

Waterkracht



1. Inleiding

Tot ver in de 19e eeuw was hout de belangrijkste brandstof en werd een groot deel van de energie geleverd door mensen, dieren, water en wind. Tot vandaag is de energiebehoefte steeds blijven stijgen en intussen zijn we zeer sterk afhankelijk van fossiele en nucleaire brandstoffen.

1.1 Problemen

Fossiele en nucleaire brandstoffen zijn beperkt voorradig. En terwijl de voorraad snel slinkt, neemt de vraag steeds toe. De wereldbevolking groeit en het energieverbruik per hoofd stijgt. Daaruit volgen vooral economische problemen en problemen voor de veiligheid en de wereldbevolking. IEA (International Energy Agency) voorspelt dat het energieverbruik tussen 1935 en 2020 met 65% zal stijgen. Daarnaast zal ook de CO₂-uitstoot met 70% stijgen (onder huidige voorwaarden).

Reststoffen uit de energiesector hebben een zware impact op het leefmilieu. Denk maar aan:

- het broeikaseffect veroorzaakt door o.a. koolstofdioxide
- giftige gassen als koolstofmonoxide, stikstofoxides,...
- verzurende gassen: stikstofoxides, zwaveldioxide,...
- transport, verwerking en berging van nucleair materiaal

1.2 Oplossingen

Om deze wereldomvattende problemen niet tot onbeheersbare omvang te laten uitgroeien, moeten er zeer dringend oplossingen gezocht worden. Energiebehoefte en energieopwekking op een duurzame wijze op mekaar afstemmen vergt een tweezijdige aanpak:

- REG: Rationeel EnergieGebruik, d.w.z spaarzaam omgaan met energie zonder comfortverlies. Dikwijls zijn rendabele maatregelen onvoldoende gekend, of maakt de zeer lage energieprijzen talrijke technische mogelijkheden schijnbaar niet rendabel.
- Hernieuwbare energie: zon, wind, water en biomassa kunnen aangewend worden om energie op te wekken voor het huishouden, industrie en transport.

1.3 Troeven van hernieuwbare energie

Duurzame ontwikkeling wil aan de behoeften van vandaag voldoen, zonder die van de toekomst in het gedrang te brengen. Hernieuwbare energie is daar een onderdeel van. Verdere voordelen zijn:

- De meeste technieken voor hernieuwbare energie zijn milieuvriendelijk en duurzaam. De bronnen zijn vrijwel onuitputtelijk. De technieken vragen relatief weinig energie voor fabricage en onderhoud, en zijn zuinig in het gebruik van grondstoffen. Tijdens hun hele levenscyclus - van bouw over gebruik tot de afbraak - veroorzaken zij een zeer lage uitstoot van schadelijke stoffen.
- Diversificatie van energievoorziening: een systeem dat zich te eenzijdig richt op slechts enkele energiebronnen die geconcentreerd zijn in een klein deel van de wereld, kan tot spanningen leiden. Denk hierbij maar aan de olieproducerende landen.
- Werkgelegenheid en betalingsbalans: studies tonen aan dat hernieuwbare energie een positief effect heeft op de werkgelegenheid.

1.4 Waterkracht als vorm van hernieuwbare energie

Hernieuwbare energie is een verzamelnaam voor verschillende vormen van energie, zoals die in de vorige paragraaf werden omschreven. Het bestaat uit:

- Zonne-energie
- Windenergie
- Waterkracht
- Biomassa
- Warmtepompen
- Aardwarmte

Dit alleen maar om aan te geven waar waterkracht zich situeert binnen de hernieuwbare energie. In hetgeen volgt zullen we het alleen maar hebben over het deel van waterkracht. We gaan verder niet in op de andere items.

2. Overzicht

Eerst bespreken we de klassieke waterkrachtcentrales. Hun werkingsprincipes zijn soms al meer dan een eeuw oud en dus volop ontwikkeld en veelvuldig gebruikt. Na een theoretische basis, worden de verschillende soorten turbines behandeld, die eigenlijk het hart van de waterkrachtcentrale vormen. Vervolgens is er de manier waarop deze turbines worden ingezet om uiteindelijk elektriciteit te kunnen opwekken. Dit resulteert in een reeks van waterkrachtcentrales, met elk hun specifieke kenmerken. Deze centrales staan dan ook in voor het opwekken van een vermogen van soms enkele honderden megawatts.

Vervolgens bespreken we het begrip „microwaterkracht“. Dit is het kleinschalig gebruik maken van de potentiële energie in het water.

Tenslotte zijn er ook de recenter ontwikkelde golfslagcentrales. In dit soort centrales is er een grote verscheidenheid in de manier waarop de elektriciteit wordt opgewekt. Aangezien deze ontwikkelingen recenter zijn, is hun toepassingsgebied nog zeer klein t.o.v hun klassieke tegenhangers. Toch zijn ze belangrijk in een toekomst, waar hernieuwbare energie steeds belangrijker zal worden.

3 Klassieke waterkracht

3.1 Fysische beschrijving

Het beschikbare vermogen uit waterkracht is afhankelijk van het hoogteverschil dat overbrugd wordt en van het debiet dat door de leidingen stroomt. De formule luidt:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \cdot \eta$$

P = Vermogen (Watt)
 ρ = Dichtheid van water (kg/m³)
g = Versnelling ten gevolge van de zwaartekracht (m/s²)
Q = Debiet (m³/s)
h = Valhoogte (meter)
 η = Rendement

Zoals bij elke energieomzetting moeten ook hier vele invloedsfactoren omtrent omzettingsverliezen in de energiebalans in rekening gebracht worden. Het rendement beschrijft hierbij de verhouding tussen geleverde energie en toegevoerde energie. In de meeste gevallen wordt een minimum rendement van 80% wel gehaald. Bij optimaal gebruik zal dit rendement gaan stijgen.

3.2 Valhoogte en debiet

Dat het elektrische vermogen afhankelijk is van de valhoogte en het debiet heeft als gevolg dat om een zo goed mogelijke benutting te bekomen, men verschillende soorten installaties in gebruik moet nemen. Concreet wil dit zeggen dat een klein bergriviertje, met een klein debiet, maar met een valhoogte van honderd meter evenveel energie kan leveren als een brede rivier, die slechts een hoogteverschil van enkele meters overwint.

Met betrekking tot de valhoogte kan men de volgende installatietypes onderscheiden:

- lage-druk-waterkrachtcentrales (valhoogte kleiner dan 25 m)
- midden-druk-waterkrachtcentrales (valhoogte kleiner dan 100 m)
- hoge-druk-waterkrachtcentrales (valhoogte groter dan 100 m)

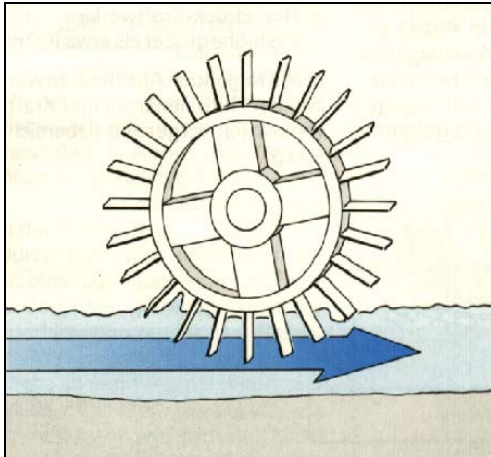
De volgende paragrafen geven meer uitleg over verschillende soorten turbines en krachtcentrales.

4. Soorten turbines

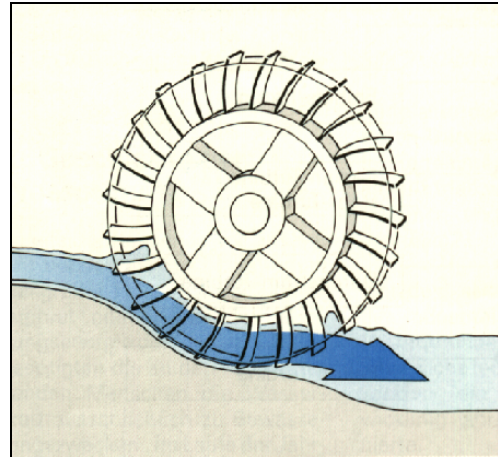
4.1 Ontwikkeling

De voorvader van alle molens is het stootrad. Dit rad gebruikt de bewegingsenergie van het water met behulp van zijn horizontale ingrijpende schoepen. Men spreekt hier van het actieprincipe.

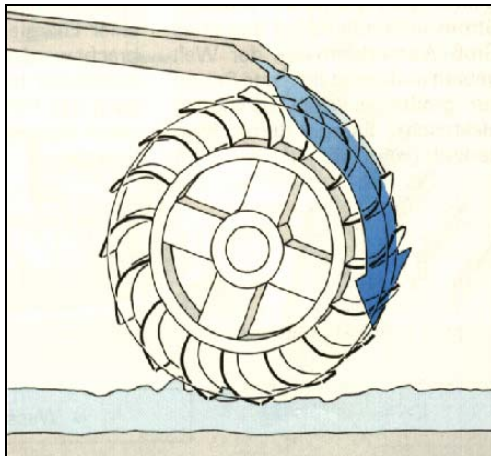
Een verder ontwikkeling van het stootrad is het onderslagwaterrad. Zoals bij het stootrad word bij deze vorm ook hoofdzakelijk de bewegingsenergie van het water gebruikt. Het verschil tussen beide bestaat in het verschil tussen intredehoogte en uittredehoogte van het water. Daardoor laat dit type waterrad het toe om naast bewegingsenergie ook in geringe mate de potentiële energie van het water te gebruiken.



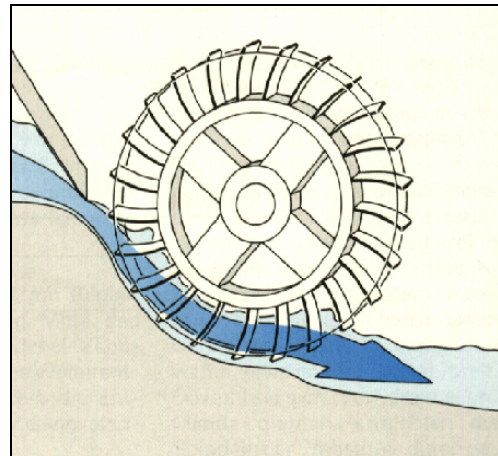
Stootrad



Onderslagrad



Bovenslagrad



Middenslagrad

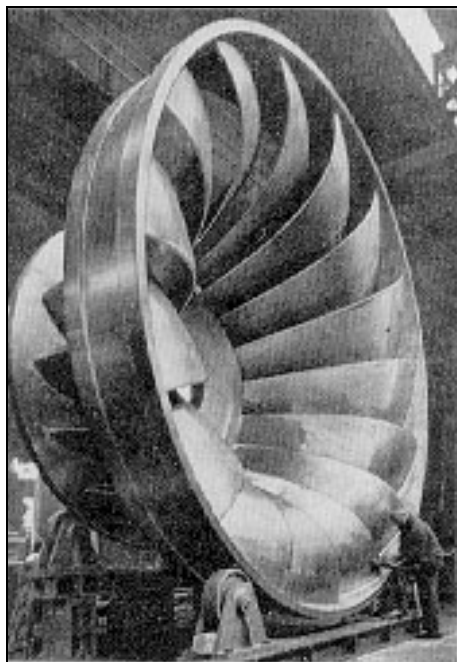
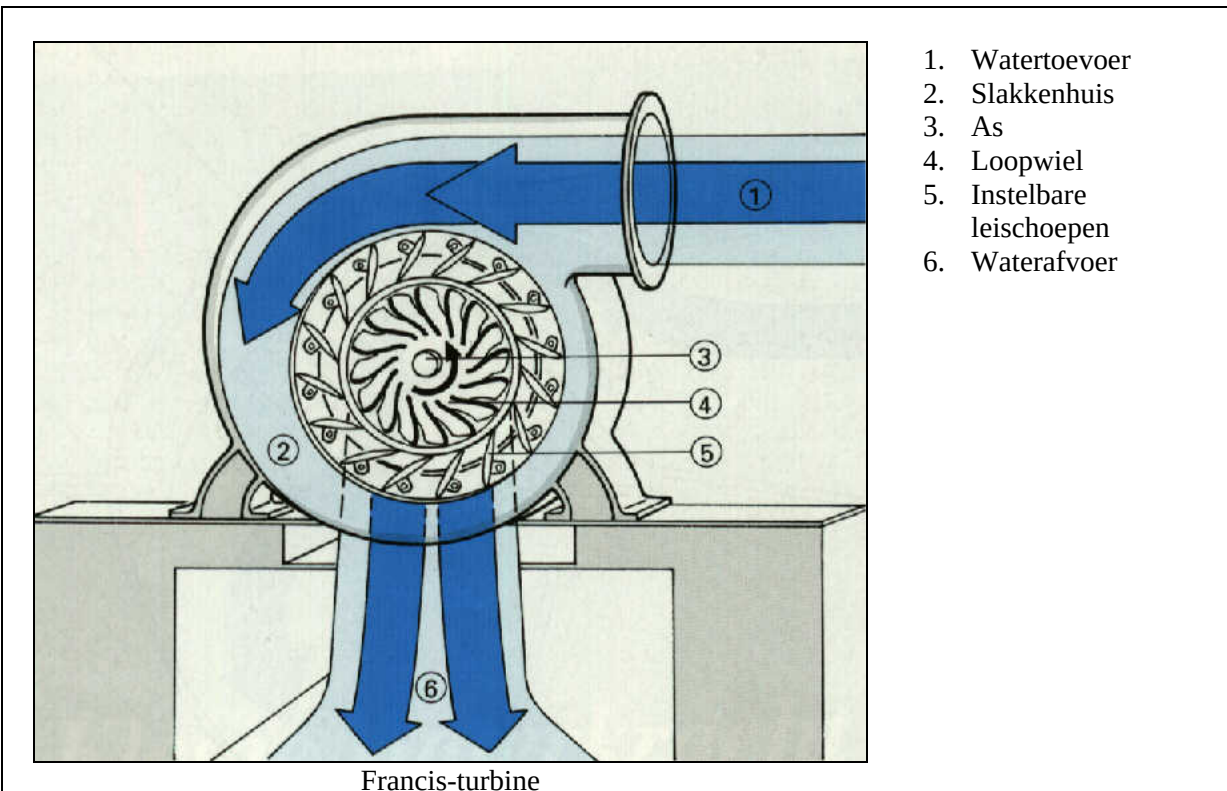
In de Middeleeuwen werden ook bovenslagraderen ontwikkeld. In tegenstelling tot de onderslagraderen stroomt hier het water van boven af in de schoepen. Het rad wordt dus niet door de beweging van het water, maar wel door het gewicht ervan aangedreven. In dit geval spreekt men van het reactieprincipe.

Als tussenvorm bestaat ook nog het middenslagrad. Het gebruikt zowel de potentiële als de kinetische energie van het water. In de huidige waterkrachtcentrales combineren de turbines het actie- en reactieprincipe met elkaar.

Vervolgens beschouwen we de moderne soorten turbines, zoals die vandaag de dag in verschillende waterkrachtcentrales ingezet worden.

4.2 Francis-turbine

De Francis-turbine is de tot op heden meest gebruikte soort turbine. Ze werd in 1849 door James Francis ontworpen. Bij de Francis-turbine is de doorstroming doorheen het slakkenhuis radiaal. De afvoer van het water gebeurt axiaal. De stator bestaat uit twee evenwijdige vlakke ringen, waartussen oriënteerbare statorschoepen aangebracht zijn. Met behulp van deze schoepen wordt het debiet, en dus ook het vermogen, geregeld. Bij een snelle belastingsvermindering zal men tijdelijk aan het water een andere uitweg verschaffen om ramstoten in de toevoerleiding te vermijden.



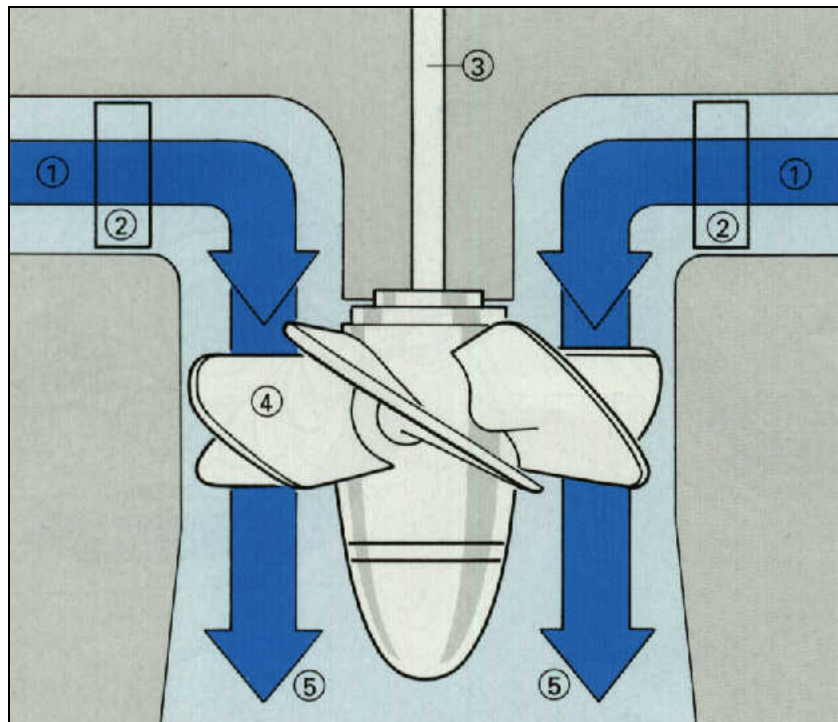
Voorbeeld van een Francis-turbine

Bij een nominale belasting bereikt deze turbine een rendement van 85%, en bij optimale bediening zelfs meer dan 90%. De diverse Francis-turbines verschillen door de stand van de as (verticaal of horizontaal), het aantal loopwielen op een as (één of twee), de toevoer van het water tot het loopwiel en de aanleg van de afvoerleiding. De grootste Francis-turbines kunnen tot 150 ton wegen en een vermogen van 700 MW leveren.

Een bijzonder voordeel van de Francis-turbine is dat ze naast een turbinewerking ook als pomp kan fungeren. Hiervan maakt men gebruik bij pompcentrales (zie later).

4.3 Kaplan-turbine

In de Kaplan-Turbine (ontwikkeld door Viktor Kaplan in 1913) is er over de loopschoepen een axiale stroming onder hoge druk, parallel met de machineas, waardoor het rad begint te draaien. Door de mogelijke instelling van lei- en loopschoepen blijft het rendement bij sterk wisselende bedrijfsvoorwaarden ongeveer constant. De Kaplan-turbine wordt vrijwel altijd met verticale as uitgevoerd, daar de axiale zuigkracht die door het water uitgevoerd wordt, zeer groot is.



1. Watertoevoer
2. Instelbare leischoppen
3. As
4. Instelbare loopschoepen
5. Waterafvoer

Kaplan-turbine



Voorbeeld van een Kaplan-turbine

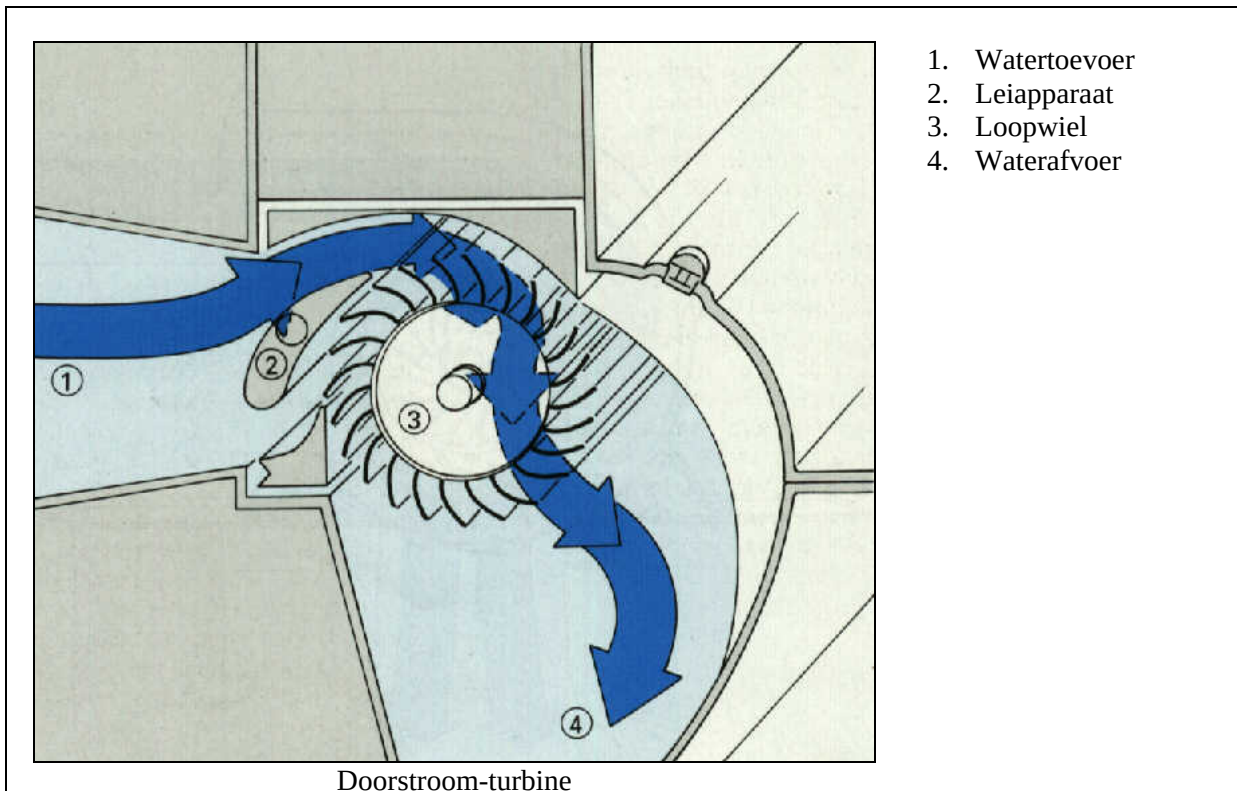
Het grote voordeel van Kaplan-turbines is dat ze een rendement van 85 tot 90% halen en dit bij een grote variatie in drukhoogte en belasting.

Ze worden overwegend gebruikt in waterkrachtcentrales waar de valhoogte kleiner dan 50 meter is, omdat ze in vergelijking met Francis-turbines grotere waterhoeveelheden kan verwerken. Dat betekent dat er in waterkrachtcentrales aan waterrijke stromen minder turbines moeten gebouwd worden.

Voor zeer kleine valhoogtes werd uit de Kaplan-turbine de schroefturbine ontwikkeld, waarbij de turbine horizontaal in het stromende water wordt geplaatst. De verliezen in de stroming, die optreden in bochten van de leidingen, worden zo geëlimineerd.

4.4 Doorstroom-turbine

De Doorstroom-turbine wordt met een liggend rad in een twee-cellen-systeem ingebouwd. Een cilindervormig rad met gekromde schoepen wordt door het water aangedreven. Het water wordt vooraf doorheen een verstelbaar lei-apparaat gevoerd. De doorstroming in rad gebeurt tweemaal tangentieel, zodat de deellastverhouding van de doorstroom-turbine goed is. Bij nominale last ligt het rendement rond 80%. De Doorstroom-turbine wordt hoofdzakelijk ingezet bij valhoogtes tot 200 meter en voor kleine vermogens.



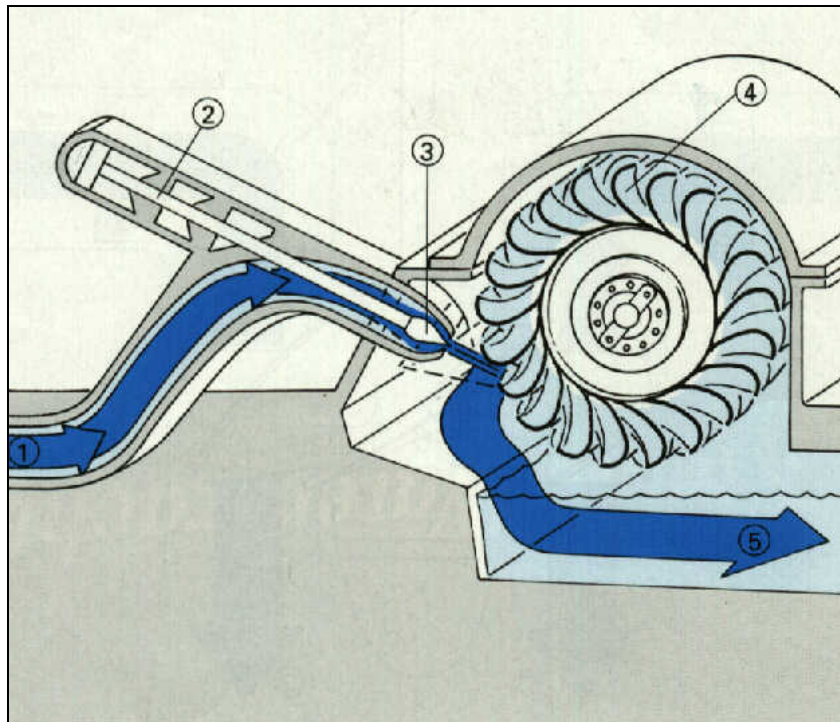
4.5 Pelton-Turbine

De pelton-turbine, door Lestor Pelton ontwikkeld in 1889, werkt volgens het actieprincipe. Dit wil zeggen dat er enkel gebruik wordt gemaakt van de kinetische energie van het water.

Bij de Pelton-turbine is de rotor voorzien van een aantal bekken die de vorm hebben van een dubbele lepel met tussenwand. De stator bestaat uit één of meer injecteurs, waarin de drukval plaatsvindt. Deze richten een waterstraal op de schoepen.

Het regelen van het debiet, en dus van het vermogen bij constante valhoogte, gebeurt doorgaans met behulp van een regelnaald die de doorstroomsectie van de injecteur beïnvloedt. Er moet voor gezorgd worden dat de verandering van de stand van de regelnaald niet te plotseling geschiedt. Zo moet de sluitertijd bijvoorbeeld minstens 15 tot 30 seconden bedragen. Anders zou namelijk waterslag in de toevoerleiding naar de turbine kunnen optreden. Als bijvoorbeeld bij het plotseling ontlasten van de turbine een snelle debietregeling toch noodzakelijk is, dan doet men een beroep op een straalaafbuiger. Deze straalaafbuiger is een schot dat tussen de injecteur en de schoepen geschoven wordt en dat de straal van de schoepen afbuigt. Dit gebeurt in hoogstens 2 tot 6 seconden. Daarna wordt de toevoer langzaam stopgezet door de afsluiter in de toevoerleiding.

De turbine wordt meestal horizontaal geplaatst met één of twee loopwielen, waarbij per looprad één of twee waterstralen gebruikt worden. Bij uitzondering kan de Pelton-turbine met een verticale as uitgevoerd worden en het aantal waterstralen kan dan tot 6 stijgen. Een nadeel van deze turbines is dat ze uiteraard onomkeerbaar zijn, d.w.z. dat zij niet als pomp gebruikt kunnen worden.



1. Watertoevoer
2. Regelstang
3. Doorn
4. Loopwiel
5. Waterafvoer

Pelton-turbine



Voorbeeld van een Pelton-turbine

Het rendement van de Pelton-turbine bedraagt ongeveer 90% en is vrijwel onafhankelijk van de belasting en dus van het waterdebiet, wat een voordeel is bij overwegende deellastwerking.

Daar de watertoevoer maar in enkele punten geschiedt, wordt deze turbine gebruikt als de valhoogte groot is en het debiet klein, dus voor bergcentrales. De snelheid van het wiel stijgt met de valhoogte. Het toerental bedraagt normaal 500 tot 1000 t/min.

5. Cavitatie en Zanderosie

Een eerste probleem waarmee ingenieurs in waterkrachtcentrales te kampen hebben is cavitatie. Het tast de loopwiel schoepen van de turbine aan. In het begin worden ze ruw, vervolgens poreus en uiteindelijk zitten ze vol met gaten. De oorzaak hiervan is de lucht die opgelost zit in het snelstromende water. Door de ontstane drukval aan het loopwiel klappen de luchtbelllen ineem, waarbij sterke mechanische krachten vrijkomen, die het loopwiel aantasten. Door een geschikte materiaalkeuze en een overeenstemmende vormgeving kan cavitatie sterk beperkt worden.

Een tweede probleem dat bij waterkrachtcentrales optreedt is zanderosie. Vrijwel alle centrales zijn uitgerust met roosters die het water ontdoen van groot drijvend materiaal, bv hout. Zandpartikels echter kunnen niet weggefilterd worden. Enerzijds omdat een filter met kleine mazen snel verstopt zou zitten, anderzijds omdat zulk een filter de snelheid van het water, die nodig is om energie te winnen, zou doen verminderen. Door die hoge snelheid in de turbine schuren die zandkorrels in de loop van de tijd materiaal weg. Vooral de Pelton-turbine is aan dit probleem onderhevig.

6. Soorten klassieke waterkrachtcentrales

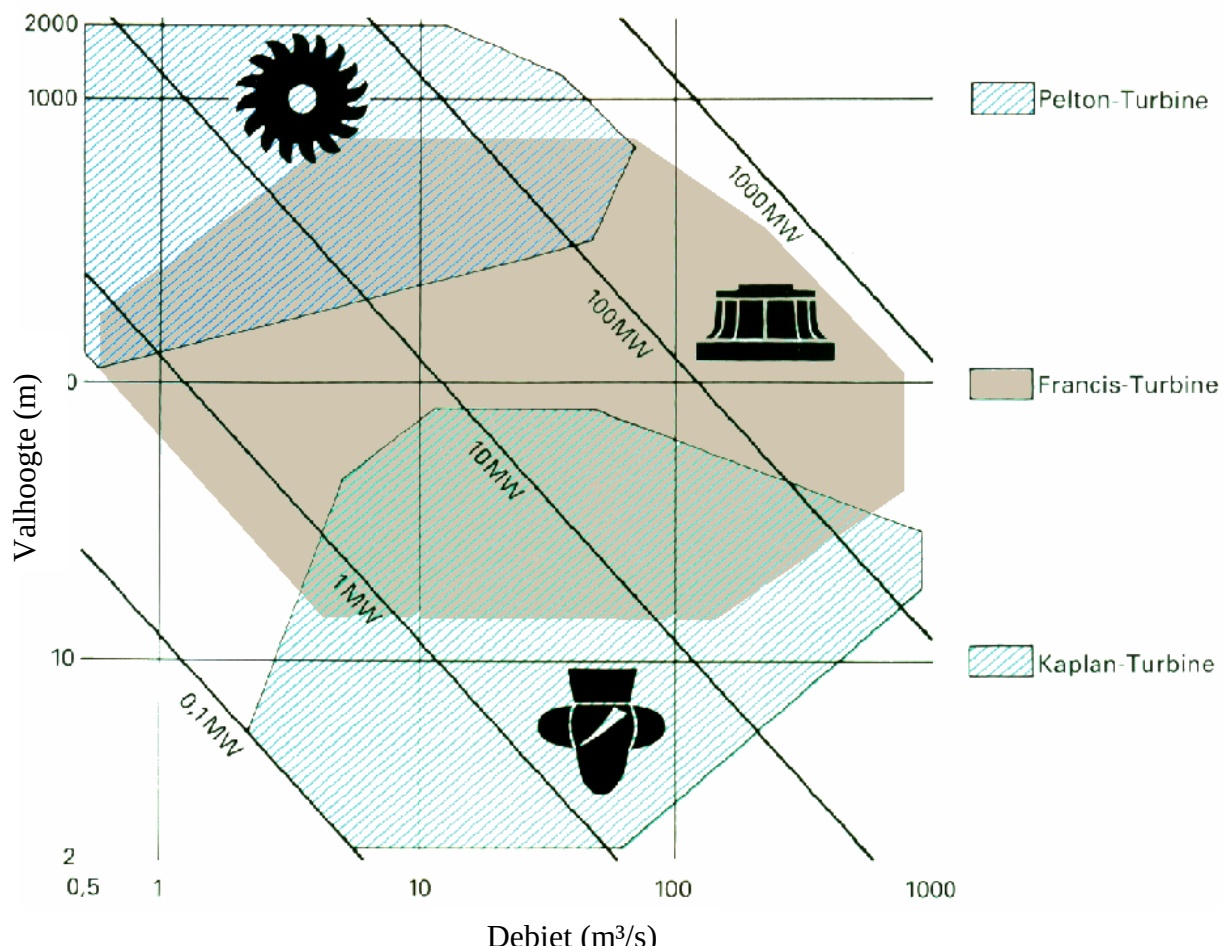
Men onderscheidt volgende soorten krachtcentrales:

- Waterkrachtcentrales die gebruik maken van de reeds aanwezige stroming van het water.
- Waterkrachtcentrales met een stuwdam.

De eerste soort centrales voorziet in de basisbehoefte aan stroom. De vlaktec centrales en de getijdencentrales behoren hiertoe.

De tweede soort daarentegen stelt energie ter beschikking naar gelang de belasting. Ze gebruiken het water in een stuwmeer om stroom te genereren tijdens piekbelasting. Hiertoehoren de bergcentrales en de pompcentrales.

Naargelang de valhoogte en de beschikbare waterhoeveelheid worden de verschillende turbinesoorten ingezet.



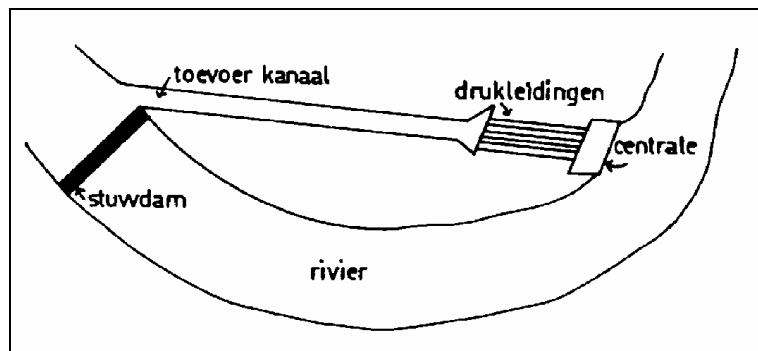
Het inzetbereik van de Francis-turbine overlapt bovenaan met dat van de Pelton-turbine, en onderaan met dat van de Kaplan-turbine. Francis- en Pelton-turbines worden hoofdzakelijk in midden- en hogedrukwaterkrachtcentrales ingezet. Daarbuiten wordt de Pelton-turbine ook ingezet waar de valhoogte extreem hoog is en de waterhoeveelheid klein is. In lage-drukwaterkrachtcentrales neemt men overwegend Kaplan-turbines in dienst.

6.1 Vlaktecentrales

6.1.1 Werkingsprincipe

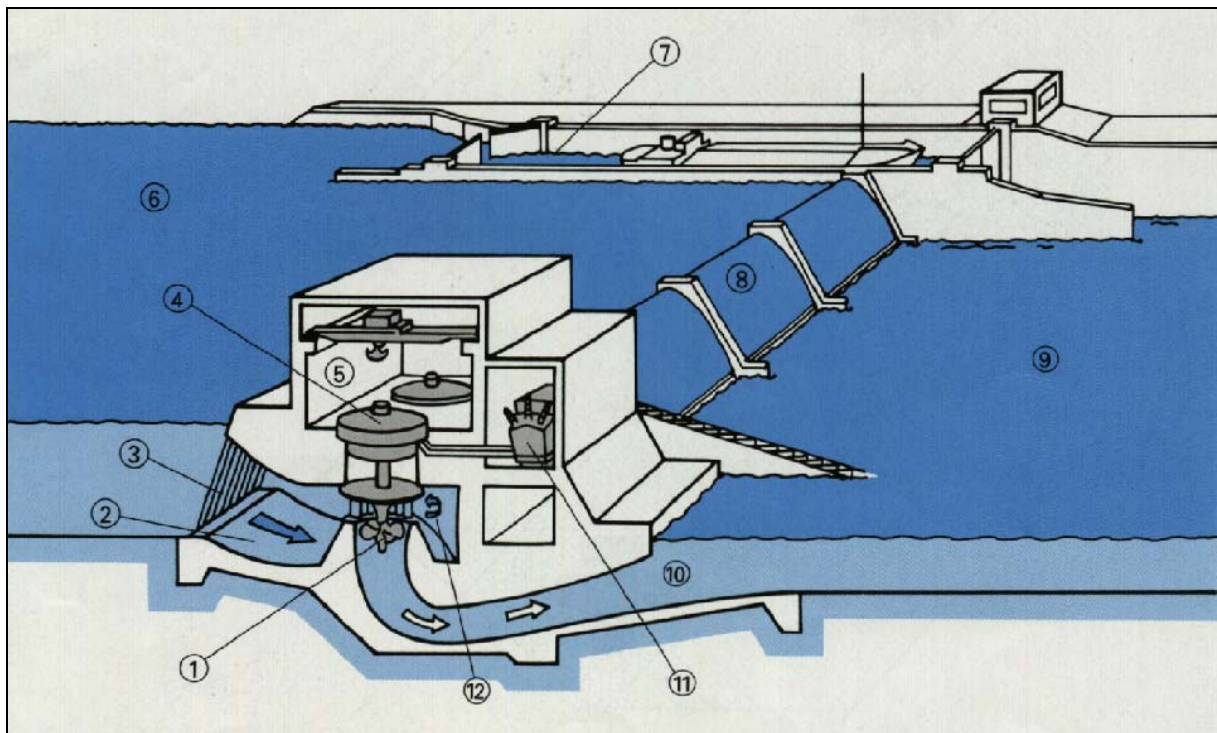
Vlaktecentrales worden gekenmerkt door een groot debiet en een klein verval. Dit verval wordt in de meeste gevallen in een bepaald punt op kunstmatige wijze verwerkt door het bouwen van een stuwdam. De centrale wordt hetzij op de oever, hetzij op de stuwdam zelf aangelegd.

Het gebeurt echter ook dat de centrale op bepaalde afstand van de stuwdam wordt geplaatst om een grotere valhoogte te verkrijgen. Deze oplossing zal bij voorkeur worden toegepast als, door het optreden van een bocht in de rivier, de geografische afstand tussen de stuwdam en de centrale beperkt kan blijven of als er ter plaatse een kleine waterval aanwezig is.



Centrale ligt op een bepaalde afstand van de stuwdam

De regeling van het debiet is in de meeste gevallen zo goed als onmogelijk, daar het heel moeilijk is over een voldoende waterreserve te beschikken. De hoogte van de stuwdam is immers doorgaans beperkt, omdat de oevers niet onder water gezet mogen worden. De oppervlakte van het kunstmatige meer is daarom klein en omdat de toegelaten peilschommelingen ook gering zijn kan hoogstens een dagelijkse regeling verkregen worden. Alleen in het speciale geval van grote rivieren in weinig bevolkte streken kan men door gedeeltelijke overstroming van de oevers ook een bepaalde seizoenregeling verkrijgen.



Werkingsprincipe van een vlaktecentrale

6.1.2 Voorbeeld van een vlaktecentrale



In Duitsland zijn de Rijn en de Moezel druk bezaaid met vlaktecentrales. Eén daarvan staat in Iffezheim. Daar zorgen 4 Kaplan-turbines voor een maximum vermogen van 108 MW. Het maximum debiet bedraagt $1100\text{m}^3/\text{s}$ over een gemiddelde valhoogte van 11m. In totaal zorgt dit voor een jaarverbruik van zowat 685 miljoen kWh.

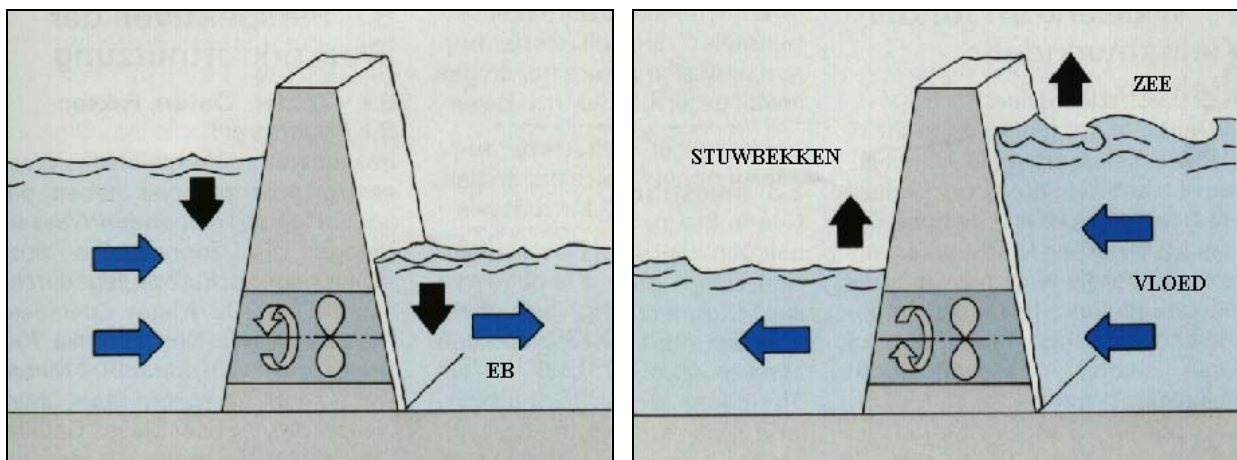
6.2 Getijdencentrales

6.2.1 Werkingsprincipe

Men maakt er gebruik van het niveauverschil veroorzaakt door de getijdenwerking, tussen de zee en een afgedamd bekken. Afhankelijk van het tij wordt in de ene of de andere richting geturbineerd. Op het einde van elke cyclus wordt nog een hoeveelheid water overgepompt (als de niveaus ongeveer gelijk zijn vergt dit weinig arbeid; later kan men deze hoeveelheid opnieuw turbineren bij grotere valhoogte).

Het maximale niveauverschil bedraagt 13,50 m terwijl de gemiddelde valhoogte tijdens het turbineren 11,50 m bedraagt. Men gebruikt hiervoor zgn. klokinstallaties: dit zijn groepen gevormd door een Kaplan-turbine en een alternator met horizontale as geïnstalleerd in een afgedichte klok, die geplaatst is in het stromingskanaal. Bij groepen met relatief klein vermogen krijgt men aldus een zeer eenvoudige en dus economische constructie, vooral door de belangrijke vermindering van de noodzakelijke werken van burgerlijke bouwkunde. Deze worden ook gebruikt bij vlaktecentrales.

Getijdencentrales hebben toch een nadeel. Het tijdstip van de elektriciteitsopwekking, op het ritme van de getijden, komt niet overeen met het tijdstip dat er veel elektriciteit wordt gevraagd.



Werkingsprincipe van een getijdencentrale tijdens eb en vloed

6.2.2 Voorbeeld van een getijdencentrale



In 1967 werd te St.-Malo op de Rance (Frankrijk) een eerste getijdencentrale gebouwd, bestaande uit 24 groepen van 10 MW elk. Het verschil tussen eb en vloed is hier vaak groter dan 12m. De dam die nodig is om het water te kunnen tegenhouden, is 750m lang en voorzien van tweewegs turbines. Het stuwbecken dat zo ontstaat, heeft een oppervlakte van zo'n 20 km² en een nuttig volume van 720 miljoen m³. Hierbij is een debiet van 15000m³/s doorheen de turbines mogelijk. Het debiet wordt met regelbare sluizen gecontroleerd.

6.3 Bergcentrales

6.3.1 Werkingsprincipe

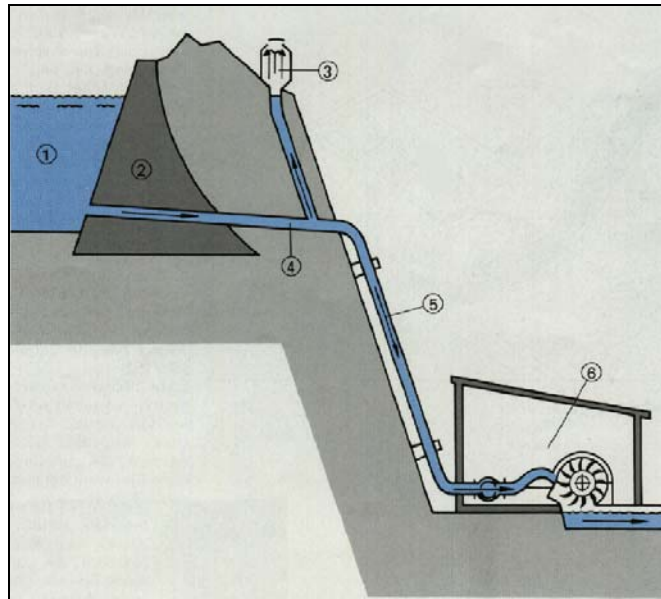
In tegenstelling tot vlaktecentrales zijn bergcentrales niet aangelegd voor continu bedrijf. Om de waterkracht van een bergrivier te benutten, zal men op een doelmatig gekozen punt een stuwdam oprichten, waardoor een kunstmatig meer ontstaat. Grosso modo kan men twee categorieën onderscheiden:

- De centrale kan gelegen zijn onmiddellijk aan de voet van de stuwdam of kan zelfs ingebouwd zijn.
- De centrale kan ook op tamelijk grote afstand gelegen zijn van de stuwdam. Dit zal het geval zijn als men ook nog gebruik wenst te maken van een natuurlijk verval in de omgeving van de stuwdam.

In dit tweede geval vertrekt uit het meer (1), dat door een stuwdam (2) ontstaan is, een aanvoerkanaal (4), dat met een kleine helling dalwaarts gericht is en boven het punt waar de centrale is aangelegd, in een evenwichtzuil (3) eindigt. Het doel hiervan is om bij plotselinge belastingsveranderingen ramstoten in het aanvoerkanaal te vermijden. Uit de basis van het aanvoerkanaal vertrekken de drukleidingen (5), van staal of beton vervaardigd, die het water naar de turbines (6) voeren. Uit deze laatste loopt het water in het afvoerkanaal naar de rivier terug.

Een belangrijk vraagstuk is de regeling van het waterdebiet. Het aangevoerd debiet varieert op zeer onregelmatige wijze gedurende het jaar, terwijl de energie die de centrale dagelijks moet leveren doorgaans regelmatig is. De ligging en de hoogte van de dam moeten daarom zo gekozen worden dat er ook gedurende het droge seizoen steeds een voldoende waterreserve aanwezig is.

Naast energievoorziening hebben stuwmuren ook nog een belangrijke functie van drinkwaterreservoir, vrijetijdsgebied en waterreservoir voor irrigatie van landbouwgronden.



Werkingsprincipe van een bergcentrale

6.3.2 Voorbeeld van een bergcentrale



La Grande Dixence is de hoogste stuwdam in de wereld. Met een hoogte van 285 m en een lengte van 700 m weegt ze wel 15 miljoen ton. Ze kan 400 miljoen m³ water tegenhouden, hetgeen goed is voor 2 miljard kWh.

6.4 Pompcentrales

6.4.1 Werkingsprincipe

De voornaamste rol van een pompcentrale bestaat erin in een hogergelegen spaarbekken water op te slaan dat tijdens de uren van laag elektriciteitsverbruik uit een lager gelegen reservoir omhoog gepompt wordt. De nodige energie die hiervoor nodig is, wordt door het net geleverd aan de alternatoren van de centrale die dan als motor werken en die de hydraulische machines aandrijven die als pomp werken. Tijdens periodes van grote vraag naar energie (piekbelasting) wordt het opgeslagen water naar beneden geleid en geturbineerd. De hydraulische machines werken nu als turbine en drijven de alternatoren aan, zoals bij gewone bergcentrales. Het globale rendement van deze operatie is gewoonlijk 70% tot 75 %.

De verantwoording van pompcentrales ligt in het grote verschil tussen de kostprijs van de opgenomen energie (tijdens de uren van laag verbruik, zoals 's nachts en in de weekends) en van de afgegeven energie (tijdens de piekuren). Dit verschil kan een factor 4 en meer zijn.

Een groot voordeel is de soepelheid van dergelijke installaties. Deze machines kunnen in noodgevallen in twee minuten van vollast pompbedrijf naar vollast turbinebedrijf worden omgeschakeld.

Vervolgens kunnen deze centrales zeer snel belangrijke belastingsschommelingen in het net opvangen (uitvallen van een zware belasting of een grote productie-eenheid).

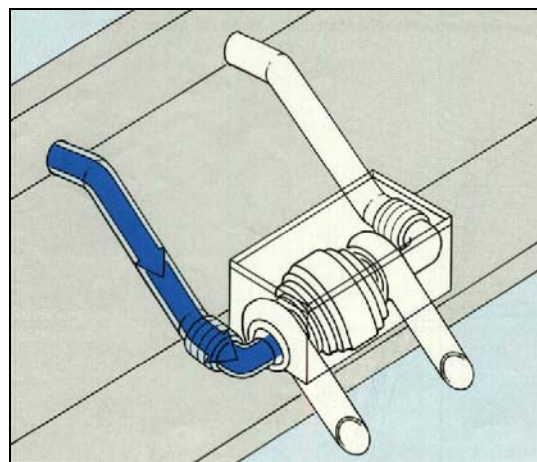
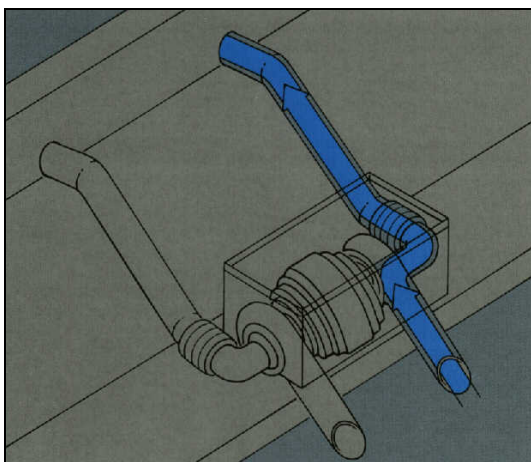
Tenslotte kunnen deze alternatoren nog gebruikt worden voor de productie van reactieve energie, als synchrone compensatoren. Verschillende uitvoeringsvormen zijn mogelijk, afhankelijk van het aantal machines per groep:

- vier eenheden (pomp, motor, turbine, generator), wat weinig toegepast wordt;
- drie eenheden (synchrone motorgenerator, pomp, turbine);
- twee eenheden (motorgenerator en omkeerbare pompturbine)

In het laatste geval is een Pelton-turbine natuurlijk onmogelijk. De laatste oplossing heeft het voordeel dat de investeringskosten kleiner zijn (20 tot 30% op de gehele centrale).

Daartegenover staan diverse nadelen:

- Het rendement van de pomp-turbine samenstelling is lager dan bij twee afzonderlijke machines.
- Bij overgang van pomp- naar turbinewerking moet de draaizijn van de machine veranderd worden. De opeenvolgende bewerkingen zijn: afschakelen van de synchroonmachine van het net, afremmen van de roterende delen, omschakelen van de synchroonmachine, versnellen van de rotoren en synchroniseren van de synchroonmachine op de netfrequentie. Het is dus niet verwonderlijk dat installaties met drie machines sneller omschakelen van pomp- naar turbinewerking.

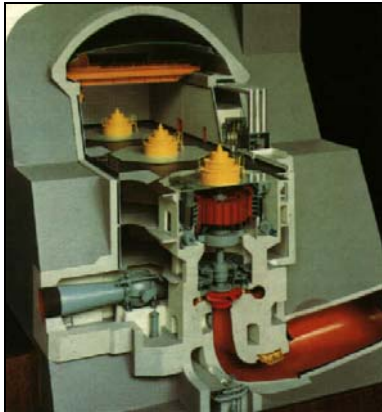


Weringsprincipe van een pompcentrale

6.4.2 Voorbeeld van een pompcentrale

De bij ons meest gekende pompcentrale is die van Coe-Trois-Ponts, die eind 1971 voor het eerst in bedrijf werd genomen. Op deze plaats vond men het grootste hoogteverschil op kleine afstand in België (ca. 250 m). Een kunstmatig bovenbekken met een inhoud van 4.000.000 m³ werd aangelegd, terwijl het benedenbekken (8.540.000 m³) gevormd wordt door een afdamming van de Amblève. De drie omkeerbare aggregaten van 145 MW ieder, gemiddeld gerekend voor 133 MW, zijn geïnstalleerd in een ondergrondse centrale. Ze zijn verticaal opgesteld en draaien met een snelheid van 300 t/min. De

turbinepomp van elk aggregaat is van het Francis-type. De onderstaande figuur geeft een idee van de opstelling van een groep.



Francis-turbines in Coo

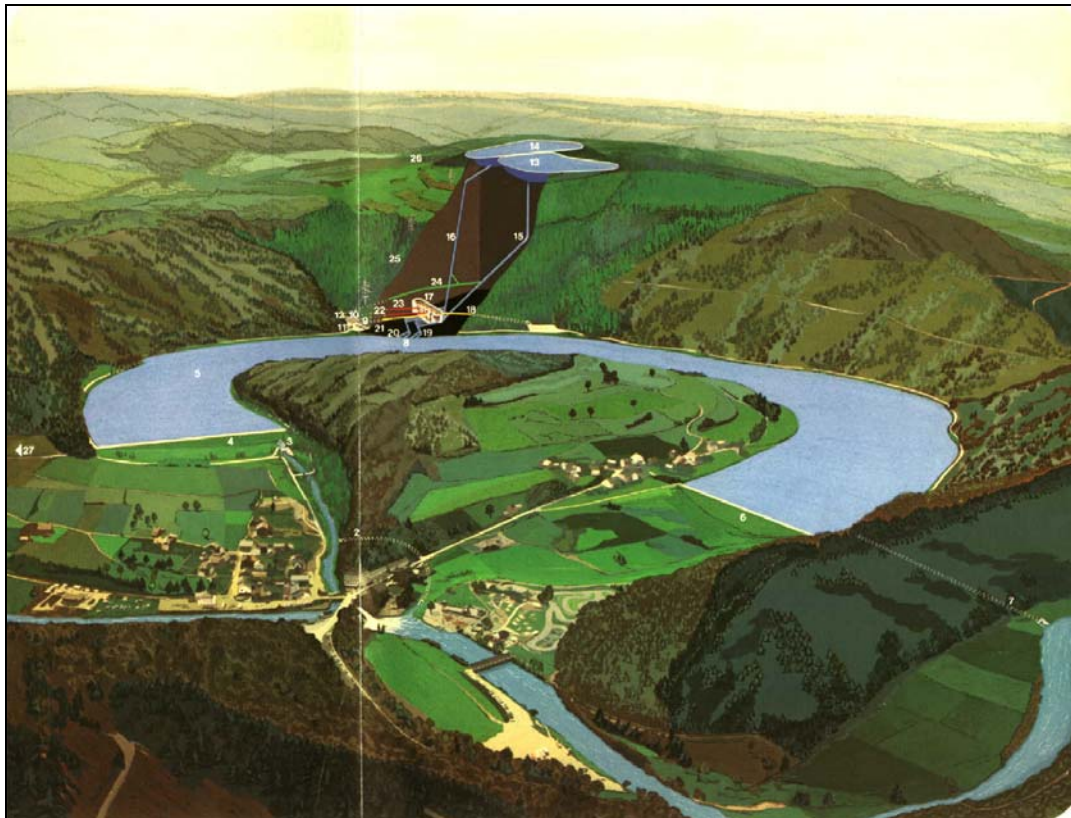
In een tweede stadium werden drie generatorgroepen van elk 200 MW aan de drie bestaande toegevoegd, zodat er nu in het totaal ongeveer 1000 MW beschikbaar is. Ook werd een tweede bovenbekken aangelegd met een inhoud van 4.540.000 m³. In het jaar 1979 is de tweede bouwphase van de pompaccumulatiecentrale Coo-Trois-Ponts afgesloten.

Een dergelijke methode om energie te stockeren laat aan de grote thermische centrales, die de basislast van het Belgische elektriciteitsnet leveren, toe op een regelmatig en voordeliger regime te werken, niettegenstaande de schommelingen van het verbruik.

Als enige belangrijke waterkrachtcentrale in het land biedt de centrale in Coo bovendien aan het nationaal elektriciteitsnet de specifieke voordelen van een dergelijke installatie, nl. een soepele regeling van het geleverd vermogen en een uiterst snelle start, hetgeen er een ideale reserve-eenheid van maakt bij het uitvallen van een thermische of nucleaire groep. Ze wordt vanuit de nationale dispatching in Linkebeek volledig op afstand bediend.

De accumulatiecentrale veroorzaakt geen milieuverontreiniging, en verbruikt zelfs geen water, vermits steeds dezelfde massa water van één bekken naar een ander overgebracht wordt. Het natuurlijke kader van Coo werd ten andere bewaard, vermits behalve de beide waterbekkens de installaties ondergronds opgesteld werden.

Met zes groepen in bedrijf kan men 6 uur lang op vollast energie afleveren. Dezelfde omkeerbare groepen kunnen als pompen werken, en de beide bovenbekkens in ongeveer 8 uur vullen.



Totaalbeeld van de centrale in Coo

7 Microwaterkracht

7.1 Het begrip microwaterkracht

Met een microwaterkrachtinstallatie wordt een installatie aangeduid waarbij potentiële energie aanwezig in een waterloop, wordt omgezet naar mechanische energie bij een netto vermogen minder dan 1 MW. Die grens van 1 MW is vrij arbitrair. Hij is bedoeld om een onderscheid te maken met installaties die gekenmerkt worden door grote ingrepen in de waterloop, meer bepaald het plaatsen van een stuwdam met vorming van een stuwmeer.

Het hoofdkenmerk van een microwaterkrachtinstallatie is dat de ingreep op de waterloop, nodig om de energie om te zetten, beperkt blijft. Bij een typische installatie wordt een stuw in de waterloop geplaatst. Een gedeelte van het water wordt naast de stuw geleid naar een machine die aangedreven wordt door het water. Veelal staat de machine direct naast de stuw en gebeurt de omleiding van het water alleen lokaal. In andere gevallen staat de machine afwaarts van de stuw en is er een tamelijk lang toevoerkanaal naar de machine. Essentieel in alle gevallen is dat de waterloop weinig gewijzigd wordt, zodat er geen grote gevolgen zijn voor de natuur in de omgeving van de waterloop.

Hierna bespreken we enkele vormen van microwaterkracht. Aangezien het hier maar om kleinschalige centrales gaat en de verscheidenheid in de verschillende landen groot is, beperken we ons tot Vlaanderen.

7.2 Watermolens

Watermolens behoren tot de eerste vorm van microwaterkrachtinstallaties. De meeste molens in Vlaanderen zijn uitgerust met waterwielen. Zoals we reeds gezien hebben bij de ontwikkeling van de turbines, bestaan hiervan verschillende types: bovenslagraderen, middenslagraderen en onderslagraderen. Sommige molens hebben een turbine. Het betreft dan meestal een Francis-turbine. Waterwielen hebben in Vlaanderen altijd een zeer beperkt vermogen, typisch tot zowat 20 kW. Op plaatsen met een groter beschikbaar vermogen staat normaal een turbine. Het vermogen van deze machines gaat in Vlaanderen tot 75 kW.



Kasteelmolen in Schorisse

Vlaanderen, inclusief Brussel, telt vandaag nog zowat 320 watermolens, waarvan het grootste gedeelte van de molens een valhoogte heeft tussen 1 en 3 m. Zelden is de valhoogte meer dan 5 m.

Alhoewel de meeste watermolens in Vlaanderen al lang buiten gebruik zijn, bleven de molengebouwen meestal nog goed bewaard. Twee derde is in zeer goede bouwkundige staat. Meer dan de helft zijn beschermd. Lang niet alle sites bezitten nog hun waterwiel. Ook niet alle bestaande watermolens worden nog gevoed door water. Bij vele watermolens is de waterloop verlegd of verdwenen. Slechts met grote infrastructuurwerken zou men deze molens weer water kunnen geven.

De meeste molens hebben een uiterst klein vermogen, d.w.z minder dan 5 kW.

7.3 Stuwen en sluizen

Naast historische watermolens zijn er in Vlaanderen bevaarbare rivieren en kanalen die uitgerust zijn met stuwen en sluizen, die dienen voor waterbeheersing en om scheepvaart mogelijk te maken. Bij deze stuwen staan normaal geen waterkrachtinstallaties. Er zijn maar weinig plaatsen waar dit wel het geval is. Voorbeelden zijn de stuw op het Albertkanaal te Wijnegem (turbine van 250 kW) en de stuw op de Leie te Harelbeke (2 Francis-turbines van 125 kW, maar niet meer in werking). Bij de meeste stuwen bestaat wel de mogelijkheid om een kleine waterkrachtinstallatie aan te brengen. In Vlaanderen is het grootst mogelijke vermogen zowat 800 kW.



De meerderheid van de locaties heeft een valhoogte tussen 1 m en 3 m. Valhoogtes groter dan 5 m komen slechts zeer weinig voor. Dit zijn de stuwen op het Albertkanaal (valhoogte 10 m).

7.4 Het potentieel van kleine waterkracht in Vlaanderen

De v.z.w TSAP heeft midden 1996 de inventarisatie van het waterkrachtpotentieel voor Vlaanderen, inclusief Brussel, beëindigd. Enerzijds zijn klassieke molensites bestudeerd waar zich waterkrachtinstallaties bevinden. Anderzijds werden bestaande stuwen bestudeerd waar, op twee uitzonderingen na, geen waterkrachtinstallaties aanwezig zijn, maar waar de mogelijkheid tot exploitatie bestaat. Het totaal potentieel beschikbaar vermogen van beide categorieën wordt respectievelijk op 4,2 MW en 10,8 MW geschat.

7.5 Andere mogelijkheden

De inventarisatie van de v.z.w TSAP betreft het potentieel aan kleine waterkracht. Daarnaast is er theoretisch nog de mogelijkheid tot een grote waterkrachtcentrale van ongeveer 10 MW op de Maas in de omgeving van Maaseik als daar een stuw zou worden gebouwd. Er bestaat ook de mogelijkheid tot installeren van een getijdencentrale van ongeveer 3,4 MW op de spuikom van Oostende.

7.6 Getijdenmolens

Waar de getijdenwerking voelbaar was, o.m op de Schelde van Antwerpen tot zelfs Gent, bouwde men in Vlaanderen in totaal meer dan 60 molens die gebruik maakten van de energie van de zich periodisch verplaatsende watermassa. Op foto van de getijdenmolen te Rupelmonde (16e eeuw) is het rad en de uitlaat van het maalwater (links) bij eb duidelijk te zien. Bij vloed wordt het water via de vloedgaten (rechts) naar de achtergelegen spaarkom geleid. Bij eb laat men het water via het onderslagrad uit het spaarbekken, zodat er gemalen kan worden. Deze unieke molen is momenteel helemaal gerestaureerd en maalt op geregelde tijdstippen, op de regelmaat van eb en vloed.



Getijdenmolen in Rupelmonde

7.7 Exploatiemogelijkheden

Het totaal vermogen aanwezig in de molensites is vrij gering (4,2 MW) en het vermogen per site is meestal ook zeer gering (slechts 18 molensites met een vermogen groter dan 40 kW). Principieel zijn deze sites daarom niet vanzelfsprekend interessant voor de productie van elektrische energie. Het gebeurt wel vaak dat molensites gerestaureerd worden om historische redenen. In het algemeen is het dan mogelijk om aan de molen een energetische functie te geven. Een voorbeeld van een dergelijke restauratie is de Molen Van Doren te Rotselaar waar een Francis-turbine van 76 kW in werking is. Ook bij sites van minder groot vermogen, vooral sites met waterwielen, kan inwerkingstelling voor elektriciteitsproductie economisch verantwoord zijn.

Bij bestaande stuwen is er niet altijd direct mogelijkheid tot oprichten van een waterkrachtinstallatie. Veelal is een aanpassing van de bouwkundige structuur nodig. Speciaal aanpassen voor waterkrachtexploitatie is duur. Het komt er op aan dat bij de eventuele herinrichting van een stuw er op gelet zou worden dat tegelijkertijd de mogelijkheid tot waterkrachtexploitatie zou gegeven worden. Als de bouwkundige voorzieningen op deze manier kunnen getroffen worden, is enkel de kost van de elektromechanische uitrusting ten laste van de waterkrachtexploitatie. Turbines voor toepassing bij kleine waterkracht zijn in het algemeen eenvoudig van constructie en daarom niet erg duur. In principe komen alle locaties met stuwen in aanmerking voor exploitatie. De interessantste zijn uiteraard deze waarbij het waterdebiet het meest gelijkmatig is gedurende het jaar. Dit zijn niet noodzakelijk de locaties met het grootste vermogen.

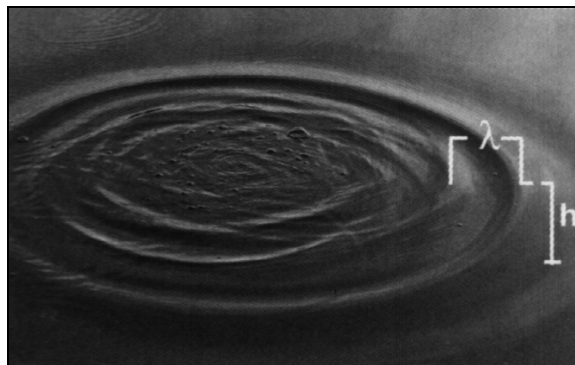
8 Golfenergie

8.1 Een zeegolf

Elke verstoring van het wateroppervlak veroorzaakt golven. De vorm van zeegolven is meestal onregelmatig en lijkt helemaal niet op de mooie sinusgolf, zoals een vallende steen die in een rimpelloze vijver veroorzaakt. Toch is het zinvol om voor een beschrijving van een zeegolf de sinusgolf als uitgangspunt te nemen. De golflengte λ is de horizontale afstand tussen twee opeenvolgende golftoppen of -kruinen. De tijd die op een bepaald punt verloopt tussen het passeren van twee opeenvolgende kruinen noemt men de periode T . De golfsnelheid v is de snelheid waarmee een golftop passeert. Tussen deze drie grootheden bestaat de bekende relatie:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Bij watergolven speelt de golfhoogte h een kenmerkende rol. De golfhoogte is de verticale afstand tussen de golftop en het golfdal. Vergeleken met harmonische golven is de golfhoogte dus gelijk aan de dubbele amplitude.



Kenmerken van een zeegolf

Men kan het vermogen van een zeegolf exact berekenen. De helft van de golfperiode (in seconden) vermenigvuldigd met de significante hoogte (in meters) in het kwadraat levert het vermogen per meter kambreedte in kilowatts:

$$P = \frac{h_s^2 T}{2}$$

De significante hoogte is de gemiddelde hoogte van de 33% hoogste golven. Bij een zware zeegang loopt het vermogen per meter kambreedte al vlug op tot waarden van een megawatt.

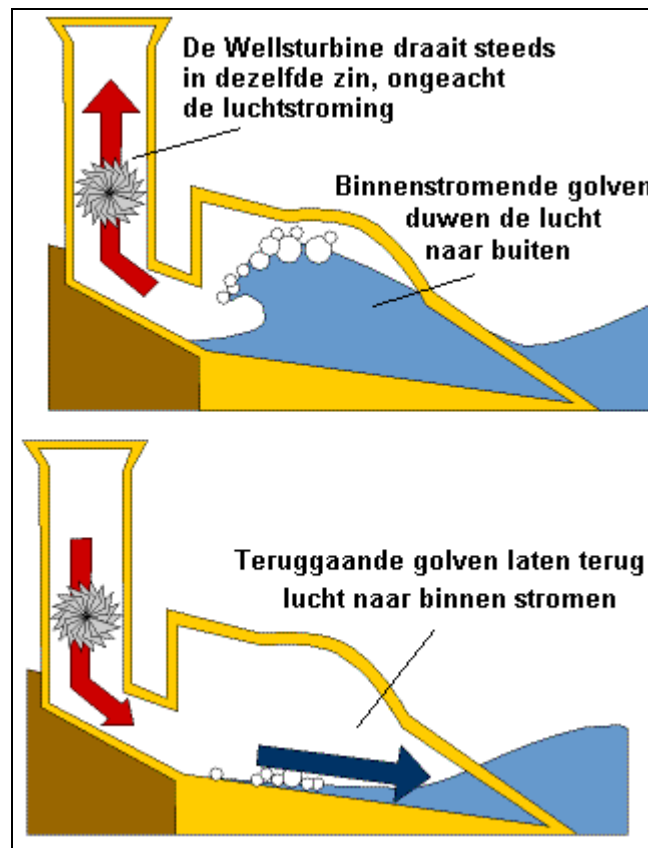
8.1 Generatoren met een vaste positie

Vast gepositioneerde elektriciteitsgeneratoren, ofwel op de zeebodem ofwel op een kuststrook, bieden belangrijke voordelen ten opzichte van hun drijvende tegenhangers, in het bijzonder op het gebied van onderhoud. De enige bewegende delen zijn de turbines. Toch zorgt het beperkt aantal geschikte plaatsen voor een groot nadeel.

8.1.1 Osprey

Als eerste golfcentrale bespreken we de Osprey. Osprey staat voor Ocean Swell Powered Renewable Energy. De centrale zet de op- en neergaande beweging van het water om in een luchtstroom die een Wellsturbine aandrijft. Het bijzondere aan een Wellsturbine zijn de symmetrische schoepen waardoor de turbine, ongeacht de richting van de luchtstroom, steeds in dezelfde richting draait. Dit gebeurt in twee stappen:

- Wanneer een golf de Osprey binnenkomt, zal ze de opgesloten lucht naar buiten willen drijven. Wanneer er voldoende druk opgebouwd is, zal de turbine beginnen draaien, en elektriciteit opwekken.
- Het omgekeerde gebeurt wanneer de golf zich terugtrekt. Er zal zich dan in de Osprey een onderdruk opbouwen, waardoor er, via de turbine, lucht naar binnen wordt gezogen.



Werking van de Osprey

De Osprey is geheel van staal dat niet drijft, maar wordt verankerd op de zeebodem. De centrale is mobiel. Hij wordt als een schip naar de plaats van bestemming versleept, waar men hem afzinkt op de zeebodem door zijn ballasttanks te vullen met zand. Wanneer men wil, kan de ballast worden uitgepompt en kan OSPREY op een andere plaats worden ingezet.

De Osprey is gebouwd om in totaal 2MW elektriciteit te leveren. De windturbine is achteraf aan het oorspronkelijke ontwerp toegevoegd. In de meestal strakke bries op zee kan die in totaal nog 1,5 MW extra leveren. De Osprey is via een onderzeese kabel verbonden met het elektriciteitsnet op het land. De machine zal in de eerste plaats elektriciteit leveren aan een plaatselijke ontziltingsinstallatie in Derdewereldlanden. Chemische ontzilting van zeewater kost zoveel energie, dat dit voor deze landen veel te duur is. De energie van OSPREY kost naar verhouding maar een schijntje. De Osprey kan ook ingezet worden om stroom te leveren aan afgelegen gebieden, zoals eilanden. De elektriciteit van de Osprey is wel iets duurder dan die van de 'conventionele' bronnen.

Dat het gebruik van golfenergie op kleine schaal haalbaar is, bewees men in 1985 in Noorwegen. Daar plaatste men een golfslagcentrale met een vermogen van 850 kilowatt.

Het Noorse systeem maakt gebruik van een kunstmatig verticaal tochtgat in een steile kustwand. In een grot aan de waterspiegel persen opkomende golven lucht samen. De lucht kan alleen ontsnappen door het tochtgat en de daarboven geplaatste turbine. Afgaande golven creëren een onderdruk in de grot, waardoor de luchtstroom in het tochtgat wordt omgedraaid. Doordat ook in de Noorse installatie een turbine is toegepast die altijd dezelfde kant op draait, wordt bij beide richtingen van de golfbeweging energie opgewekt.



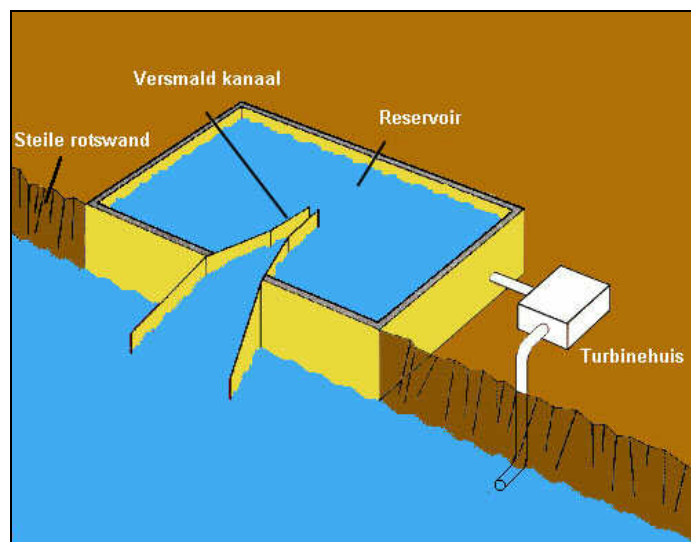
Het Noorse systeem



De Osprey tijdens constructie

8.1.2 Tapchan

Tapchan, of tapered channel system, wat zoveel wil zeggen als versmald kanaalsysteem, bestaat uit een versmald kanaal, dat in verbinding staat met een reservoir, dat op een steile rots staat.



Onderdelen van het Tapchan-systeem

Doordat het instroomkanaal versmald is, zal naarmate de golven de rotswand naderen, hun hoogte (amplitude) toenemen. Uiteindelijk zal het water terechtkomen in het reservoir, dat enkele meters boven de zeespiegel staat. Daar wordt de kinetische energie van de bewegende golven omgezet in potentiële energie. Daarna wordt het water doorheen een Kaplan-turbine gevoerd, waar het zijn potentiële energie afgeeft. De werking is eigenlijk analoog aan die van een pompcentrale, alleen dat hier het water niet via een pomp, maar op natuurlijke wijze op een hoger niveau wordt gebracht. Met weinig bewegende delen, alleen maar in het turbinehuis, zijn er maar weinig onderhoudskosten en een grote betrouwbaarheid.

TAPCHAN systemen kunnen ook voorzien in elektrische energie op vraag, aangezien het water in het reservoir kan bewaard worden. Echter, TAPCHAN systemen zijn niet geschikt in alle kuststreken. De golven moeten een goed gemiddelde aan energie hebben. Het verschil tussen eb en vloed moet ook minder zijn dan 1 meter. Het water moet ook diep zijn kortbij de kust en er moet plaats zijn voor een reservoir.

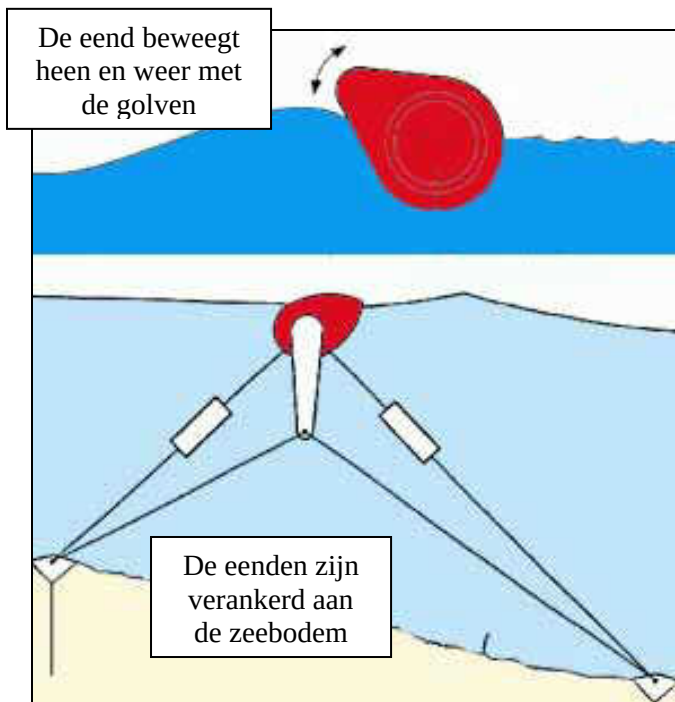
8.2 Drijvende generatoren

Zoals de naam het zegt genereren deze toestellen energie uit de harmonische beweging van het beweegbare deel van de generator. In tegenstelling met de generatoren met een vaste positie, is de hele machine vrij beweegbaar op het ritme van de golven. De rotor is nog wel vast gepositioneerd t.o.v de generator, maar de beweegbare delen zorgen voor een stroming van een fluïdum, dat de rotor aandrijft. Hierdoor hoeven ze niet zo robuust uitgevoerd te worden.

8.2.1 De Salter-eend

Stephen Salter van de universiteit van Edinburgh begon in 1974 met het onderzoek naar golfenergie. Hij is de geestelijke vader van de Salter-eenden. Dit zijn drijvende installaties met de vorm van een eendenbek, die op een lange drijvende as zijn gemonteerd en onafhankelijk van elkaar met de golfslag op en neer schommelen. Een hydraulisch systeem brengt de beweging van de golfslag via een hydraulische motor over op elektrische generatoren.

Een model (schaal 1 op 10) is uitgetest op Loch Ness in Schotland. Het golfklimaat van dit meer lijkt sterk op dat van het noordelijk deel van de Atlantische Oceaan, maar dan wel op schaal. Het model was vijftig meter lang en haalde een vermogen van 15 kW uit de golven.



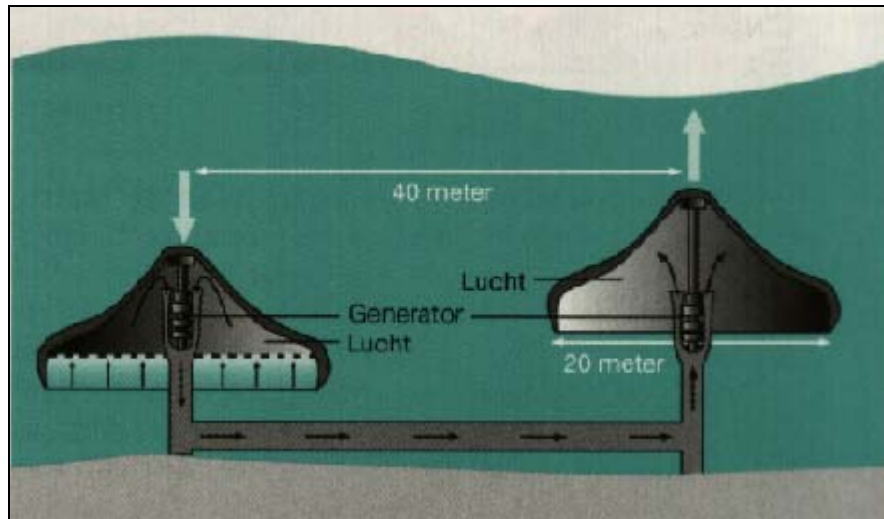
De Salter-eend

Ondanks dit succes is dit type golfslagcentrale nooit op ware grootte toegepast. Om het vermogen van een conventionele elektriciteitscentrale te halen, zijn al vlug kilometerslange rijen Salter-eenden nodig. Die vormen een gevaar voor de scheepvaart. Ook bestaat er onzekerheid over de gevolgen voor het ecosysteem van nabijgelegen kusten, als op grote schaal wordt ingegrepen op de golfbewegingen.

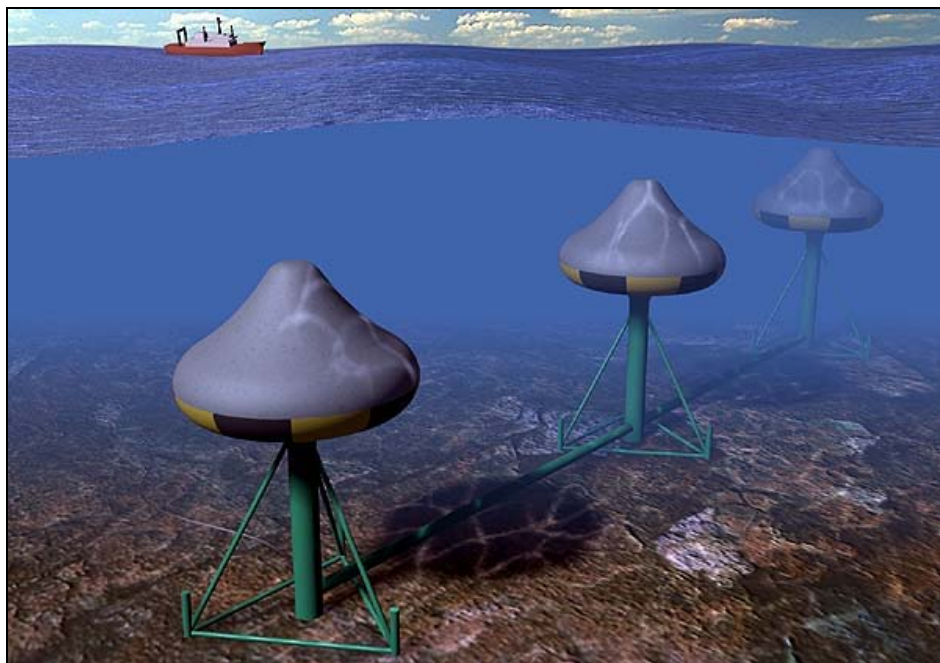
Daarnaast werden de Schotten geconfronteerd met het probleem dat de centrale zowel bij zware stormen als bij stil weer goed moet kunnen functioneren. Zwaar weer vraagt om een zeer robuuste constructie, terwijl de benutting van kleine golven juist een betrekkelijk lichte installatie vraagt.

8.2.2 Archimedes Wave Swing

De Nederlandse firma Teamwork Technology ontwikkelt de Archimedes Wave Swing (AWS). Dit systeem is stormbestendig doordat het zich vijftien meter onder het wateroppervlak bevindt. Het bestaat uit twee of meer paddestoelvormige betonnen luchtkamers, elk met een doorsnede van twintig meter en een gewicht van honderdduizend kilogram. De luchtkamers zijn via luchtleidingen met elkaar verbonden. Als er een golf over een kamer komt, stroomt door de hogere waterdruk het zeewater daar onderin naar binnen. Terwijl de kamer zinkt, perst het water lucht naar de volgende kamer, die zich dan in de trog tussen twee opeenvolgende golven bevindt. Daardoor komt de tweede kamer omhoog. De schommel kan ongeveer vijf meter op en neer bewegen. Een generator die is aangesloten op de schommel wekt elektriciteit op.



Principe van de AWS



Volgens berekeningen en proeven met schaalmodellen produceert het systeem bij een golfhoogte van één meter 0,52 megawatt. Het netto vermogen van drie van dergelijke waterschommels kan ongeveer 8 megawatt bedragen. Per kilometer kustlijn is er plaats voor zes AWS drielingen die dan samen 48 megawatt elektriciteit kunnen opwekken, aan de Noordzeekust voldoende voor 70.000 huishoudens.

8.2.3 Clam

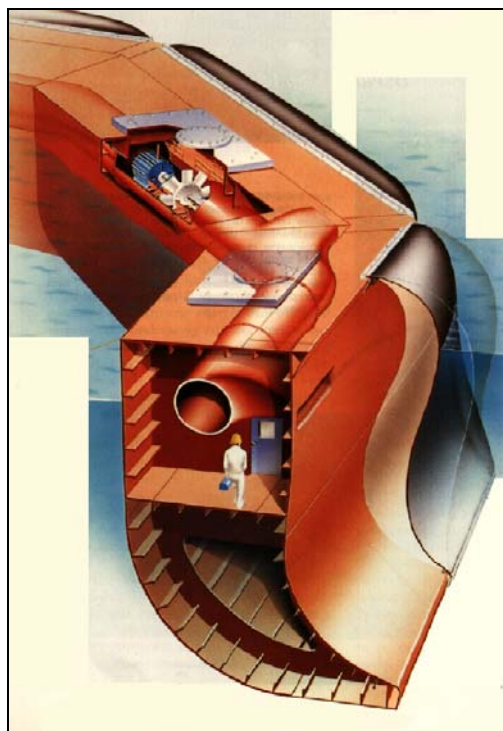
De Clam (strandgaper, een soort schelp) is een ronde constructie met een diameter van zestig meter, die op het water drijft. Ze bestaat uit twaalf holle secties. Aan de buitenkant van elke sectie zit een hard rubberen membraan, dat door de golfslag heen en weer wordt gedrukt. Elke sectie werkt daardoor als een blaasbalg, waarbij de golven voor een steeds wisselende luchtstroom zorgen. De luchtstroom drijft een Wellsturbine aan. De turbine drijft een generator aan die elektriciteit opwekt.

De hele installatie wordt verankerd in water met een diepte van minstens dertig meter. Ook de Clam is op schaal nagebouwd en onder barre weersomstandigheden uitgetest aan de noordkant van Loch Ness in Schotland. Hoewel golfslagcentrales onderhevig zijn aan sterk wisselende hoeveelheden energie die de deining aanvoert, moet het mogelijk zijn om met installaties als de Clam langs de Schotse westkust een gemiddeld vermogen van achthonderd kilowatt op te wekken.

Het voordeel van drijvende golfslagcentrales is dat ze met de deining meegaan. Daardoor hoeven zij minder dan vaste installaties bestand te zijn tegen de geweldige natuurkrachten. Door zijn ronde vorm kan de Clam golfenergie uit elke richting omzetten in elektrische energie.



De Clam - schaalmodel

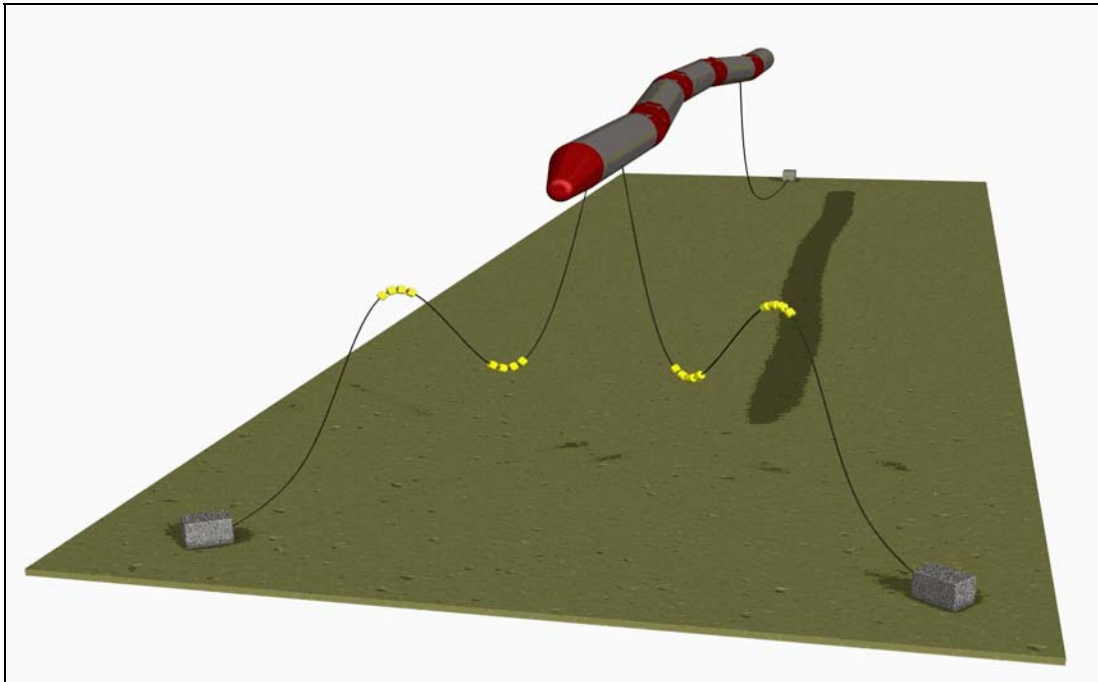


De Clam - doorsnede

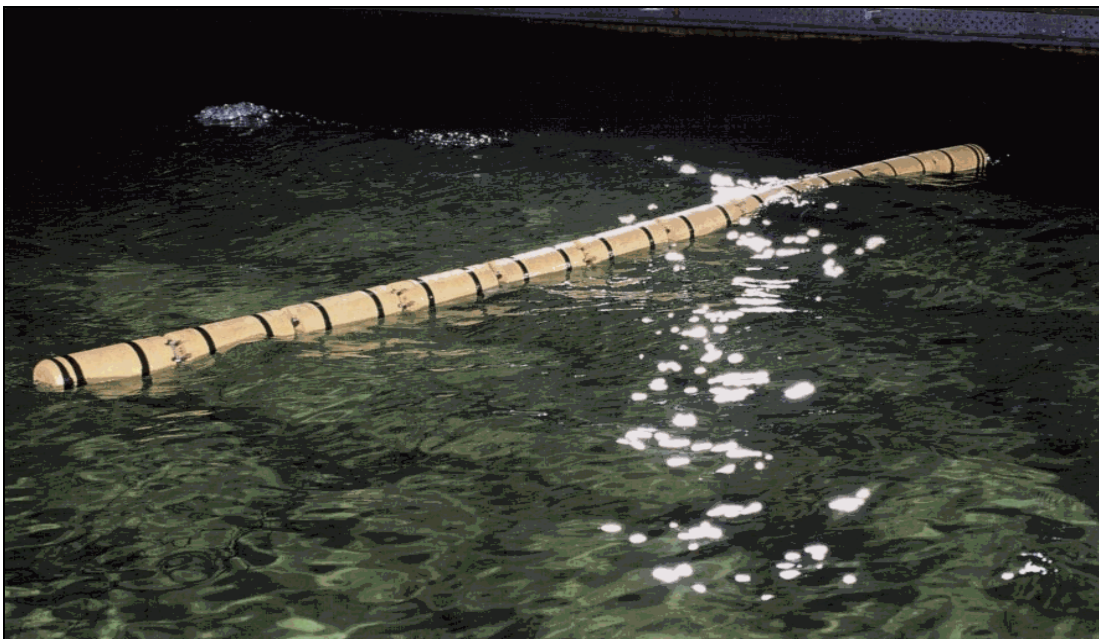
8.2.4 De Pelamis

De Pelamis, genaamd naar een zeeslang, ontworpen door Ocean Power Delivery Ltd in Schotland, is een serie van cilindrische segmenten die verbonden zijn met scharnierende verbindingstukken. Wanneer golven over de ganze lengte naar achter lopen, pompen de hydraulische cilinders in de verbindingstukken olie om een hydraulische motor aan te drijven. De gegenereerde elektriciteit wordt via een onderzeese kabel naar de kust gebracht. De Pelamis is zo'n 130 meter lang en heeft een diameter van 3,5 meter.

Deze installatie is bedoeld voor gebruik op zee. Hierbij kan het een vermogenoutput van 0,75MW leveren. De Pelamis wordt nog niet gebruikt.



De Pelamis



De Pelamis - schaalmodel

9 Beeld van de toekomst

Het is een kwestie van tijd voordat de fossiele brandstoffen schaarser en daardoor duurder worden. Daarbij zal door economische groei en ontwikkeling het wereldenergieverbruik voorlopig nog blijven toenemen, met name in Derdewereldlanden. De oceaanelnergiecentrales bieden volop perspectieven voor kustgebieden met een geschikte deining, watertemperatuur of getij. De technieken die in de 20e eeuw zijn ontwikkeld, kunnen zich in de 21e eeuw bewijzen als een volwaardige, duurzame bron van energie.

Bronnen:

HEA - Erzeugung elektrischer Energie: Wasserkraftwerke - 1995
Prof. dr. ir. D. Van Dommelen - Productie, transport en distributie van elektriciteit - 1988 - p. 35-50
ODE-Vlaanderen vzw en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap - Kleine Waterkracht - 1999
Natuur&Techniek - De oceaan als eeuwige energiebron - juni 1998 - p. 46-48
Natuur&Techniek - Golfkracht, nieuwe energiebron - november 1996 - p. 32-40
Informatiebrochure – Coo-Trois-Ponts, pompaccumulatiecentrale

Internet :

www.stadtwerke-glauchau.de
www.ode.be

