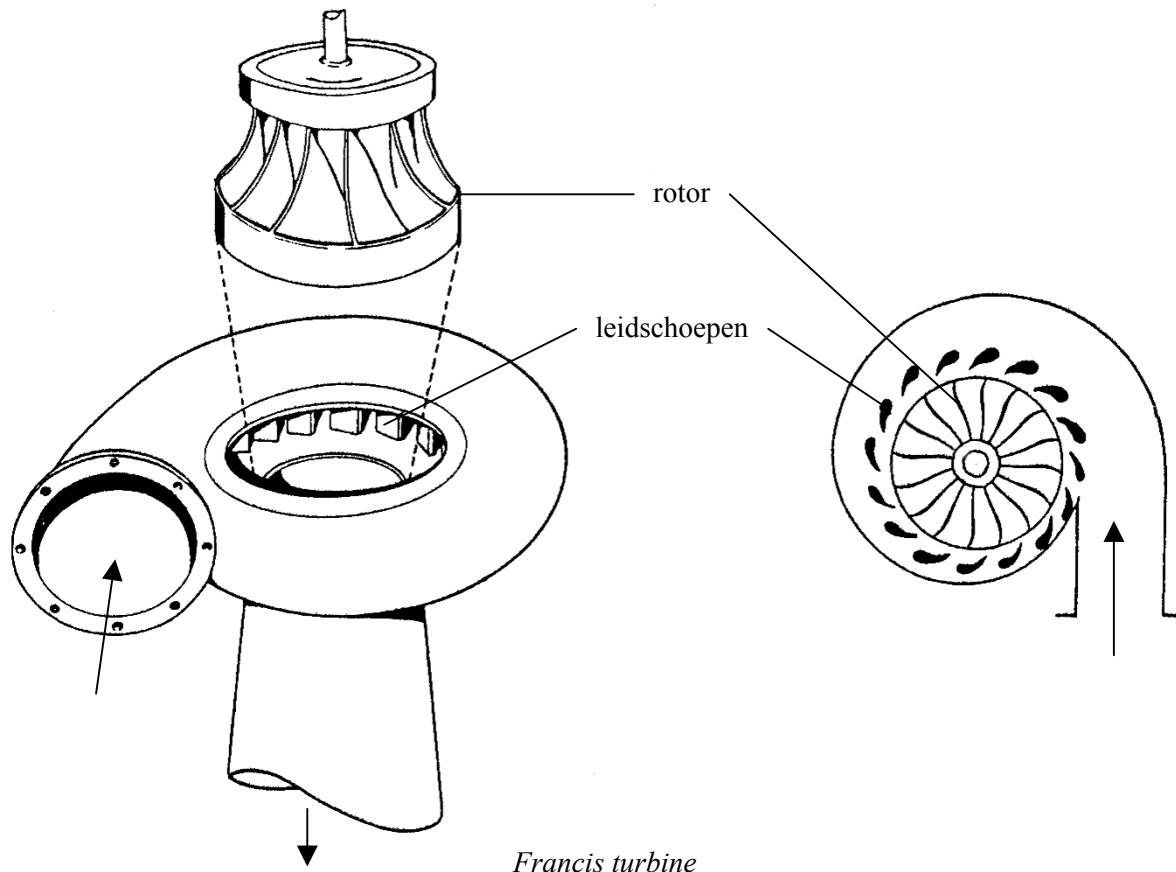
In tegenstelling tot een impuls turbine zit de rotor van een reactie turbine geheel in het water. Bij een gegeven verval draaien reactie turbines sneller dan impuls turbines. Het gevolg hiervan is dat een reactie turbine meestal rechtstreeks aan een generator gekoppeld kan worden zonder dat een versnelling nodig is. Sommige fabrikanten leveren vaste combinaties van reactie turbine en generator.

Reactie turbines zijn moeilijker te fabriceren dan impuls turbines omdat ze speciaal gevormde bladen en een drukdichte omhulling vergen. De extra hieraan verbonden kosten worden gecompenseerd door een hogere efficiëntie, een hogere rotatiesnelheid en een redelijk compacte installatie.

De gecompliceerde fabricage maakt dit soort turbines minder geschikt voor toepassingen in kleinschalige waterkrachtcentrales in ontwikkelingslanden. De meeste reactie turbines hebben een slechte efficiëntie als ze partieel belast worden.

Francis turbine

Francis turbines zijn het meest voorkomende type reactie turbines. Het ontwerp kan aangepast worden aan een grote verscheidenheid van verval en debiet combinaties. Het water komt de turbine radiaal richting het centrum binnen en verlaat de turbine in de richting van de as.

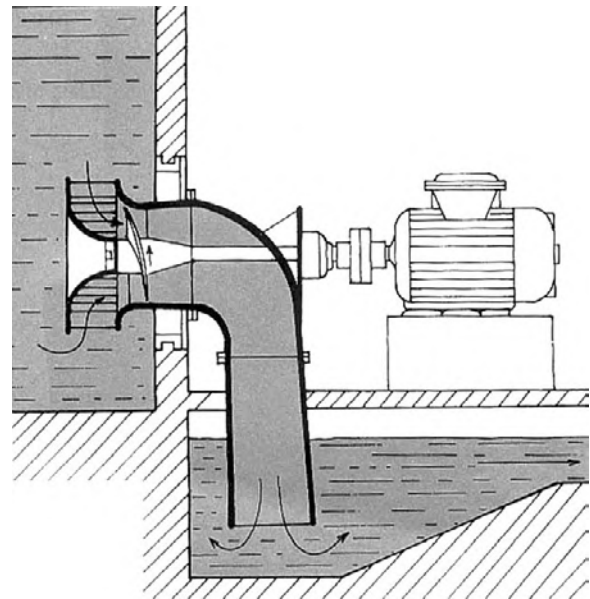


De leidschoepen rond de rotor zijn zodanig geconstrueerd dat de energie van het water voor het grootste gedeelte omgezet wordt in rotatie-energie. De stand van de leidschoepen is aan te passen aan variabele waterhoeveelheden en de belasting van de turbine. Een enkele Francis turbine is ongeschikt voor een situatie met sterk wisselende hoeveelheden water omdat de efficiëntie snel daalt bij afnemende waterhoeveelheden. In een dergelijke situatie kunnen meerdere, parallel geschakelde Francis turbines een oplossing bieden. De efficiëntie van Francis turbines is bij de ontwerp debiet/verval combinatie zeer hoog (tot 99%).

Propeller en Kaplan turbines

Een propeller turbine bestaat uit een propeller (vergelijkbaar met een sloopsschroef) in een verlenging van de drukpijp. De turbine-as verlaat de drukpijp op een punt waar deze buigt. De propeller heeft normaal gesproken drie tot zes schoepen. De waterstroom langs de propeller wordt gereguleerd met een aantal vaste schoepen voor de propeller. Dergelijke turbines zijn redelijk eenvoudig te fabriceren tegen lage kosten zodat ze goed bruikbaar zijn in ontwikkelingslanden.

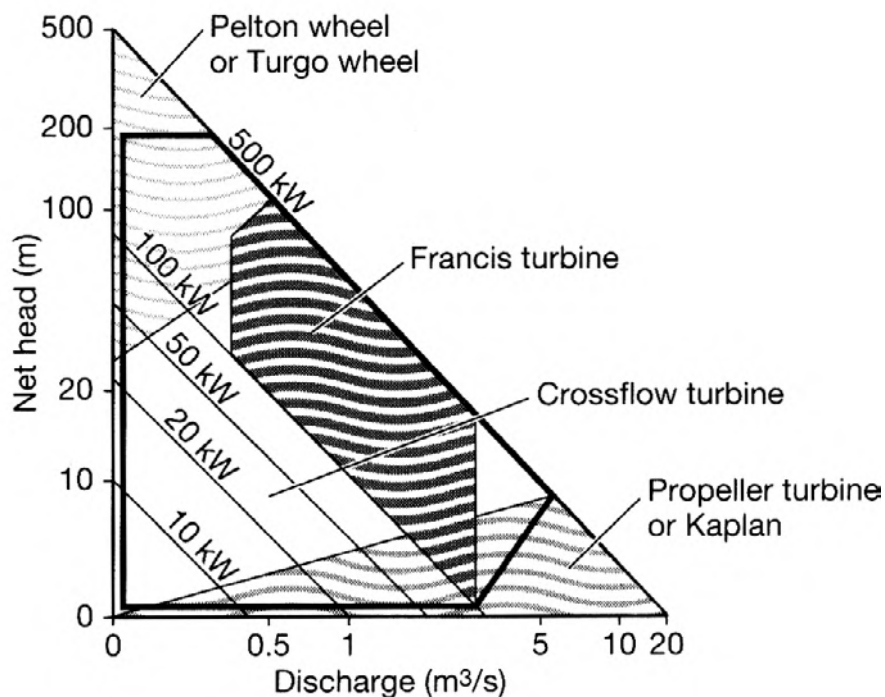
De slechte efficiëntie bij verminderde waterhoeveelheden is een nadeel. Grote waterkrachtcentrales maken gebruik van meer geavanceerde propeller turbines waarbij de stand van de schoepen instelbaar is. Dergelijke turbines worden Kaplan turbines genoemd. De toepassing van propeller turbines kan geschieden bij vervallen van 1 tot 30 meter, capaciteiten variëren van 100 kW tot 200.000 kW.



propeller turbine

2.4.3 Keuze van turbine

Bij grootschalige waterkracht worden de turbines op maat gemaakt. Turbines voor kleinschalige waterkracht worden echter vaak in serie geproduceerd. Om het juiste type turbine te kiezen kan onder andere gebruik gemaakt worden van onderstaande tabel.



2.5 Toepassing

2.5.1 Mechanische energie

De door een waterkracht turbine opgewekte energie kan gebruikt worden om allerlei machines aan te drijven. Voorbeelden hiervan zijn maalstenen, rijstplanners, oliepersen en zaaginstallaties.

Om de mechanische energie over te brengen van de as van de turbines naar de machines kan gebruik gemaakt worden van verschillende overbrengingsvormen. Te weten:

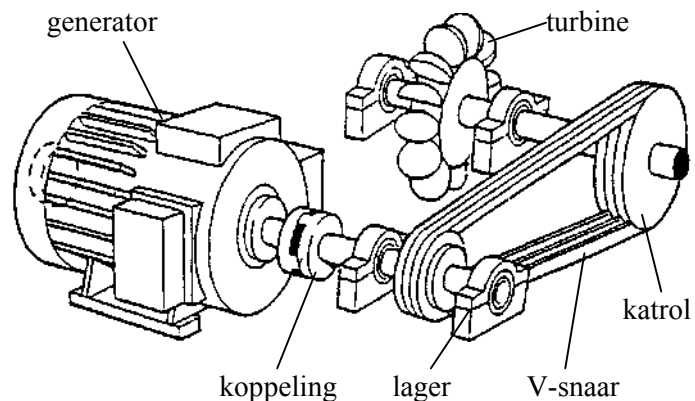
- 1) directe aandrijving,
- 2) V-snaren,
- 3) drijfriemen,
- 4) ketting en tandwielen,
- 5) versnellingsbak.

Directe aandrijving

Deze methode kan alleen gebruikt worden als de snelheid van de turbine hetzelfde is als de gewenste aandrijfsnelheid van de machine. Bij directe aandrijving wordt gebruik gemaakt van een flexibele koppeling om beide assen met elkaar te verbinden. De voordelen zijn weinig onderhoud, een hoge efficiëntie (>98%) en lage kosten. Het enige nadeel is de vereiste nauwkeurigheid van de positionering van de turbine en de machine ten opzichte van elkaar. De verkrijgbare directe koppelingen verschillen onderling in de tolerantie in de positionering: des te duurder de koppeling des te groter de tolerantie. Deze extra investering kan opwegen tegen de problemen die ontstaan bij positioneringsfouten

V-snaren

V-snaar aandrijvingen worden veel toegepast in kleinschalige waterkrachtcentrales tot een vermogen van 100 kW. V-snaren zijn in ontwikkelingslanden bekend en goed verkrijgbaar omdat ze veel gebruikt worden in kleinschalige industrieën. De werking van V-snaren berust op de wrijving van de snaar in groeven op de katrol. Grote longitudinale krachten (spanning op de snaar) zijn hierdoor niet nodig. De tolerantie voor positionering is groot, maar de efficiëntie ligt tussen de 85 en 95%.



Aandrijving met behulp van katrollen en een V-snaar

Aandrijfriemen en katrollen

Moderne aandrijfriemen werken met grote spanning op de banden. De wrijving tussen de band en de katrol zorgt voor de overbrenging van de krachten. Aandrijfriemen zijn efficiënter dan V-snaren en zorgen voor minder rubberstof. Door de grote spanning op de riem komen er grote krachten op de katrollen. Deze dienen dus zwaarder uitgevoerd te worden.

Een nadeel van aandrijfriemen kan de beschikbaarheid zijn: in lang niet alle landen zijn ze eenvoudig te verkrijgen.

Ketting en tandwielen

Kettingen in combinatie met tandwielen hebben een hoge efficiëntie, maar slijten zeer snel. Een nadeel is de slechte verkrijgbaarheid en het verbruik van olie.

Versnellingen

Versnellingen worden gebruikt als de andere mogelijkheden niet toepasbaar zijn. Versnellingen zijn zeer kostbaar en vragen een grote nauwkeurigheid. In normale omstandigheden zijn ze te duur.

2.5.2 Elektrische opwekking

Het omzetten van het vermogen van de turbine in elektriciteit biedt grote voordelen:

- Grotere toepasbaarheid; het gegenereerde vermogen kan nu voor alle typen elektrische apparaten gebruikt worden (hierdoor ontstaat een vergroting van het aantal gebruiksmogelijkheden),
- Groter bereik; het gebruik van de door de turbine geleverde energie is niet meer gekoppeld aan de plaats waar de turbine zich bevindt. De elektriciteit kan gedistribueerd worden naar meerdere plaatsen (een vergroting van het aantal plaatsen waar de energie benut kan worden).

Een installatie die mechanische energie (zoals die geleverd wordt door de turbine) omzet in elektriciteit heet een generator. Elektriciteit komt voor in twee verschillende vormen: gelijk- en wisselstroom. Voor installaties met een vermogen tot 1,5 kW wordt meestal gebruik gemaakt van gelijkstroom. De gebruikte voltages zijn 12 of 24 Volt voor het opladen van accu's en 110 of 220 V voor verlichting. Het voordeel van het gebruik van gelijkstroom is dat bij lage voltages de snelheidscontrole voor de turbine niet zo nauw luistert. Voor grotere vermogens (> 1,5 kW) wordt meestal overgestapt op wisselstroom, met 1-fase stroom tot 10 of 20 kW en drie-fase stroom daar boven. Globaal gesproken zijn zowel drie-fase motoren als generatoren goedkoper per kW dan hun 1-fase tegenhangers. Drie-fase stroom heeft echter als groot nadeel dat het transformeren en transporteren ervan een complexe zaak is. Voor vermogens tot 20 kW is daarom 1-fase stroom te prefereren.

Voor kleinschalige waterkrachtcentrales is het gebruikelijk synchrone generatoren te gebruiken met vier polen. De gewenste snelheid is dan 1500 toeren/ minuut voor 50 Hz en 1800 voor 60 Hz. Lagere snelheden zijn mogelijk maar dan moeten meer-polige generatoren gebruikt worden die een stuk duurder in de aanschaf zijn.

De generatoren in kleinschalige waterkrachtcentrales zijn meestal '*stand-alone*'-units, dat wil zeggen niet aangesloten op het elektriciteitsnet. Voor dit soort doeleinden worden synchrone generatoren gebruikt. Dit type generatoren kan ook parallel geschakeld worden met het elektriciteitsnet. Inductiegeneratoren daarentegen kunnen alleen in combinatie met het net gebruikt worden. Zij hebben een simpeler constructie en zijn goedkoper, maar zijn dus niet in een '*stand-alone*'-situatie te gebruiken.

Snelheidscontrole

Wisselstroom wordt gegenereerd met een frequentie van 50 of 60 Hz. Deze frequentie is afhankelijk van het toerental van de generator en moet binnen nauwe grenzen gehouden worden. Te grote variaties in de frequentie van de opgewekte stroom kunnen beschadigingen in elektrische apparaten veroorzaken.

Om de frequentie constant te houden bestaan twee verschillende methodes:

- correctie van de hoeveelheid water die door de turbine gaat,
- elektronische belastingsregeling.

Bij waterhoeveelheidscorrectie wordt de hoeveelheid water die tot de schoepen van de turbine toegelaten wordt aangepast als er veranderingen in de rotatiesnelheid worden waargenomen. Hiervoor zijn bewegende delen nodig (al dan niet automatisch bestuurd). Het voordeel van deze methode is dat slechts die hoeveelheid water gebruikt wordt die daadwerkelijk nodig is. Het niet gebruikte water kan opgeslagen worden (dit voordeel verdwijnt als de centrale geen opslag mogelijkheid voor water heeft). Bij een elektronische belastingsregelaar wordt de hoeveelheid afgenomen stroom zodanig geregeld dat de turbine met een constante snelheid draait. Elektronische meetinstrumenten bepalen de gevraagde en de geleverde hoeveelheid stroom. Ballastweerstand (bijvoorbeeld verwarming van water) worden ingeschakeld om de afgenomen hoeveelheid stroom op een zodanig peil te brengen dat de frequentie constant blijft.

Voor kleinschalige waterkrachtcentrales zijn elektronische belastingsregelaars een goed en betrouwbaar alternatief voor de dure mechanische installaties voor het regelen van het debiet door de turbine.

2.6 Implementatie

2.6.1 Fases bij de invoering

Bij de invoering van kleinschalige waterkracht in een bepaald gebied zijn drie fases te onderscheiden; de planningsfase, de implementatiefase en de bedrijfsvoeringfase.

Planning

In de planningsfase van de invoering van kleinschalige waterkracht wordt om te beginnen het op te wekken vermogen vergeleken met het gevraagde vermogen. Bij het vaststellen van het gevraagde vermogen moet een onderscheid gemaakt worden tussen situaties waarbij waterkracht een bestaande energiebron vervangt en situaties waarbij waterkracht geen bestaande energiebron vervangt maar geheel nieuw is. De vraag naar energie is in de eerste situatie gelijk aan het nu geleverde vermogen. In de tweede situatie is de gevraagde hoeveelheid energie veel moeilijker te bepalen. Wel dient in beide gevallen rekening gehouden te worden met de aantrekkingskracht die het aanbod van energie heeft op de vraag ernaar.

Het op te wekken vermogen wordt bepaald aan de hand van topografische, hydrologische en technische onderzoeken.

Verdere aandachtspunten tijdens de planningsfase zijn:

- onderzoek naar de sociale en economische haalbaarheid,
- gevolgen voor de bestaande infrastructuur ,
- analyse van de wettelijke mogelijkheden en beperkingen,
- het opzetten van een systeem-ontwerp,
- het opzetten van een managementstructuur voor de bouwen de bedrijfsvoering van de kleinschalige waterkrachtcentrale.

De managementstructuur voor de bouwen de bedrijfsvoering van een kleinschalige waterkrachtcentrale kan op verschillende manieren vorm gegeven worden. Afhankelijk van de bemoeienis van de overheid kan deze structuur variëren van staatsondernemingen tot particuliere bedrijven. Vaak zal de bouw plaats vinden in een projectvorm waarbij meerdere partijen betrokken zullen zijn, waarna de bedrijfsvoering overgelaten wordt aan een hiervoor geschikte organisatie. Die organisatie hoeft hiervoor niet speciaal opgericht te worden, maar kan een bestaande zijn.

Omdat de omstandigheden per land verschillend zijn en geen enkele kleinschalige waterkrachtcentrale hetzelfde is, is het niet mogelijk eenduidig aan te geven welke organisatievorm het beste is.

Implementatie

In de implementatiefase worden de materialen aangekocht, de turbine gefabriceerd, de civiele werken en de elektrische installatie en het distributienetwerk aangelegd.

Bedrijfsvoering

Onder de bedrijfsvoering vallen de training van het bedienende personeel, het vaststellen van de tariefstructuur en inningswijze en het onderhoud van de installatie.

2.6.2 Problemen bij de invoering

Waterkracht bestaat bij gratie van stromend water. Fluctuaties in de rivierafvoer kunnen echter voor problemen zorgen. Vaak bestaan geen afvoergegevens van een bepaalde rivier over een langere periode, terwijl daarnaast ook goede topografische kaarten ontbreken. Voor een project gestart wordt moet dit goed gerealiseerd worden. In veel gevallen zal men genoeg moeten nemen met een niet-wetenschappelijke benaderingswijze. De hierbij gepaard gaande risico's moeten onderkent worden. Het kan worden aangetoond dat zelfs onder deze omstandigheden de implementatie van een waterkracht-project levensvatbaar kan zijn. Andere punten die vaak onduidelijkheden kunnen opleveren zijn waterrechten, licenties, rurale elektrificatieplannen en de wettelijke eisen als waterkracht gebruikt wordt voor productieve doeleinden.

Om later een betere bezettingsgraad (de ratio tussen de gevraagde en de opgewekte energie) te krijgen zal er veel energie gestoken moeten worden in de voorlichting over energiegebruik. Het doel hiervan is het vermijden van pieken van korte duur en een verhoging van de benuttingsgraad.

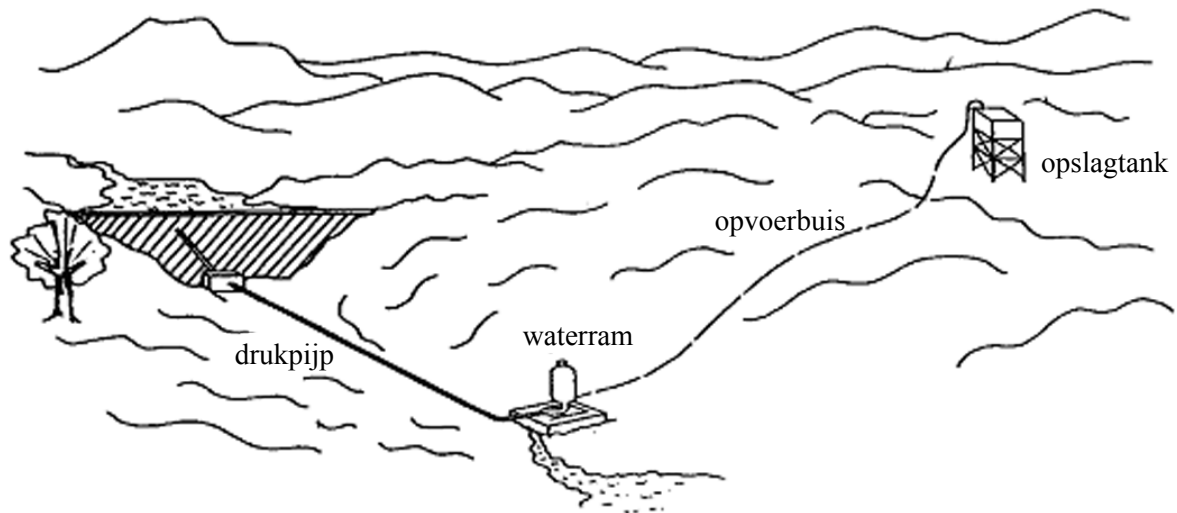
Het verkrijgen van medewerking van de lokale bevolking en hen betrekken in de uitvoering van het project is cruciaal voor het slagen van een ontwikkelingsproject, kleinschalige waterkracht vormt hierop geen uitzondering. Bij het doen van veldonderzoek en locatie vaststelling moet benadrukt worden dat het eerste probleem dat opgelost moet worden niet van technische maar van sociale aard is. Zodra een geschikte locatie gevonden is voor een kleinschalige waterkrachtcentrale moet de prioriteit liggen bij het benaderen van de lokale bevolking, de dorpsoudsten en gemeenschapsleiders. Tot in detail moet duidelijk gemaakt worden wat het effect van een kleinschalige waterkrachtcentrale zal zijn op hun levensomstandigheden. Men moet duidelijk zijn in wat er van de bevolking verwacht wordt in termen van medewerking en wat de uiteindelijke kosten voor de bevolking zullen zijn.

Pas nadat de medewerking van de bevolking is verkregen en men de gevolgen van het opzetten van een kleinschalige waterkrachtcentrale realiseert, kan er begonnen worden met de technische kant van het verhaal.

Bij het bepalen van de locatie en de grootte van een kleinschalige waterkrachtcentrale moet terdege rekening gehouden worden met het gebruik van rivier water voor irrigatie. Het bovenloops van de waterkrachtcentrale onttrekken van water aan de rivier ten behoeve van irrigatie beïnvloed de beschikbare hoeveelheid water voor de waterkrachtcentrale. Vroegtijdig overleg met de boeren hierover is dus gewenst.

2.7 Waterrammen

Waterrammen zijn eigenlijk geen turbines. Er wordt geen roterende beweging opgewekt. Waterrammen zijn pompen die werken op waterkracht. De druk van water wordt direct gebruikt om een deel van dat water te verpompen, bijvoorbeeld naar een opslagtank op een heuvel, of om het water horizontaal te verplaatsen. Er wordt dus niet eerst met een turbine elektriciteit opgewekt en er worden geen brandstoffen gebruikt.



Overzicht van een waterram installatie

Waterrammen kunnen op dezelfde manier als waterturbines geïnstalleerd worden. Het civieltechnische gedeelte is dus min of meer gelijk. Verschil is wel dat er ook een opvoerleiding en een opslagtank aanwezig moet zijn om het gepompte water mee te vervoeren en op te slaan. Door de werking van de waterram moet de drukpijp grotere krachten kunnen weerstaan dan bij een turbine. Voor kleine waterrammen kan nog HDPE gebruikt worden, maar ijzeren drukpijpen worden toch aanbevolen voor grotere waterrammen. Voor een optimale werking moet de lengte van de drukpijp 3 tot 7 maal de verticale lengte zijn.

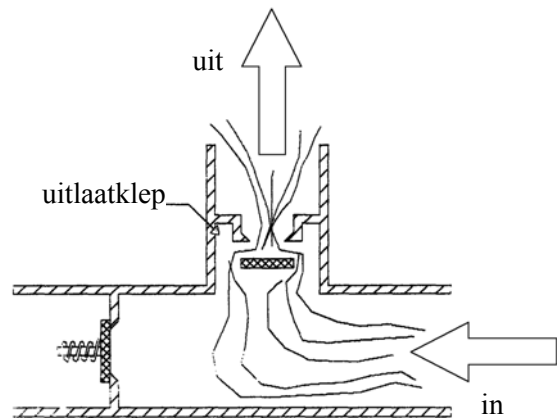
2.7.1 Geschiedenis

Reeds twee eeuwen wordt de technologie van de waterram toegepast. Zij vindt haar oorsprong in 1772, toen J. Whitehurst op theoretische manier de ram uitdacht, gebruik makend van de 'waterhamer' (water in beweging dat plotseling tot staan gedwongen wordt). Dit idee is vervolmaakt door J.M. de Montgolfier waarvoor hij in 1797 een patent verwierf. Inmiddels is de waterram vooral bekend om haar toepassingen als waterpomp in ontwikkelingslanden. Dit vooral in het kader van projecten in de drinkwatervoorzieningen op dorpsniveau. Minder bekend is, dat de waterram ook in geïndustrialiseerde landen toepassingen kent en gebruikt wordt. Heel wat fabrikanten hebben een productie opgezet, velen hebben hun eigen model ontworpen waardoor men echter bijna altijd voor onderdelen en onderhoud afhankelijk is van de desbetreffende fabriek. Deze rammen kenmerken zich meestal door hun uitzonderlijke robuustheid, met als gevolg hogere kosten.

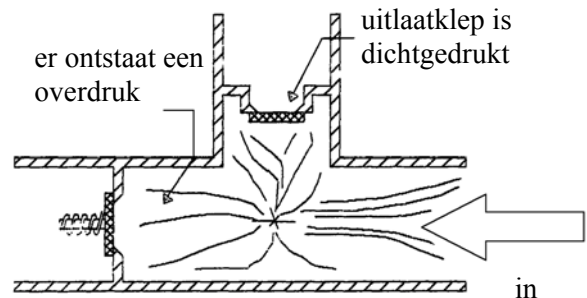
2.7.2 Werking

In de figuren is het hart van de waterram schematisch weergegeven. Rechts is steeds de ingang van de waterram. Hierdoor stroomt continu water naar binnen. Dit wordt aangeleverd door de drukpijp, die een minimale verticale hoogte heeft van 1 meter.

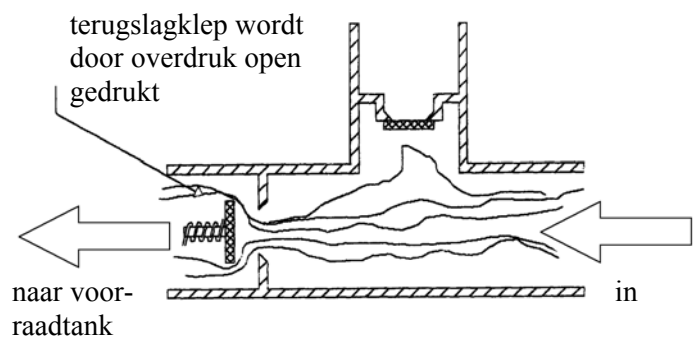
In eerste instantie stroomt het water in de waterram de bocht om, naar boven. (zie bovenste figuur) Hier komt het weer vrij in de buitenlucht terecht en stroomt terug in de rivier. Het water begint echter steeds meer snelheid te maken, tot op een gegeven moment het water de uitlaatklep meesleurt. Hierdoor sluit het water zijn eigen uitgang af.



Toch komt er door de aanvoerpijp nog water aangestroomd. Dit geeft een overdruk in de waterram. (zie middelste figuur) Als je thuis de kraan snel dichtdraait, is ook 'opeens' de uitgang dicht. Je hoort een 'toink' in de waterleiding. Dit heet wel de 'waterhamer'. Hieraan dankt de waterram zijn naam.



In de waterram wordt deze waterhamer nuttig gebruikt: met de overdruk wordt de terugslagklep links geopend. (zie onderste figuur) Dit leidt naar de opvoerbuis. Na verloop van korte tijd verdwijnt de overdruk. Hierdoor sluit de terugslagklep zich weer. Nu staat het water vrijwel stil. Door de zwaartekracht valt de uitlaatklep boven in de waterram weer naar beneden. Dit brengt ons bij het begin van de cyclus. Het hele proces gebeurt zo'n 2-3 keer per seconde. Uiteindelijk wordt telkens een klein beetje water naar de opvoerleiding geperst, en dus als het ware opgepompt.



2.7.3 Gebruik

Een belangrijk voordeel van een waterram is dat hij uit zichzelf volledig automatisch werkt, zolang er maar water wordt toegevoerd. In de praktijk zijn er veel toepassingen bekend, waarin rammen jarenlang zonder storingen non-stop hebben gewerkt. De waterram ondervindt hierbij nauwelijks slijtage, en is gratis in gebruik. Waterrammen kunnen parallel geschakeld worden met elk een eigen drukpijp, maar een gezamenlijke opvoerleiding. Bij variaties in watertoevoer kunnen dan enkele rammen aan- of afgesloten worden om toch optimaal te blijven pompen.

Ongeveer 10% van het water dat door de waterram stroomt wordt verpompt, de rest stroomt terug in de rivier. De opbrengst van de waterram hangt erg af van onder andere het verval, de opvoerhoogte en de grootte van de waterram. Opbrengsten variëren tussen 0,5 m³ per dag per waterram tot enkele honderden m³ per dag per waterram.

2.7.4 Types

Er zijn vele ontwerpen voor waterrammen in omloop. Op commerciële basis zijn al lange tijd gegoten waterrammen beschikbaar. Gegoten waterrammen zijn vrij duur en zijn vaak alleen aantrekkelijk voor grote toepassingen. Bovendien is er nogal wat kennis voor nodig om het apparaat te installeren en eventueel te repareren. Om de waterram aantrekkelijker te maken en omdat het werkingsprincipe van een waterram vrij eenvoudig is, hebben enkele organisaties met succes zelfbouw-rammen ontwikkeld. Dat wil zeggen, dat hij uit gemakkelijk verkrijgbare onderdelen zelf samen te stellen is. In 1996 heeft de WOT ook haar eigen waterram ontworpen: de Breurram.

Zelfbouwrammen hebben een lagere efficiëntie dan commerciële rammen. Echter, de kosten zijn over het algemeen lager en de beschikbaarheid hangt af van beschikbare kennis, vaardigheden en gereedschappen, en niet zozeer van financiële middelen en beschikbaarheid van leveranciers.

De kosten voor een commerciële waterram variëren tussen de 2400 US\$ voor een ram voor 2-inch drukpijpen en 8000 US\$ voor een ram voor 4-inch of 6-inch drukpijpen.

2.8 Kosten en opbrengsten

2.8.1 Economische aspecten

In dit hoofdstuk zal een globale economische analyse gegeven worden voor een kleinschalige waterkrachtcentrale. Hierbij zullen de volgende drie punten beschouwd worden:

- 1) investeringen (kapitaalkosten),
- 2) inkomsten,
- 3) bedrijfs- en onderhoudskosten.

Investeringskosten

De kosten van kleinschalige waterkrachtcentrale variëren niet proportioneel met het gegenereerde vermogen. Een combinatie van groot verval en een klein debiet geeft hetzelfde vermogen als een combinatie met een klein verval en een groot debiet. De kosten zullen in het laatste geval echter veel hoger liggen omdat er een veel duurere turbine nodig zal zijn. Bij het gebruik van verkleinde versies conventionele technologie zoals bij grote waterkrachtcentrales gebruikt wordt, vallen de kosten voor een kleinschalige waterkrachtcentrale onacceptabel hoog uit. Bij het gebruik van speciale, voor kleinschalige projecten ontwikkelde, technologie verandert het kostenbeeld aanzienlijk.

De goedkoopste kleinschalige waterkracht systemen zijn lokaal gefabriceerd en worden alleen gebruikt voor mechanische toepassingen, zoals malen. De kosten hiervan kunnen liggen rond de US\$ 200 per geïnstalleerde kilowatt. De duurste kleinschalige waterkrachtcentrales zijn 'turn-key'-projecten voor elektriciteitsopwekking in afgelegen gebieden. Door het gebruik van moderne, geïmporteerde westerse technologieën en aannemers, kunnen de kosten oplopen tot 10.000 US\$/kW. Globaal genomen kost een kleinschalige waterkrachtcentrale voor het opwekken van elektriciteit tussen de US\$ 1000 en US\$ 4000 per kW (inclusief generator en distributienet).

De belangrijkste kosten voor een kleinschalige waterkrachtcentrale zijn de civiele werken en constructies aan de ene kant en de technische installaties aan de andere kant. Een algemene indeling van de te maken kosten is niet te geven omdat iedere kleinschalige waterkrachtcentrale uniek is in zijn verval/debiet combinatie en in de geologische omstandigheden. Voor een globaal idee kunnen echter de getallen aangehouden worden zoals die weergegeven zijn in de volgende tabel.

Klein verval		Groot verval	
dam en inlaat	35 %	inlaat en bezinkingstank	12 %
centralehuis	15 %	drukpijp	35 %
turbine en generator	35 %	centralehuis	9 %
200m elektriciteitskabel	5 %	turbine en generator	24 %
transport en installatie	5 %	200m elektriciteitskabel	5 %
diverse	5 %	transport en installatie	9 %
		diverse	6 %
totaal	100 %	totaal	100 %

Tabel: Verdeling van de kosten voor een kleinschalige waterkrachtcentrale.

Voor de (globale) prijzen van turbines geeft de volgende tabel enig inzicht.

Vermogen (kW)	Pelton	Turgo	Crossflow	Francis	propeller
2	2 – 4	2 – 4	1 – 2	4 – 6	4 – 6
5	3 – 8	5 – 8	2 – 6	8 – 10	8 – 10
20	8 – 20	12 – 20	3 – 14	20 – 30	20 – 30
100	40 – 80	55 – 80	30 – 50	40 – 100	40 – 100
200	60 – 100	80 – 100	50 – 80	60 – 120	60 – 120

Tabel: Kosten van turbines in 1.000 US\$

Aan de hand van de investeringskosten en de levensduur van de installatie kan een jaarlijks equivalent van de investeringskosten berekend worden.

Inkomsten

De inkomsten kunnen bij een haalbaarheidsstudie slechts globaal geschat worden. Als de vraag naar geleverd vermogen bekend is, kan er een bepaalde prijs aan gekoppeld worden om zo het inkomen te berekenen. Voor systemen voor elektriciteitsopwekking zouden de lokale elektriciteitsstarieven gebruikt kunnen worden. Helaas is het vaak zo dat deze gesubsidieerd zijn en hierdoor onbereikbaar laag zijn voor een kleinschalige waterkrachtcentrale. Beter is het gebruik te maken van de kosten van de kleinschalige waterkrachtcentrale en de te verwachten benuttingsgraad (de fractie van het gegenereerde vermogen dat daadwerkelijk gebruikt wordt).

Een andere grondslag voor prijsbepaling kunnen de brandstofkosten zijn die door een kleinschalige waterkrachtcentrale uitgespaard worden. Een richtlijn is dat elektriciteit uit het nationale elektriciteitsnet bijna nooit verkocht wordt voor minder dan US\$ 0,04 /kWh. Waterkrachtcentrales kunnen werken voor kosten rond de US\$ 0,1 - 0,2 /kWh, terwijl de kosten bij het gebruik van dieselaggregaten liggen rond de US\$ 0,4 /kWh.

Bij mechanische systemen kan uitgegaan worden van de hoeveelheid product dat verwerkt kan worden en de hierbij verwachte opbrengst.

Bedrijfs- en onderhoudskosten

De bedrijfskosten van een kleinschalige waterkrachtcentrale blijven beperkt tot een persoon die de installatie moet bemannen (al dan niet *part-time*). Onderhoudskosten worden meestal geschat op 3% per jaar van de investeringskosten. Daarnaast moet rekening gehouden worden met de kosten van stilstand gedurende het onderhoud (tussen de 1 a 2 dagen en een week per jaar, afhankelijk van de lokale situatie).

2.8.2 Waterrammen

De economische aspecten van een waterram liggen anders. Watervoorziening wordt vaak niet gemeten of verkocht. De haalbaarheid wordt dan ook vaak vergeleken met andere alternatieven zoals handpompen.

2.9 Onderhoud

2.9.1 Civiele werken

Het is aan te raden dagelijks te controleren of er geen opstoppingen in het aanvoerkanaal zitten. Ook is het belangrijk eventuele lekkages snel te repareren. Een lek kan snel groter worden en de grond langs of onder het kanaal wegspoelen. De bezinkingstank moet leeg geschept worden zodra deze te vol raakt met bezinksel. Ook het vuilrooster voor de drukpijp moet ontdaan worden van vuil indien nodig.

De drukpijp zelf vergt weinig onderhoud. Elke maand kijken of er geen lek is, is voldoende.

2.9.2 Turbines

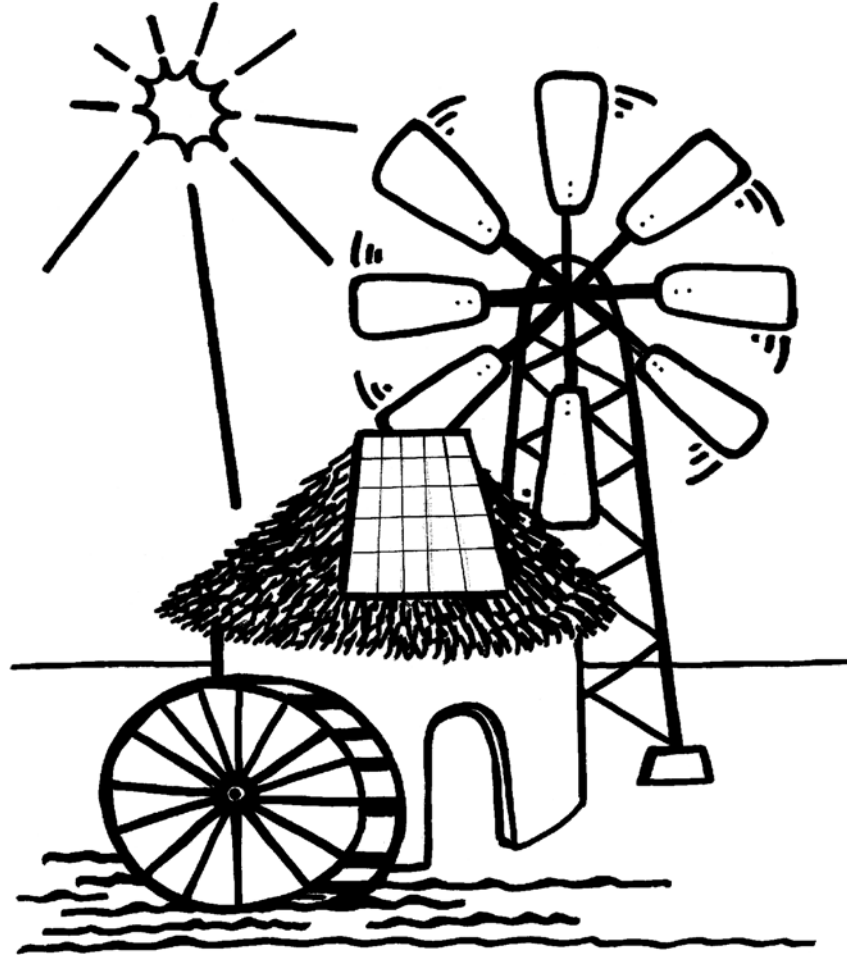
Turbines vergen weinig onderhoud zolang het water schoon gehouden wordt. Bij mechanische gebruik hangt het van de overbrenging af wat er aan onderhoud gedaan moet worden. Over het algemeen volstaat het om af en toe te controleren of de bouten en moeren nog goed vast zitten. Bij elektriciteitsopwekking kan het beste de onderhoudsinstructies van de leverancier van de generator gevolgd worden.

2.10 Literatuur

Dit hoofdstuk is gebaseerd op de volgende bronnen;

- *Micro-hydro power. Technical Brief.* - Intermediate Technology Development Group.
http://www.itdg.org/html/technical_enquiries/technical_briefs.htm
- *Microhydro web portal.* - Wim Klunne.
<http://www.microhydropower.net/>
- *Kleinschalige waterkracht voor gebruik in ontwikkelingslanden.* Wim Klunne. 1993.
- *Waterkracht.* - Projectbureau Duurzame Energie.
<http://www.duurzame-energie.nl/downloads/factsheets/Waterkracht.pdf>
- *Micro-hydropower. A guide for development workers.* P. Fraenkel, e.a. - Intermediate Technology Development Group. 1991.
- *Micro-hydro design manual. A guide to small-scale water power schemes.* - A. Harvey. Intermediate Technology Development Group. 1993.
- *Renewable Energies.* - Climate Action Network Central and Eastern Europe (CAN CEE).
<http://www.cancee.org/ren/ren.html>
- *The power guide.* Hulscher, Fraenkel - Intermediate Technology Publications/Technology and Development Group, University of Twente. 1994.
- *Water and Energy.* - Unesco.
http://www.unesco.org/water/wwap/facts_figures/water_energy.shtml
- *Hydraulic ram pumps. Technical brief.* - Intermediate Technology Development Group.
http://www.itdg.org/html/technical_enquiries/technical_briefs.htm
- *Hydraulic rams* - TU Delft/Cicat. 1998

cursus Duurzame Energie in ontwikkelingslanden



Bundel behorende bij de cursus.

Mei 2003

Uitgegeven door: studievereniging MONSOON en de Werkgroep OntwikkelingsTechnieken, Universiteit Twente

Werkgroep OntwikkelingsTechnieken (WOT)

Universiteit Twente

postbus 217

7500 AE ENSCHEDE

Studievereniging MONSOON

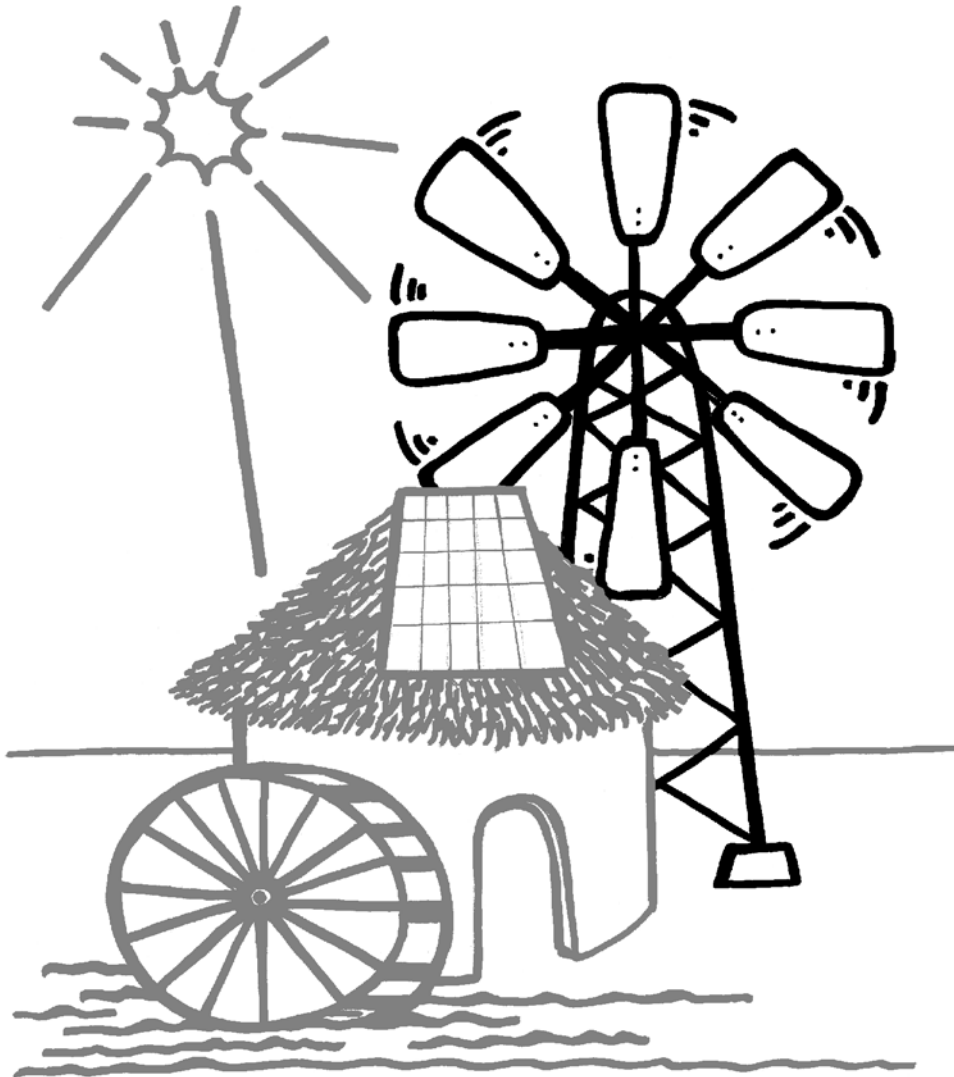
Universiteit Twente

postbus 217

7500 AE ENSCHEDE

Hoofdstuk 3

Windenergie



cursus Duurzame Energie in ontwikkelingslanden
samengesteld door Rink Glazema

3. WINDENERGIE	2
3.1 INLEIDING	2
3.1.1 <i>Hoe de wind waait</i>	2
3.1.2 <i>Geschiedenis van windenergie</i>	3
3.1.3 <i>Voor- en nadelen van windenergie</i>	4
3.1.4 <i>Vermogen van de wind</i>	4
3.1.5 <i>Windsnelheid</i>	5
3.2 WINDMOLENS	7
3.2.1 <i>Inleiding</i>	7
3.2.2 <i>Onderdelen van een windmolen</i>	7
Verschillende types windmolens	7
Kruien	8
Stormbeveiliging	8
Toren	9
3.2.3 <i>Windmolenterminologie</i>	9
Vermogens coefficient Cp.....	9
De snellopendheid	10
De ontwerp windsnelheid	11
Andere belangrijke windsnelheden	12
De vermogenscurve	13
3.3 WINDPOMPEN	15
3.3.1 <i>Inleiding</i>	15
3.3.2 <i>Pompen</i>	15
De zuigerpomp	15
De Touwpomp	16
Enkele andere pompen	17
De juiste pomp kiezen	17
3.3.3 <i>Opbrengst</i>	18
Vermogen en debiet.....	18
Waterbronnen	18
3.3.4 <i>Opslag</i>	19
Back-up energie-voorziening	19
3.3.5 <i>Haalbaarheid</i>	20
Technische Aspecten	20
Economische aspecten	20
Sociale aspecten.....	20
3.3.6 <i>Overbrenging</i>	21
3.3.7 <i>Toepassingen</i>	21
3.4 WINDGENERATOREN.....	22
3.4.1 <i>Inleiding</i>	22
3.4.2 <i>Generatoren</i>	22
Autodynamo's	22
Asynchrone generatoren	22
Permanent magneet generatoren (PMG's)	23
3.4.3 <i>Overbrenging</i>	23
3.4.4 <i>Opbrengst</i>	23
3.4.5 <i>Opslag</i>	24
3.4.6 <i>Toepassingen</i>	25
3.4.7 <i>Haalbaarheid</i>	25
Technische aspecten	25
Economische aspecten.....	25
3.5 ONDERHOUD	26
3.6 LITERATUUR	27

3. Windenergie

3.1 Inleiding

Wind is een onuitputtelijke bron van energie. Het lijkt nergens vandaan te komen en het lijkt nergens heen te gaan, maar toch is het er altijd. Al eeuwen lang maakt de mens gebruik van deze duurzame vorm van energie. Denk maar eens aan de Vikingen die met hun zeilschepen de zeeën bevoeren. Toen in de 7^e eeuw na Chr. de eerste windmolens werden gebouwd in China en Perzië bleek de wind nuttig te zijn voor een veelvoud van toepassingen, van het malen van graan tot het droogleggen van plassen en meren.

Hoewel tegenwoordig windenergie naar de achtergrond lijkt te zijn verdreven door de energiewinning uit fossiele brandstoffen, zal het door zijn permanente en goedkope karakter met name in ontwikkelingslanden een belangrijke rol blijven spelen. Naast de grote elektriciteitsopwekkende windturbines die we in het westen vooral kennen, bewijzen de kleinschalige windmolens hun nut maar al te goed bij hele elementaire processen (irrigatie, watervoorziening en laagpotentiële stroomopwekking). In dit hoofdstuk gaan we in op deze kleine windmolens, toegepast in ontwikkelingslanden.

Windenergie kan worden aangewend voor verschillende doeleinden. Ruwweg zijn er twee belangrijke toepassingen: het gebruik van windmolens voor het opwekken van elektriciteit (windgenerators) en voor het oppompen van water (windpompen). Daarnaast kan windenergie worden toegepast voor het aandrijven van werktuigen, bijvoorbeeld voor het malen van graan (oude bekende toepassing in Nederland) of het aandrijven van een houtzagerij. In dit hoofdstuk worden alleen de windpomp en de windgenerator besproken. In de rest van dit hoofdstuk zal achtereenvolgens worden ingegaan op de wind (§1), de windmolen in het algemeen (§2), de windpomp (§3) en de windgenerator (§4). Als laatste komt nog het onderhoud (§5) van windmolens aan bod.

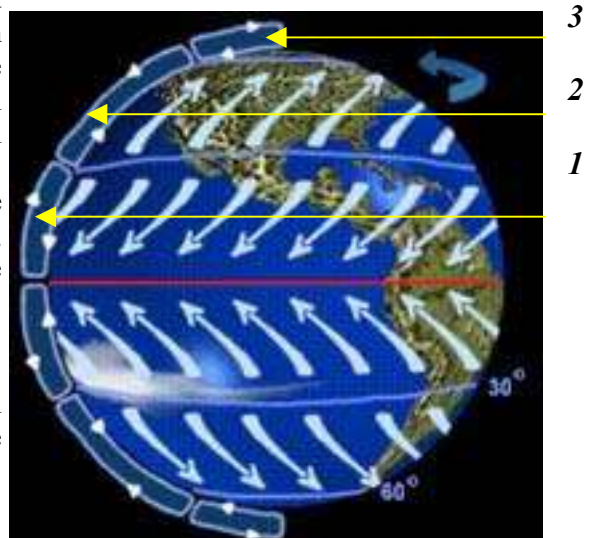
3.1.1 Hoe de wind waait

Waar komt de wind eigenlijk vandaan? Uiteindelijk wordt de wind veroorzaakt door de zon. Zonnestralen verwarmen de aarde die op haar beurt de lucht verwarmt. Warme lucht wil opstijgen en geeft daardoor een lagere luchtdruk. De lucht koelt af, wordt zwaarder en zal daardoor dalen. Het resultaat is een gebied met hogere luchtdruk. Door temperatuurverschillen ontstaan er dus verschillen in luchtdruk. De lucht zal zich verplaatsen van hogere naar lagere luchtdruk en daardoor ontstaat er wind.

Doordat de zon de aarde ongelijkmatig verwarmt, begint de wind in de atmosfeer te bewegen. De warme lucht van de evenaar wordt naar de polen gebracht en de koude poollucht naar de evenaar. Deze circulatie zorgt ervoor, dat de polen niet te koud en het gebied rond de evenaar niet te warm worden. De lucht beweegt echter niet rechtstreeks van de evenaar naar de polen en terug. De wind wordt beïnvloed door het draaien van de aarde. De wind die van de evenaar naar het noorden waait, wordt een beetje naar het oosten gedraaid door het draaien van de aarde. De warme lucht die van de evenaar naar de polen wordt geblazen, koelt af. Op 30° noorder- en zuiderbreedte daalt de lucht terug naar het aardoppervlak. Niet al de lucht wordt van daaruit teruggeblazen naar de evenaar. Het rondje dat door de wind geblazen wordt, wordt een cel genoemd. Er zijn op aarde drie van deze cellen.

de Hadley cel (1)

De cel ligt tussen de evenaar en 30° noorder- en zuiderbreedte. De wind aan de oppervlakte van de aarde in deze cel wordt passaatwind genoemd.



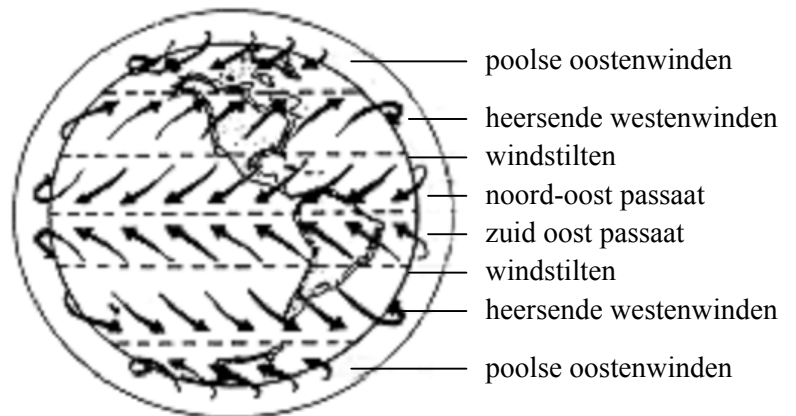
de Ferell cel (2)

De cel ligt tussen de 30 en 60 ° noorder- en zuiderbreedte. De wind in deze cel is in de winter sterker. De lucht draait bij de 30° grens, en waait naar de polen. Bij 60° stijgt de lucht op en waait terug naar de 30° grens. Niet alle lucht waait terug. Een deel van de lucht uit de Ferell cel wordt opgenomen in de Poolcel.

de Poolcel (3)

De Poolcel ligt op de polen. Tot 60° noorder- en zuiderbreedte. Op 60° stijgt de lucht op, boven de pool daalt de lucht. De winden in deze cel zijn normaal gesproken koud en droog.

Zoals hiervoor is beschreven buigt de draaiing van de aarde de luchtstromen af. De winden naar de evenaar toe komen daardoor uit het oosten, de zgn. *passaatwinden*. Tussen de 30° en 60° noorder- en zuiderbreedte komt de lucht van warme tropische gebieden en koude poolgebieden bij elkaar. Hierdoor kan het weer snel veranderen, de ene keer droog en warm, de andere keer nat en koud. De wind in deze gebieden komt meestal uit het westen. Dit zijn zgn. *heersende winden*. Door o.a. bergen, bewolking, kustlijnen e.d. worden deze winden afgebogen. In vele gebieden zal de windrichting dan ook variëren.



Mondiale winden

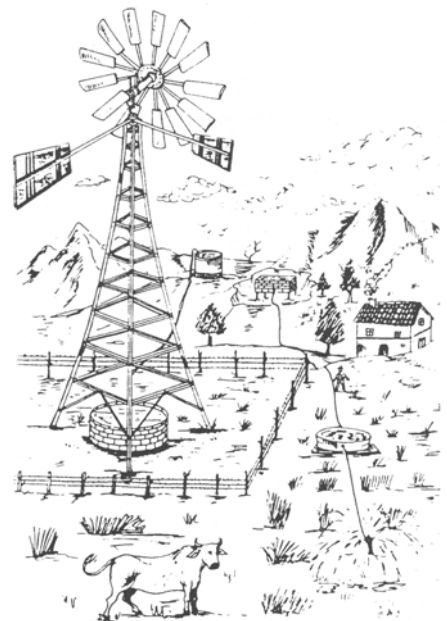
De wind op een bepaalde locatie is afhankelijk van zowel *mondiale* als *locale* winden.

Mondiale winden zijn steeds terugkerende winden die over grote gebieden tegelijkertijd waaien. Ze worden o.a. veroorzaakt door de draaiing van de aarde, de draaiing van de aarde om de zon en door de enigszins ronde vorm van de aarde. Lokale winden zijn afhankelijk van het landschap. Een goed voorbeeld zijn bergachtige gebieden, die de wind sterk kunnen beïnvloeden.

3.1.2 Geschiedenis van windenergie

Windenergie heeft zijn nut in het verleden maar al te goed bewezen. Al eeuwen wordt windenergie gebruikt bij zeilboten, het pompen van water, het malen van zaden en graan en tegenwoordig ook voor het opwekken van elektriciteit.

De eerste windmolens werden gebruikt in Perzië (het huidige Iran) in de 5^e eeuw na Christus, voor het vermalen van graan. Vanaf daar verspreidde het gebruik van windmolens zich door de Islamitische wereld. In de 11^e eeuw na Chr. werden windmolens intensief gebruikt in het hele Midden Oosten en in de 13^e eeuw werden ze ook geïntroduceerd in Europa. Tijdens de Middeleeuwen hebben ze een belangrijke rol gespeeld bij het malen van graan, het zagen van hout en natuurlijk...het voor Nederland zo kenmerkende droogmalen van land. Maar in het begin van de 19^e eeuw, na de uitvinding van de stoommachine en de opkomst van fossiele brandstoffen, ging de populariteit en de ontwikkeling van windmolens met rasse schreden achteruit. Ondanks dat zijn eind 19^e eeuw in Amerika veel windmolens in gebruik genomen voor de irrigatie van landbouwgrond en de watervoorziening voor vee. De oliecrisis van 1973 zorgde echter voor een hernieuwde interesse in windenergie omdat de ooit zo goedkope fossiele brandstoffen enorm duur werden.



Traditionele toepassing van een windmolen op een boerderij

Tegenwoordig heeft windenergie door de toenemende bezorgdheid over het milieu een plek verworven in veel overheidsprogramma's. Waterpompende windmolens worden nog steeds wereldwijd veel gebruikt. Verkoopcijfers wijzen op een wereldwijde verkoop van 5.000 tot 10.000 waterpompende windmolens per jaar. De markt voor elektriciteitsgenererende windmolens is snel groeiend, vooral in Europa, waar momenteel enorme turbines van enkele megawatts elektriciteit per molen aan het net leveren. De installatie van kleinere windmolens in ontwikkelingslanden neemt ook aanzienlijk toe. Op afgelegen plaatsen bijvoorbeeld, waar geen elektriciteitsaansluiting is of de prijs ervan onacceptabel hoog is, doen kleinschalige windgeneratoren het goed. Vooral de kleine (50W) *stand-alone* batterij-opladende windmolens nemen aanzienlijk in aantal toe.

3.1.3 Voor- en nadelen van windenergie

De voornaamste voordelen van windenergie zijn:

- de meeste technologie op het gebied van windenergie is oud en goed ontwikkeld;
- windturbines opereren automatisch, vragen weinig onderhoud en kunnen daardoor voor lange tijd zonder nieuwe investeringen;
- er is geen brandstof nodig, waardoor de gebruikskosten erg laag zijn;
- de technologie is eenvoudig en robuust;
- windmolens kunnen in ontwikkelingslanden zowel geheel als gedeeltelijk worden geproduceerd (bijvoorbeeld de kop geïmporteerd en de toren lokaal geproduceerd);
- er wordt geen CO₂ of andere schadelijke bij-producten geproduceerd.

Enkele nadelen van windenergie zijn:

- afhankelijk van de geografische ligging en lokale geschiktheid;
- de krachtvoorziening kan aanzienlijk variëren waardoor er opslag nodig is (zoals waterreservoirs of batterijen);
- in perioden met lage windsnelheden, kan het vermogen van de windturbines te laag zijn om aan de vraag te voorzien. Een back-up systeem is dan nodig (bijv. een handpomp, dieselpomp of diesel generator), die de kosten dan weer verhogen;
- niet overal is de potentiële markt groot genoeg om de technische kennis en apparaten te ondersteunen die nodig zijn voor een eenvoudige uitvoering;
- de aanschafkosten zijn vaak hoog in vergelijking met alternatieven zoals een dieselgenerator. Dit maakt windenergie een onaantrekkelijke investering voor kapitaalarme mensen, ondanks de mogelijk lagere kosten op lange termijn.

3.1.4 Vermogen van de wind

Het vermogen van de wind door oppervlak A is afhankelijk van de windsnelheid (m/s) en de luchtdichtheid ρ . De kinetische energie (bewegingsenergie) per seconde ofwel het kinetische vermogen van wind wordt in formule weergegeven door:

$$P_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{W}) \quad \text{waarbij} \quad \begin{array}{l} \rho = \text{dichtheid van lucht} \approx 1,2 \text{ kg/m}^3 \\ A = \text{oppervlakte in m}^2 \\ v = \text{windsnelheid in m/s} \end{array}$$

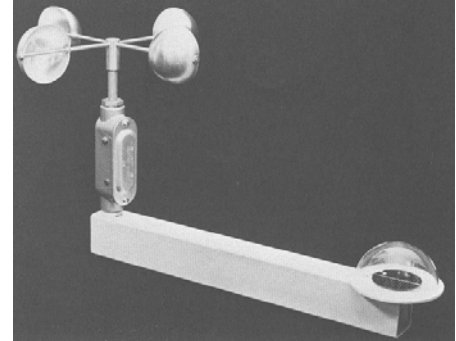
In onderstaande tabel zijn voor een aantal windsnelheden het bijbehorende energieaanbod berekend bij een aangenomen luchtdichtheid van 1,2 kg/m³.

Windsnelheid in m/s	Beaufort	Energieaanbod in W/m ²
3	2 zwakke wind	16,2
5	3 matige wind	75
10	5 vrij krachtig	600
15	7 harde wind	2025
20	9 storm	4800

3.1.5 Windsnelheid

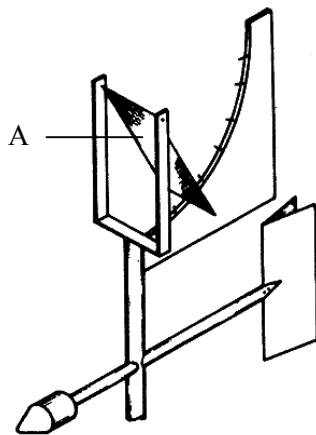
Uit de vorige tabel blijkt duidelijk de grote invloed van de windsnelheid op het potentiële vermogen van de wind. De derdemacht betekent dat, als de windsnelheid op een bepaalde locatie verdubbelt, de energie in de wind 8 keer zo hoog wordt! Het moge duidelijk zijn dat goede windgegevens noodzakelijk zijn om na te gaan hoeveel vermogen uit de wind gehaald kan worden.

De windsnelheid kan worden gemeten met een anemometer (zie figuur hiernaast). De anemometer bestaat uit drie of vier halve, holle bollen die bevestigd zijn aan een verticaal draaibaar asje. Het toerental van het asje is een maat voor de windsnelheid.



Anemometer

Nog eenvoudiger, maar minder nauwkeuriger is de wildse vaan. Deze meter wordt in de wind gehouden met een windvaan. Plaat A is scharnierend opgehangen. Bij toenemende windsnelheid wordt de hoek tussen de plaat en de verticale stand steeds groter. De hoek is dus een maat voor de windsnelheid.



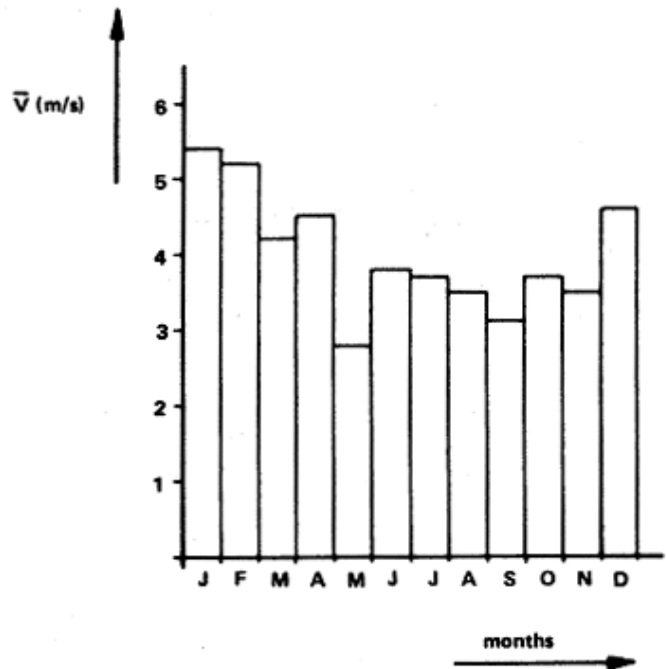
Wildse vaan

De windkracht wordt vaak uitgedrukt in de z.g. schaal van Beaufort. Deze schaal is ontwikkeld door de Ier Sir Francis Beaufort in 1805. Oorspronkelijk werd dit gebruikt om windsnelheden op zee uit te drukken, maar nu wordt hij ook op land gebruikt. De windkracht wordt op 10 meter boven land gemeten. In onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de schaal van Beaufort.

Windkracht	Beschrijving	Windsnelheid in m/s
0	Windstil	< 0.5
1	Lichte wind	0.5-1.5
2	Lichte wind	2-3
3	Matige wind	4-5
4	Matige wind	6-8
5	Vrij krachtige wind	9-10
6	Krachtige wind	11-13
7	Harde wind	14-17
8	Stormachtige wind	18-20
9	Storm	21-24
10	Zware storm	25-28
11	Zeer zware storm	29-33
12	Orkaan	> 33

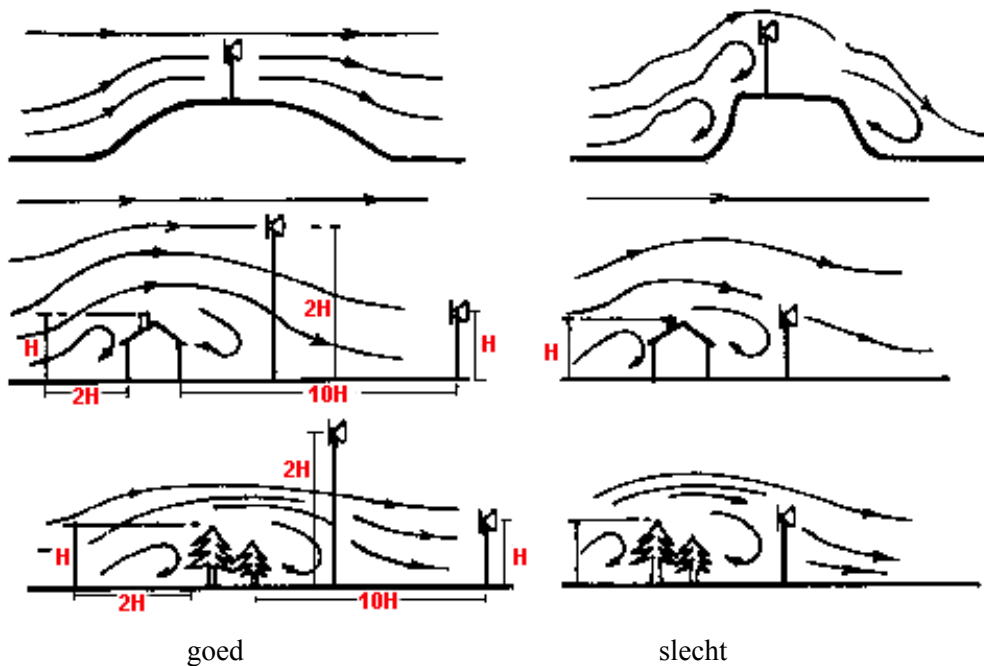
Voor het vaststellen van toepassingen voor windenergie is het vaak zinnvoller om de gemiddelde jaarlijkse windsnelheid op een bepaalde plek te weten. Dit kan bijvoorbeeld worden opgevraagd bij een weerstation, bij een universiteit of een vliegveld in de buurt. Hierbij dient wel rekening te worden gehouden met het feit dat bijvoorbeeld vliegvelden op relatief vlakke, dus winderige locaties liggen, waardoor de windsnelheid niet representatief hoeft te zijn voor de regio. In ontwikkelingslanden doen weerstations vaak windmetingen voor landbouwdoeleinden, waarbij ze de windsnelheid meten op 2 meter boven de grond. Aangezien de rotor van een windmolen een stuk hoger zit (vaak hoger dan 6 meter) zijn deze gegevens niet altijd geschikt voor windenergie toepassingen.

In sommige gevallen kan het belangrijk zijn om ook de verdeling van de wind over de seizoenen te weten, bijvoorbeeld voor een wateroppompende windmolen. Het kan zijn dat het droge seizoen ook het seizoen is met weinig wind. In dat geval is de gemiddelde jaarlijkse windsnelheid geen goede graadmeter, maar is de gemiddelde windsnelheid in het droge seizoen van belang. Hiernaast is een voorbeeld te zien van de verdeling van de windsnelheid over een jaar.



Voorbeeld van een verdeling van de gemiddelde windsnelheid per maand over een jaar

Voor het selecteren van een goede plek voor een windmolen, komt er echter meer kijken dan alleen de gemiddelde windsnelheid en de seizoensverdeling. De geschiktheid voor toepassingen voor windenergie zijn erg locatie-specifiek. Het is dan ook vaak nodig om ter plekke uitgebreide windmetingen te doen (bijvoorbeeld met een anemometer). Heuvels, bomen en andere obstakels kunnen een grote invloed hebben op de stroming van de wind zoals in onderstaande figuur is te zien.

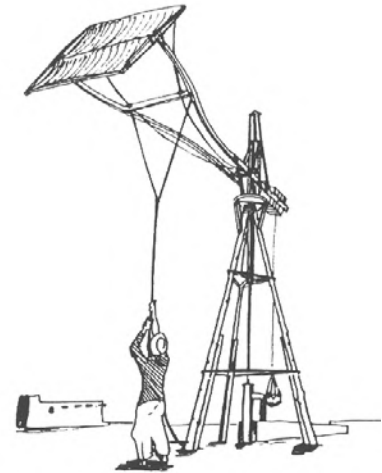


Invloed van obstakels op de stroming van de wind

3.2 Windmolens

3.2.1 Inleiding

In een windmolen wordt kinetische energie van de lucht omgezet in mechanische energie. Deze mechanische energie kan gebruikt worden om een werktuig aan te drijven, bijvoorbeeld een generator, een pomp of een graanmolen. Dit geschiedt doormiddel van één of meer wieken. Deze worden door de wind in beweging gezet. Meestal bewegen de wieken zich in een ronddraaiende beweging. In dit geval wordt de ronddraaiende constructie van de wieken de rotor genoemd. Een uitzondering vormt de zgn. *flapping vane* windpomp. Deze ‘molen’ heeft geen rotor maar een arm met een scharnierende vaan, die door de wind op en neer wordt bewogen.



Flapping vane windpomp

3.2.2 Onderdelen van een windmolen

De belangrijkste onderdelen van een windmolen zijn:

- **De toren.** Deze zorgt ervoor dat de molen hoog boven de grond zit en daardoor goed wind vangt.
- **De rotor.** Deze vangt de wind en gaat daardoor draaien, en zet de bewegingsenergie in de wind zo om in mechanische energie. De rotor wordt gevormd door een of meerdere wieken.
- **Belasting.** Hierin wordt de energie die wordt gevangen door de rotor nuttig gebruikt. Dit kan bijvoorbeeld een pomp of een elektrische generator zijn.
- **Overbrenging.** Deze zorgt ervoor dat de rotor en de generator of pomp aan elkaar gekoppeld worden. Dit kan bijvoorbeeld een tandwielkast of een krukas zijn, soms is alleen een as voldoende.
- **Een installatie om de windmolen op de wind gericht te houden.** Voor kleine windmolens in ontwikkelingslanden is dit meestal een vaan, maar er zijn ook andere mogelijkheden.
- **Een stormbeveiliging.** Deze moet ervoor zorgen dat de krachten op de windmolen beperkt worden bij harde wind. Hier zijn verschillende mogelijkheden voor.

Verschillende types windmolens

Er zijn in de loop der tijd talloze types windmolens ontwikkeld. Hieronder worden een aantal types kort besproken.

De horizontale as windmolen

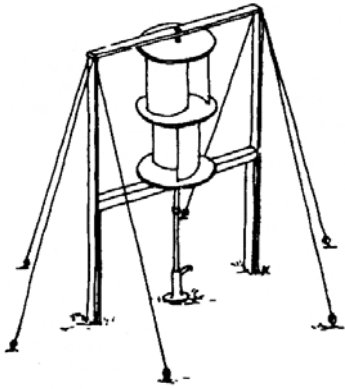
Dit is waarschijnlijk het meest bekende type windmolen. Dit type komt met verschillende aantallen wieken voor. Degenen met weinig wieken worden vooral gebruikt voor elektriciteit opwekken, die met veel wieken voor het oppompen van water.

De verticale as windmolens

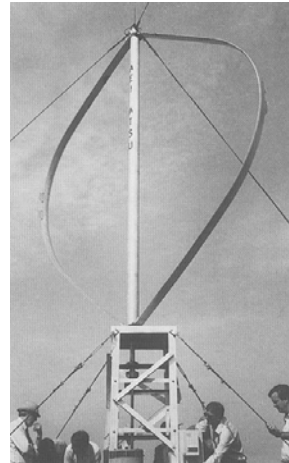
De verticale as windmolens zijn verruit in de minderheid, toch worden ze hier kort genoemd. De twee belangrijkste types zijn de Darrius rotor en de Savonius rotor. Beide hebben als voordeel dat de windrichting niet uitmaakt voor de werking, ze hoeven dus niet te kruien. De Savonius-rotor is erg inefficiënt en de draaisnelheid is beperkt. De Darrius heeft als nadeel dat het niet uit zichzelf begint te draaien. Dit kan opgelost worden door er een kleine Savonius-rotor aan te koppelen.

Overige types

Naast de genoemde types, die nog redelijk vaak voorkomen zijn er nog allerlei andere ideeën geweest, bijvoorbeeld om een trechter voor een windmolen te zetten zodat de wind geconcentreerd wordt. Het is echter over het algemeen makkelijker om de wieken van de rotor te verlengen, al zal de molen dan wel een lager toerental hebben. Er zijn wildere ideeën zoals een wagen met een zeil met een generator aan de wielen.



Savonius rotor



Darrieus rotor

Kruien

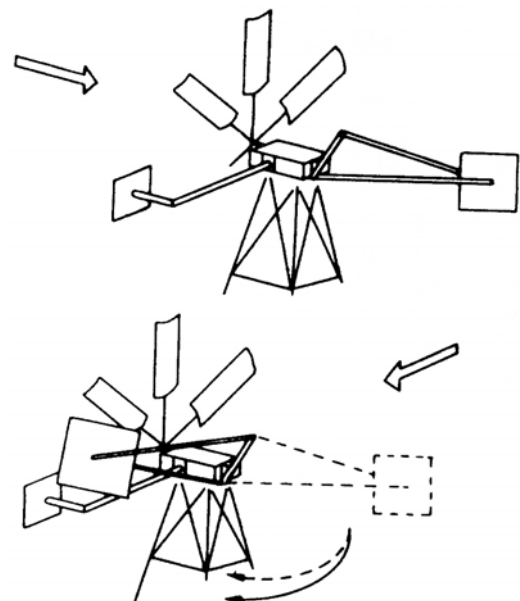
Omdat de wind niet altijd uit dezelfde richting komt, betekent dit dat de molen moeten kunnen draaien, dit heet kruien. Verticale as windmolens werken bij iedere windrichting, zij hoeven dus niet te kruien. Er zijn verschillende systemen ontwikkeld om een windmolen op de wind gericht te houden. De meeste Oudhollandse molens worden met de hand op de wind gezet, het is echter handiger om dat automatisch te laten gebeuren. Bij kleine windmolens gebeurt dit meestal met een vaan achter de rotor.

Enkele manieren om te kruien:

- Handkruien; Dit wordt vooral toegepast waar een nagenoeg constante windrichting heerst. Indien de windrichting te veel afwijkt, wordt de rotor met de hand in de juiste stand gezet.
- Door een windvaan; De windvaan houdt de rotor op de wind doordat de vaan zichzelf opstelt in de windrichting. In deze stand ondervindt de vaan de minste luchtweerstand.
- Windservo; Deze bestaat uit een kleinere rotor (de kruimolen) die haaks op de rotor is geplaatst. Wanneer de rotor niet loodrecht op de wind staat, dan vangt de kruimolen wind waardoor die zal gaan draaien. De kruimolen verdraait de stand van de rotor via een overbrenging, totdat deze weer loodrecht op de wind staat. De kruimolen vangt dan geen wind meer en stopt.
- Door het zelfrichtend effect van de rotor. De rotor is hierbij achter de toren opgesteld. De wind houdt de rotor dus in de goede positie.

Stormbeveiliging

Bij hoge windsnelheden worden de krachten op de windmolen erg groot. Tenzij de molen extreem zwaar en sterk (en dus duur) uitgevoerd wordt, zullen deze krachten op één of andere manier beperkt moeten worden. Dit houdt in dat het oppervlak en de draaisnelheid van de molen beperkt moeten worden. Vaak gebeurt dit door de molen uit de wind te draaien, zodat de wind er langs waait in plaats van er tegenaan. Er zijn verschillende methodes ontwikkeld om dit voor elkaar te krijgen. De vaan, die de molen normaal in de wind houdt kan bijvoorbeeld bij harde wind wegklappen. Windmolens zonder een stormbeveiliging hebben meestal een korte levensduur. Een molen moet beschermd zijn tegen hoge windsnelheden om de kracht op de rotor en het toerental van de rotor te begrenzen.



Voorbeeld van een stormbeveiliging

Er zijn vele soorten stormbeveiligingen. Globaal kan er een onderscheid gemaakt worden in:

- Handbeveiliging. Bij storm moet de molen met de hand stil gezet worden. Bijvoorbeeld bij een molen met zeilen als wieken worden de zeilen ingerold.
- Halfautomatische beveiliging. Bij te hoge windsnelheden beveiligt de molen automatisch, maar moet na de storm met de hand terugzet worden in de normale stand.
- Automatische beveiliging. De molen beveiligt zichzelf geheel automatisch bij storm en bij zachtere winden gaat de molen automatisch terug in de normale stand.

De werking van stormbeveiligingen kan als volgt zijn:

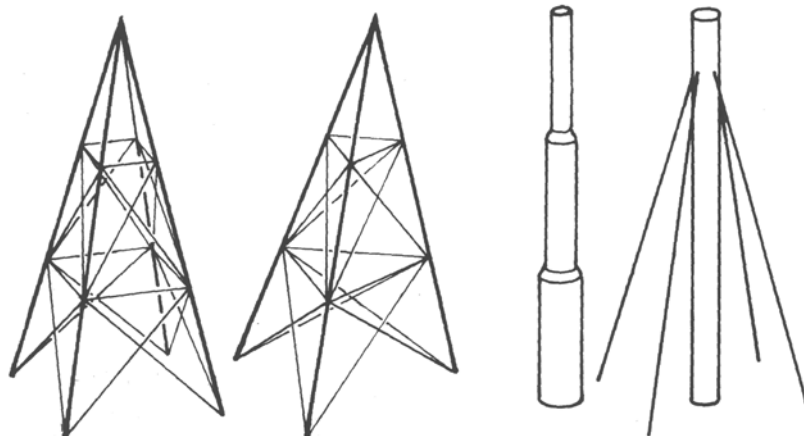
- De rotor draait bij hoge windsnelheden uit de wind, daardoor vangt die minder wind.
- Remkleppen op de wieken of op afzonderlijke armen. Bij hoge windsnelheden verdraaien de remkleppen dusdanig dat ze veel luchtweerstand veroorzaken en zodoende de rotor afremmen.
- Het blokkeren van de rotor zodat deze helemaal niet meer draait.

Toren

De rotor wordt meestal op een toren geplaatst om:

- Boven obstakels zoals begroeiing e.d., uit te komen en zodoende meer wind te kunnen vangen.
- Te voorkomen dat de draaiende wieken iemand kunnen raken.

Het gedeelte van de molen dat op de toren staat en waaraan de rotor is bevestigd wordt de kop genoemd. Er zijn meerdere torenconstructies mogelijk, zie onderstaande figuur.



Verskillende types torens

3.2.3 Windmolenterminologie

In dit gedeelte worden enkele termen uitgelegd, die veel worden gebruikt bij windmolens. O.a. de vermogenscoëfficiënt (C_p), de snelheid (λ) en de ontwerp-windsnelheid komen aan bod. Er zal met name in worden gegaan op de het belang van deze variabele bij het kiezen van de juiste molen.

Vermogens coëfficiënt C_p

De windmolen zet niet alle bewegingsenergie van de wind om in mechanische energie. Anders zou de lucht achter de windmolen geen bewegingsenergie meer hebben en dus stilstaan. Er zou dan geen lucht langs de rotor stromen. Het gedeelte van de windenergie dat wordt ‘onttrokken’ door de rotor wordt uitgedrukt in de vermogenscoëfficiënt C_p . Het vermogen van een windmolen kan op deze manier worden uitgedrukt in de formule:

$$P_{\text{rotor}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{W})$$

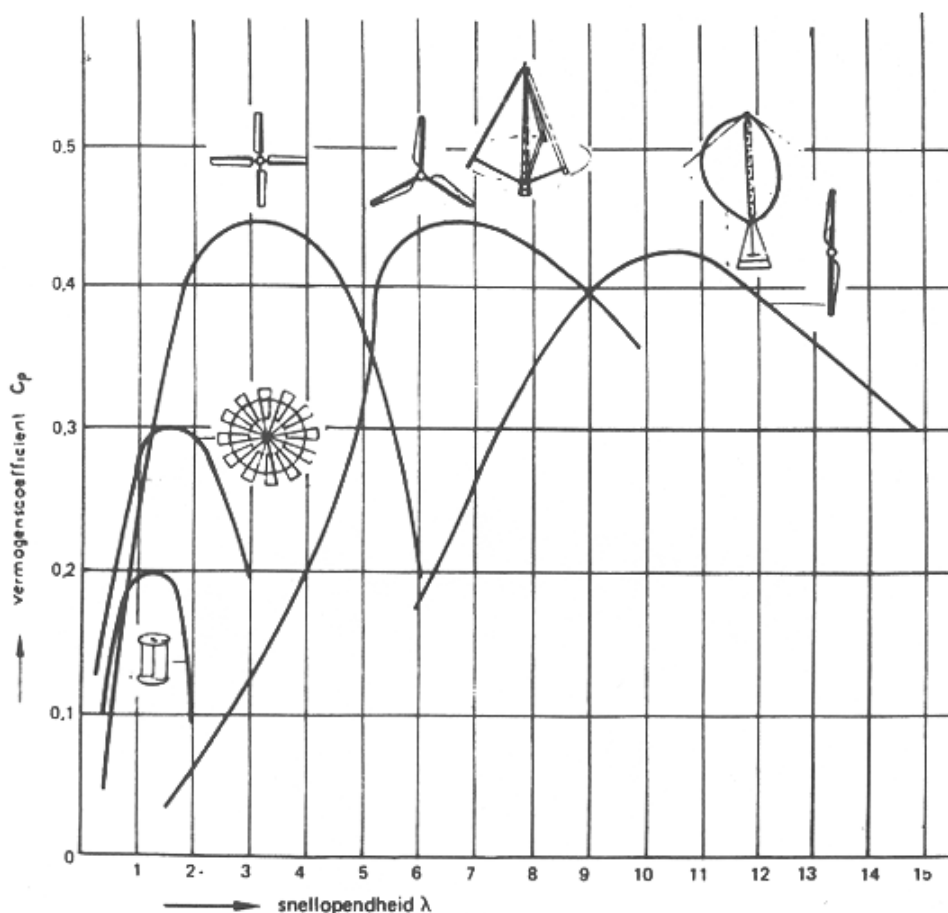
In deze formule is A het rotoroppervlak. Dit is niet gelijk aan het oppervlak van de wieken, maar aan het hele oppervlak die de wieken bestrijken als ze draaien.

De C_p -waarde geeft als het ware het rendement van de rotor weer en kan in theorie maximaal 0,59 bedragen. Door allerlei verliezen is deze in de praktijk lager. De maximale C_p -waarde van een type molen wordt bepaald door de vorm van de rotor. Deze C_p waarde treedt echter alleen op als de verhouding tussen windsnelheid en het rotortoerental precies goed is. Voor andere verhoudingen is de C_p -waarde lager. Dit verband kan weergegeven worden in een zogenaamde C_p - λ -curve. λ is de snellopendheid van de rotor: de snelheid van de punten van de wieken gedeeld door de windsnelheid.

$$\lambda = \frac{\text{snelheid van uiteindes van wieken}}{\text{windsnelheid}} = \frac{\text{toerental} \cdot \pi \cdot \text{Diameter}}{\text{windsnelheid}}$$

De snellopendheid

In onderstaande grafiek worden de C_p - λ curves van een aantal types windmolens gegeven.



C_p - λ curve

Ter illustratie kijken we naar het verschil tussen een rotor met veel wieken en één met drie wieken. Het eerste wat opvalt is dat de maximale C_p waarde van de veel-wieker een stuk lager is dan die van de drie-wieker. De veel-wieker is dus minder efficiënt. Toch worden molens met veel wieken veel gebruikt om water op de pompen. De reden daarvoor is dat de maximale waarde van C_p bij een lagere snellopendheid optreedt. Als beide windmolens dezelfde ontwerp-windsnelheid hebben (dit is de windsnelheid waarbij C_p maximaal is) dan zal de veel-wieker bij die snelheid relatief langzaam draaien en de drie-wieker snel. Er wordt ook wel gezegd dat de veel-wieker een langzaamloper is en de drie-wieker een snelloper.

Het vermogen van een windmolen is evenredig aan de draaisnelheid vermenigvuldigd met het koppel dat de molen levert. Bij een langzaamloper is de draaisnelheid klein, het koppel zal dus relatief groot zijn. Dit is belangrijk voor waterpompende windmolens. De pomp vraagt meestal een groot koppel om de waterkolom omhoog te kunnen tillen, de snelheid is van minder belang. Bij elektriciteitsopwekking is het tegenovergestelde het geval. De meeste generatoren werken het best met een hoge snelheid en een laag koppel. Daarom zijn elektriciteitsopwekkende windmolens meestal snellopers.

De ontwerpwindnelheid

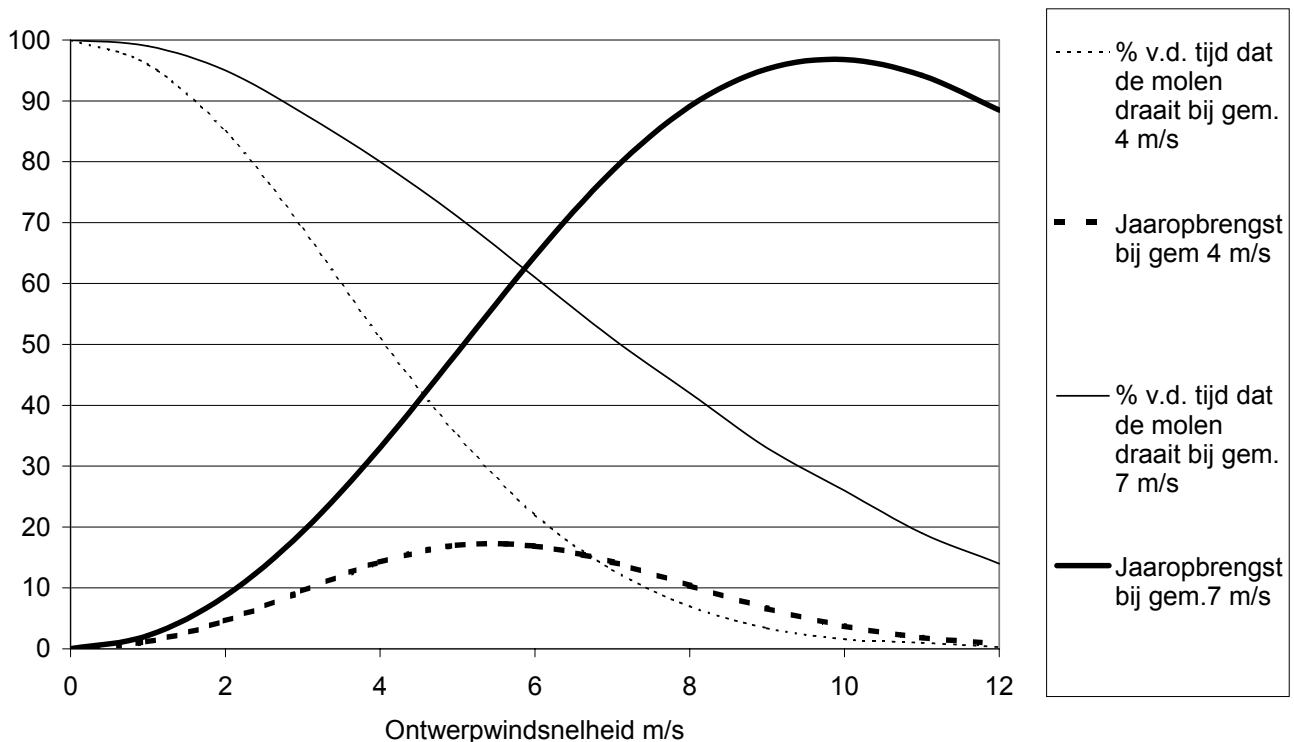
Zoals in de vorige paragraaf is besproken heeft ieder rotortype een maximale- C_p waarde, die optreedt bij een waarde van de snellopendheid. Die waarde kan echter zowel optreden bij een hoog toerental en hoge windsnelheid, als bij een laag toerental en een lage windsnelheid. Dit is afhankelijk van de belasting.

Neem bijvoorbeeld een waterpompende windmolen. Je kunt die molen gebruiken met een kleine pomp, die per omwenteling van de molen maar een klein beetje water oppompt. Dan zal de molen maar weinig wind nodig hebben om te beginnen met draaien (lage startsnelheid), en ook bij een vrij lage windsnelheid de meest gunstige snellopendheid bereiken. Gaat het harder waaien dan zal de molen minder efficiënt werken. Dezelfde molen met een grotere pomp zal bij lage windsnelheden minder efficiënt werken, en bij hogere windsnelheden efficiënter. Voor generatoren geldt iets dergelijks.

Bij het ontwerpen van een windmolen wordt meestal een ontwerpwindnelheid gekozen. De kenmerken van de belasting worden hier dan op aangepast, zodanig dat bij de ontwerpwindnelheid de windmolen maximaal efficiënt is.

Of de windmolen geschikt is voor een gebied met lage of hoge windsnelheid wordt vooral bepaald door de ontwerpwindnelheid. Het effect van de ontwerpwindnelheid op de opbrengst per jaar en op hoe vaak de windmolen draait is weergegeven in de onderstaande grafiek. Dit is twee keer gedaan, één keer voor een gemiddelde windsnelheid van 4 m/s en één keer voor 7 m/s. Deze grafiek is gemaakt voor een vereenvoudigde situatie en geldt dus niet voor alle windmolens en belastingen, toch geeft deze grafiek een indicatie van het effect van de ontwerpwindnelheid.

Verband tussen ontwerpwindnelheid en opbrengst en draaipercentage



Bij deze grafiek valt het volgende op te merken:

- De ontwerpwindnelheid waarbij de molen de maximale opbrengst per jaar oplevert, is niet gelijk aan de gemiddelde windsnelheid, maar iets hoger. Dat komt doordat de hogere windsnelheden veel energierijker zijn. Het is dus belangrijker dat de windmolen efficiënt is bij hoge windsnelheden dan bij lage windsnelheden.
- Als de ontwerpwindnelheid zo gekozen wordt dat de jaaropbrengst maximaal is, dan draait de molen maar ongeveer 25% van de tijd. Als de windmolen de enige bron van energie is, dan kan dit een probleem zijn. Bij een elektriciteitsopwekkende windmolen zijn dan bijvoorbeeld veel accu's nodig om in periodes met weinig wind toch elektriciteit te hebben. Het kan dan toch handiger zijn om een lagere ontwerpnelheid te kiezen.
- Als een windmolen is ontworpen voor een gebied met gemiddeld 4 m/s, dan zal die het ook doen bij een gemiddelde windsnelheid van 7 m/s. Hij zal echter lang niet zoveel opwekken als een molen die ontworpen is voor 7 m/s gemiddeld.
- Een windmolen met een ontwerpnelheid van 9 m/s, is ideaal voor een gebied met 7 m/s gemiddeld (als het gaat om de jaaropbrengst). Maar diezelfde windmolen in een gebied met 4 m/s zal bijna nooit werken en de jaaropbrengst zal zeer teleurstellen.

Dit geeft aan dat het zeker in gebieden met weinig wind belangrijk is om een windmolen te kiezen die daar ook voor ontworpen is. Ook geeft het aan dat het belangrijk is om schattingen van gemiddelde windsnelheden niet zomaar voor waar aan te nemen. Als die schattingen wat optimistisch waren, dan is dat desastreus voor de opbrengst van de molen.

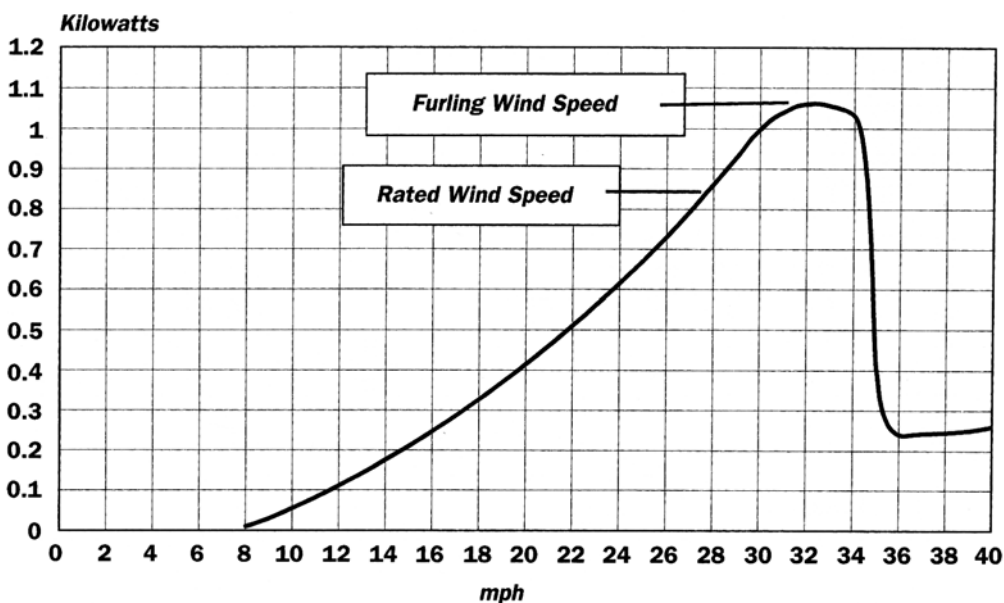
Andere belangrijke windsnelheden

De ontwerpwindnelheid geeft een indicatie of een windmolen geschikt is voor een bepaald gebied. Deze wordt echter meestal niet gegeven door fabrikanten. Wel wordt vaak de volgende windsnelheden gegeven:

- *Cut-in windspeed*: Dit is de windsnelheid waarbij de molen begint te produceren.
- *Rated windspeed*: Dit is de windsnelheid waarbij de molen de *rated-power* levert. Dit is het vermogen dat de fabrikant aangeeft op de windmolen. Vaak is dit het maximale vermogen, maar soms is het maximale vermogen nog wat hoger.
- *Furling windspeed*: Dit is de windsnelheid waarbij de stormbeveiliging in werking treedt. Daardoor neemt de opbrengst plotseling sterk af. Niet alle stormbeveiligingssystemen hebben een duidelijke *Furling windspeed*.
- *Cut-out windspeed*: Dit is de windsnelheid waarbij de windmolen ophoudt met werken, de stormbeveiliging is dan volledig in werking. Niet alle windmolens hebben een echte *cut-out windspeed*.
- *Survival windspeed*: Dit is de hoogste windsnelheid waarbij de molen nog heel blijft.

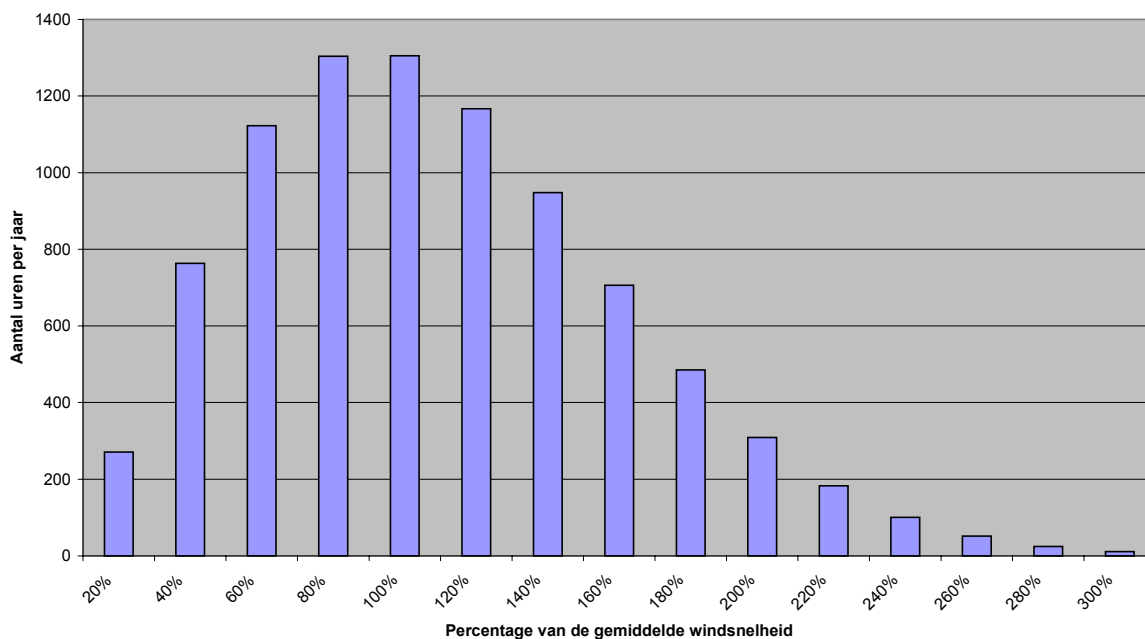
De vermogenscurve

In sommige gevallen wordt ook een vermogenscurve gegeven. Deze curve geeft bij iedere windsnelheid het vermogen. Hieronder staat een voorbeeld van zo'n curve. Aan de hand van deze curve kan een schatting gemaakt worden van de jaaropbrengst. Hiervoor is wel een windverdeling nodig. Als alleen de gemiddelde windsnelheid bekend is, kan een schatting worden gemaakt van de windverdeling met behulp van een Rayleigh-verdeling. De meeste windverdelingen lijken hier op. Deze verdeling is getoond onder de vermogenscurve.



Een vermogenscurve

De Rayleigh verdeling als benadering van het voorkomen van verschillende windsnelheden



Rayleigh verdeling

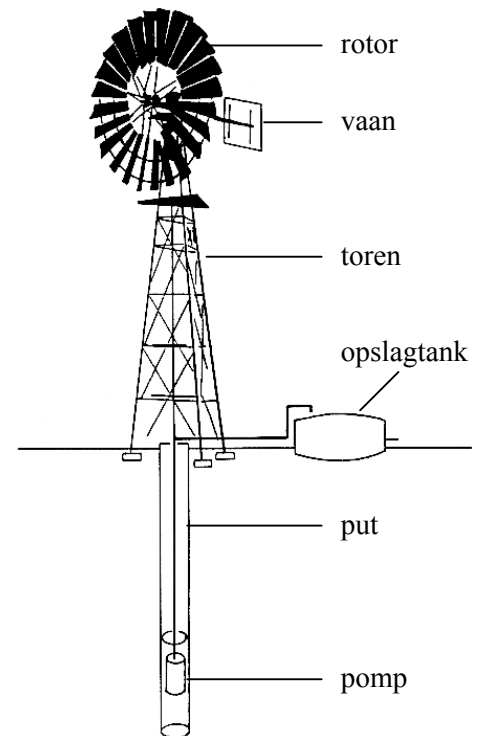
De verwachte jaaropbrengst kan berekend worden door een aantal windintervallen (bijvoorbeeld tussen 10 en 14 m/s) te kiezen, en per interval te bepalen hoeveel uur per jaar de windsnelheid binnen dat interval valt. Dan kan voor een windsnelheid in het midden van het interval (in het voorbeeld 12 m/s) uit de vermogenscurve afgelezen worden wat het vermogen bij die windsnelheid is. Dit kan dan vermenigvuldigd worden met het aantal uren per jaar en gesommeerd worden. Dit geeft de verwachte jaaropbrengst. In onderstaande tabel staat een voorbeeld. Hiervoor is de vermogenscurve van de vorige pagina gebruikt. Er is uitgegaan van een gemiddelde windsnelheid van 15 mph (mijl per uur) en een Rayleigh verdeling zoals op de vorige pagina.

Windsnelheid (Mph)	Percentage van de tijd Dat die windsnelheid optreedt	Aantal uren per jaar	Vermogen (Watt)	Energie
<8	20%	1752	0	0 kWh
8 tot 16	39%	3425,16	120	411 kWh
16 tot 24	28%	2409	430	1036 kWh
24 tot 30	9%	797,16	800	638 kWh
30 tot 34	3%	227,76	1030	235 kWh
34 tot 36	1%	61,32	600	37 kWh
>36	1%	87,6	250	22 kWh
Totaal				2378 kWh

3.3 Windpompen

3.3.1 Inleiding

Een windmolen kan gebruikt worden om water op te pompen. Een waterpompende windmolen wordt ook wel 'windpomp' genoemd. In ontwikkelingslanden is dit de meest gebruikte toepassing van windenergie. De figuur hiernaast geeft een beeld van de meest gebruikelijke vorm van windpompen: een windmolen met horizontale rotoras en een windvaan om het in de wind te richten. Het aantal bladen van de rotor van een windpomp varieert van 4 tot 24. De rotor is via een overbrenging gekoppeld aan een pomp, waardoor de draaiende beweging wordt omgezet in een pompende beweging. In deze paragraaf zullen eerst de meest gebruikte pompen worden besproken. Daarna wordt achtereenvolgens ingegaan op de opbrengst, de opslag, de overbrenging, haalbaarheid en de toepassingen van windpompen.

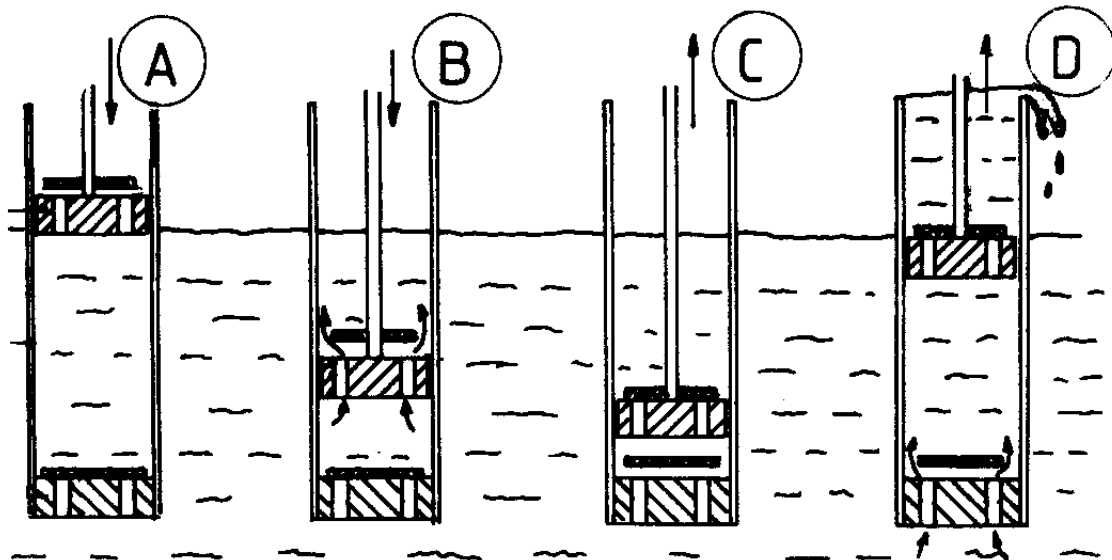


Waterpompende windmolen

3.3.2 Pompen

De zuigerpomp

Het meest toegepaste type pomp is de enkelwerkende zuigerpomp (zie onderstaande figuur). Deze pomp bestaat uit een zuiger, een cilinder en twee kleppen, namelijk de zuiger- en de voetklep. In A staat de zuiger in de bovenste stand en gaat omlaag. De zuigerklep gaat open en de voetklep wordt dichtgedrukt. In B gaat de zuiger omlaag waarbij het water door de zuiger stroomt. In C gaat de zuiger van de onderste stand omhoog. De zuigerklep wordt dichtgedrukt en de voetklep gaat open. In D drukt de zuiger het water omhoog en wordt 'nieuw' water aangezogen via de geopende voetklep. Hierna begint de cyclus opnieuw.



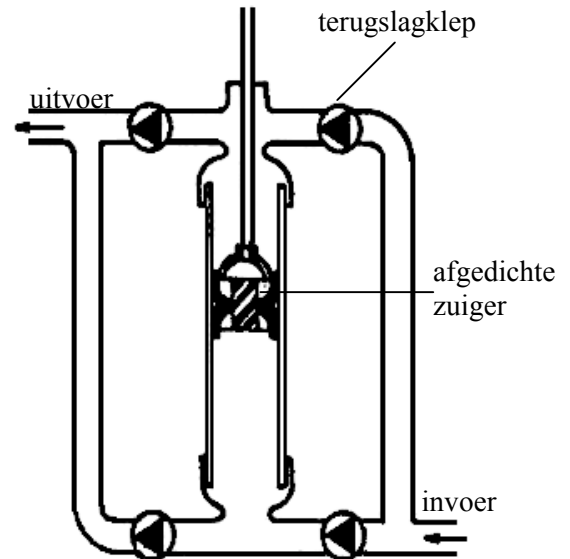
Werking enkelvoudige zuigerpomp

Een krukas zet de draaiende beweging van de rotor om in een op- en neergaande beweging voor de zuigerpomp. Een molen met deze pomp kan herkend worden aan het grote aantal wieken. (8 tot 24) Dit grote aantal wieken is noodzakelijk, omdat bij het op gang komen veel kracht nodig is. De hoek van de wieken ten opzichte van de wind is zodanig dat er veel koppel (kracht) en weinig toeren wordt

geleverd. De rotor draait langzaam vergeleken met andere typen en men spreekt daarom van een lage snelheid (zie §3.2.3). Soms wordt een vertragsmechanisme gebruikt (een soort versnellingsbak) om het geleverde koppel verder te vergroten. De startwindnelheid is door het grote aantal wieken laag, zodat bij weinig wind de rotor al draait en er water wordt gepompt.

Vooral in situaties waarbij een groot hoogteverschil moet worden overbrugd en de watervraag relatief laag is, wordt gekozen voor de zuigerpomp.

Naast enkelwerkende bestaan er ook dubbelwerkende zuigerpompen. Deze pompen het water zowel bij op- als neergaande bewegingen omhoog. Zij hebben een veel ingewikkelder kleppensysteem dan een enkelwerkende zuigerpomp, maar zorgen wel voor een beter verdeelde mechanische belasting. Dubbelwerkende zuigerpompen worden veel minder toegepast.

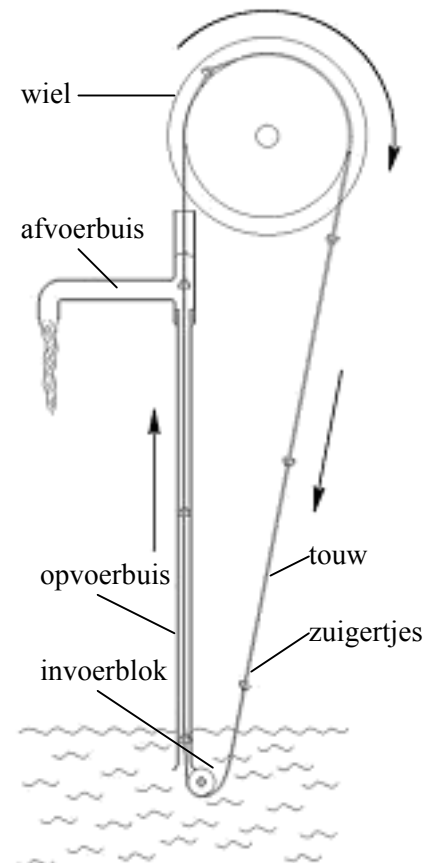


Werking dubbelwerkende zuigerpomp

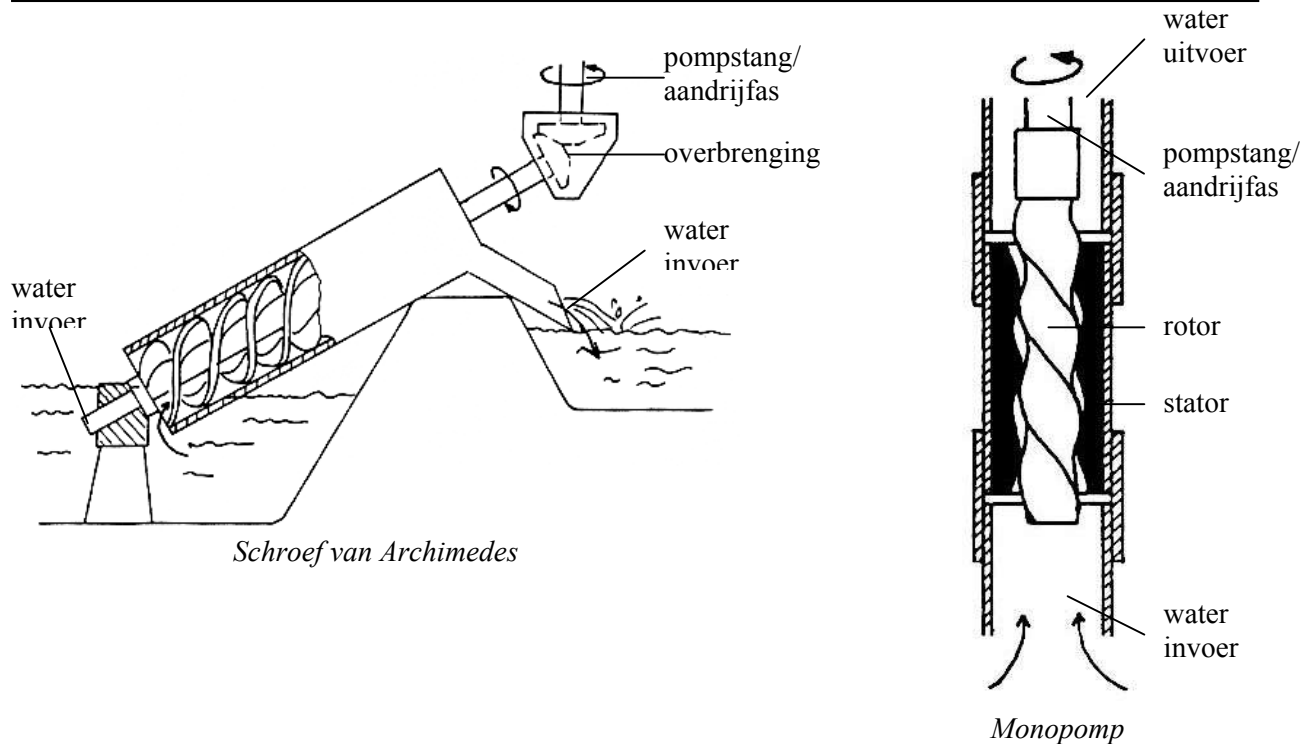
De Touwpomp

De touwpomp is een erg eenvoudig en goedkoop te bouwen pomp die voor een groot deel uit afval materiaal gebouwd kan worden. Juist door zijn eenvoud kan de touwpomp gebouwd en onderhouden worden door niet technisch onderlegde personen, hoewel enige praktische handigheid vereist is.

In de figuur hiernaast is de principe-opbouw van een touwpomp te zien. Een touwpomp bestaat uit een (opvoer)buis waardoor een touw loopt waaraan zuigertjes zijn bevestigd. De buis reikt aan de onderkant in het (grond)water en aan de bovenkant steekt hij een eind boven de grond uit. De zuigertjes die aan het touw zijn bevestigd passen met een kleine speling (0,2...0,5mm) in de buis. Door nu het touw door de buis te trekken, zal doordat de zuigertjes de buis min of meer afsluiten, een onderdruk worden gecreëerd waardoor water mee omhoog wordt genomen. Een waterfilmje tussen de zuiger en de buiswand zorgt voor de smering en draagt ook bij aan de afsluiting tussen de zuigertjes en de buis. Aan de bovenkant loopt het touw over een wiel waarmee het touw door de buis wordt getrokken. Aan de onderkant van de buis bevindt zich een constructie die er voor zorgt dat het touw soepel in de buis glijdt. De touwpomp kan met eenvoudige materialen worden toegepast tot een diepte van zo'n 40 meter. Hoe dieper het water zich bevindt des te kleiner de diameter van de opvoerbuisc moet zijn. Dit omdat er anders een te groot gewicht aan water aan het touw hangt en dit niet meer met de hand omhoog gepompt kan worden.



Werking touwpomp



Enkele andere pompen

Afhankelijk van de omstandigheden en de toepassing kan gekozen worden voor andere types pompen. In bovenstaande figuur staan voorbeelden van enkele pompen die worden aangedreven door een roterende pompstang. Het voordeel van deze types pompen is dat ze rustig werken en een continu debiet leveren, waardoor de krachten in de pompstang geen grote pieken vertonen.

De juiste pomp kiezen

Over het algemeen zijn zuigerpompen geschikter voor het overbruggen van grotere hoogteverschillen, bij een kleinere watertoevoer per tijdseenheid. Voor het pompen van water over een klein hoogteverschil (minder dan 2 meter) kunnen de *centrifugaalpomp* of de *schroef van Archimedes* geschikte opties zijn. Het kiezen van de meest geschikte pomp is echter van veel variabelen afhankelijk. Niet alleen het windregime, de benodigde watertoevoer en het hoogteverschil zijn van belang, ook de aanschafkosten en de mogelijkheid tot het zelf produceren spelen een rol. Een monopomp bijvoorbeeld is moeilijk te produceren en is daarmee niet geschikt voor lokale productie. Daarnaast speelt de betrouwbaarheid (de gevoeligheid voor beschadiging van de pomp) een aanzienlijke rol. Hoe vaak moet onderhoud of reparaties gepleegd worden en van welke aard zijn deze reparaties? Voor moeilijke reparaties is men al snel afhankelijk van een lokale service, terwijl voor het repareren van een touwpomp weinig specifieke technische kennis vereist is.

3.3.3 Opbrengst

Vermogen en debiet

Als de gemiddelde windsnelheid en het rotoroppervlak bekend zijn, kan het gemiddelde vermogen P van een waterpompende windmolen met de volgende vuistregel berekend worden.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{windpomp}} &= 0,1 \cdot A \cdot v_{\text{gem}}^3 && \text{(W)} \\
 A &= \text{rotoroppervlak} = \pi/4 \cdot D^2 && \text{(m}^2\text{)} \\
 D &= \text{rotordiameter} && \text{(m)} \\
 v_{\text{gem}} &= \text{gemiddelde windsnelheid} && \text{(m/s)}
 \end{aligned}$$

De waarde 0,1 in de formule gaat uit van een typische windmolen. In de praktijk kan deze waarde variëren van 0,05 tot 0,15. Voor een windpomp is het echter van meer belang om te weten hoeveel water per tijdseenheid gepompt kan worden, oftewel het debiet. Het maximale debiet Φ (gedefinieerd als de hoeveelheid water in m^3 per seconde) kan als volgt berekend worden.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{windpomp}} &= \Phi \cdot \rho_{\text{water}} \cdot g \cdot H && \text{(W)} \\
 \text{Waarin } \Phi &= \text{debiet} && \text{(m}^3\text{/s)} \\
 \rho_{\text{water}} &= \text{dichtheid van water} \approx 1000 && \text{(kg/m}^3\text{)} \\
 g &= \text{valversnelling} = 9,81 && \text{(m/s}^2\text{)} \\
 H &= \text{opvoerhoogte} && \text{(m)} \\
 \text{oftwel} &&& \\
 \Phi &= P_{\text{windpomp}} / (9810 \cdot H) && \text{(m}^3\text{/s)}
 \end{aligned}$$

Is nu de (dagelijkse, maandelijkse of jaarlijkse) gemiddelde windsnelheid bekend, dan is de water opbrengst globaal te berekenen met bovenstaande formule. Andersom kan, als de behoefte aan water bekend is, uitgerekend worden wat de minimaal benodigde rotordiameter is.

Voorbeeld: een windmolen met een diameter van 5 meter ($A \approx 20 \text{ m}^2$) in een regio met een gemiddelde windsnelheid van 5 m/s, levert volgens de formule 250 Watt op ($0,1 \times 20 \times 5^3$).

Met een bron van 10 meter onder de grond en een opslagtank 5 meter boven de grond, is het debiet $250 / (9810 \cdot 15) = 0,0017 \text{ m}^3\text{/s}$. Dit is gelijk aan $6,1 \text{ m}^3$ per uur of 50.000 m^3 per jaar.

Een handige formule om de dagopbrengst te berekenen is: $\Phi_{\text{dag}} = 0,69 \cdot v_{\text{gem}}^3 \cdot D^2 / H \text{ (m}^3\text{/dag)}$

Waterbronnen

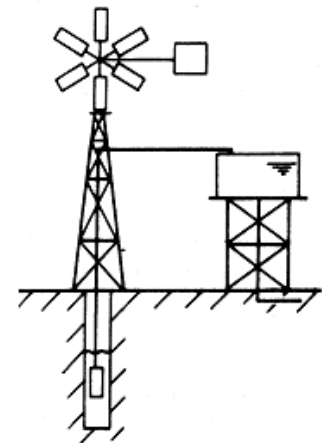
Voor de opbrengst van de molen is ook de capaciteit van de waterbron van belang. De bron kan een rivier zijn, een meer, een irrigatiekanaal, een put of een boorgat (grondwater). De capaciteit van de bron moet groter zijn dan die van de windpomp, om te voorkomen dat de bron droog komt te staan. Een pomp die regelmatig 'droog' pompt slijt snel en levert bovendien niks op.

De windmolen wordt over het algemeen direct boven de bron geplaatst. De hoeveelheid water die kan worden opgepompt per tijdseenheid hangt onder andere af van de diepte van het waterpeil in de bron. Hoe dieper geboord moet worden voor de bron, des te kleiner de diameter van het boorgat kan zijn. Deze diameter is bepalend voor de grootte van de pomp en de hoeveelheid water die opgepompt kan worden. Bronnen kunnen volgens onderstaande tabel op diepte worden ingedeeld:

	Aantal meters onder grondoppervlak	waterpompcapaciteit	kenmerken
Ondiepe bronnen	0 - 5	5 – 30 $\text{m}^3\text{/uur}$	Zijn meestal hand gegraven
Half-diepe bronnen	5 – 25	1 – 10 $\text{m}^3\text{/uur}$	De diameter van het boorgat varieert van 50 tot 150 mm en is bepalend voor de grootte van de pomp.
Diepe bronnen	> 25 (kan meer dan 100 zijn)	0,1 – 5 $\text{m}^3\text{/uur}$	

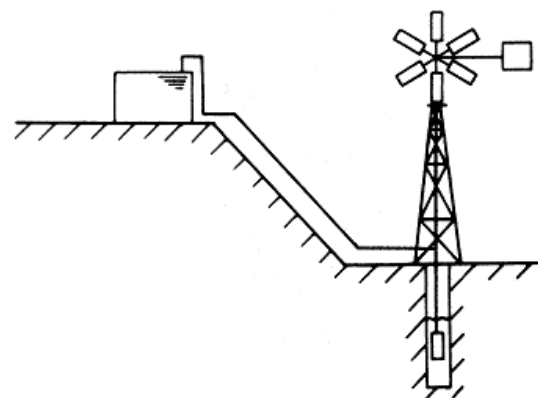
3.3.4 Opslag

Omdat wind over het algemeen een erg onregelmatige bron van energie is, is de opbrengst van een windpomp niet automatisch gelijk aan de behoefte. Behoeftte aan water bestaat niet alleen wanneer het waait, ook in windstille periodes zal er behoefte zijn aan water. Om ook in deze periodes aan de behoefte te kunnen voldoen is er opslag van water nodig. Het water dat de molen meer pompt dan er op dat moment nodig is, kan hiervoor gebruikt worden. Drinkwater voor mensen moet zodanig bewaard worden dat er geen vervuiling kan optreden. Het water kan dan bijvoorbeeld worden opgeslagen in een watertoren die goed is afgesloten voor eventuele vervuiling van buiten. Voor irrigatie of voor drinkwater van vee zijn de kwaliteitseisen niet zo streng. Het water kan hier in open voorraadtanks of in bekkens opgeslagen worden. In de figuren hiernaast staan voorbeelden van opstellingen van windpompen.



Windpomp met watertoren

De optimale opslagcapaciteit is niet zo eenvoudig te bepalen. Daarvoor zijn allereerst nauwkeurige windgegevens nodig, bijvoorbeeld van de uurlijkse gemiddelde windsnelheden. Verder is het nodig de behoefte aan water nauwkeurig te kennen en ook de kosten van opslag met verschillende capaciteiten. Zijn deze gegevens niet voorhanden, dan is men genoodzaakt een ruwe schatting te maken van de benodigde capaciteit. Een goede richtlijn voor irrigatie bijvoorbeeld is een opslagcapaciteit van 1 à 2 gemiddelde dagopbrengsten.

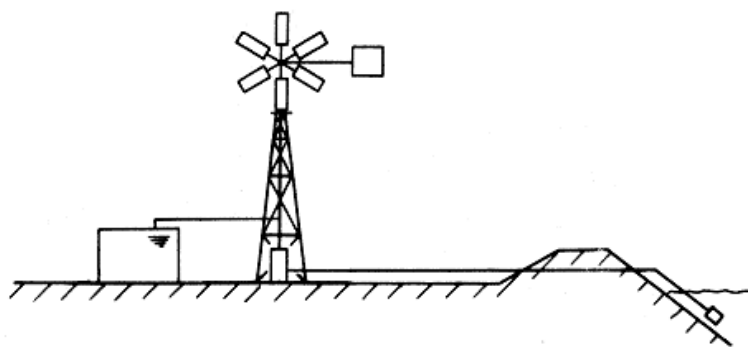


Opslagtank boven de windpomp

Back-up energie-voorziening

De berekeningen voor de opbrengst van een windpomp (§3.3.3.) leveren een gemiddelde jaarlijkse opbrengst. Echter, de wind waait niet gelijkmatig op de zelfde snelheid, waardoor de opbrengst gedurende een jaar aanzienlijk kan fluctueren. Er zullen dagen zijn dat er te weinig wind is om de molen te laten draaien, terwijl het op andere dagen zo hard kan waaien dat de molen voor de veiligheid uit de wind wordt gedraaid.

Voor een gedeelte kunnen deze fluctuaties worden opgevangen door opslagtanks, maar het is niet altijd economisch rendabel is om de opslagcapaciteit voldoende groot te maken voor een constante opbrengst door het jaar. De economische grootte van een opslagtank is eigenlijk nooit meer dan het watergebruik voor 3 dagen. Tijdens windstille periodes van meer dan 3 dagen is er dus een vervangende energievoorziening nodig, om te garanderen dat er genoeg water beschikbaar is. Een vaak voorkomende combinatie is de windpomp met een dieselmotor als back-up. De windmolen kan dan gezien worden als een besparing op de dure brandstof (deze moet geïmporteerd worden), maar is geen vervanging voor de dure generator zelf. Men zal na moeten gaan of de aanschaf- en onderhoudskosten van de windmolen en de opslagtank opwegen tegen de besparing aan de brandstofkosten.



Windpomp met aanvoerpijp over afstand

3.3.5 Haalbaarheid

De haalbaarheid is de kans van slagen op de beoogde baten van de molen. Voor de haalbaarheid zijn veel aspecten van belang, o.a. technische, economische en sociale aspecten

Technische Aspecten

Deze zijn vooral de lokaal aanwezige middelen zoals gereedschappen, materialen, reserve-onderdelen en kennis. Wordt de molen lokaal geproduceerd, dan zijn deze aspecten van groot belang bij de keuze voor het type molen. De constructie van de molen mag niet te ingewikkeld zijn, de materialen die voor de molen gebruikt worden, moeten zo veel mogelijk lokaal gekocht kunnen worden. Voor de nodige bewerkingen is een eenvoudig uitgeruste werkplaats vereist. De technische aspecten zijn ook van belang voor de installatie, het onderhoud en reparaties. Dit geldt ook voor windmolens die kant en klaar gekocht zijn. Het VLOM-concept (*Village Level Operation and Maintenance*) speelt een belangrijke rol. Doelstelling van dit concept is dat onderhoud en reparaties op dorpsniveau mogelijk zijn, dus door de gebruikers zelf uitgevoerd kunnen worden. De haalbaarheid wordt daardoor een stuk groter.

Economische aspecten

In een kosten-baten analyse moet een afweging worden gemaakt of de voordelen op wegen tegen de kosten en of de molen kan concurreren met andere vormen van watervoorziening. Factoren die hierbij een rol spelen zijn de aanschaf- en installatiekosten, de onderhouds- en reparatiekosten, de gebruikskosten, de levensduur en de opbrengsten.

Windpompen zijn erg moeilijk met elkaar te vergelijken, omdat ze vaak gemaakt zijn voor specifieke omstandigheden. Ze kunnen zijn ontworpen voor verschillende windsnelheden, voor verschillende hoeveelheden opgepompt water, etc. Een manier om windpompen onderling te vergelijken is te kijken naar de kosten per m² rotor. Als vuistregel voor de kosten van een windpomp kan gebruikt worden: \$400 per m² rotoroppervlak (rotordiameter < 5 m).

In de onderstaande tabel is een richtlijn weergegeven van de relatieve kosten van windpomp onderdelen.

Onderdeel	Klein (D = 2m)	Middel (D = 4m)	Groot (D > 6m)
Machine (kop, rotor, windvaan, overbrenging)	40%	60%	75%
Toren	50%	30%	20%
Pomp en pijpen	10%	10%	5%
Totale prijs (exclusief productiekosten)	100%	100%	100%

Tabel: Overzicht van de relatieve kostprijzen van de onderdelen van een windpomp van verschillende groottes.

Sociale aspecten

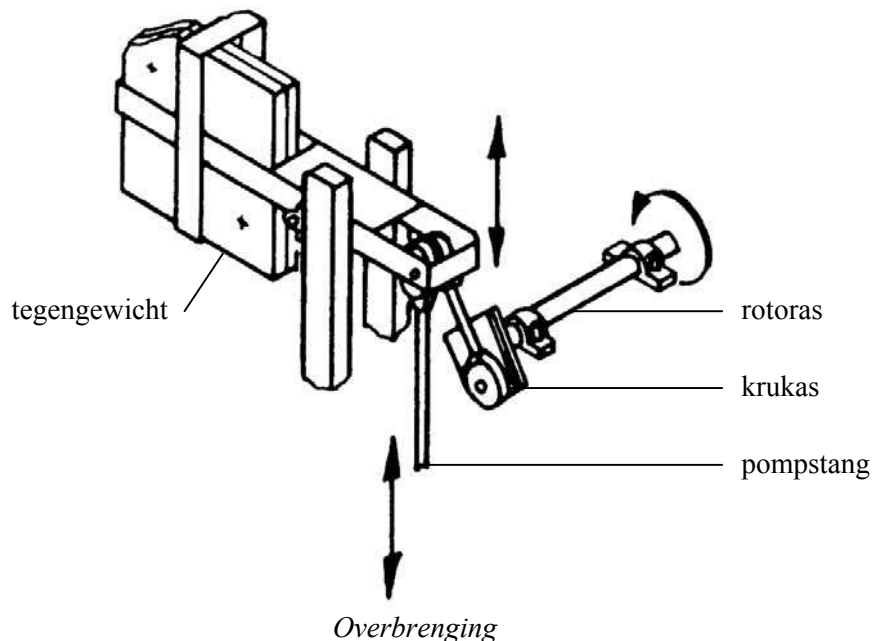
In veel gevallen is een windmolen te duur voor de armste boeren. Introductie van windmolens voor boeren met iets meer grond dan de armsten kan de concurrentie-positie van de armste boeren verslechteren.

Een boer, die een windmolen gaat gebruiken, wordt daarmee naast de zon en de regen, ook afhankelijk van de wind. Hier moet men mee leren omgaan. Bij een molen met een handbediende stormbeveiliging moet de gebruiker oppassen wanneer er storm op komst is en de molen op tijd uit de wind draaien. De gebruiker moet voor het onderhoud zorgen, door het zelf te doen of door iemand in te huren die hiervoor is opgeleid.

3.3.6 Overbrenging

De overbrenging dient voor de koppeling tussen de rotor en de pomp. In onderstaande figuur is een constructie weergegeven die de roterende beweging van de rotor omzet in een op- en neergaande beweging met behulp van een krukas (o.a. voor zuigerpompen).

Pompen zoals de centrifugaalpomp en de monopomp hebben een roterende pompstang. De overbrenging vindt dan meestal plaats met behulp van een haakse tandwieloverbrenging.



3.3.7 Toepassingen

De meest gebruikte toepassing voor windpompen is drinkwater voor mensen en vee. Andere toepassingen zijn irrigatie, drainage en viskwekerijen. Drinkwater voor vee is een traditionele toepassing die in het begin van de 20^e eeuw de reden is geweest dat er door heel Amerika en Australië duizenden windpompen zijn gebouwd. Ze zijn zo populair geworden doordat vee van water kan worden voorzien zonder dat er ook maar iemand voor nodig is, gedurende een lange periode. Een kleine windpomp kan een kudde van 100 koeien van water voorzien.

De mogelijkheid om windpompen te gebruiken voor irrigatie van landbouwgrond hangt af van de 'match' tussen gewas en windseizoen. Gewassen hebben water nodig op bepaalde voorspelbare tijdstippen in het jaar. Op die tijdstippen moet er genoeg wind zijn om de gewassen van water te voorzien met een windpomp. Het gewassenpatroon kan eventueel enigszins worden aangepast om beter op het windseizoen aan te sluiten. Irrigatie kan plaatsvinden door *sprinkler*-installaties of door open kanalen die het water van de pomp of opslagtank over het land verspreiden.

Drinkwater met windpompen voor mensen heeft veel voordelen. Er hoeft weinig omgezien te worden naar de pomp zelf, terwijl een bescheiden pomp al een groot aantal mensen van water kan voorzien. Een goed ontworpen windpomp van 5 meter hoog, kan met een gemiddelde windsnelheid van 3,8 m/s en een opvoerhoogte van 25m wel 1200 mensen van water voorzien. De investeringskosten van de molen zijn dan zo'n \$2 per persoon, terwijl een goed onderhouden windmolen wel 20 jaar mee kan gaan. Ondanks dat worden windpompen in ontwikkelingslanden nog relatief weinig gebruikt voor menselijk drinkwater. Het is duidelijk dat op dit gebied nog goede groeimogelijkheden zijn.

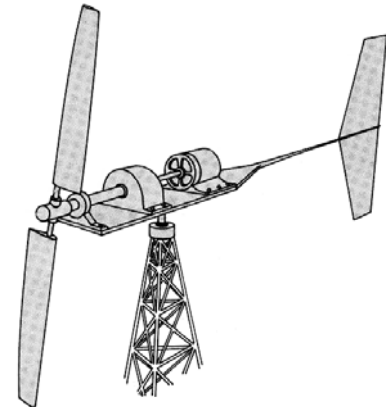
3.4 Windgeneratoren

3.4.1 Inleiding

Elektriciteitsopwekking met windmolens zit in een stroomversnelling. Met name de grootschalige toepassing voor directe levering aan het hoogspanningsnet. De kennis omtrent windmolens en stroomopwekking is enorm toegenomen, zowel van de grote windgeneratoren (>1 MW) als de kleinere systemen.

In vergelijking met windpompen, wordt de windgenerator nog weinig toegepast in ontwikkelingslanden. Grootschalige systemen zijn daar vanwege de technische complexiteit en de hoge kosten moeilijk toepasbaar. Kleine windgeneratoren bieden wel perspectief, omdat de constructie relatief eenvoudig is en zelfbouw in beeld komt. Qua kostprijs en prestatie zal een windgenerator moeten concurreren met een dieselgenerator. Gezien het wisselend karakter van de windsnelheid zijn deze zg. *stand alone* windmolens veelal acculaders.

Zeker als de elektriciteitsbehoefte een regelmatig karakter heeft, zoals bijvoorbeeld voor verlichting of een dagelijks proces. Achtereenvolgens zullen enkele veelgebruikte generatoren worden besproken, wordt ingegaan op de overbrenging en de opslag van windgenerators en zal worden gekeken naar de toepassing en haalbaarheid van windgenerators in ontwikkelingslanden.



Windgenerator

3.4.2 Generatoren

Bij een windgenerator drijft de rotor een stroomgenerator aan. De rotor zet windenergie om in rotatie-energie. De generator op zijn beurt zet de rotatie-energie uit het rotoroppervlak om in elektrische energie. Om dit voor elkaar te krijgen heeft een stroomgenerator een magnetisch veld nodig. Dit veld kan op verschillende manieren worden opgewekt, elk met hun eigen voor- en nadelen.

Autodynamo's

Toepassing: kleine windgeneratoren tot ± 500 W Stand - alone molens.

Veel kleine zelfbouwwindgeneratoren tot ca. 500 W hebben een wisselstroom - autodynamo als generator. Deze werkt met elektromagneten op de draaiende rotor-as (het zg. anker), die een driefase wisselstroom opwekken in drie wikkelingen in het stilstaande rotorhuis (de zg. stator). Via een diodebrug wordt de wisselstroom gelijkgericht. De gelijkstroom, die de elektromagneten nodig hebben levert de dynamo zelf aan het anker via koolborstels.

Autodynamo

Voordelen	Nadelen
<ul style="list-style-type: none"> - Tweedehands goedkoop - Algemeen verkrijgbaar - Regelbare opbrengst - Sterk magnetisch veld - Onafhankelijk van netspanning 	<ul style="list-style-type: none"> - Laag rendement (< 60 %) - Hoog benodigd toerental - Stroomverbruik voor elektromagneten - Koolborstels nodig (onderhoud)

Asynchrone generatoren

Toepassing: netgekoppelde molens.

Dit type is voor grotere vermogens. Het magnetisch veld wordt opgewekt middels een (noodzakelijke) koppeling aan het elektriciteitsnet. De constructie is eenvoudig en goedkoop. Hier zitten de elektromagneten in de stator en de inductiewikkelingen op het anker. Het anker wordt aangedreven door de rotor. De motor levert pas stroom, als het toerental van het anker het synchrone toerental bereikt, dat wil zeggen: sneller gaat lopen dan het wisselend magnetisch veld. Dit zg. aanlooptoerental, is afhankelijk van het aantal noord - zuidpoolparen van het anker. Meer poolparen betekent een lager aanlooptoerental, maar ook grotere afmetingen van de generator.

Asynchrone generator

Voordelen	Nadelen
<ul style="list-style-type: none"> - Goedkoop - Algemeen verkrijgbaar - Vrijwel onderhoudsvrij (geen koolborstels) 	<ul style="list-style-type: none"> - Matig rendement - Netkoppeling nodig

Permanent magneet generatoren (PMG's)

Toepassing: generatoren van 500 W tot boven 1 kW, stand-alone molens.

De elektromagneten op het anker van het dynamotype zijn vervangen door permanente magneten. Deze generatoren zijn vaak speciaal ontworpen voor windmolens en de as is zo dik, dat er veel magneten op kunnen worden gemonteerd. Zo levert de generator zonder extra overbrenging voldoende spanning, ook bij een laag toerental. Omdat de magneten geen veldstroom nodig hebben, zijn er geen koolborstels nodig. Dat scheelt onderhoud.

Het geleverde vermogen volgt het toerental. Dat is gunstig voor het rendement. Bij een hoog toerental ontstaat er wel warmte-ontwikkeling in de stator, wat een negatieve invloed heeft op het rendement.

PMG

Voordelen	Nadelen
<ul style="list-style-type: none"> - Hoog rendement (> 70 %) - Robuust ontwerp, dus bedrijfszeker - Onderhoudsvrij - Geschikt voor zelfbouw - Onafhankelijk van netspanning 	<ul style="list-style-type: none"> - Gevaar voor verlies van magnetisatie - Niet geschikt voor grote vermogens

3.4.3 Overbrenging

Bij de elektromagneettypen ligt het toerental van de rotor vaak onder het aanlooptoerental van de generator, en zal het toerental via een overbrenging verhoogd moeten worden. Een grote overbrenging (toerental uitgaand / toerental ingaand) betekent wel een groot startkoppel. Als men kiest voor een kleine overbrenging of zelfs een directe koppeling tussen rotoras en generator, dan moet de snelheid van de rotor hoog zijn en/of de generator meerpolig. Een PMG wordt zonnig uitgerust met extra permanente magneten.

De optimale overbrengingsverhouding is afhankelijk van de gekozen generator. Uitgaande van de ontwerpnelheid, kiest men een overbrenging, die het optimale toerental voor de generator benadert. De overbrenging kan geschieden door middel van een ketting, tandwielen, V-snaar of een tandriem. Zie ook het hoofdstuk over waterkracht.

Het is ook mogelijk, de omwentelingssnelheid van de rotor te beïnvloeden middels aanpassing van de hoek, waarmee de rotorbladen op de windrichting staan, de zogenaamde *aanvalshoek*. Vergroting van de aanvalshoek is gunstig bij lagere windsnelheden. Dit principe vind je ook terug bij het ontwerp van de rotorbladen. Een getordeerd rotorblad (sterker bij de as, minder bij de tip) geeft een optimaal koppel op ieder aangrijpingspunt van de wijk.

3.4.4 Opbrengst

De windgenerator zet windenergie om in elektrische energie, uitgedrukt in een gemiddeld elektrisch uitgangsvermogen P_{el} . De winbare elektrische energie over het rotoroppervlak is:

$$P_{el} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{gem}^3 \quad (W)$$

waarbij

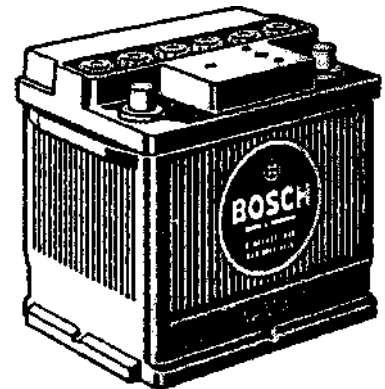
C_p	= vermogenscoëfficiënt	
ρ	= luchtdichtheid	(kg/m ³)
A	= rotoroppervlak	(m ²)
v_{gem}	= gemiddelde windsnelheid	(m/s)

Als de C_p waarde van de molen niet bekend is, kan m.b.v. onderstaande vuistregel een goede indicatie gegeven worden van de opbrengst van een windmolen met rotoroppervlak A en gemiddelde windsnelheid v_{gem} . Andersom kan relatief snel een schatting worden gemaakt van de benodigde rotordiameter bij een gegeven elektriciteitsbehoefte.

$$P = 0,2 \cdot A \cdot v_{gem}^3 \quad (W)$$

3.4.5 Opslag

De elektriciteit die wordt opgewekt door windgeneratoren hoeft niet direct te worden gebruikt, het kan worden opgeslagen. Elektrische energie kan op verschillende manieren worden opgeslagen, die veelal afhangen van wat in de omgeving mogelijk is. Als er een elektriciteitsnet aanwezig is, ligt teruglevering van de opgewekte stroom aan het net voor de hand. Men maakt gebruik van bestaande faciliteiten en de leveringszekerheid is groot. Dit is dé toepassing in de westerse wereld. Als er geen net ligt, maar er wel een waterreservoir met debietmogelijkheden in de buurt is, kan water worden opgepompt met een elektromotor en teruggewonnen via een waterturbine. De beschreven kleinere windgeneratoren worden vaak geplaatst in afgelegen gebieden, waar geen elektriciteitsnet is. Dan ligt opslag in accu's voor de hand.



Accu

Men maakt onderscheid tussen *start-accu's* en *halftractie-accu's*.

Het tractie type is voor een hoge aanvangsström, bijvoorbeeld voor een motor of een zuigerpomp. Het halftractietype is beter voor langdurige levering van continue stroomafname, bijvoorbeeld verlichting, radio of licht machinewerk. Het verschil zit in de dikte van de loodplaten. De extra dikke platen in een halftractie-accu verhogen het rendement voor stationaire toepassing tot 20%.

De *capaciteit* van een accu wordt uitgedrukt in Ampère-uur (Ah). Als een halftractie-accu bijvoorbeeld 10 Ampère uur wordt geladen, kan er zo'n 8 uur worden gewerkt met een stroomvraag van 1 Ampère. Het aanbod van fabrikanten varieert van zeer klein tot boven 20 Ah.

Er zijn verschillende typen accu's, waarvan de loodzuuraccu de meest voorkomende is, vanwege zijn lage prijs. De lood-calciumaccu ruikt op, omdat het onderhoud minimaal is en de levensduur veel beter. De levensduur wordt vaak uitgedrukt in het aantal malen, dat de accu geladen en ontladen kan worden (het aantal cycli).

Voor de levensduur van de *gewone loodzuuraccu* is het gebruik en onderhoud van groot belang:

- De accu mag niet teveel worden doorgeladen en niet te diep ontladen.
- De zuurconcentratie van het elektrolyt (zwavelzuur) mag niet te hoog zijn
- Het elektrolytniveau moet altijd hoger dan de platen staan.

Aandachtspunten voor accu's in het algemeen

- Om teveel opladen en ontladen te voorkomen is een accubewaking nodig, die de verbinding tussen de generator en de accu op tijd in- en uitschakelt.
- Accu's uit bedrijf worden altijd volgeladen opgeslagen en tijdig bijgeladen. Ontladen loodaccu's zijn snel afval.
- De keuze voor onderhoudsvrije accu's heeft de voorkeur, vanwege de stroomleveringsbetrouwbaarheid.
- Bij de aanschaf van een bepaald merk accu dient men te letten op het optimale temperatuurtraject. De leveringscapaciteit loopt beneden en boven bepaalde kritische waarden snel terug.
- De accu mag niet bloot staan aan temperaturen boven 55 °C.
- Stem de accukeuze af op het soort werk en de verwachte windstille perioden.

3.4.6 Toepassingen

Windgeneratoren kunnen voor verschillende toepassingen worden gebruikt. Van radio's en de verlichting van huizen tot het aandrijven van grote machines en het leveren aan het elektriciteitsnet. Hieronder volgt een overzicht van generatoren van verschillende groottes met bijbehorende veel voorkomende toepassingen.

Rotor Diameter (m)	Vermogen (bij wind van 12m/s)	Veel voorkomende toepassing
1	50W	Accu-opladen voor verlichting en communicatie in afgelegen gebieden
2	1kW	Meerdere accu's tegelijk opladen en communicatie
6	10kW	Verwarming en gebruik voor meerdere elektriciteitstoepassingen, mogelijk met accu's
14	50kW	<i>Stand alone</i> elektriciteit generatie voor communicatie voor een compleet dorp
20	100kW	Aansluiting op elektriciteitsnet, verkoop van elektriciteit aan energie bedrijf

3.4.7 Haalbaarheid

Om tot een afgewogen besluit te komen omtrent de aanschaf van een bepaald type windgenerator voor een bepaalde toepassing is een grondige veldanalyse de eerste stap.

Actuele gemiddelde windinformatie van het gebied, liefst gerangschikt naar periode maakt duidelijk, of stroomvoorziening uit windenergie voldoende zekerheid biedt. Bovendien geeft het informatie omtrent de benodigde opslagcapaciteit die nodig is, om windleemten op te vangen. Een veldonderzoek ter plaatse is nodig voor de goede plaatsbepaling, zonder storende elementen als bos en ruw terrein

Technische aspecten

Het is voor eventuele zelfbouw, installatie, onderhoud en reparaties van belang welke technische middelen aanwezig zijn en over welke kennis lokale technici beschikken. Een systeem dat aansluit bij de plaatselijke mogelijkheden en kennis van materialen en arbeid heeft altijd de voorkeur. Dus een onderhoudsgevoelige molen met autodynamo gekoppeld aan een loodzuuraccu kan soms een beter alternatief zijn dan een onderhoudsvrije PMG met een onderhoudsvrije loodcalcium accu. Dit laat onverlet, dat beperkt onderhoud geld mag kosten, maar dan wel ondersteund vanuit de projectfinanciering over de begrote projectduur.

Economische aspecten

Een vuistregel voor de kosten van een windgenerator:

US\$ $(333 + 3333 / D^2)$ per m² rotoroppervlak.

Een accupakket komt hier nog bij. Uiteraard zijn de plaatselijke aanvoerlijnen van groot belang. Als vergelijkingscriterium geldt de lokale prijs van de dieselgenerator en de beschikbaarheid van brandstof. Voor een goede beslissing tussen de alternatieven is een kosten-batenanalyse ter plaatse nodig.

3.5 Onderhoud

Voor een langdurig gebruik van windmolens is regelmatig onderhoud vereist. Voor windpompen geldt dat extra onderhoud is vereist bij windpompen met een versnellingsoverbrenging en diepe boorgaten. Er gelden de volgende onderhoudsinstructies:

- de olie in de overbrenging moet minstens één keer in het half jaar worden nakeken en indien nodig, worden vervangen.
- de leren zuigers binnenin de zuigerpomp moeten elke 1 à 2 jaar worden vervangen als gevolg van slijtage. Vooral als er zand is vermengd in het opgepompte water moet hier extra goed naar worden gekeken, omdat hierdoor de zuigers en de cilinder extra snel slijten. Bij diepe boorgaten (dieper dan 30 meter) is het aan te raden om een pomp te gebruiken met een open bovenkant. De zuiger kan dan gemakkelijk naar boven worden gehaald door de opvoerbuys voor onderhoud.
- een ander punt van aandacht is corrosie. Zorg er voor dat er de pomp zelf roestvrij blijft en vraag van tevoren aan de leverancier of de pomp is gemaakt om corrosie te weerstaan.

Windgeneratoren zijn over het algemeen gemaakt voor minimaal onderhoud. Instructies van de leverancier dienen strikt opgevolgd te worden. Verder moeten de accu's regelmatig gecontroleerd worden op corrosie en het niveau van het elektrolyt.

3.6 Literatuur

Dit hoofdstuk is gebaseerd op de volgende bronnen:

- *Renewable Energies*. - Climate Action Network Central and Eastern Europe (CANCEE).
<http://www.cancee.org/ren/ren.html>
- *The power guide*. Hulscher, Fraenkel - Intermediate Technology Publications/Technology and Development Group, University of Twente. 1994.
- *Windenergie voor de derde wereld*. Brughuis - Werkgroep OntwikkelingsTechnieken (WOT). 1990.
- *Windpumping a handbook*. van Meel, Smulders – World Bank Washington, D.C. 1989.
- *Windsnelheid*. - MeteoPlanet. <http://home.tiscali.be/bartwarnez/windsnelheid.htm>
- *PMG construction manual*. Piggott - Scoraig Wind Electric. 2001.
- *Guided tour on wind energy*. Danish Wind Industry Association.
<http://windpower.org/tour>
- *Accu's in motorhomes*. Lenoir
<http://www.campersite.be/accu.htm>
- *Scoraig wind electric- home built windpower*. Piggott
<http://homepages.enterprise.net/hugh0piggott/>
- *Renewable energy links*.
http://www.otherpower.com/otherpower_links.html