

*Waterkracht in Nederland*

## Van waterrad tot buisturbine

24

**D. Vreugdenhil**

Waterstaatszorg omvat een niet aflatende strijd tegen de overlast van water. Anderzijds omvat waterstaatszorg ook het gebruik van water voor allerlei behoeften van de menselijke samenleving en het ontwikkelen en instandhouden van gezonde en duurzaam functionerende waterhuishoudkundige systemen. Bij het gebruik van water is te denken aan scheepvaart, drink- en industriewatervoorziening, water voor land- en tuinbouw, koelwater en ook aan het opwekken van mechanische en elektrische energie. Aanleiding tot het bespreken van water als energiebron was de recente bouw van drie moderne riviercentrales in de Maas en in de Neder-Rijn. Dit artikel beoogt een algemeen overzicht te geven van de ontwikkeling van het gebruik van waterkracht in Nederland, een minder bekend aspect van omgaan met water.

**Watermolens in Europa**

Het benutten van de energie van stromend of vallend water ontstond vóór het begin van onze jaartelling. Enkele eeuwen voor Chr. werden er in Klein-Azië reeds door waterkracht aangedreven schepraders gebruikt voor bevoeiingsdoeleinden. Omstreeks het begin van onze jaartelling worden voor het eerst door water aangedreven korenmolens vermeld. Zij hadden een horizontaal liggend 'waterrad' met een verticale as, die rechtstreeks molenstenen aandreef. De Romeinen hebben watermolens ontwikkeld met verticale raderen en een horizontale as, welke door een haakse overbrenging met houten kamraders een verticale as aandreven. Deze watermolens hadden een vermogen van ca. 3 pk.

Vanuit het Middellandse Zee-gebied drong het gebruik van watermolens langzaam door in West- en Noord-Europa en in de Middeleeuwen zou het gebruik van waterkrachtenergie een grote vlucht nemen.

De verspreiding van watermolens verliep aanvankelijk langzaam. Er zijn vermeldingen uit Frankrijk (Dijon, 580) en Engeland (762), maar in de tiende eeuw waren in Engeland al honderden watermolens blijkens de beschrijving van het koninkrijk Engeland in het "Domesday Book", dat werd gemaakt in 1086 op bevel van Willem de Veroveraar. Aan het eind van de elfde eeuw stonden er in Zuidoost-Engeland al meer dan vijfduizend.

Een eerste vermelding uit Noord-Brabant dateert uit 704 (Waalre) en in Gelderland uit 1025. Waterkracht werd ook hier een belangrijke energiebron.

Watermolens werden gebruikt als korenmolens, houtzaagmolens, oliemolens, smedrijmolens en bij de gietijzerfabricage. Belangrijk was de beschikbaarheid van rivieren en beken met een voldoende en constante waterafvoer, ook in de droge tijd. In ons land waren vooral Limburg, Brabant, Gelderland en Twente met hun riviertjes en beken geschikt voor de bouw van watermolens. In de estuaria van Zuidwest-Nederland werd de getijbeweging hiervoor benut.

Waar vroeger watermolens hebben gelegen is af te leiden uit de aanwezigheid van bouwrestanten, uit kartografische bronnen, zoals stadsplattegronden of kaarten van een landsdeel. Verder uit plaatsnamen en uit schriftelijke of gedrukte bronnen zoals oorkonden over molenrechten.

Er kunnen verschillende soorten watermolens worden onderscheiden:

- waterradmolens in beken en rivieren; zij werden aangedreven door de kracht van stromend of vallend water.
- schipmolens, die op stroom in grote rivieren verankerd werden.
- getijmolens, met eb en vloed als energiebron.
- brugmolens, die in grote bruggen werden ingebouwd.
- watervluchtmolens, die zowel door water als door windkracht konden worden aangedreven.

## Waterradmolens

Waterradmolens in beken en rivieren vormden de grootste groep. Volgens schattingen hebben er ooit ca. 800 bestaan in Limburg, Brabant, Gelderland, Twente en Drente. Daarvan waren er anno 1990 nog 85 over. Daarmee vergeleken was het aantal windmolens in de Lage Landen sterk in de meerderheid. In de achttiende eeuw waren er volgens Forbes ca. 8000, waarvan 1000 in de Zaanstreek. In 1990 waren er nog 996 windmolens.

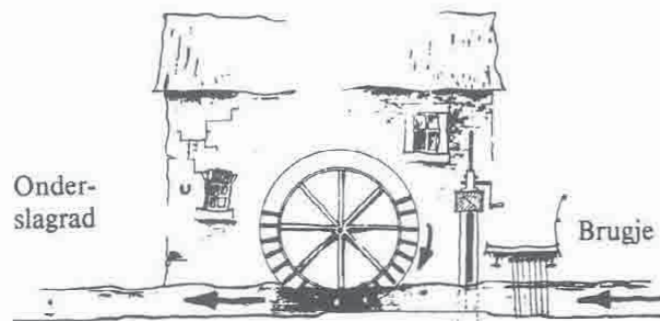
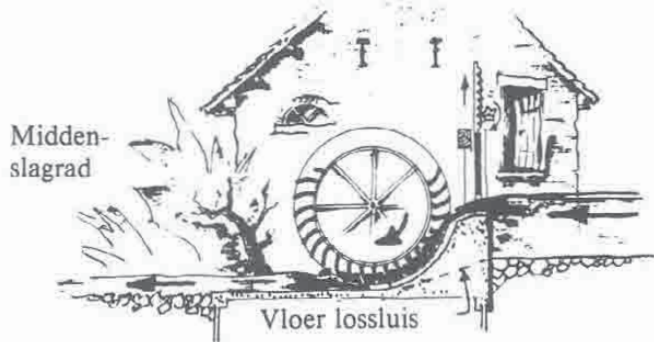
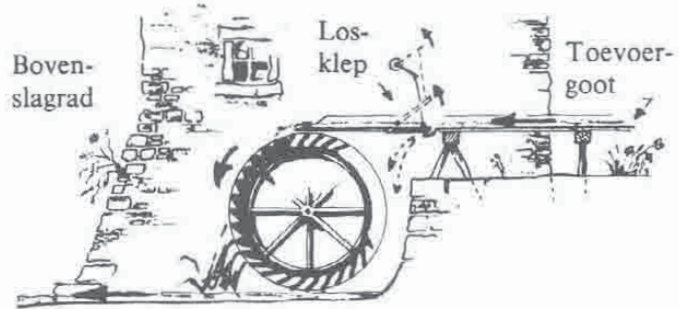
In gebieden met regelmatig stromend water konden waterradmolens worden gebouwd. In ons land was dat in Noord-Brabant, Limburg, Oost-Gelderland, Twente en op de Veluwe. In Drente kwamen van de 13e tot in de 17e eeuw ook waterradmolens voor. Er zijn zelfs funderingsresten uit ca. 1000 na Chr., maar sinds het begin van de 17e eeuw zijn deze molens in dat landsdeel verdwenen.

Bij de bouw van waterradmolens hield men rekening met een aantal 'vestigingsfactoren'. Het belangrijkste was een geschikte waterloop, een beek of rivier, die men afdamde of plaatselijk verlegde. Op de Veluwe werden zo talrijke kunstmatige waterlopen aangelegd ten behoeve van watermolens, de zogenaamde sprengen. Met een dam of stuw werd zonnodig voldoende verval voor het waterrad verkregen.

Dan moest er een klantenkring zijn of een afzetgebied, bijvoorbeeld boeren met koren of gezaagd hout. Was immers eenmaal een plaats voor de molen gekozen, dan kon de opgewekte mechanische energie ook alleen ter plaatse worden gebruikt. Tenslotte diende men rekening te houden met bestaande molenrechten van kloosters, abdijen en kasteelheren.

Voor verschillende topografische omstandigheden werden er op den duur verschillende typen waterradmolens ontwikkeld. De Romeinen begonnen daar al mee. Wij kunnen thans bovenslag-, middenslag- en onderslagmolens onderscheiden. In de 19e eeuw kwamen de turbinemolens. Twee typen molens worden hier nader besproken.

*Bovenslagmolens* werden vooral gebouwd in streken met duidelijke hoogteverschillen: Noord- en Midden-Twente, de Veluwe en Zuid-Limburg. Bij deze molens wordt het water via een goot tot boven het waterrad geleid, dat dan wordt aangedreven door de kracht van het op het rad vallende water. Dit type wordt toegepast bij betrekkelijk grote vervallen van meer dan 2,5 m. De waterraderen zijn betrekkelijk klein. Bovenstrooms van de molen wordt dikwijls een molenvijver aangelegd waarmee men 's nachts



Afb. 1. Schema van onderslagrad en bovenslagrad (uit: Nijhof, blz. 18).



Afb. 2. Watermolens waren een dankbaar thema voor zeventiende-eeuwse landschapsschilders. Meindert Hobbema. Watermolen (Den Haag, Mauritshuis).

water kan accumuleren, dat overdag wordt omgezet in maalenergie. Bovenslagwielen hadden een behoorlijk rendement, namelijk ca. 60%, bij een uitgekende constructie zelfs 80 à 90%. In streken met kleinere hoogteverschillen (vervallen van 1,5 à 2 m) werden vooral *onderslagmolens* toegepast, met name in Oost- en Midden-Brabant, Midden- en Noord-Limburg, Zuid-Twente en in delen van de Gelderse Achterhoek. Ook de inmiddels al eeuwen verdwenen watermolens in Drente waren van het onderslagtype. Bij deze molens vindt de aandrijving van de waterraderen plaats door de kracht van stromend water. De raderen hebben grotere diameters: 4 tot 8 m en soms nog meer. Het rendement is beperkt, nl. 25 à 30%.

Eeuwenlang werden watermolens geconstrueerd in eikenhout, in de 19e eeuw ging men ook ijzerconstructies toepassen.

## Sprengen op de Veluwe

De hierboven al genoemde sprengen verdienen nadere aandacht. Het zijn door mensen gegraven kunstmatige beken op de Veluwe ten behoeve van de bouw van watermolens. Zij komen vooral langs de vrij steile oostelijke en zuidelijke randen van het Veluwe plateau voor.

De eerste sprengen werden reeds gegraven in de 11e eeuw, het merendeel in de 16e en 17e eeuw, maar ook nog een aantal in de 19e eeuw, onder andere voor de voeding van het Apeldoorns Kanaal.

Sprengen zijn ingravingen in de randen van het Veluwemassief tot op het diepe grondwater. Zij reiken van 2 à 4 m, tot soms zelfs 7 m beneden maaiveld. De uitgegraven grond werd dikwijls langs de randen gedeponeed.

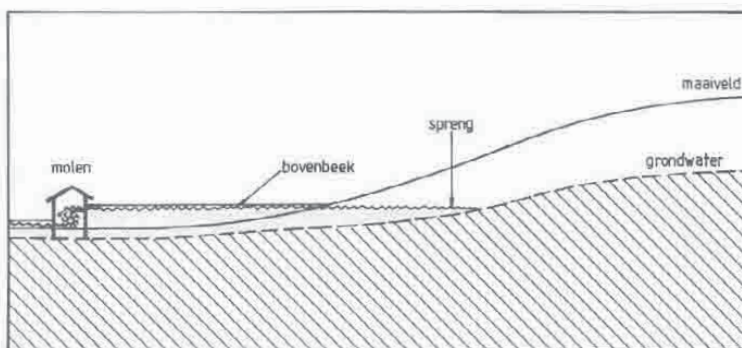
Sprengebeken hebben een constante waterafvoer en vrij grote vervallen; zij zijn daarvoor geschikt voor bovenslagwatermolens. Vervallen werden op één of meer punten geconcentreerd door aanleg van dijken langs de beken. Boven deze molens werden meestal stuw- of molenvijvers aangelegd, de zogenaamde wijerds, als bezinkbekken voor bladeren, takken, en dergelijke en als waterbuffer in het molenbedrijf. Er zijn soms vrij ingewikkelde sprengensystemen gegraven. De sprengebeken vertegenwoordigen een apart halfnatuurlijk landschapstype met een bijzondere flora en fauna. Na het verdwijnen van de watermolens bleven veel sprengen nog belangrijk voor de watervoorziening van de nieuwe papierfabrieken en van de wasserijen op de Veluwe.

Voor het behoud van het sprengen-milieu is goed onderhoud nodig. Regelmatig schoonmaken (ruimen) van de sprengen is erg belangrijk omdat zij anders verstopt raken door bladeren, takken, plantengroei of verzanding. Dit onderhoud dient kleinschalig te worden uitgevoerd, niet grootschalig machinaal of met chemische middelen. Voor het instandhouden van de Veluwse sprengen en beken werd in 1979 door beek-eigenaren en natuurliefhebbers een stichting opgericht. De zorg voor de waterkwaliteit van de beken en sprengen berust bij het zuiveringschap Veluwe te Apeldoorn, het kwantiteitsbeheer bij het waterschap Oost-Veluwe te Twello en het grondwaterbeheer bij de provincie Gelderland.

## Watermolens in Velp en Rozendaal

De bouw en het bedrijfsgebruik sinds de elfde eeuw van 16 watermolens langs de Beekhuizer beek en de Rozendaalse beek in Velp en Rozendaal is illustratief voor de benutting van waterkracht langs de Veluwezoom. De Rozendaalse beek en de Beekhuizer beek zijn respectievelijk ca. 4200 m en 3400 m lang en telden 10, respectievelijk 6 watermolens. De gezamenlijke benedenloop door de uiterwaarden naar de IJssel is ca. 1600 m lang. In het kleine stroomgebied van beide beken komen wij de belangrijkste bedrijfsoorten tegen van de watermolens op de Veluwe, namelijk:

- het malen van graan (vanaf de 11e eeuw);
- de fabricage van zeemleer, door middel van stampen (16e eeuw);
- de fabricage van olie uit zaden, door middel van pletten (14e en 15e eeuw);
- het vervaardigen van koperwerk voor ketels van branderijen en brouwerijen, verder voor scheepswerven (bouten, bekleding van scheepswanden) (17e eeuw);
- het vervaardigen van geschept papier uit lompen (17e tot 19e eeuw);
- het aandrijven van wasserijen, waarbij tevens het heldere beekwater als waswater diende (19e eeuw).



Afb. 3. Schets van een sprengenbeek.  
(naar Nijhof, blz. 76).

Op grond van gegevens van Kerkkamp kan het volgende overzicht worden opgesteld voor het aantal molens en het daarmee uitgeoefende bedrijf: vijf korenmolens, één leermolen, één oliemolen, twee kopermolens, dertien papiermolens en twee of drie wasmolens; in totaal 24 of 25 molens. Dit lijkt in strijd met het genoemde totale aantal van 16 molens. Bedacht moet echter worden, dat molens in de loop der tijd dikwijls werden verbouwd voor een andere bedrijfsvorm. Zo werden korenmolens in de 17e en 18e eeuw verbouwd tot papiermolens. Toen hierdoor zelfs een tekort aan korenmolencapaciteit dreigde te ontstaan, nam de raad van Arnhem in 1621 het besluit om op de stadswallen een windmolen te plaatsen.

Wasmolens vormden soms een nevenbedrijf van papiermolens, hetgeen ook van invloed is op bovenstaande telling.

Over de technische aspecten van de in dit hoofdstuk besproken watermolens, zoals waterafvoeren, vervallen en afmetingen van de waterraderen, is weinig bekend. De Rozendaalse beek had een grotere waterafvoer dan de Beekhuizer beek. Langs deze laatste beek zijn uit 1795 enige vervallen bekend:

Beekhuizer molen	12 voet 3 duim	(3,67 m)
Keijenberg molen	13 voet 1 duim	(3,92 m)
Molen het Horstje	10 voet 6 duim	(3,15 m)

(N.B. Een voet is gesteld op 30 cm).

De toegepaste vervallen waren kennelijk 3 à 4 m. De molens waren van het bovenslagtype.

Van de 16 watermolens in Velp en Rozendaal bestaat er nog één, de in 1391 reeds vermelde Van Lennepmolen, niet ver van het postkantoor te Velp. Deze korenmolen is tot ca. 1900 in gebruik gebleven. Hij werd in 1924 door de gemeente aangekocht en gerestaureerd. In 1961 brandde de molen af waarna hij in 1966 werd herbouwd. Nu is hij in gebruik als taveerne voor recepties en partijen terwijl het nog regelmatig draaiende waterrad het dorpsbeeld verlevendigt.

De Rozendaalse korenmolen bleef in bedrijf tot 1945. Bij de bevrijding in april van dat jaar werd deze molen, waarin munitie was opgeslagen, door Duitse troepen opgeblazen en later niet meer herbouwd.

Van de omstreeks 1617 gebouwde papiermolen aan de Keijenberg resteert nog het oude molenaarshuis, en in Rozendaal nog een molenschuur.

Verder zijn er in Velp en Rozendaal nog restanten van molenvijvers, beekdijken en kunstmatige watervallen waar vroeger molens stonden.

## Schipmolens

Dit type molen is minder bekend omdat het vrijwel nergens meer voorkomt. De eerste schipmolens werden in 536 in Rome gebouwd tijdens een beleg van die stad door de Oost-Goten. Er zijn in Europa, Rusland en Amerika 400 voormalige schipmolens bekend. Er zullen er zeker meer zijn geweest. Zij kwamen vooral veel voor op de rivieren Tiber, Garonne, Donau, Elbe en in kleinere aantallen ook op andere rivieren. In beperkte mate kwamen schipmolens ook op Nederlandse rivieren voor, namelijk acht op de Maas bij Maastricht (16e en 17e eeuw), twee op de Waal bij Nijmegen (17e



Afb. 4. Schipmolens voor Keulen. Detail uit het stadsgezicht van Anton Woensam van Worms, 1531.

28

eeuw) en één op de IJssel bij Deventer (16e eeuw). De schipmolens bij Nijmegen zijn onder andere afgebeeld op het bekende riviergezicht op die stad door Albert Cuyp. Vermoedelijk lagen er ook op de Waal bij Tiel en op de IJssel bij Zutphen, maar de schaarse bronnen zijn daarover niet erg duidelijk. In het vlakke laagland kwamen ze niet voor.

Schipmolens waren schepen of pontons met een molenhuis en één of meer waterraderen opzij of achterop. Zij waren verankerd op stroom, dikwijls in groepen. Het waren veelal korenmolens.

Het voordeel van schipmolens was de gelijkmatige energieproductie bij een over het algemeen slechts langzaam veranderende rivierstroom, hetgeen een efficiënte bedrijfsvoering mogelijk maakte. Het nadeel was de moeilijke bereikbaarheid van de molen, de kwetsbaarheid bij ijsgang en de hinder voor de scheepvaart, zoals de grote houtvloten op de Rijn.

Het vroege verdwijnen van veel schipmolens hangt vermoedelijk samen met die hinder voor de scheepvaart op drukke rivieren. Wijziging in de afvoerverdeling over de Nederlandse Rijntakken kan in ons land ook een rol hebben gespeeld. Bij de herziening van de Rijnvaartacte van Mannheim in 1868 werd nog rekening gehouden met schipmolens. De oeverstaten moesten krachtens art. 30 van de Acte zorgen, dat de scheepvaart op de Rijn niet zou worden belemmerd "door molens of andere in de stroom geplaatste werktuigen, noch door bruggen of andere kunstwerken". Verder werd bepaald, dat er "in het vervolg geen vergunningen zullen worden verleend voor het oprichten van nieuwe drijvende molens".

In de eerste helft van de 20e eeuw verdwenen in Europa de meeste toen nog bestaande schipmolens.

## Getijmolens

Het gebruik van getijmolens is al zeer oud. De oudst bekende stonden bij Basra (Irak) ca. 960 na Chr. De eerste vermeldingen in Europa zijn 1124 bij Bayonne in Frankrijk, 1135 bij Londen in de Thames en in de tweede helft van de 12e eeuw in Bretagne. In Zuidwest-Nederland werd ook reeds in de Middeleeuwen door middel van getijmolens gebruik gemaakt van eb en vloed als energiebron. De oudste getijmolen in Nederland lag in Zierikzee en werd in 1220 al vermeld. Volgens Tutein Nolthenius werden er in de 13e eeuw drie gebouwd, in de 14e eeuw vijf, in de 15e eeuw twee, in de 16e eeuw vijf en in de 17e eeuw zes. Zij raakten buiten gebruik in de 18e en 19e eeuw, de laatste in 1887 te Bergen op Zoom.

In West-Europa en in Amerika zijn honderden getijmolens gebouwd. In Bretagne en langs de Kanaalkust waren de condities bijzonder gunstig, namelijk grote tijverschillen en de aanwezigheid van estuaria, die als bassin konden dienen.

Getijmolens bestonden als systeem uit een bassin – bijvoorbeeld het achterste deel van een haven – dat door een afsluitdam van het buitenwater was afgesloten. Verder waren nodig een inlaatsluis in de dam, waardoor men bij vloed het bassin liet vollopen en een uitlaatkanaal tussen het bassin en het buitenwater. In het uitlaatkanaal was de getijwatermolen gebouwd, welke bij eb werkte. Bij het dubbelwerkend systeem werd de meer gecompliceerde getijmolen ook gebruikt in de vloedfase van het buitenwater wanneer het bassin volliep. Meestal waren getijmolens "enkelwerkend" en werkten zij ca. vier uur tijdens eb. Het gemiddelde tijverschil tussen vloed en eb moest tenminste 2,5 à 3 m zijn; het tijverschil in Zeeland van 3 à 4 m voldeed aan die voorwaarde. Het bassin werd dikwijls tevens gebruikt als spuikom waarbij men met de spuistroom probeerde slib weg te spoelen uit de haven. Dit was een gebruikelijke vorm van havenonderhoud.

Tot ca. 1700 werden houten onderslag-waterraderen toegepast, later ook bovenslagwieken bij vervallen van meer dan 3 m.

Bij een enkelwerkende molen waren er ca. acht maaluren per dag. Als gevolg van de

steeds veranderende tijdstippen van eb en vloed waren ze onregelmatig verdeeld over het etmaal. Hoog-en laagwater treden elk etmaal 50 minuten later op. Dit was dus wel een ongemak bij het molenbedrijf.

Getijmolens waren meestal korenmolens. Naast het defensieve voordeel van de veilige ligging binnen de stadswallen van vestingsteden, waren er aan de bouw van getijmolens ook nadelen verbonden. Zij vroegen veel ruimte voor de aanleg van de bijbehorende bassins (van 3 à 4 tot 10 à 12 ha groot) en voor het maken van afsluitdammen. Niettemin zijn er 21 gebouwd in het Nederlandse Deltagebied en ca. 25 in het aangrenzende Belgische Scheldegebied. Veel is hier niet van over. Naast funderingsresten van een tweetal molens zijn er eigenlijk alleen het fraaie molengebouw aan de haven in Goes en het sterk verbouwde Sashuis in Middelburg. Onze zuiderburen zijn beter af met hun uit 1516 daterende museummolen te Rupelmonde aan de Schelde, even ten Zuiden van Antwerpen.



Afb. 5. Molengebouw (met klokketorentje) van de voormalige getijmolen aan de haven te Goes (foto gemeente Goes).

## Getijcentrales

Bij de bouw van de derde schutsluis in het kanaal door Zuid-Beveland bij Hansweert in 1912-1916 werd overwogen een getijcentrale te bouwen met het kanaal en de voorhavens van de sluisen als bassin. Het kanaal zou namelijk een eigen elektrische centrale krijgen voor de bediening van de daartoe behorende sluisen en bruggen. Met deze getijcentrale zou een proefobject worden verkregen voor het opdoen van praktijkervaring met benutting van eb en vloed. In het ontwerp was een waterturbine opgenomen, welke bij een verval van 3 respectievelijk 4 m een vermogen zou krijgen van 32 danwel 45 pk of ca. 23,5 danwel 33 kW, met een rendement van 75 %. Dit zijn dus nog zeer bescheiden vermogens.

Uiteindelijk is de bouw van deze getijcentrale niet doorgegaan, omdat de in Duitsland bestelde onderdelen door de oorlogstoestand (1914-1918) niet werden geleverd. Er is toen een centrale met Dieselmotoren gekomen.

In de Rance (Bretagne) is bij een gemiddeld tijverschil van 8,4 m een dubbelwerkende getijdecentrale gebouwd met een vermogen van  $24 \times 10 \text{ MW} = 240 \text{ MW}$  (voltooid in 1966). Dit vermogen werd later vergroot tot 320 MW.

Bij deze centrale wordt zowel het instromende vloedwater als het uitstromende ebwater benut voor stroomopwekking door geavanceerde bulbturbines.

Naast de bouw van enkele kleine proefcentrales in Rusland, China en Canada zijn er studies gemaakt voor getijdecentrales in andere estuaria. Bekend zijn de plannen voor de Severn bij Bristol met een gigantisch vermogen van 11.000 à 12.000 MW. Een recent voorbeeld is de studie voor de monding van de Mersey bij Liverpool, waar een centrale van 700 MW zou kunnen komen.

Ook in Nederland werden studies verricht voor een getijdecentrale met als locatie de Oosterscheldemond en met een bassin in het daarachter gelegen deel van die zeearm (varianten met 9.000 tot 16.000 ha).

Reeds in 1954 werd door ir E.J. de Vos voor de Deltacommissie een onderzoek verricht naar de mogelijkheden voor energiewinning uit de getijbeweging in de Zeeuwse wateren. Voor een bassin gevormd door de Zandkreek en het Veerse gat (ca. 3000 ha) werden enkele mogelijkheden nagegaan voor een enkelwerkende centrale. De resultaten van deze studie waren bij de optredende getijverschillen negatief.

In de jaren 1965-1968 werd overleg gevoerd tussen de PZEM en de Deltadienst van de Rijkswaterstaat over de mogelijkheden voor de bouw van een getijdecentrale in combinatie met de nog uit te voeren Deltawerken in de Oosterschelde. In een studierapport van de PZEM uit september 1967 werd een enkelwerkende centrale van 50 MW met één bassin van 9.000 ha in beschouwing genomen. Hoewel een dergelijk project tech-

nisch mogelijk leek, werd van de bouw afgezien wegens de noodzakelijke grote investeringen en problemen met de zoetwaterberging.

Najaar 1973 werden de mogelijkheden van het project opnieuw bekeken door de Commissie Oosterschelde, beter bekend als de Commissie Klaasesz. Uit informatie van de PZEM blijkt dat het project ook toen onrendabel zou zijn geweest, zelfs bij de toenmalige hoge energieprijzen. Het toevoegen van een centrale van 50 à 100 MW leek ook van geringe betekenis voor de landelijke energiebehoefte, zoals het hoofd van de Deltadienst in een brief aan de Commissie opmerkte. De Commissie Klaasesz heeft de bouw van een getijdencentrale dan ook ontraden in haar rapport uit 1974. Niettemin werd in 1975 door ir D. Kooman van de Deltadienst nog een studie verricht naar een getijdencentrale in een afsluitbare doorlatende caissondam in de mond van de Oosterschelde bij een gedempt getij in het Oosterscheldebekken. Zijn conclusie was dat een getijdencentrale economisch onrendabel was, gelet op de hoge investeringskosten. De berekende energieprijzen zou vijfmaal de toen geldende prijzen bedragen.

Nadien is nog te vermelden het zogenaamde Energoproject uit 1981 (Energie Oosterschelde), een studie ten behoeve van opslag van windenergie in een spaarbekken naar de ideeën van ir L. Lievense. Als bekken zou het 100 ha grote bouwdoek op het werkeiland Neeltje Jans in de Oosterschelde moeten dienen. Gedacht werd aan een windturbinepark van 35 MW (met 15 windmolens) en één waterkracht turbine van 15 MW. Door het hoogteverschil tussen het bassinpeil en het peil van de Oosterschelde te benutten zou waterkrachtenergie kunnen worden opgewekt (ca. 80 miljoen kWh per jaar) en zelfs in bescheiden mate nog wat getijde-energie (ca. 1,6 miljoen kWh of 2% extra).

De regering heeft echter geen budget beschikbaar gesteld voor realisatie van dit plan, dat bedoeld was als proefproject.

De Oosterschelde als bron van getijde-energie blijft de geesten bezighouden. Uit het voorgaande blijkt, dat grote getijdencentrales – behoudens in de Rance – vrijwel alleen een geschiedenis hebben van plannen maken. Maar mogelijk zullen de volhouders winnen.

## Ontwikkelingen in de negentiende eeuw

Wind- en watermolens waren tot in de negentiende eeuw de belangrijkste industriële krachtbron. Soms groeiden watermolens uit tot industrieën, zoals de papierindustrie op de Veluwe en de ijzergieterijen langs de Oude IJssel. Op de Veluwe was de papierfabricage met behulp van watermolens na 1600 gedurende enkele eeuwen de belangrijkste industrie. Alleen de Zaanstreek had met windmolens een grotere papierproductie. In 1650 telde het gebied rond Apeldoorn 28 papiermolens. In 1740 telde de Veluwe 174 papiermolens en in 1817 nog 117, waarvan de meeste rond Apeldoorn. In 1905 waren er nog maar 5. Stoomkracht had de waterkracht verdrongen en niet alleen in de papierindustrie. Het vermogen van de houten wind- en watermolens was rond 1800 toegenomen tot hoogstens 15 pk. Door toepassing van ijzer- en staalconstructies kon het vermogen verder worden opgevoerd tot 40 pk. In de tweede helft van de achttiende eeuw verscheen echter de stoommachine op het toneel. De Watt-stoommachines hadden aanvankelijk een vermogen van 15 pk maar omstreeks 1840 bereikte men door technische verbeteringen al een vermogen van 40 pk met stoommachines. Na 1840 won de stoommachine het dan ook als industriële krachtbron van wind- en watermolens. Toch kreeg de benutting van waterkracht-energie al spoedig nieuwe impulsen, namelijk door het gebruik van “witte steenkool” in berggebieden en door de ontwikkeling van energietransport over lange afstanden met behulp van elektrische hoogspanningsleidingen.

Bij de ontwikkeling van hydro-elektrische centrales na 1860 moet de naam van Bergès worden genoemd, een papierfabrikant uit Grenoble. Hij ging het water in de bergen gebruiken voor het aandrijven van waterturbines, waarmee in generatoren elektriciteit kon worden opgewekt. In de bergen bouwde men talrijke hogedruk-centrales. Later werden ook waterturbines ontwikkeld voor riviercentrales met kleinere vervallen. De lagedruk-turbines zijn thans zo geperfectioneerd, dat toepassing ook in Nederland mogelijk werd.

## Hydro-elektrische riviercentrales

De eerste moderne waterkrachtcentrale in Nederland kwam tot stand in de Roer bij Roermond. In de vorige eeuw stonden daar verschillende watermolens ten behoeve

van de fabricage van papier en textiel en voor het malen van graan. In 1885 werd in een vroegere papierfabriek een watergraanmolen ingericht. Het bestaande grote waterrad werd vervangen door een turbine, de eerste in Nederland. De turbine was een horizontaal liggend ijzeren rad in een ijzeren turbinehuis en had verstelbare leidschoepen. Deze kleine turbine leverde samen met een waterrad een vermogen van 60 tot 80 pk (45 tot 60 kW). De watergraanmolen bleef in bedrijf tot 1916.

Van een schaalvergroting van de krachtopwekking kon men met deze turbine nog niet spreken. Dat gebeurde wel in de volgende fase. In 1918 werd het gebouwencomplex verkocht aan een fabrikant van aardappelprodukten, de N.V. Het Steel. Men sloopte het waterrad en de turbine en bouwde een waterkrachtcentrale met twee Francisturbines en twee draaistroomgeneratoren.

Toen de N.V. Het Steel na enkele jaren failliet ging, kwam een deel van de gebouwen met de waterkrachtcentrale in handen van de N.V. Noury en Van der Lande uit Deventer, die er de N.V. Electro Chemische Industrie vestigde, de ECI. De tussen 1918 en 1920 gebouwde centrale functioneerde tot 1974, met een onderbreking van 1945 tot 1948.

De ECI-centrale had twee turbines met elk een maximum vermogen van 400 pk (ca. 300 kW), die de generatoren aandreven. De turbines hadden elk een maximum waterverbruik van 17,5 m<sup>3</sup>/sec. De valhoogte bedroeg 1,5 à 2,0 m. Het maximum vermogen kon ten hoogste vijf maanden per jaar worden opgewekt wegens de wisselingen in het afvoerregime van de Roer. Na herstel van oorlogsschade werkte de ECI-centrale tot 1974 met één turbine en één generator.

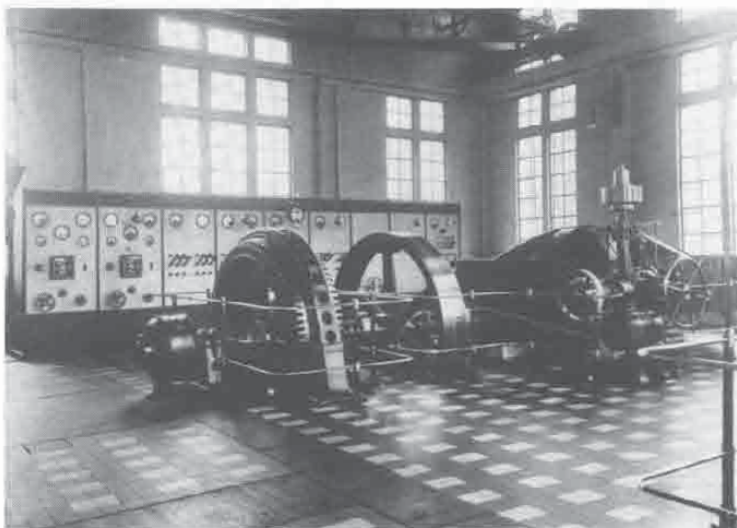
De centrale werd in 1991 op de Rijksmonumentenlijst geplaatst. Het behoud van dit interessante technisch monument is hierdoor beter gewaarborgd.

Het ligt voor de hand in gekanaliseerde rivieren voor de opwekking van waterkrachtenergie gebruik te maken van het verval ter plaatse van scheepvaartstuwen. Zo kwam in 1962 de eerste riviercentrale in ons land in bedrijf bij Hagestein. Deze werkte van 1962 tot 1974. Na een ingrijpende revisie kwam de centrale in 1984 opnieuw in bedrijf. Inmiddels waren de studies voor waterkrachtcentrales in een stroomversnelling geraakt. Al sinds 1916 was er gestudeerd op mogelijkheden om de energie van de Maas te benutten, maar na 1980 kwam er – eerst in Limburg en later in breder verband – nieuw overleg op gang over de bouw van waterkrachtcentrales in onze grote rivieren nabij scheepvaartstuwen. In 1984-1985 werd besloten drie centrales te bouwen: bij Maurik (Neder-Rijn), bij Alphen (Maas) en bij Linne (Maas). Deze centrales werden toen economisch rendabel geacht. Eind 1990 waren de drie centrales alle in bedrijf. De bouw van deze centrales in een periode van vijf jaar was voor ons land een unieke gebeurtenis. Hiermee kwam een eind aan zeventig jaar studeren, plannen maken en commissiewerk.

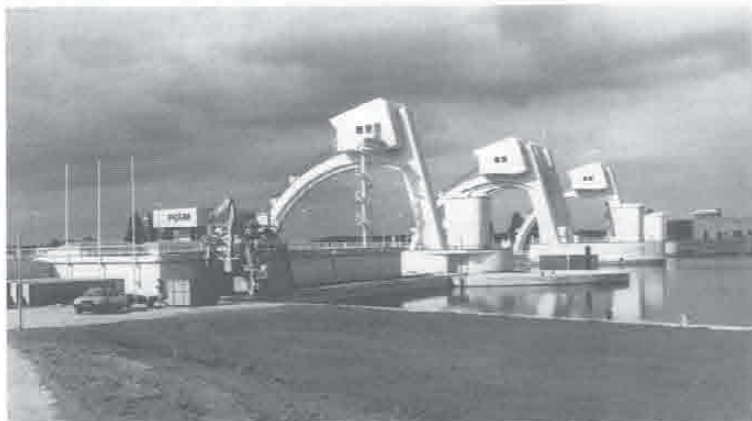
Momenteel wordt er nog een haalbaarheidsonderzoek verricht naar een centrale bij de stuw van Borgharen in de Maas beneden Maastricht.

De bouw van riviercentrales bij de in Nederland optredende vervallen en afvoeren is mede mogelijk geworden door de beschikbaarheid van moderne Kaplan-buisturbines met horizontale as, waarbij de generator zich in een stalen huis (de "bulb") onder water vòòr de turbine bevindt.

In onderstaand staatje is een overzicht gegeven van het vermogen van een aantal centrales. Ter vergelijking zij vermeld, dat een eenheid van een moderne thermische centrale (olie, gas of kolen) 450 à 650 MW groot is.



Afb. 6. De ECI-centrale bij Roermond; de eerste moderne waterkrachtcentrale in Nederland, 1920 (foto gemeente Roermond).



Afb. 7. Waterkrachtcentrale in de Neder-  
rijn bij Maurik (1988) (foto PGEM). Op  
de foto links de nieuwe centrale en rechts  
de stuw.

32

Plaats	Rivier	Vermogen in MW	in bedrijf
ECI-centrale Roermond	Roer	0,3	1920–1945, 1948–1974
Hagestein	Lek	1,8	1962–1974, 1984–heden
Maurik	Neder-Rijn	10	1988
Linne	Maas	11,5	1990
Alphen	Maas	14	1990
Maastricht (Borgharen)	Maas	9	in studie
Windpark Lelystad (35 turbines)		10,5	1991
Nederweert	ZW-vaart	0,04	1923–1958

Beschouwing van deze vermogens toont aan, dat waterkrachtcentrales en windparken in Nederland voorshands nog behoren tot de categorie “kleinere energieproducenten”. Er zijn ook mogelijkheden voor opwekking van kleinschalige waterkracht (tussen 0,01 en 0,5 MW) in zogenaamde minicentrales. Zoals wij zagen bereikte men met watermolens in de 19e eeuw vermogens van 0,03 MW (40 pk).

Omstreeks 1923 bouwde men nabij sluis nr. 15 van de Zuid-Willemsvaart een kleine centrale, welke tot deze categorie behoort. Recent bouwde de IJsselmij een kleine centrale van 0,1 MW in de Vecht bij de stuw “De Haandrik” (Gramsbergen).

Minicentrales lijken interessant voor toepassing in derde wereldlanden. Met deze gedachte om elders in de wereld de verworven kennis van het gebruik van waterkracht toe te passen wordt voortgeborduurd op een bestaande traditie. Dit begon met de getijmolens. Hiervan werden er in de 17e tot de 19e eeuw 70 gebouwd in Suriname voor het uitpersen van suikerriet.

Talrijke getijmolens werden in de 17e eeuw gebouwd in het gebied van Nieuw-Amsterdam (New York). In het vroegere Nederlands-Oost-Indië vond tussen 1917 en 1942 de bouw plaats van 25 waterkrachtcentrales voor de algemene electriciteitsvoorziening. Hiervan kwamen er 19 tot stand op Java met een gezamenlijk vermogen van 118 MW. Al snel na de tweede wereldoorlog werd deze draad weer opgepakt. In 1965 kwam in Suriname het multipurpose Brokopondo-project, bestaande uit een grote stuwdam, een stuwmeer van 156.000 ha en een elektrische centrale van 180 MW, gereed.

In Afrika werden Nederlandse ingenieursbureaus en aannemingsbedrijven onder andere betrokken bij de bouw van een waterkrachtcentrale van 150 MW in de Nijl (Oeganda).

Tot op heden is waterkracht in Nederland een zaak van decentrale energieopwekking op kleinere schaal. Toch zijn er grootschalige perspectieven. De Nederlandse SEP heeft met de Noorse Statkraft een overeenkomst gesloten voor de levering van 500 MW-waterkrachtvermogen aan Nederland via een ca. 500 km lange onderzeese kabel door de Noordzeebodem.

De mogelijkheden om energie aan stromend en vallend water te onttrekken zijn wereldwijd onderkend en op grote schaal benut. Dit kan van de winning van energie uit golvend water (getij- resp. windgolven) bepaald niet gezegd worden. Voor de getijbeweging blijft het tot nu toe nog steeds bij plannen, maar voor het winnen van energie uit (wind) golven is een nieuwe fase bereikt. Onlangs kwam namelijk de bouw van het

#### Algemene werken en artikelen

P. Nijhof, *Watermolens in Nederland* (Zwolle 1982).

S.J. Fockema Andreae, ‘Waterkrachtmolens in Nederland’, *Tijdschrift van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap* (KNAG) 2e reeks (1952) 153-158.

R.J. Forbes, ‘De Nederlandse energievoorziening. Terugblik naar het verleden’, *Maatschappij-belangen*. Maandblad van de Nederlandsche maatschappij voor nijverheid en handel (1962) nr. 3, 112-121.

R.J. Forbes, *De mens bouwt zich een wereld* (Amsterdam 1952) 83-84, 111-112 en 204-222.

J.G. Landels, *Die Technik in der antiken Welt* (München 1979) 19-29.

G.A. Coert, ‘De watermolens in Drenthe’ *Stellingsnovas*, orgaan van de Molenstichting Drenthe nr. 10 (1985) 2-9 en nr. 11 (1985) 6-15.

H. Voorn, *De papiermolens in de provincie Gelderland, alsmede in Overijssel en Limburg* (Haarlem 1985) 209.

#### Sprengen op de Veluwe

W. Oosterloo, *Het Veluwe bekenboekje* Uitgave van zuiveringschap Veluwe (Apeldoorn 1981).

A.J. IJzerman, ‘Beken en watermolens op de Veluwe’ in: *Sprengen en beken van de Veluwe* Uitgave van Stichting tot behoud van de Veluwe sprengen en beken (Vaassen 1989).

#### Watermolens in Velp en Rozendaal

H. Kerkkamp, *Waterraderen wentelden in Velp en Rozendaal* (Velp 1970).

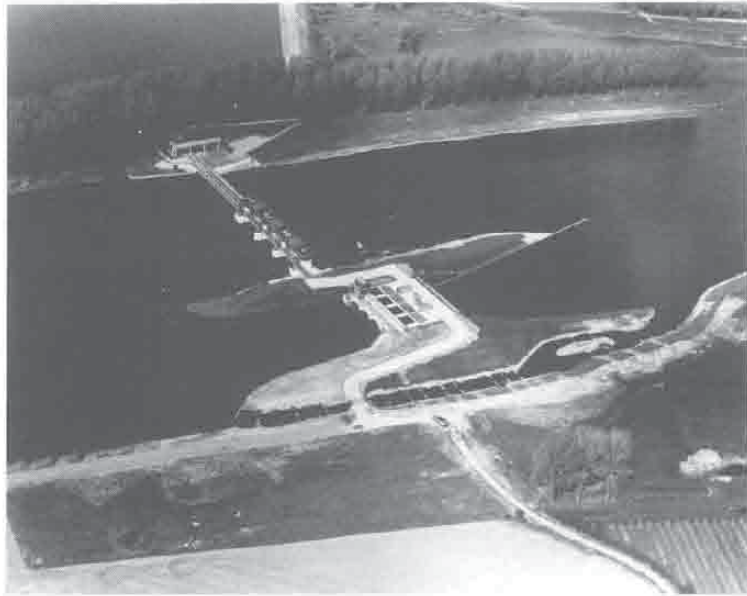
*Veluwe papiermolen* cat. Gids Nederlands Openluchtmuseum Arnhem (Nijmegen 1988) 124-125.

prototype van een golfcentrale gereed op het eiland Islay ten westen van de Schotse kust. Hiermee doemt een nieuw perspectief op voor de winning van – kleinschalige – waterkrachtenergie.

*Toelichting op gebruikte eenheden en symbolen.*

Voor enkele oudere werktuigen is in dit artikel de oude eenheid voor vermogen gebruikt, de paardekracht (pk). Voor moderne centrales zijn de vermogens in kW of MW vermeld.

Het vermogen van een watermolen of van een elektrische centrale is de geproduceerde hoeveelheid energie per tijdseenheid (sec). De vermogens kan men als volgt omrekenen: 1 Megawatt (MW) = 1000 kW = 1000.000 W. 1 pk = 0,7355 kW en 1 kW = 1,36 pk. De elektriciteitsproductie en het elektriciteitsverbruik worden gemeten in kilowattuur (kWh).



Afb. 8. Waterkrachtcentrale in de Maas bij Linne (1990) (foto PLEM). Op de luchtfoto de bestaande stuw, de nieuwe centrale (midden) en de nieuwe vispassage.

*Verantwoording*

De schrijver van dit artikel ondervond veel medewerking van de elektriciteitsbedrijven in Gelderland (PGEM), Limburg (PLEM), Zeeland (Delta Nutsbedrijven) en de Samenwerkende elektriciteits-productiebedrijven (SEP).

Foto's werden door diverse instanties, musea en bedrijven beschikbaar gesteld.

*Schipmolens*

A. Tutein Nolthenius, 'Schipmolens', *Bijdragen en Mededelingen Getre*, dl LVII (1958) 233-243.

W. van Heugten, 'Schipmolens op de Rijn' *Der Kalender für das Kleverland* (Kleef 1989) 112-118.

*Getijmolens en getijcentrales*

A. Tutein Nolthenius, 'Getijmolens in Nederland', *Tijdschrift K.N.A.G.* nr. 3 (1954) 186-199.

B. Boonman, *Getijmolens, de watermolens van Goes* (Goes 1986).

J.A. Ringers, 'Beschrijving van den bouw van de derde schutsluis in het kanaal door Zuid-Beveland te Hansweert' *Rapporten en mededeelingen van den Rijkswaterstaat*, nr. 8 ('s-Gravenhage 1917) 63-83.

Rapport van *Commissie Oosterschelde* (Den Haag 1974) 141-143.

*Moderne waterkrachtcentrales*

D. Vreugdenhil, 'Waterkracht in Nederland' Rubriek 'Historiën' *De Ingenieur*, orgaan van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, jrg 97, nr.3 (1985) 41.

D. Vreugdenhil, 'Waterkracht in Nederland' *Waterbouwkundig tijdschrift O.T.A.R.* jrg 74, nr.5 (1989) 184-193.

*Bouwen buiten Nederland*

A. Tutein Nolthenius, 'Getijmolens in Noord-Amerika' *Waterbouwkundig tijdschrift O.T.A.R.*, jrg 40 (1955) 113-116.

F.M.C. Berkhout, 'Vijftig jaar bouw- en waterbouwkunde in Nederlands-Indië en in Indonesië en Nederlands Nieuw-Guinea', *Herdenkingsbundel van het vijftigjarig bestaan van de afdeling voor Bouw- en Waterbouwkunde van het K.I.w.I.* (1956) 35.