

Energie uit golven langs oevers en dijken

WINN Verkenning energie en golfdemping

M. van der Wal
M. de Jong
J.-J. Schouten
L. Korving

1200339-005

Titel

Energie uit golven langs oevers en dijken

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Lucas Janssen, Marco Hoffman	1200339-005	1200339-005-VEB-0009	43

Trefwoorden

Oevers, damwanden, energie, golfdemping

Samenvatting

Het project WINN staat voor "Waterinnovatie Rijkswaterstaat". Binnen het WINN project worden in 2009 door Deltares, als uitvoerend partner binnen WINN, enkele innovatie-ideeën binnen het thema Water & Energie geëvalueerd op praktische haalbaarheid. Een van die ideeën is de mogelijkheid om golfdemping langs kades/oevers van binnenvaartkanalen te combineren met het opweken van energie en de constructie een functioneel onderdeel van een oeververdediging of dijkbekleding te laten vormen.

Als in het Amsterdam-Rijnkanaal voor een grootschalige toepassing € 200 /m' wordt geïnvesteerd, dan zal de terugverdientijd korter zijn dan 15 jaar waarbij de verkregen golfdemping gratis is. Als aan de golfdemping ook een waarde wordt toegekend, dan wordt de terugverdientijd veel korter dan 15 jaar. Veel belovende constructies zijn drijvers, golaftopping en het direct toepassen van piëzo-elektrische materialen.

Aanbevolen wordt de golven in het Amsterdam-Rijnkanaal in een monitoring programma te meten, andere locaties te onderzoeken en een pilot opstelling langs het Amsterdam-Rijnkanaal voor te bereiden.

Referenties

Deltares (augustus 2008): Water als bron van duurzame energie, inspiratieatlas van mogelijkheden

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	dec. 2009	ir. M. van der Wal		ir. O.M. Weiler		drs. I.L. Ritsema	
		M.P.C. de Jong					
		ir. J. Schouten					

Status

concept

Dit document is een concept rapport, niet een definitief rapport, en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Definities van energievoorraden	1
1.3	Het maken van schattingen	2
1.4	Leeswijzer	3
2	Opzet verkenning	5
3	Potentiële en winbare energievoorraad en een maximum economisch investeringsbedrag	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Scheepsgeïnduceerde golven	7
3.3	Casestudies voor twee locaties	10
3.4	Potentieel te winnen energie uit scheepsgeïnduceerde golven (secundaire golven)	13
3.5	Ruwe schatting windgolven	15
3.6	Inschatting netto financiële opbrengst	17
3.7	Discussie en conclusies	18
4	Vormgeving	19
4.1	Methodologie	19
4.2	Inventarisatie van werkingsprincipes	21
4.2.1	Werkingsprincipes voor het opwekken van energie uit zeegolven.	21
4.2.2	Drijvers met een stang	26
4.2.3	Zwaaiende panelen	27
4.2.4	Golfdrukleidingen	28
4.2.5	Samendrukbare compartimenten	29
4.2.6	Terugslag klep in combinatie met retourstroming door een vijzelturbine	31
4.3	Selectie van werkingsprincipes	33
4.3.1	Inleiding	33
4.3.2	Magneet/spoel bekrachtiging	34
4.3.3	Golf overslag	36
4.3.4	Piëzo-elektrische energiesystemen	38
5	Conclusies en aanbevelingen	41
6	Referenties	43

1 Inleiding

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

1.1 Achtergrond

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

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

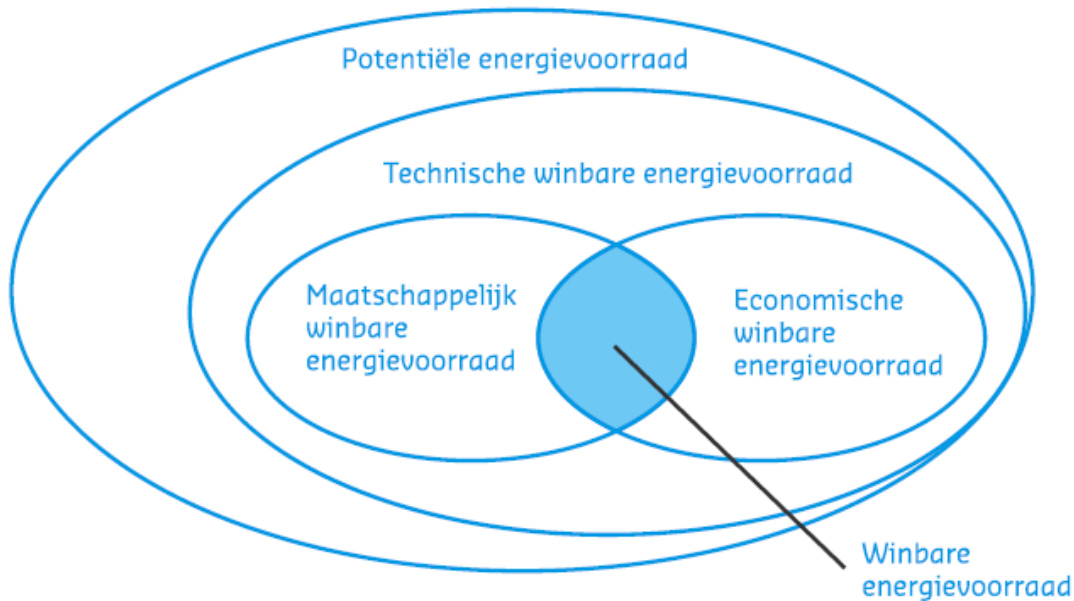
Rijkswaterstaat beschikt over een groot beheersgebied met geschikte locaties voor het opwekken van energie met water en heeft daarom de aanzet gegeven voor verschillende projecten waar deze vorm van duurzame energieopwekking het uitgangspunt vormt. Voor Rijkswaterstaat is dit een van de acties om haar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

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

1.2 Definities van energievoorraden

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

Locaties zijn alleen exploitabel wanneer de investeringskosten en operationele kosten lager zijn dan de inkomsten door energieverkoop. Er is dan sprake van **economisch winbare energievoorraden**. In onderstaande figuur is de relatie tussen deze voorraden gevisualiseerd.



Figuur 1.1 Schema van de verschillende definities van energievoorraad.

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

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

1.3 Het maken van schattingen

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

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

Er zijn intussen innovatieve methoden om deze energie te winnen met een bepaalde efficiëntie. De technisch winbare energievoorraad is dus enorm. Het staat echter buiten kijf dat het maatschappelijk niet haalbaar is het gehele Nederlandse deel van de Noordzee uit te rusten met installaties die deze vorm van energie weten te transformeren tot elektriciteit. Dat is onmogelijk door ruimtebeslagen van scheepvaart, visserij, natuur, gaswinning en defensie.

Het is dus van essentieel belang dat de criteria en aannames op basis waarvan de potenties berekend worden duidelijk zijn. Deze criteria en aannames bepalen namelijk hoe kansrijk de exploitatie van een energiebron is, de tijdshorizon waarbinnen exploitatie mogelijk geacht wordt en wat de daarmee verbonden technologische oplossingen zijn. Ondanks het ontbreken van alle benodigde bewezen wetenschappelijke kennis, zijn op basis van een voorlopige analyse eerste schattingen gemaakt waaruit conclusies kunnen worden getrokken over de relatieve kansen van de verschillende opties op het gebied van waterenergie.

In deze verkenning gaat het niet om energie uit windgolven op zee, maar om energie uit scheepsgolven in een kanaal. Er zijn twee grote verschillen tussen die situaties: elke installatie op zee moet ontworpen worden op extreme omstandigheden, dat wil zeggen op grote golven die heel af en toe optreden, en in een kanaal kan een installatie licht worden ontworpen. De redenen daarvoor zijn dat scheepsgolven vrij regelmatig zijn (periode en golfhoogte) en dat de maximum ontwerp golfhoogte relatief laag is en vrij goed bekend is. Ook scheepsgolven zijn maar af en toe aanwezig, namelijk als er een schip een oever passeert. De keerzijde is dat in die scheepsgolven veel minder energie zit dan in windgolven op zee. Het gaat in deze verkenning om een beperkte energie voorraad waarbij gezocht wordt naar een kosten-effectieve manier om die energie te winnen.

1.4 Leeswijzer

Deze verkenning is door een projectgroep onder leiding van ir. M. van der Wal uitgevoerd. In deze projectgroep zitten experts van Teeage BV, Bureau Kiem, Royal Haskoning en Deltares. Hoofdstuk 1 is overgenomen uit het rapport Water als bron van duurzame energie (Deltares, 2008). Hoofdstuk 3 is grotendeels door dr.ir. M. de Jong (Deltares) met een kleine bijdrage door ir. M. van der Wal (Deltares) geschreven. Aan Hoofdstuk 4 is door verschillende projectgroepleden bijgedragen. Paragraaf 4.1 is door ir. D. van Rooijen geschreven. Paragraaf 4.2 grotendeels door ir. M. van der Wal geschreven met een bijdrage (4.2.6) door J.-J. Schouten (Deltares) en een bijdrage door ir. T. den Hartog. Paragraaf 4.3 is grotendeels door L. Korving geschreven, waarbij opgemerkt moet worden dat ir. J.-J. Schouten het idee van piëzo-elektrische elementen naar voren heeft gebracht. De algemene redactie van het rapport is door ir. M. van der Wal uitgevoerd.

Een algemene beschouwing over duurzame energie uit water is in Hoofdstuk 1 als inleiding opgenomen. De eerste vraag die in de verkenning is beantwoord, is hoeveel winbare energie is aanwezig in de scheepsgolven langs de oever van een kanaal en wat is het maximum bedrag dat geïnvesteerd kan worden, om die energie kosten-effectief te winnen (hoofdstuk 3). Vervolgens is geïnventariseerd welke werkingsprincipes veel belovend zijn (paragraaf 4.2). De beoordeling van die werkingsprincipes heeft geleid tot een selectie van drie veel belovende principes. Het rapport is afgesloten met conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 5).

2 Opzet verkenning

Het project WINN staat voor "Waterinnovatie Rijkswaterstaat". Binnen het WINN project worden in 2009 door Deltares, als uitvoerend partner binnen WINN, enkele innovatie-ideeën binnen het thema Water & Energie geëvalueerd op praktische haalbaarheid. Een van die ideeën is de mogelijkheid om golfdemping langs kades/oevers van binnenvaartkanalen te combineren met het opweken van energie en de constructie een functioneel onderdeel van een oeververdediging of dijkbekleding te laten vormen. Op die manier kan het reduceren van overlast door golfreflecties voor de scheepvaart mogelijk gecombineerd worden met duurzame energiewinning. Dit is een bijzonder idee, aangezien de meeste projecten voor de winning van energie uit golven zich richten op windgolven (of deining) op zee (zie bijvoorbeeld Brooke, 2003, voor een overzicht van projecten wereldwijd en Evans en De O.Falcao, 1985, voor een overzicht van verschillende typen constructies). Het idee heeft mogelijkheden voor een heel goede landschappelijke inpassing.

In dit rapport wordt er geconcentreerd op energieopwekking en golfdemping in kanalen met oevers, die uit damwanden bestaan. Het Nederlandse netwerk van waterwegen bestaat voor een belangrijk deel uit kanalen om transport per schip (voornamelijk binnenvaartschepen en op enkele grote kanalen ook zeeschepen) te bevorderen. Het Noordzeekanaal, het Amsterdam-Rijnkanaal, het Prinses Margrietkanaal, het Wilhelmina- en Julianakanaal en de Nieuwe Waterweg zijn hiervan de bekendste. Gezien dergelijke kanalen niet van natuurlijke aard zijn, beschikken deze waterlopen over een kunstmatige oeverbescherming, vaak een taludbekleding en soms ook oevers die uit damwanden bestaan. Damwanden reflecteren de inkomende golven sterk en bij de veel voorkomende afmetingen van wind- en scheepsgolven en damwandprofielen is de demping van de inkomende golf gering. Bij taludverdedigingen treedt wel enige demping op. Daardoor treedt in kanalen met damwanden verhoudingsgewijs veel hinder door reflectiegolven op. Vooral kleinere schepen, veelal recreatievaart, worden gehinderd en hebben meer moeite om op koers te blijven. Daarnaast ervaren afgemeerde schepen verschillende vormen van hinder: grote troskrachten (breken van trossen, vervormen van bolders) en hinder bij laden en lossen door scheepsbewegingen (Waterloopkundig Laboratorium, 1986).

De uitdaging bestaat erin om reflecties van golven nabij kanaalwanden te dempen en hierbij te gelijktijd zoveel mogelijk energie te winnen. Het concept dient hierbij met een zo hoog mogelijk rendement gecombineerd met een eenvoudige inpasbaarheid en zo laag mogelijke kost per energie-eenheid geïmplementeerd te worden.

De verkenning is als volgt opgezet:

Inleiding

Schatting van de potentieel winbare energie en een maximum economisch investeringsbedrag

Vormgeving

Methodologie

Brainstorm van vormen

Selectie van meest belovende lokatie

Selectie van meest belovende vormgeving

Conclusies

Bij de vormgeving is een methodologie van divergeren (brainstormen) en convergeren (selekteren van werkingsprincipes) toegepast. In een brainstormsessie is in een groep experts, waaronder hydrodynamici, innovatiedeskundigen en experts op constructief gebied, gesproken over mogelijke constructie concepten. De resultaten van de twee hoofdonderdelen zullen de praktische haalbaarheid van het idee moeten aantonen. Indien het idee haalbaar blijkt te zijn kan in een vervolgstudie een meer gedetailleerde uitwerking gemaakt worden van de in concept ontwikkelde methode. Bovendien zou in die fase mogelijk een pilot-project gestart kunnen worden met een full-scale testopstelling.

3 Potentiële en winbare energievoorraad en een maximum economisch investeringsbedrag

3.1 Inleiding

In de haalbaarheidstudie wordt een inschatting gemaakt van de energie aanwezig in de door schepen geïnduceerde golven op een kanaal. Hiervoor zullen twee specifieke locaties als casestudie gebruikt worden om zo een inschatting op een consistente set aan realistische gegevens te kunnen baseren. Daarnaast zal een ruwe eerste inschatting van windgolven gemaakt worden op basis van een casestudie voor een specifieke locatie.

Typen golven:

Op binnenvaartkanalen treden de volgende typen golven op:

- primaire scheepsgolven¹;
- secundaire scheepsgolven;
- translatiegolven;
- windgolven.

In deze haalbaarheidsstudie wordt een schatting gemaakt van de energie aanwezig in de secundaire golfsystemen (hieronder nader toegelicht). Daarnaast wordt een zeer ruwe inschatting voor de te verwachten windgolven beschreven. Aangezien verwacht wordt dat deze twee typen golven de meeste (winbare) energie bevatten wordt zo een globale inschatting verkregen van het totaal van aanwezige golfenergie. De uitkomst zal dienen als een eerste indicatie van de economische haalbaarheid van het idee ('is het de moeite/investering waard').

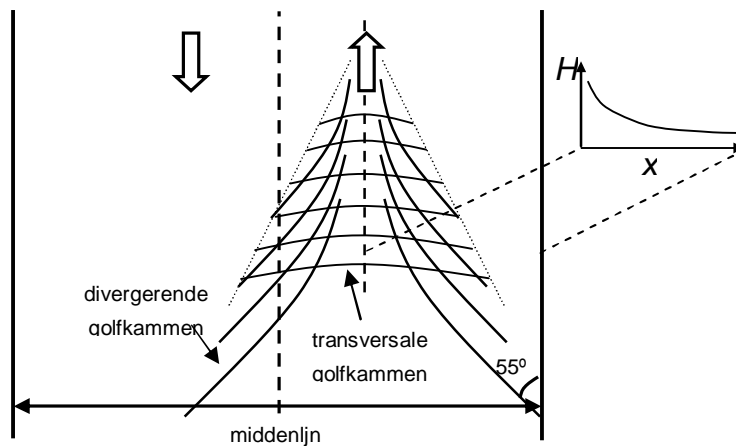
3.2 Scheepsgeïnduceerde golven

Een varend schip heeft te maken met twee kritische snelheden: een rompsnelheid en een diepte-kritische snelheid. De rompsnelheid is gerelateerd aan de lengte van het schip. Het praktische effect van de rompsnelheid is dat voor het bereiken van bepaalde snelheden een minimale scheepslengte benodigd is. De diepte-kritische snelheid is gelinkt aan de snelheid van ondiep-water golven. Aangezien in deze haalbaarheidstudie met name binnenvaartschepen beschouwd zullen worden (relatief lange schepen) is met name de (diepte-) kritische snelheid relevant. Binnenvaartschepen en de meeste recreatievaart (niet speedboten) zullen onder de diepte-kritische snelheid varen.

Bij snelheden beneden de diepte-kritische snelheid zal een varend schip twee soorten golfsystemen opwekken. De primaire golf en een secundair golfsysteem. De primaire golf is een waterstandsval (met beperkte magnitude) in een gebied rondom het schip. Het secundaire golfsysteem, genaamd Kelvin golfsysteem, bestaat uit twee soorten golven: transversale golven en divergerende golven (zie Figuur 3.2), waarvan doorgaans de laatstgenoemde dominant zullen zijn. In open water zal dit patroon altijd ontstaan als het schip beneden de kritische snelheid vaart, gerelateerd aan de locale diepte.

¹ Het is niet efficiënt om uit dit type golf energie te winnen, aangezien de extra weerstand die door het winnen van die energie wordt geïntroduceerd door de schepen met evenredig extra vermogen (en dus extra brandstofverbruik) gecompenseerd zou moeten worden.

Het ontstaan van het Kelvin-patroon is niet afhankelijk van de grootte van het schip. Dit is geïllustreerd in Figuur 3.2, waarin een voorbeeld wordt gegeven van schepen met verschillende afmetingen die elk hetzelfde secundaire golfpatroon (voor wat betreft vorm) opwekken. Figuur 3.3 illustreert dat het niet zo is dat grotere schepen noodzakelijkerwijs hogere golven op zullen wekken. Dat hangt namelijk ook af van vele andere factoren. In die afbeelding is zichtbaar dat in dit specifieke geval het kleinere schip de hoogste golven opwekt. Ook zijn reflecties van de oever zichtbaar rechtsonder in de afbeelding (aangegeven met gestippelde ovaal). Het typische Kelvin-golvenpatroon uit Figuur 3.1 is in deze afbeelding erhaald ter illustratie.



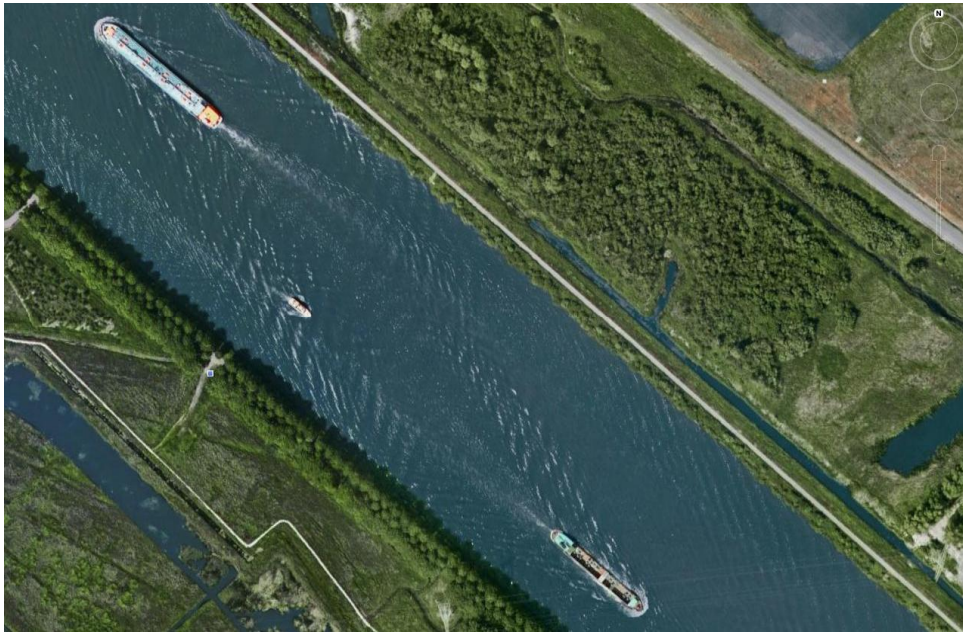
Figuur 3.1 Schets van secundair golfpatroon opgewekt door een varend schip in een kanaal.

De huidige studie richt zich op deze secundaire golvensystemen. Dit omdat verwacht wordt dat uit dat type golfbeweging de golfenergie te winnen is, vergelijkbaar met 'reguliere' windgolven. Bovendien zijn hinderlijke golfreflecties voor schepen met name het gevolg van de secundaire golfsystemen. Uit deze golven energie winnen en tegelijk reflecties dempen is dus een dubbel positief effect.

De bij de oever optredende golfhoogte in het Kelvin-golvenpatroon hangt af van een aantal factoren, waaronder de:

- snelheid van het schip door het water;
- locale diepte;
- afstand van de vaarlijn tot de oever.

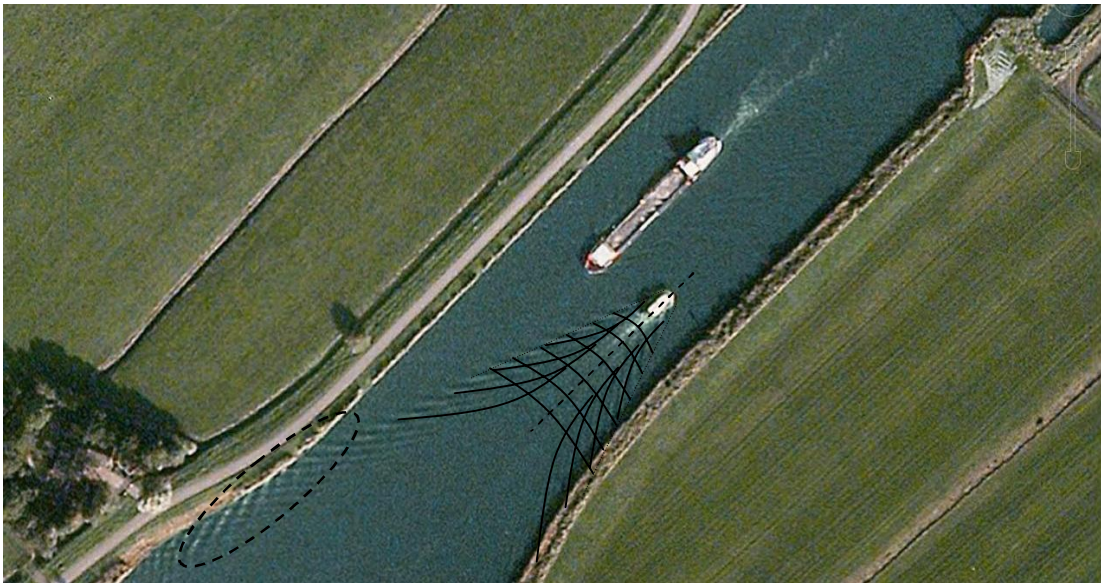
Ook de scheepsvorm en de afmetingen van het schip zijn hierbij van belang.



Figuur 3.2 Voorbeeld van interfererende golvensystemen van schepen van verschillende afmetingen (Amsterdam-Rijnkanaal, nabij Diemen). Bron originele afbeelding: Google Earth.

Er bestaan verschillende semi-empirische rekenregels die op basis van onder andere deze opgesomde parameters een inschatting geven van de te verwachten golfhoogten en het verloop van de golfhoogte bij toenemende afstand tot de vaarlijn. De vuistregels zijn veelal gebaseerd op trendfits van meetdata, waarbij in sommige studies een grote spreiding in de data gevonden werd (zie Sorensen, 1997, voor een zeer compleet overzicht en evaluatie van verschillende formuleringen uit de literatuur). Daarentegen zijn dergelijke trendfits het enige dat beschikbaar is om de golfhoogten te beschrijven. Het typische verloop van de hoogste golfkammen (de interferentiepieken in het patroon) volgens die vuistregels is geïllustreerd rechts in Figuur 3.2 (golfhoogte H vs. afstand tot de vaarlijn van het schip x). De voor de huidige verkenning toegepaste formuleringen zijn het meest gangbaar (zie bijvoorbeeld WL | Delft Hydraulics, 1996, en Erikson *et al.*, 2003, in PIANC Bulletin 114).

De rekenregels gelden voor open water, dus zonder reflecties en zonder invloeden van (niet uniforme) bodems en oevers. Voor een gedetailleerde beschouwing en voor de volledige weergave van dergelijke situaties zijn uitgebreidere numerieke berekeningen benodigd. Een voorbeeld van uitvoer van een dergelijke berekening staat in , een illustratieve/schetsmatige situatie overgenomen uit een recent adviesproject. In dit voorbeeld is de invloed van een passerend schip langs een insteekhaven gemodelleerd. De kades zijn als 100% reflecterend aangenomen. In de berekening wordt de verstoring van het wateroppervlak door het schip als waterstandrandvoorwaarde opgelegd op de onderste rand van het rekendomein. De locatie van het schip is voor elk van de drie delen schetsmatig weergegeven met de zwarte contour.



Figuur 3.3 voorbeeld verschil in golfhogten voor verschillende schepen (Prinses Margrietkanaal, ten zuidwesten van Grouw). Bron originele afbeelding: Google Earth.

De afbeelding linksboven in Figuur 3.4 toont de situatie op het moment dat het schip net het gebied is ingevaren. Er zijn nog geen golfreflecties ontstaan; de golven bereiken op het getoonde moment net de oever. In de afbeelding rechtsboven is het schip al verder gevaren en is golfreflectie opgetreden. Een soortgelijk interferentiepatroon is zichtbaar als in Figuur 3.3. De onderste afbeelding laat zien dat hinder door de scheepsgeïnduceerde golven nog lang door kan gaan ook als het schip al enige tijd geleden is gepasseerd (in het adviesproject was het aandachtspunt met name de golven die tijdens en na de scheepspassage doordringen in de insteekhaven).

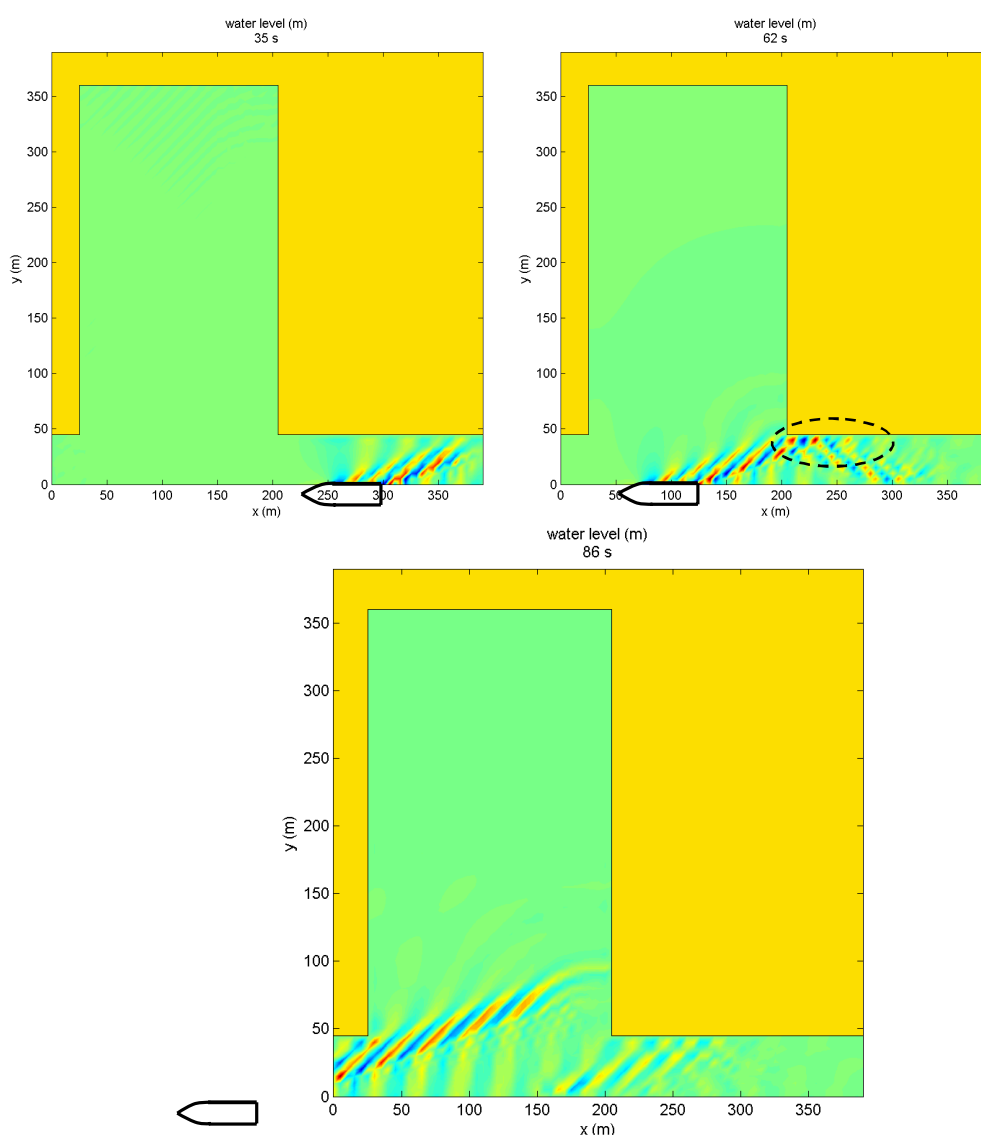
Aangezien het in de huidige evaluatie gaat om een eerste verkennende studie zal in het resterende deel van dit rapport volstaan worden met een eerste inschatting van de aanwezige golfenergie op basis van de eerder genoemde rekenregels, dus uitgaande van een Kelvin-golvenpatroon op open water. Gedetailleerdere berekeningen zouden in een eventueel vervolg uitgevoerd kunnen worden.

3.3 Casestudies voor twee locaties

Om een indicatie te krijgen van wat voor typische golfcondities (hoogte en periode) op zullen treden door passerende schepen is met de vuistregels een indicatieve casestudie gemaakt voor twee locaties: het Prinses Margrietkanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal. Van deze beide locaties is bekend dat er hinder voor scheepvaart optreedt van golfreflecties (voor het Amsterdam-Rijnkanaal staat dit bijvoorbeeld vermeld in Stichting Recreatietoervaart Nederland, 2009, zie ook Figuur 3.5).

De waarden voor relevante parameters die gelden voor de beide locaties (of voorsnog zijn aangenomen, nader uit te werken in een mogelijke vervolgfase van de studie) staan opgesomd in Tabel 3.1. Gezien de relatieve hoge verkeersintensiteit is aangenomen dat in het Amsterdam-Rijnkanaal gemiddeld het midden van de eigen helft van de vaarweg wordt aangehouden.

Voor het Prinses Margrietkanaal is het midden van het kanaal aangehouden als locatie van de schepen². Dat zal overeenkomen met de gemiddelde locatie, aangezien de schepen naar verwachting alleen tijdens passeermanoeuvres (zoals getoond in Figuur 3.3) uit zullen wijken. Voor het Prinses Margrietkanaal is uitgegaan van het totaal aan beroeps- en recreatievaart (50.000 passages per jaar). Voor de snelheid is de maximaal toegestane snelheid aangehouden, aangezien (met name) de commerciële vaart met die snelheid zal varen. Dit is een optimistische schatting voor wat betreft de totaal te winnen golfenergie. Dit geldt vooral voor de recreatievaart, aangezien zij doorgaans met lagere snelheid varen dan de beroepsvaart.



Figuur 3.4 voorbeeld uitvoer numeriek model voor berekening scheepsgeïnduceerde golven (rood: golfkam; blauw: golfdal). De set aan golfkammen rondom $x = 200\text{m}$ in de onderste afbeelding zijn gerelateerd aan een numeriek effect van de inkomende rand.

² Pers. comm. J. Brolsma, (Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, Ontwerp en Inrichting Netwerken (NOI)), dd 21 juli 2009.

Tabel 3.1 Overzicht gegevens twee casestudielocaties.

Parameter	Prinses Margrietkanaal	Amsterdam-Rijnkanaal
Typische kanaalbreedte	60 m	95 m
Typische locale diepte	5 m	6 m
Totale lengte kanaal	65 km	72 km
Gemiddelde locatie schip in de doorsnede	midden van het kanaal	midden van eigen helft
Gemiddeld aantal schepen per jaar:		
beroepsvaart ³	20.000	80.000
recreatievaart	30.000	2.000
Gemiddeld aantal schepen per dag:		
beroepsvaart	55	220
recreatievaart	82	5
Maximaal toegestane vaarsnelheid	12.5 km/uur (ca. 7 kn)	18 km/uur (ca. 10 kn) ¹

In de vuistregels zit een zogenaamde vormfactor (α , doorgaans ≤ 1) die specifieke aspecten van de scheepsrump (scheepstype, diepgang) weergeeft. Voor de huidige haalbaarheidsstudie is die factor op 1 gezet, welke, in combinatie met de geselecteerde vuistregel, wordt aanbevolen voor beladen binnenvaartschepen (PIANC, 1987, geciteerd in Sorensen, 1997). Andere (lagere) waarden voor de vormfactor α worden in de literatuur doorgaans genoemd in combinatie met een ander empirisch verloop (samengevat in Sorensen, 1997, Knight 1999). Dat aangepaste verloop valt, op zichzelf, iets hoger uit, zodat de netto berekende golfhoogten in die aanpak ongeveer gelijk (mogelijk enigszins lager) zullen zijn aan de waarden zoals hier toegepast.

Er is in deze haalbaarheidsstudie verder geen onderscheid gemaakt tussen verschillende scheepstypen (en bijbehorende α – waarden). Half-beladen binnenvaartschepen, die mogelijk de hoogste snelheid varen in combinatie met een nog enigszins grote diepgang, zijn niet afzonderlijk beschouwd, aangezien voor die beladingscondities geen gegevens in de literatuur zijn teruggevonden. De nu gekozen waarden komen overeen met relatief hoge inschattingen voor de opgewekte golven (en dus aanwezige energie): de maximaal toegestane vaarsnelheden in combinatie met de hoogste vormfactor (scheepstype- en/of beladingsfactor).

³ Bron: pers. comm. J. Brolsma (Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Scheepvaart, Ontwerp en Inrichting Netwerken (NOI)), dd 21 juli 2009. Gegevens zijn in lijn met waarden vermeld in Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer en CBS (2003).



Figuur 3.5 Voorbeeld van scheepsgeïnduceerde golven langs het Amsterdam-Rijnkanaal. Bron originele afbeelding: Stichting Recreatietoervaart Nederland (2009).

Op basis van de genoemde aannames en de hierboven weergegeven parameterwaarden worden de volgende typische (indicatieve) golfkarakteristieken gevonden nabij de oever (zonder invloed reflecties):

Tabel 3.2 Kenmerkende scheepsgolven in twee case studies.

Prinses Margrietkanaal:	H = 0.2 m	T = 1.8 s
Amsterdam-Rijnkanaal: nabijgelegen passage (1/4 B)	H = 0.7 m	T = 2.6 s
verafgelegen passage (3/4 B)	H = 0.5 m	T = 2.6 s

De genoemde golfhoogten geven de hoogte van de interferentiepieken tussen beide golfcomponenten in het Kelvin-golfsysteem weer.

De golfhoogte op het Amsterdam-Rijnkanaal wordt op basis van ervaring als relatief hoog gezien. Dit bevestigt dat optimistische waarden zijn berekend met de rekenregels. Bovendien is vooralsnog voor de overzichtelijkheid van de berekeningen uitgegaan van de golfhoogte van de nabije passage voor alle scheepspassages. Deze aanpak is weliswaar optimistisch, maar geeft voor nu voldoende inzicht in de orde van groottes van de te verwachten hoeveelheden energie in de golven.

3.4 Potentieel te winnen energie uit scheepsgeïnduceerde golven (secundaire golven)

Als maat voor de golfhoogte van de secundaire golfsystemen zijn de interferentiepieken aangehouden (positieve inschatting voor wat betreft aanwezige golfenergie). Daarnaast is voor deze ruwe inschatting de standaard lineaire golftheorie aangehouden, die uitgaat van een enkele, oneindige sinuscomponent.

De berekende golfhoogten -eigenlijk de hoogte van de interferentiepieken- worden hierbij gecombineerd met de richting van de interferentiepieken, welke onder een hoek van 55° met de oever aankomen (oftewel een golfrichting met 55° met de normaal op de oever).

Voor de energieflex in de golven geldt:

$$F = Ec_g \cos \theta, \text{ met } E = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (1)$$

waarin F de energieflex is per strekkende meter oever (W/m^1), E de golfenergie (J/m^2), c_g is de groepsnelheid (m/s) en θ is de hoek van de golfstraal (voortplantingsrichting, in graden) met de normaalrichting op de kade. De dichtheid van water wordt weergegeven met ρ (kg/m^3), de zwaartekrachtsversnelling door g (m/s^2) en a (m) staat voor de golfamplitude.

Voor de beide casestudielocaties komt dit overeen met de volgende waarden (naast standaardwaarden voor g en ρ):

Tabel 3.3 Kenmerkende golfparameters in twee case studies.

parameter	Prinses Margrietkanaal	Amsterdam-Rijnkanaal
a	0.1 m	0.35 m
θ	55°	55°
c_g (volgens lineaire golftheorie)	1.4 m/s	2.1 m/s

Invullen van deze waarden leidt tot de volgende indicatieve energieflexen per strekkende meter kade:

Prinses Margrietkanaal	40	W/m^1
Amsterdam-Rijnkanaal	700	W/m^1

Over het algemeen zullen bij een passerend schip ca. 5 hoge kammen de oever bereiken. Dat betekent dus dat de berekende energieflex, constant in de tijd aangenomen in standaard lineaire golftheorie, slechts een zeer beperkt deel van de tijd op zal treden na elke scheepspassage. Aangenomen is dat de berekende energieflex constant zal blijven gedurende het interval van die 5 golfperiodes per scheepspassage. Als bovendien het gemiddelde aantal schepen per dag in de berekening wordt meegenomen komen de hierboven berekende energieflexen overeen met de volgende gemiddelde hoeveelheid golfenergie per dag en per strekkende meter oever (flux * 5 * golfperiode * gemiddeld aantal schepen per dag):

Prinses Margrietkanaal	47	$kJ/m^1/dag$	17	$MJ/m^1/jaar$
Amsterdam-Rijnkanaal	2000	$kJ/m^1/dag$	750	$MJ/m^1/jaar$

Om de economische waarde van deze energie aan te geven kan de marktwaarde van deze hoeveelheden energie geschat worden. Op die manier kan een indicatie gegeven worden van de 'return on investment' per strekkende meter kade (per dag of per jaar). Om dit te bepalen is aangenomen dat 1 kWh aan energie (3.6 MJ) 0.20 euro in de markt op zal leveren. Op basis hiervan heeft de in de golven aanwezige energie een marktwaarde van:

Prinses Margrietkanaal	0.003	$\text{€}/m^1/dag$	0.95	$\text{€}/m^1/jaar$
Amsterdam-Rijnkanaal	0.10	$\text{€}/m^1/dag$	40	$\text{€}/m^1/jaar$

De energie in de scheepsgeïnduceerde golven komt dus overeen met een relatief beperkte financiële marktwaarde. Er zal nagegaan moeten worden of dit voldoende is om de investering terug te verdienen die gemoeid is met het aanleggen van een constructie om de energie te winnen. Hiervoor zal de netto opbrengst van de opgewekte energie moeten worden bepaald. Dit betekent dat aanvullende kosten, bijvoorbeeld voor transport van energie, en aanvullende opbrengsten, bijvoorbeeld subsidies, verdisconteerd moeten worden. Ook andere (positieve) aspecten van de winning van deze vorm van energie zal in de afweging van kosten en baten meegenomen dienen te worden. Hierbij kan gedacht worden aan:

- reductie van hinderlijke golfreflecties;
- energiewinning onafhankelijk van (fluctuaties in) natuurlijke factoren, dus ook beschikbaar bij lage windsnelheden (windgolven) of weinig zon.

Afgezien van een economische afweging is het ook van belang na te gaan hoe de te winnen hoeveelheid energie zich verhoudt tot de totale Nederlandse energiebehoefte, oftewel: hoe significant is deze bijdrage? Als aangenomen wordt dat langs de gehele lengte van de beschouwde kanalen energie gewonnen kan worden⁴ en dat langs het gehele tracé de snelheid en locatie van het schip in de breedte van het kanaal constant is, dan resulteert dit in de volgende gemiddelde hoeveelheid energie die langs één oever over de gehele lengte van het gehele kanaal te winnen is:

Prinses Margrietkanaal	3.0	GJ/dag	1105	GJ/jaar	(\approx 60.000 €/jaar)
Amsterdam-Rijnkanaal	144	GJ/dag	53000	GJ/jaar	(\approx 3.000.000 €/jaar)

Ter referentie is hier ook de economische marktwaarde van de berekende hoeveelheden energie per jaar genoemd.

Deze hoeveelheden energie komen overeen met respectievelijk ca. 10^{-5} en 10^{-3} procent van het jaarlijks energieverbruik in Nederland ($3.5 \cdot 10^9$ GJ, waarde 2007, zie Deltares, 2008), een verwaarloosbaar kleine bijdrage dus ten opzichte van de totale Nederlandse energiebehoefte. Aangezien niet alle mogelijke oevers langs Nederlandse kanalen beschouwd zijn, slechts twee case-studielocaties, dient dit slechts ter illustratie van de orde van groottes.

3.5 Ruwe schatting windgolven

Om een eerste indicatie te geven van wat de karakteristieken zijn van windgolven op binnenvaartkanalen is een casestudie gemaakt voor een specifieke locatie langs het Amsterdam-Rijnkanaal. Hierbij is een optimistische schatting gemaakt van de golfhoogten die door de wind op het kanaal zullen worden opgewekt. De gekozen aanpak kan leiden tot relatief hoge schattingen, aangezien in deze haalbaarheidstudie vooralsnog geen rekening is gehouden met:

- de remmende invloed van de aanwezigheid van kades op de opwekking van golfcondities (die ook optreedt bij wind in de lengterichting van het kanaal), zie Figuur 3.6;
- de duur van een specifieke conditie; een specifieke windsnelheid en –richting moet lang genoeg aanhouden om deze condities te bereiken

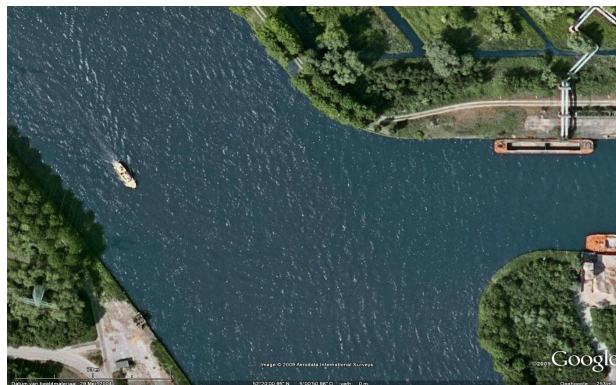
⁴ Dit zal naar alle waarschijnlijkheid een te optimistische aanname zijn, maar voor deze eerste inschatting slechts gebruikt om orde groottes af te schatten.

Ongeveer 5 % van de tijd (ofwel gemiddeld 4300 s/dag) treedt een windsnelheid op van 5 m/s tot 7 m/s uit noordwestelijke richting (zie Figuur 3.7), van een nabijgelegen locatie op het IJmeer). In de buitenbocht bij Diemen is de strijklengte uit noordwestelijke richting relatief lang: ongeveer 5 kilometer. Met de methode Bretschneider worden golfhoogten berekend van ongeveer 0.2 tot 0.3 m met een periode van ca. 2 s. Op basis van deze golfparameters kan een inschatting gemaakt worden van de energie in de door wind opgewekte golven. Op een soortgelijke manier als hierboven in detail beschreven voor scheepsgeïnduceerde golven worden de volgende waarden voor de windgolven op de beschouwde locatie gevonden:

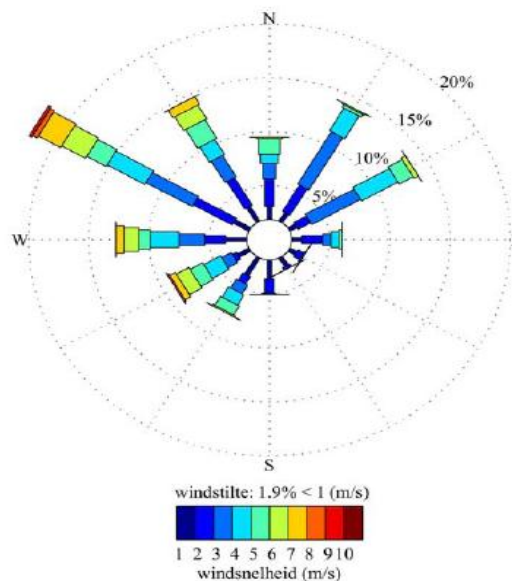
Amsterdam-Rijnkanaal	0.7	MJ/m ¹ /dag	260	MJ/m ¹ /jaar
----------------------	-----	------------------------	-----	-------------------------

Hierbij moet opgemerkt worden dat deze energie alleen te winnen is langs het ‘aangeblazen’ deel van de oever in een bocht, dus over een lengte van ca. de breedte van het kanaal.

Gecombineerd met de interferentiepieken van de scheepsgolven komt het totaal op 1 GJ/m¹/jaar, overeenkomend met ca. €55 /m¹/jaar.



Figuur 3.6 Amsterdam-Rijnkanaal met kleine windgolven (bron Google Earth).



Figuur 3.7 windklimaat op het IJmeer (overgenomen uit WL | Delft Hydraulics, 2007), in dit rapport aangenomen als geldend langs het Amsterdam-Rijnkanaal.

3.6 Inschatting netto financiële opbrengst

Uitgangspunt voor de inschatting van de netto opbrengst is de marktwaarde van de door schepen opgewekte energie langs het Amsterdam-Rijnkanaal. Zoals hierboven genoemd is de mogelijke aanvullende opbrengst door windgolven relatief klein en geldt voor een zeer beperkt deel van de oevers langs het kanaal. Deze wordt hier derhalve buiten beschouwing gelaten.

De schatting zal gemaakt worden in een zeer ruwe vorm, met name op basis van ruwe schattingen. Hierbij wordt rekening gehouden met kosten voor transport en met aanvullende inkomsten in de vorm van (mogelijke) subsidies. Daarnaast worden ingeschatte rendementen voor het omzetten van de energie in de golf naar elektrische energie in rekening gebracht.

Langs het Amsterdam-Rijnkanaal bereikt per jaar naar schatting 204 kWh golf energie één strekkende meter oever. Als al die energie 100% omgezet en aan het elektriciteitsnet geleverd zou kunnen worden dan wordt de hierboven berekende marktwaarde aan inkomsten verkregen: 40 €/m¹/jaar. Dit is echter niet volledig het geval.

Als aangenomen wordt dat 80% van de energie in de secundaire sloopgolven omgezet (technisch 'geogst') kan worden en dat die omzetting vervolgens een rendement heeft van 40% (een optimistische schatting), dan wordt uiteindelijk 65 kWh/m¹/jaar aan elektriciteit gewonnen (verliezen tijdens verder transport worden hier niet beschouwd).

De marktwaarde per kWh is grofweg 0.2 €. Geschat is dat hiervan ca. 25% dekking is voor kosten voor transport van de elektrische energie en overige kosten. Netto is er dus 0.15 €/kWh aan opbrengst beschikbaar voor investering in de opwekking. Daarbovenop komt een mogelijke subsidie, geschat op 0.05 €/kWh. Uiteindelijk is er netto beschikbaar voor winning van de energie: 0.20 €/kWh.

De geraamde opbrengst van 65 kWh/m¹/jaar voor de oevers van het Amsterdam-Rijnkanaal komt daarmee overeen met ca. 13 €/m¹/jaar. Dit is een minimum opbrengst omdat alleen naar de berekende secundaire sloopgolven is gekeken. Er zijn echter ook andere sloopgolven, bijvoorbeeld de transversale sloopgolven en er zijn windgolven. Het betekent dat als de aanlegkosten van de constructie beperkt kunnen blijven tot 100 €/m¹ energiewinning op een economische basis mogelijk lijkt. Wordt daarnaast ook een waarde toegekend aan golfdemping, dan kan het investeringsbedrag wellicht tot 200 €/m¹ worden verdubbeld. Hierbij is ervan uitgegaan dat de energie niet over grote afstanden moet worden getransporteerd en dat over een korte afstand kabels aangelegd moeten worden om de constructie met het elektriciteitsnet te verbinden. Deze bedragen gelden voor een grootschalige aanleg. Voor de aanleg van een pilot om de werking te demonstreren lijkt het redelijk van een groter investeringsbedrag uit te gaan van bijvoorbeeld 300 €/m¹ voor een pilot over een lengte van enkele tientallen meters, dat komt overeen met aanlegkosten van 15.000 €/50 m. Deze kosten betekenen dat naar een eenvoudige en goedkope vormgeving gezocht moet worden.

Als het lukt een eenvoudige vormgeving te ontwikkelen die ook weinig onderhoud vergt dan kan een grootschalige toepassing toch een aanzienlijke opbrengst leveren. Beschouw bijvoorbeeld een toepassing over een lengte van 30 kilometer langs een oever van het Amsterdam-Rijnkanaal: een investering van € 6 miljoen levert per jaar tenminste € 400.000 duurzame electriciteit.

Dat is een terugverdientijd van maximum 15 jaar met gratis golfdemping. Er zijn goede mogelijkheden dat een pilotopstelling zal kunnen aantonen dat deze terugverdientijd aanzienlijk kan worden verkort.

Aangezien een (groot) deel van de kades langs het Amsterdam-Rijnkanaal op termijn geheel of gedeeltelijk vervangen dienen te worden is het mogelijk interessant om een extra investering te maken voor een compacte golfdempende constructie met duurzame energieopwekking, als onderdeel van die nieuwe kadeconstructie. Bij ingeschatte vervangingskosten van ca. 5,000 - €/m¹ kan mogelijk voor een relatief kleine aanvullende investering significante golfdemping met duurzame energieopwekking bereikt worden.

3.7 Discussie en conclusies

Het potentieel aan te winnen energie uit scheepsgeïnduceerde golven, bepaald op basis van de hoogte van de interferentiepieken, is geïllustreerd aan de hand van twee concrete casestudies: het Prinses Margrietkanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal. Daarnaast is ter illustratie een beknopte, ruwe inschatting gemaakt van de windgolven op een specifieke locatie langs het Amsterdam-Rijnkanaal.

Op basis van de resultaten wordt geconcludeerd dat voor het meest geschikte deel van de oevers van kanalen de energie opbrengsten bescheiden zullen zijn, zodat naar een eenvoudige en goedkope vormgeving gezocht moet worden om op economische wijze energie te winnen uit scheepsgeïnduceerde golven. Een en ander betekent dat voor een groot deel van de oevers van het hoofdvaarwegennetwerk het naar verwachting niet of net rendabel is om te investeren in de winning van energie uit scheepsgeïnduceerde golven als het primaire (of enige) doel is de investering terug te verdienen. Op gemerkt wordt dat deze verwachting erg onzeker is omdat nog veel factoren onbekend zijn en op ruwe aannames berusten. Het verdient aanbeveling:

- De waterbeweging langs de oever van het Amsterdam-Rijnkanaal gedurende enkele weken met een klein interval te meten, zodat het inzicht in de optredende scheepsgolven en windgolven kan worden vergroot.
- Onderzoek te doen naar locaties met meer scheepsgolven dan het Amsterdam-Rijnkanaal, bijvoorbeeld langs de Waal, Boven Merwede en de Rotterdamse haven waar de uurgemiddelde waterstand echter een veel grotere variatie heeft dan in het Amsterdam-Rijnkanaal door getij en variatie in de rivierafvoer. Daar kunnen wellicht locaties worden gevonden met een hogere energie opbrengst dan de berekende opbrengst in het Amsterdam-Rijnkanaal. Tevens zouden die locaties geselecteerd kunnen worden op een kleine afstand tot het bestaande elektriciteitsnet of op de mogelijkheid de geproduceerde elektriciteit lokaal te verbruiken.
- De aannames in de voorgaande beschouwingen te verifiëren met een pilot langs het Amsterdam-Rijnkanaal.

4 Vormgeving

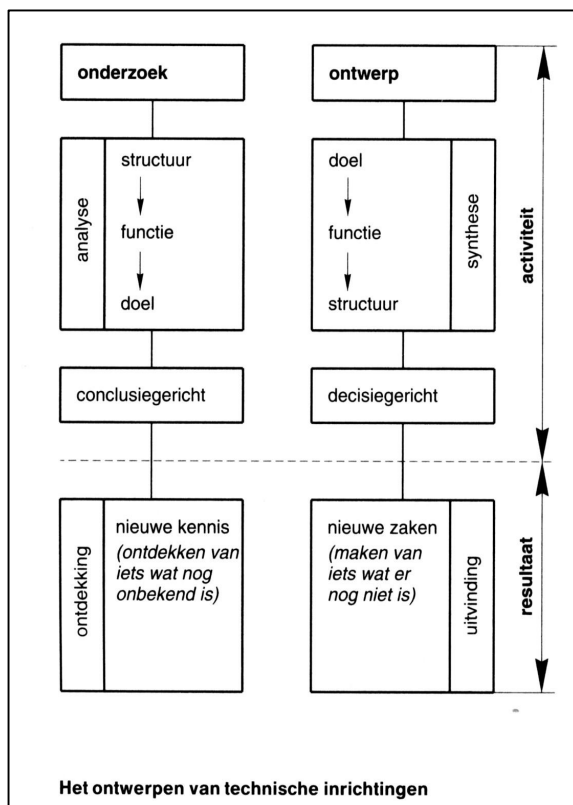
4.1 Methodologie

Basis regels voor innovatie zijn (Daan van Rooijen, van de Kroonenberg, 198):

- 1 het hoofddoel moet helder zijn en het moet haalbaar zijn,
- 2 het hoofddoel is Most Advanced and Yet Acceptable (MAYA)
- 3 de hoofddoelstelling moet door alle partijen geaccepteerd zijn.
- 4 Voortgang van het project moet toetsbaar zijn.

Het hoofddoel van dit project is duurzame energie opwekken gecombineerd met golfdemping. De locatie is in de eerste plaats een kanaal met een vrijwel constant waterpeil (uurgemiddeld), en met een doorkijk naar meer extreme locaties zoals havens met getij en rivieren.

In de beginfase van een innovatieproject is niet altijd duidelijk of er voldoende kennis is om met ontwikkeling te beginnen. Vanuit de wetenschap wordt dan vaak geroepen om meer onderzoek. Daar tegenover eisen beleidsmakers marktrijpe en unieke producten op korte termijn en is onderzoek in hun ogen vaak al te wetenschappelijk of te theoretisch. Het WINN programma is gericht op het ontwikkelen van nieuwe methoden om duurzame energie uit water te winnen



Van belang in elk R&D project is dat men vooraf duidelijk stelt waar de prioriteit ligt. Is het project gericht op meer kennis te verwerven of gericht om een product te ontwikkelen. Kort gezegd is het een onderzoeksproject of een ontwikkelingsproject?

Een onderzoeksproject is conclusiegericht. Door analyse wordt kennis gegeneerd over in volgorde: structuur, functie en doel van een natuurverschijnsel.

Een ontwerp of ontwikkelingsproject is decisiegericht en begint met een doelstelling en vervolgens ontwikkeld men door synthese de functie en de structuur (zie schema in Figuur 4.1).

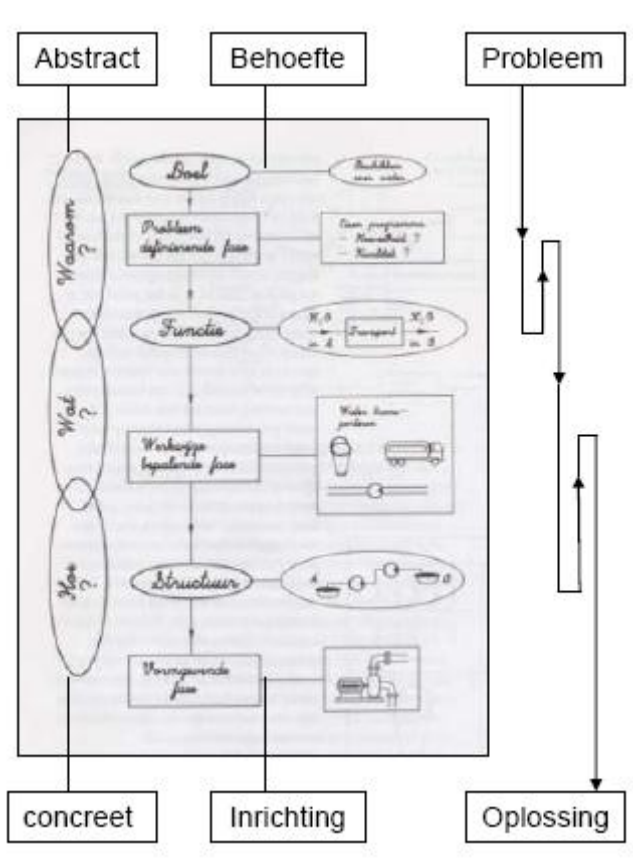
In een ontwikkelingsproject kunnen wel onderzoeksactiviteiten plaats vinden om kennisleemtes te vullen maar die zijn altijd gericht op het ontwikkelingsdoel.

Figuur 4.1 Schematisch verschil tussen ontwikkeling en onderzoek.

In het eerste geval is een onderzoeksmethode zinvol en in het laatste geval een ontwerpmethodiek. Een ontwerpmethodiek is zelfs noodzakelijk als er onvoldoende inzicht is in de aard van het ontwerpprobleem en onvoldoende overzicht in de veelheid en diversiteit van factoren.

In dit project wordt een innovatieve methode ontwikkeld om duurzame energie op te wekken gecombineerd met golfdemping. Met nadruk wordt gesteld dat in dit project geen onderzoek wordt uitgevoerd.

In geval het ontwikkelproces onoverzichtelijk dreigt te worden, dan is het goed het proces te ordenen volgens het schema in Figuur 4.2. Het iteratieve karakter van een ontwikkelproces leidt vaak tot enige onoverzichtelijkheid voor de deelnemers aan het proces. De deelnemers vertegenwoordigen vaak verschillende disciplines. Het schema biedt een handvat om een onoverzichtelijk proces te structureren.,.



Figuur 4.2 Voorbeeld van een complex en iteratief ontwikkel proces.

Het proces van dit project is samengevat in twee stappen: een inventarisatie van werkingsprincipes via een brainstorm sessie gehouden bij Deltares op 30 september 2009 (paragraaf 4.2) en een selectie van de meest veelbelovende werkingsprincipes gehouden in Westraven nabij het Amsterdam-Rijnkanaal op 14 oktober 2009 (paragraaf 4.3).

4.2 Inventarisatie van werkingsprincipes

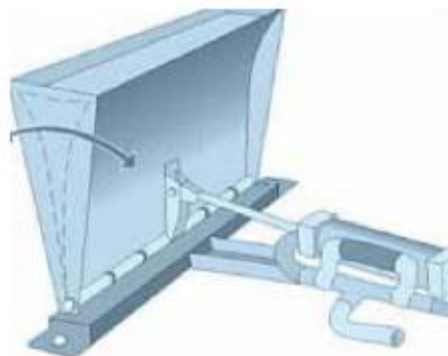
4.2.1 Werkingsprincipes voor het opwekken van energie uit zeegolven.

Golfenergie uit windgolven is op verschillende manieren te winnen. Golfenergie installaties bestaan uit twee delen: het omzetten van de golfbeweging in een andere beweging en het omzetten van die beweging in elektrische energie. De meest doorontwikkelde golfenergie installaties zijn gebaseerd op één van de volgende vier principes. Onttrekking van (een deel van) de golfenergie gebeurt via (Deltares, 2008 en J. Stoop, 2009):

- 1 **Drijvers:** als gevolg van een passerende golf maakt een drijver, op of onder het wateroppervlak, een op- en neergaande, een heen- en weergaande en roterende beweging. Een of meerdere van deze bewegingen kunnen via conventionele overbrengingen omgezet worden in elektrische energie, zie Figuur 4.3 en Figuur 4.4.

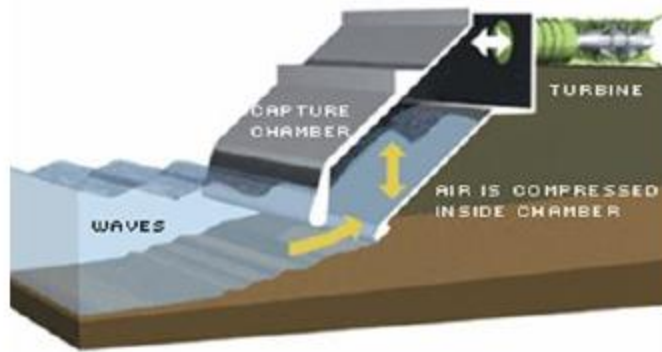


Figuur 4.3 Foto van een Wavestar Energy proefinstallatie voor de kust van Denemarken.



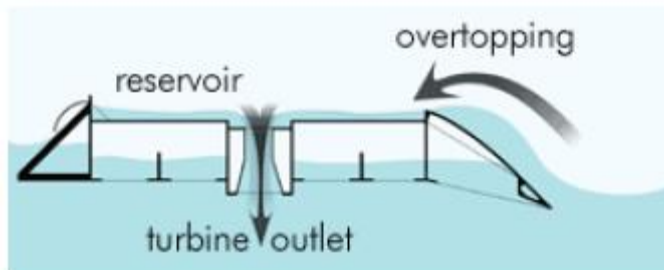
Figuur 4.4 Schets van een Wave Roller systeem.

- 2 **Luchtdrukkamers:** een golf water komt binnen in een afgesloten kamer waardoor de in de kamer aanwezige lucht wordt samengeperst. Deze luchtstroom drijft een turbine aan, zie Figuur 4.5.



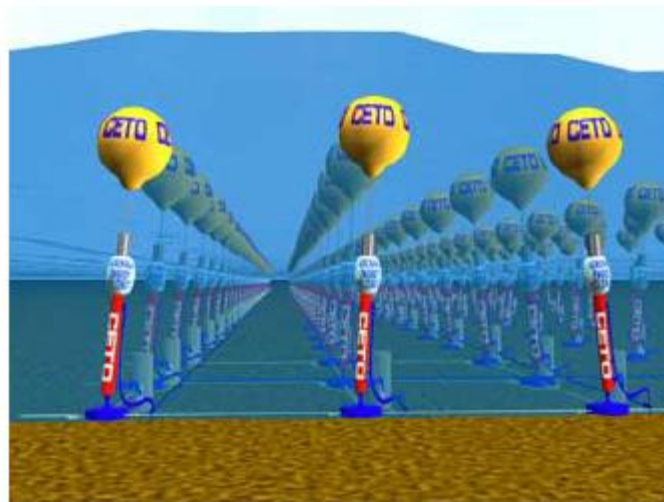
Figuur 4.5 Voorbeeld van een constructie met een luchtkamer.

- 3 **Aftopping van de golven:** Het bovenste gedeelte van een golf wordt in een installatie naar een hoger gelegen reservoir gekanaliseerd. De kinetische energie van het bovenste deel van de golf wordt omgezet in potentiële energie, waarna het water via een turbine naar zeeniveau stroomt en energie opwekt, zie Figuur 4.6.



Figuur 4.6 Voorbeeld doorsnede van een drijvende aftopping constructie.

- 4 **Golfrotors:** De waterdeeltjes in golven maken een cirkelbeweging, die via een combinatie van een verticale en/of horizontale rotor omgezet kan worden in een draaibeweging. Deze beweging kan via conventionele overbrengingen omgezet worden in elektrische energie, zie Figuur 4.7.



Figuur 4.7 Schets van het CETO systeem.

Tijdens de brainstormsessie op 30 september hebben de deelnemers zich laten inspireren door de bovenstaande systemen met in gedachten de omstandigheden van het Amsterdam-Rijnkanaal, zie Figuur 4.8.



Figuur 4.8 Interferentiepieken die door een passerend binnenvaartschip zijn veroorzaakt, weerkaatsen tegen de damwand aan de oostelijke oever van het Amsterdam-Rijnkanaal nabij Utrecht, 14 oktober 2009.

Het doel van het idee om energie op te wekken uit scheepsgolven langs een damwand in een kanaal is:

minimaal 30 % van de aanwezige energie in de golven om te zetten in elektrische energie, minimaal 30 % golfdemping (dat betekent dat de golfhoogte van de gereflecteerde golf 30 % kleiner is dan de golfhoogte van de inkomende golf)

Het programma van eisen (PvE) voor een grootschalige toepassing luidt schematisch:

- De constructie neemt in het kanaaldwarsprofiel een beperkte breedte in (maximaal 2 m), dit ivm resterende beschikbare ruimte voor de scheepvaart.
- De constructie is gemakkelijk te vervangen na een aanvaring.
- De investeringskosten bedragen maximaal € 200 per strekkende meter bij een grootschalige toepassing waar de constructie op een industriële wijze kan worden geproduceerd.
- De levensduur van de constructie is minimaal 7 jaar.
- De onderhoudskosten bedragen per jaar maximaal 10 % van de investeringskosten.

Het programma van eisen voor een pilot toepassing is wat minder streng. Bijvoorbeeld langs het Amsterdam-Rijnkanaal zullen de bestaande damwanden worden vervangen. Er is veel hinder door tegen de damwand reflecterende scheepsgolven. Door voor of achter de damwand energie opwekkende constructie te plaatsen worden de scheepsgolven voor een belangrijk deel gedempt. Dan kan energieopwekking worden gecombineerd met verbetering van de bevaarbaarheid door golfdemping. In havens met afgemeerde schepen of in kanalen is extra golfdemping een manier om de troskrachten in de trossen van de afgemeerde schepen te reduceren.

Motorvermogens en de afmetingen van schepen nemen in de tijd geleidelijk toe. Door deze toename wordt er steeds meer energie aan het water toegevoerd afhankelijk van de vaarroute van het schip, de brandstofprijs en de waterdiepte van het kanaal.. Uiteindelijk wordt deze energie omgezet in een zeer kleine temperatuurstijging van het water. Dit is echter een theoretische effect, dat in de praktijk vaak nauwelijks meetbaar zal zijn.

In een brainstorm zijn de volgende ideeën over een werkingsprincipe van golf naar beweging naar voren gebracht zie Tabel 4.1:

Tabel 4.1 Overzicht van verschillende werkingsprincipes.

Omzettingen mogelijkheden van golfenergie naar nuttige energievorm										
Werkgroep Golfdemping / oktober 2009 / Deltares										
nr	naam	aanwezig in g principe		omzetting I	medium	werktuig	omzetting II		nuttige vorm	
Oever met talud										
A1	Lopende band	dynamisch	druwbeweging	translatie	water	lopende band met de golf mee	rotatie	draaiende as	dynamo	electriciteit
A2	compartimenten		beweging	translatie	water	vlakverschuiving loodrecht op golfrichting	excentriek, zuigermotor		pomp	direct drive
A3	rollen	mechanisch	beweging	rotatie	water	(principe gebeds-)molens verticale as met de golf mee			dynamo	electriciteit
A5	piezo elektrisch	mechanisch	beweging	buiging	water	wuivend riet	principe /piezo/rekstrookjes		pomp	direct drive
A6	compartimenten	dynamisch	drukopbouw	druk omzetting	water	vlakverschuiving		inductiemotor		electriciteit
A7	drijvers	mechanisch	beweging	translatie	water	vlakverschuiving loodrecht op golfrichting	excentriek, zuigermotor		dynamo	electriciteit
A8	orgelpijpen	druk	drukopbouw	druk omzetting	lucht	luchtverplaatsing	vibratie		fluit	muziek
Oever met damwand										
B1	Lopende band	dynamisch	druwbeweging	translatie	water	lopende band met de golf mee	rotatie	draaiende as	dynamo	electriciteit
B2	drijvende containers	druk	beweging	translatie	lucht	vlakverschuiving loodrecht op golfrichting	excentriek, zuigermotor		dynamo	electriciteit
B3	panelen	mechanisch	beweging	rotatie	water	(principe gebeds-)molens verticale as met de golf mee			dynamo	electriciteit
B4	rollen	mechanisch	beweging	rotatie	water	(gebeds-)molens horizontale as			dynamo	electriciteit
B5	piezo elektrisch	mechanisch	beweging	buiging	water	wuivend riet	principe /piezo/rekstrookjes		pomp	direct drive
B6	compartimenten	dynamisch	beweging	translatie	water	vlakverschuiving		inductiemotor		electriciteit
B7	golfdrukleidingen	druk	drukopbouw	druk omzetting	lucht	luchtverplaatsing	turbine		dynamo	electriciteit
B8	orgelpijpen	druk	drukopbouw	druk omzetting	lucht	luchtverplaatsing	vibratie		fluit	muziek
C	opvangbekken op oever	volumeverplaat reservoir vullen		uitloop	water	vijzel	rotatie	draaiende as	dynamo	electriciteit
C	opvangbekken direct achter wand	volumeverplaat reservoir vullen		uitloop	water	vijzel	rotatie	draaiende as	dynamo	electriciteit

Van deze werkingsprincipes zijn de volgende geselecteerd en nader beschreven:

- Drijvers met een stang (4.2.2)
- Zwaaiende panelen (4.2.3)
 - Scharnier bovenkant van het paneel,
 - Scharnier onderkant van het paneel
- Golfdrukleidingen (4.2.4)
- Samendrukbare compartimenten (4.2.5)
- Terugslag klep i.c.m. met retourstroming door vijzelturbine (4.2.6)

Van beweging naar het opwekken van energie zijn de volgende principes genoemd:

- Turbine,
- Inductie met een magneet,
- Piëzo elektrische elementen.

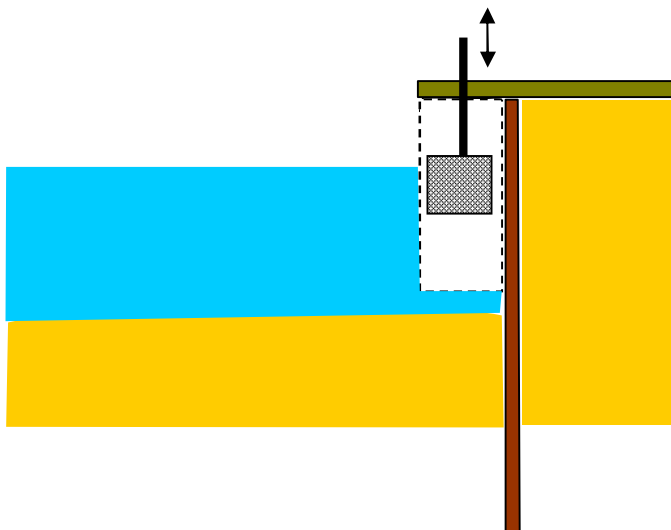
Deze ideeën worden in het volgende nader beschreven.

4.2.2 Drijvers met een stang

Voor de damwand drijven containers met daarop een verticale staaf. De golven doen de container op en neer bewegen tussen twee geleiders. De weerstand tussen de geleiders moet klein zijn en ongevoelig voor vervuiling, en indien onder water, aangroeiing. Het principe is dat de containers zodanig geballast worden dat ze in de eigen-frequentie van de golven op en neer bewegen. Een voordeel hierbij is dat de periode van de scheepsgolven vrij constant is. De verticale beweging van een stang, die aan de container is bevestigd en die deels boven de damwand uitsteekt, kan direct door inductie in energie worden omgezet, zie schets in Figuur 4.9. Daartoe wordt aan de stang een magneet bevestigd die in een spoel op neer kan bewegen. Een andere variant is dat de verticale beweging als bij een stoommachine in een draaiende beweging wordt omgezet en dat daarmee vervolgens een turbine wordt aangedreven.

Voor de bescherming van de drijvers kan gekozen worden voor twee oplossingen: de drijvers zijn zo goedkoop dat ze gemakkelijk kunnen worden vervangen als er schade optreedt of wel de drijvers worden door of een deksloof, of een gording of fenders worden beschermd. Die fenders kunnen naast een drijver aan de damwand worden bevestigd. De drijvers kunnen van kunststof containers of van ijzer worden gemaakt. De kunststofcontainers zullen geballast moeten worden. De afmetingen van een horizontale doorsnede van een drijver zijn ongeveer 1 m^2 .

De beweging van een drijver die door een uitstekende gording of deksloof wordt beschermd wordt beperkt tot de hoogte van de onderkant van de deksloof of gording. Bij een integraal ontwerp zal de hoogte en de breedte van de deksloof of gording op de afmetingen van de drijver worden afgestemd. De elektriciteitskabels kunnen aan, op of tegen een deksloof of gording worden aangebracht. Daarmee wordt het graafwerk gereduceerd. Het principe van de drijver die via een beweging energie opwekt lijkt enigszins op het principe dat door Water Star Energy in een pilot is toegepast, zie Figuur 4.3. Tijdens de brainstorm is opgemerkt dat het principe van een drijver met een stang ook gebruikt kan worden om een watermuziekinstrument als kunstwerk te maken. Op verschillende stangen worden een soort van orgelpijpen met verschillende diameters geplaatst. Door de lucht die door de orgelpijpen wordt geperst ontstaan verschillende klanken die gerelateerd zijn aan de golven in het kanaal.



Figuur 4.9 Schets van een dwarsdoorsnede van een damwand met een drijvende container.

Voordelen:

Eenvoudige constructie indien met inductie energie wordt opgewekt
 Zeer goede landschappelijke inpassing

Nadelen:

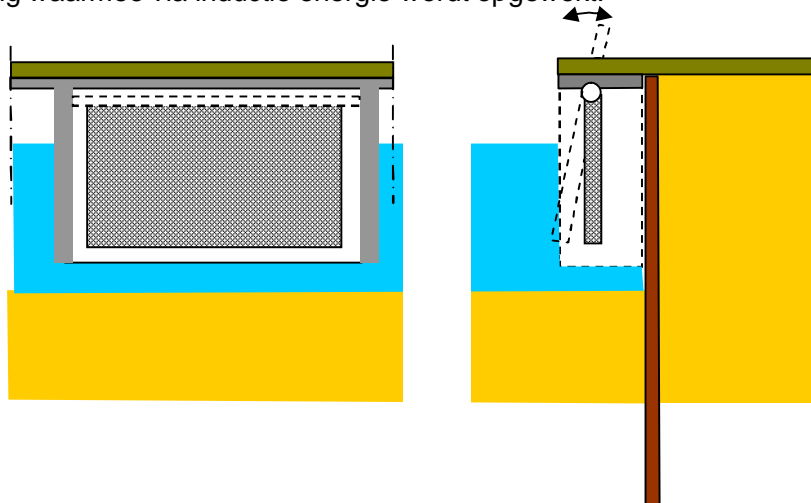
Het onderhoud van een lange rij bewegende drijvers is onbekend.

4.2.3 Zwaaiende panelen

De panelen zitten in min of meer in een omhulling die de uitwisseling tussen het water achter het paneel en het kanaalwater zodanig remt dat het paneel gemakkelijk in zijn eigenfrequentie komt en zo geschikt is voor energiewinning, zie schets in Figuur 4.10. De panelen worden zo ontworpen dat ze net niet gaan drijven bij de hoogste waterstand. De lengte van een paneel wordt door de scheepsgolven bepaald. Een lengte van ongeveer 1 tot 2 m lijkt geschikt. Opgemerkt wordt dat de panelen in de schets een grotere lengte hebben.

Een variant is een paneel dat het scharnier aan de onderkant heeft. Aan het wateroppervlak zijn de drukvariaties het grootst (orbitaalbeweging golf) en daar kan dit paneel ook de grootste uitwijking maken. Nadeel is dat een scharnier met een draaiende as onderwater lastiger is te onderhouden.

De zwaaiende beweging kan direct worden omgezet in een draaiende as die een turbine aandrijft. Een variant is een zwaaiend paneel dat met een stand is verlengd tot boven de damwand. Daar kan de beweging van een stang worden omgezet in een horizontale beweging waarmee via inductie energie wordt opgewekt.



Figuur 4.10 Schets met een aanzicht en een dwarsdoorsnede van een zwaaiend paneel.

Onzekerheden:

Het onderhoud van de constructie is onzeker. De beweging van een paneel kan door vuil, aangroeiing worden beperkt. Wat is de kans op schade als schepen afmeren langs deze constructie?

Voordelen:

De zwaaiende bewegingen van verschillende panelen op 1 as resulteert in een krachtig en gelijkmatig draaiende as. Alle panelen hebben een verschillende fase. De draaiende as kan via een tandwiel overbrenging een turbine aandrijven. De omzetting van de zwaaiende beweging via inductie in elektriciteit is efficiënt.

Nadelen:

De zwaaiende panelen hebben behoorlijk wat ruimte nodig. Daardoor wordt het overstek verbonden aan de deksloof van de damwanden een relatief vrij zware constructie.

De omzetting van een zwaaiende beweging van een panaal naar een draaiende as is niet efficiënt. De lengte van de as kan waarschijnlijk niet oneindig lang worden. Dat kan resulteren in vrij veel kleine turbines met elk zijn eigen onderhoud.

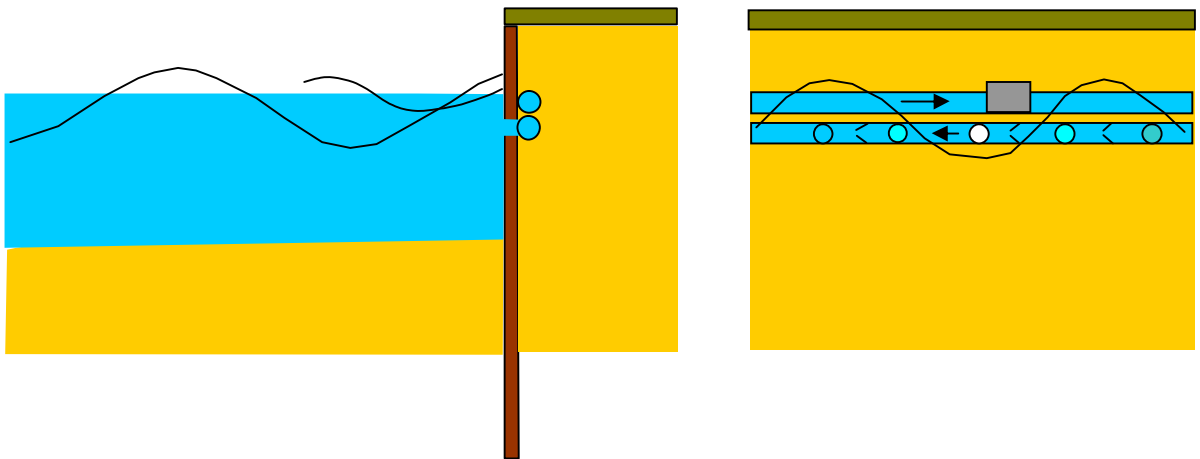
De omzetting van een zwaaiende beweging via inductie in elektriciteit vraagt veel inductie elementen naast elkaar. Het onderhoud aan die elementen is onbekend.

4.2.4 Golfdrukleidingen

Achter de bestaande damwand worden twee buizen geplaatst, waarbij een heengaande leiding juist onder de laagste waterstand in een golf en een hoger gelegen retourleiding, zie Figuur 4.11. In de heengaande leiding worden openingen gemaakt die door de damwand heen in verbinding staan met het water in het kanaal. Na elke opening is in de leiding een terugslag klep aangebracht. Als een golftop tegen de damwand komt stijgt de druk en ook de druk in de leiding. De terugslagklep opent zich en water stroomt in één richting door de verhoogde druk door de leiding.

Deze constructie kan beter bij een nieuw aan te leggen damwand worden ingebouwd dan bij een bestaande damwand. Bij bestaande damwand kunnen ankerstangen in de weg zitten en de toegankelijkheid beperken. Een bestaande damwand dient voldoende sterk te zijn om na verzwakking door het aanbrengen van gaten in de damwand toch voldoende sterk te zijn.

Deze stroming kan direct gebruikt worden om het water in de vijver bij Westraven te verversen. Of om een kleine turbine aan te drijven om elektrische energie op te wekken.



Figuur 4.11 Dwarsdoorsnede en aanzicht van een systeem met golfdrukleidingen.

Onzekerheden:

Onderhoudskosten van de installatie.

Voordelen:

Goede landschappelijke inpassing,
Weinig ruimte beslag

Nadelen:

Gering debiet en de leiding kan niet oneindig lang worden gemaakt. Golven die zich tegen de stroomrichting in de leiding voortplanten zijn waarschijnlijk minder effectief.
Veel kleine turbines leiden tot veel onderhoud.
Openingen door de damwand verzwakken een bestaande damwand.

4.2.5 Samendrukbare compartimenten

Het idee is een samendrukbaar compartiment geïntegreerd in een damwand. De golven drukken het compartiment in en laten het compartiment ook weer uitzetten, zie Figuur 4.12. Het samendrukken en uitzetten veroorzaakt ook golfdemping. Golfdemping van verschillende golven:

- Windgolven
- Secundaire scheepsgolven
- Translatiegolven die ontstaan uit een primaire scheepsgolf
- Translatiegolven en seiches

De beoogde demping bedraagt 30 tot 50 % van de golfhoogte en een verflauwing van de helling van het front van translatiegolven met ongeveer 30 tot 50 %.

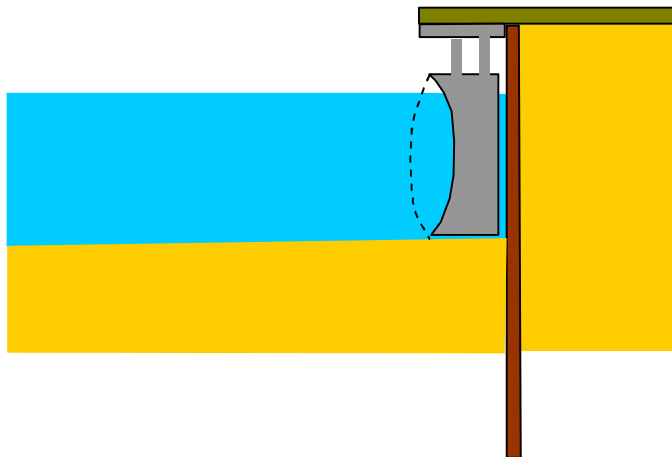
De grootte van de compartimenten is afgestemd op het type golf dat een compartiment belast.

De compartimenten kunnen een constructief onderdeel worden van de damwand langs een kanaal.

Daardoor kan op het aantal damwandplanken mogelijk worden bespaard bij aanleg van een nieuwe damwand. Bij een bestaande damwand kunnen de compartimenten eenvoudig aan de bestaande damwand worden opgehangen of vastgelast.

Het principe werkt bij een oever waar een translatiegolf langs loopt als volgt. Door het indrukken van de compartimenten neemt de kanaaldoorsnede iets toe, en daarmee de stroomsnelheid in de translatie golf iets af. Deze vertraging leidt tot een klein energieverlies. Omgekeerd wordt bij een vergroting van een compartiment de kanaal dwarsdoorsnede iets kleiner en neemt de stroomsnelheid in de translatiegolf iets toe. In veel havens en kanaalpanen lopen translatiegolven heen en weer terwijl ze langzaam dempen door bodemwrijving. Door het uitzetten en indrukken van compartimenten dempen die translatiegolven veel sneller. Een vergroting of verkleining van een kanaaldwarsprofiel moet wel 2 tot 5 % van het kanaaldwarsprofiel zijn. Dat zijn relatief grote veranderingen, maar niet onmogelijk.

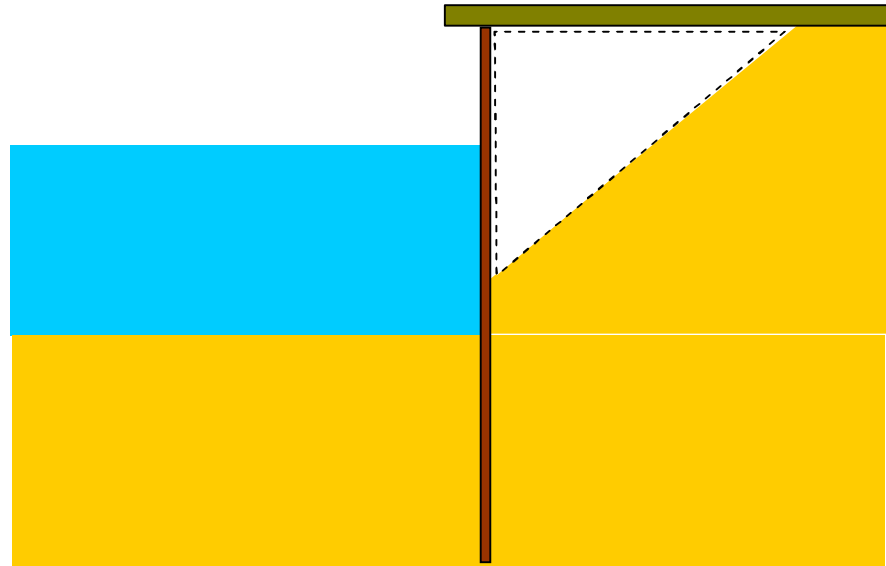
Het principe werkt iets anders bij een oever waar een translatiegolf tegen reflecteert, bijvoorbeeld aan het einde van een havenbekken. Er zijn goede ervaringen met golfdemping door een overstortrand. Een oever met een overstortrand is in een volgende paragraaf toegelicht.



Figuur 4.12 Schets dwarsdoorsnede damwand als oeverbescherming in een kanaal.

Kademuur

Onder een grote kademuur is vaak onbenutte ruimte, en daar zouden grote samendrukbare compartimenten kunnen worden aangelegd, zie Figuur 4.13. Deze compartimenten dienen in de eerste plaats golven in de haven te dempen en in de tweede plaats energie op te wekken. In een haven bekken komen verschillende golven voor, die het beste gedempt kunnen worden door samengestelde compartimenten met verschillende afmetingen.



Figuur 4.13 Schets dwarsdoorsnede van een kadeconstructie in een haven.

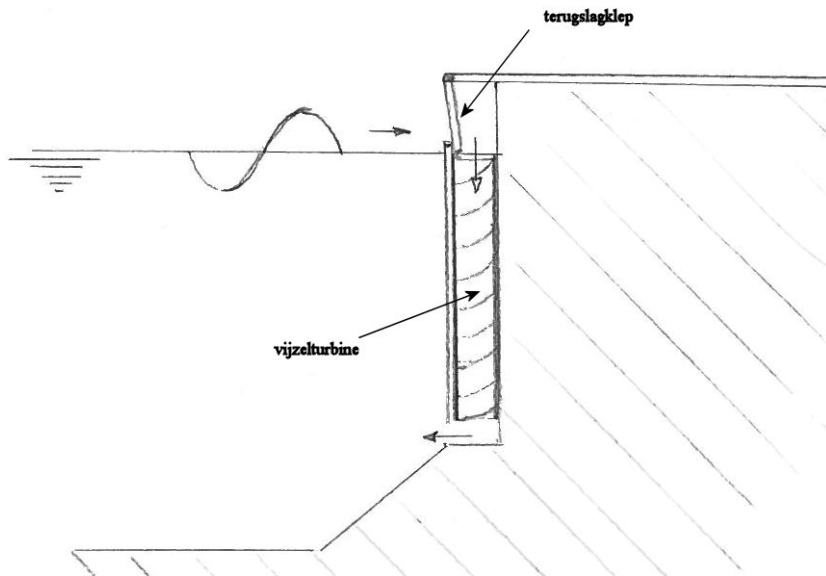
In de witte ruimte in bovenstaande schets kan een constructie worden geplaatst voor het opwekken van energie en het dempen van translatiegolven.

4.2.6 Terugslag klep in combinatie met retourstroming door een vijzelturbine

In dit ontwerp bestaat de kade aan de bovenzijde (boven de gemiddelde waterlijn) uit een terugslag klep die alleen waterverplaatsing toestaat in de richting van de landzijde van de kademuur, zie Figuur 4.14. Deze stroming vindt alleen plaats indien er een waterstandsverschil is tussen het waterniveau van het kanaal en het waterniveau achter de kademuur. Achter de kademuur bevindt zich dus ook een waterkolom met een retourstromingscomponent aan de onderzijde van de kademuur. Parallel aan de (verticale) kademuur aan de landzijde is een vijzelturbine geplaatst waar het water doorheen wordt gestuurd aangezien het waterniveau aan beide zijde van de kademuur gelijk moet zijn en dit de weg is van de minste weerstand. Dit debiet stroomt via de onderzijde van de kademuur weer terug naar het kanaal en via de vijzelturbine wordt de energie geoogst.

Op deze manier wordt de golf ter plaatse van de kade 'afgetopt' en vrijwel alle potentiële golfenergie gestuurd door de vijzel. Tevens is daarmee de reflectie van een golf geminimaliseerd.

De draaiende beweging van de vijzel wordt via een turbine omgezet in elektriciteit.



Figuur 4.14 Schets dwarsdoorsnede van een kadeconstructie in een haven waarbij gebruik wordt gemaakt van een terugslagklep en een vijzelturbine.

Onzekerheden:

De aanlegkosten en de onderhoudskosten van een vijzelturbine. Een vijzelturbine werkt optimaal als de vijzel onder een bepaalde hoek wordt geplaatst. Dat kan als de vijzel evenwijdig aan de keermuur onder een hoek staat.

Voordelen:

Goede landschappelijke inpassing.
 Ook toepasbaar bij een schuine kadewand.
 Hoog omzettingsrendement van een vijzelturbine.
 Goede golfdemping

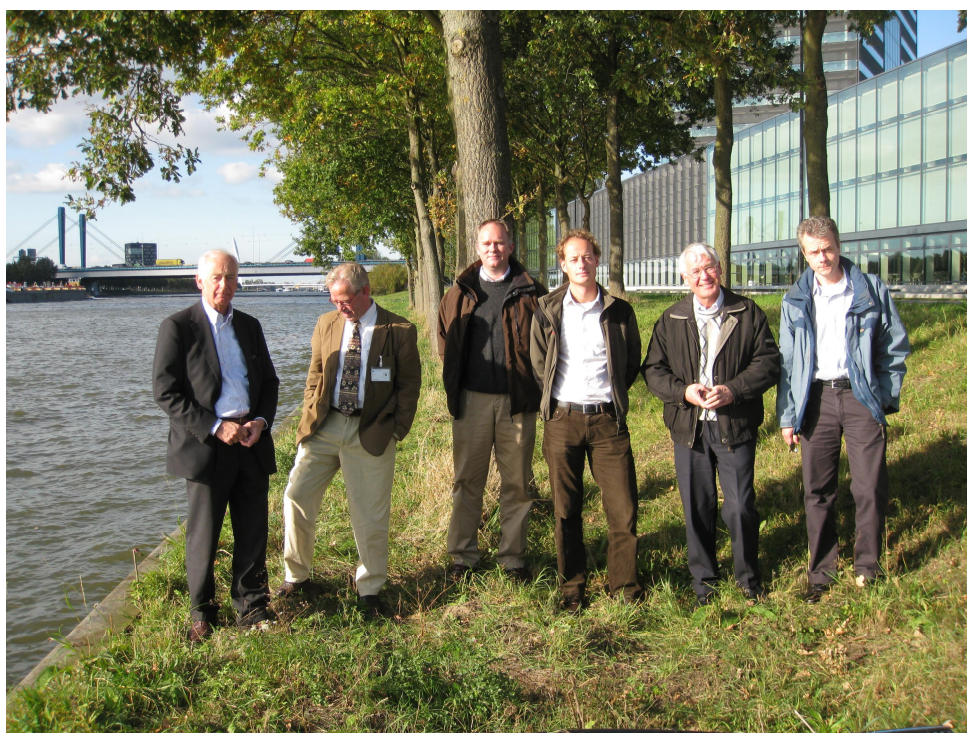
Nadelen:

Alleen het hoogste deel van een golftop wordt gebruikt. Het golfdal is nodig om het water door een vijzelturbine terug te laten stromen.
 Een aandachtspunt kan de responstijd van het systeem zijn. Voor een goede werking is het wellicht gewenst dat deze responstijd past bij de golfperiode van de inkomende golven.
 De aanlegkosten en het onderhoud van een vijzelturbine zijn wellicht aanzienlijk. De vijzelturbine moet beschermd worden tegen aanvaringen. De vijzel zit onder water en is daardoor wellicht moeilijk toegankelijk voor onderhoud.

4.3 Selectie van werkingsprincipes

4.3.1 Inleiding

De deelnemers aan de tweede brainstormsessie op 14 oktober 2009 aan de oever van het Amsterdam-Rijnkanaal nabij RWS kantoor Westraven waren, zie Figuur 4.15, van links naar rechts: Tom den Hartog (Teeage), Leo Korving (Royal Haskoning), Daan van Rooijen (KIEM), Jan-Joost Schouten (Deltares), Henk Roodenburg (gepensioneerd, expert utiliteitsbouw) en Martijn de Jong (Deltares). De foto is door M. van der Wal (Deltares) genomen.



Figuur 4.15 Deelnemers aan de tweede brainstormsessie.

Drie mogelijke werkingsprincipes zijn gekozen als meest veelbelovend en die methoden worden hier besproken. Deze werkingsprincipes worden als volgt aangeduid:

- magneet/spoel bekrachtiging (4.3.2),
- golf overslag systeem (4.3.3) en
- piëzo-elektrisch energiesysteem (4.3.4).

Deze systemen worden in dit rapport kort theoretisch geschetst. Een gedetailleerde uitwerking (technisch en economisch) dient nog te gebeuren. Gezien het innovatieve karakter van deze technieken is een uitwerking met standaard methoden niet voldoende. In die situatie kan het ontwerpen van een pilot constructie worden overwogen om overblijvende onzekerheden weg te nemen.

4.3.2 Magneet/spoel bekrachtiging

De eerste techniek bestaat erin om elektriciteit op te wekken op basis van de beweging van een magneet door een spoel. Het systeem werkt als volgt: een boei of vlotter drijft ter hoogte van de kanaal- of damwand op het wateroppervlak en volgt diens beweging. Het drijvende element is verbonden met een verticale stang (zie Figuur 4.16). Beide eenheden worden geleidend opgesteld zodat deze ter plaatste gehouden worden ter hoogte van de dam- of kanaalwand (zie onderaan Figuur 4.17).

Tijdens verstoring (golven) zal de verticale stang op en neer bewegen t.g.v. de drijver. Deze translatiebeweging kan nu via het magneet/spoel principe omgezet worden in elektrische energie. Hierbij wordt de magneet verbonden met de verticale as en dus als bewegend onderdeel opgesteld, aangedreven door de golven. De magneet beweegt vervolgens door de vaste, met de dam- of kanaalwand verbonden spoel (zie Figuur 4.16 en Figuur 4.17). Volgens de wet van Faraday wordt mechanische energie omgezet in elektrische energie:

$$V(t) = -N \cdot \frac{\partial(B(t) \cdot A)}{\partial t} \quad (2)$$

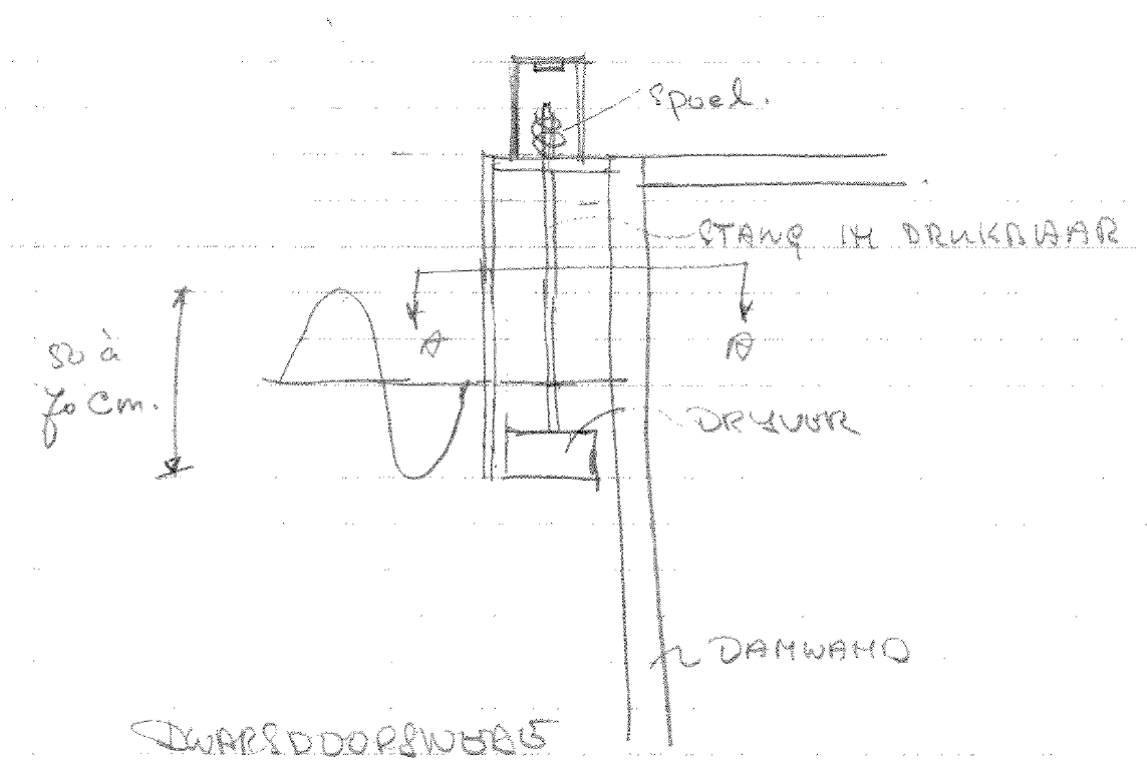
In deze vergelijking is $V(t)$ de spanning die gegenereerd wordt in functie van de tijd t , N het aantal wikkelingen van de spoel, $B(t)$ de magnetische flux in functie van de tijd en A de dwarsdoorsnede van de spoel. Het elektrische vermogen kan dan hieruit eenvoudig bepaald worden:

$$P(t) = \frac{V(t)^2}{R} \quad (3)$$

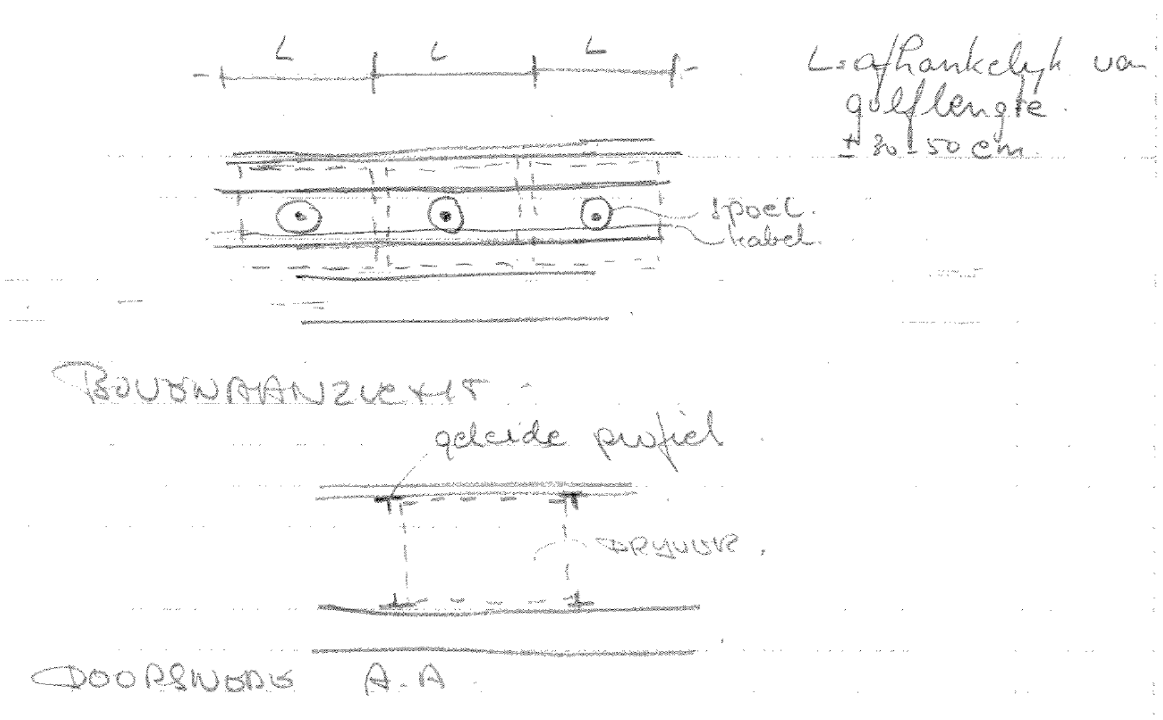
Hier is $P(t)$ het elektrische vermogen in functie van de tijd t en R de weerstand van de spoel. Stel bijvoorbeeld dat amplitudes tot 20 cm van golven voorkomen. Een koperen spoel met een lengte van 20 cm en bijvoorbeeld diameter 20 cm kan dan ontworpen worden. Een permanente magneet met magnetische flux van 1 Tesla beweegt hierdoor met een periode van 2 seconden (de tijd dat golven elkaar opvolgen). Stel eveneens dat hiervoor een drijver van 1 m² vereist is om de stang in beweging te houden (niet berekend).

Het opgewekte vermogen zal dan variëren in de tijd en zou absoluut een halve kilowatt kunnen opwekken.

Een idee van de investeringskosten en constructiekosten zou een eenheidsprijs per m² kunnen opleveren. Dit moet echter nog uitgezocht worden.



Figuur 4.16 Schematische voorstelling van het magneet/spoel systeem.



Figuur 4.17 Doorsneden van het systeem.

Uiteraard is het systeem in de eerste plaats bedoeld voor demping van golven. Naarmate het opgewekte vermogen toeneemt des te groter de weerstand die de magneet zal ondervinden om door de spoel te bewegen. De drijver zal hierdoor als een demper fungeren waarbij de demping afhankelijk is van de eigenschappen van het magneet/spoel systeem. Een optimalisatieoefening is hier van belang.

Toch zijn er aan dit systeem ook enkele nadelen verbonden. Bij formule 1 is er immers stilzwijgend vanuit gegaan dat er gewerkt wordt onder ideale condities. In deze optiek wordt er hier vooral gezondigd aan het feit dat de geïmplementeerde spoel voor deze toepassing niet oneindig groot is. Dat wil zeggen dat het omzettingsrendement van de magnetische flux $B(t)$ naar een elektrisch spanningsverschil over de spoel lager zal uitvallen dan volgens formule 1 berekend. Een mogelijke oplossing zou kunnen zijn om te kiezen voor een kleine magneet met bijvoorbeeld een lengte van 1 cm die beweegt in een spoel van bijvoorbeeld 50 cm. Hierdoor zou een 'oneindige spoel' benaderd kunnen worden.

Om de omzetting van een mechanische translatiebeweging naar elektrische energie met een hoger rendement te laten gebeuren, kan ook gekeken worden naar een krukas/stangmechanisme zoals in een zuigermotor. De translatiebeweging wordt dan via dit mechanisme omgezet in een rotatiebeweging. Op de roterende as kan dan een kleine generator geplaatst worden zoals bijvoorbeeld een dynamo. Op deze manier lijkt het of de magneet (op rotatie as) draait in een oneindig lange spoel (stator) waardoor energieconversie met hoog rendement doorgaat.

Een belangrijk nadeel is uiteraard dat voor dit systeem golven met constante amplitudes verlangd worden gezien het krukas/stangmechanisme star is. Dit is natuurlijk nooit het geval.

Praktisch is een bijkomend probleem de uiteindelijke levering van de elektrische energie naar het net. Een goede aanpak zou kunnen zijn om een opstelling te maken waarbij een aantal 'machines' in serie geplaatst worden over een belangrijke lengte (neem bijvoorbeeld 100 m). Op die manier kan er allicht meer continuïteit verwacht worden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan schepen die elkaar om 100 à 200 m opvolgen in drukke kanalen.

In deze optiek kan dan bijvoorbeeld gekozen worden voor een lange flexibele drijver waar op discrete punten magneet/spoelsystemen gemonteerd staan voor elektrische afname. Een andere mogelijkheid is om meerdere kleine eenheden met bijvoorbeeld drijvers van 1 m² achter elkaar te installeren.

Ter hoogte van een dijk is dit uiteraard eenvoudiger gezien er continu golven aankomen.

De effectieve regeling van het spanningssignaal zal eveneens goed bestudeerd moeten worden om een goede netvoeding te garanderen. Hier kan gedacht worden aan frequentieregelaars en hakers.

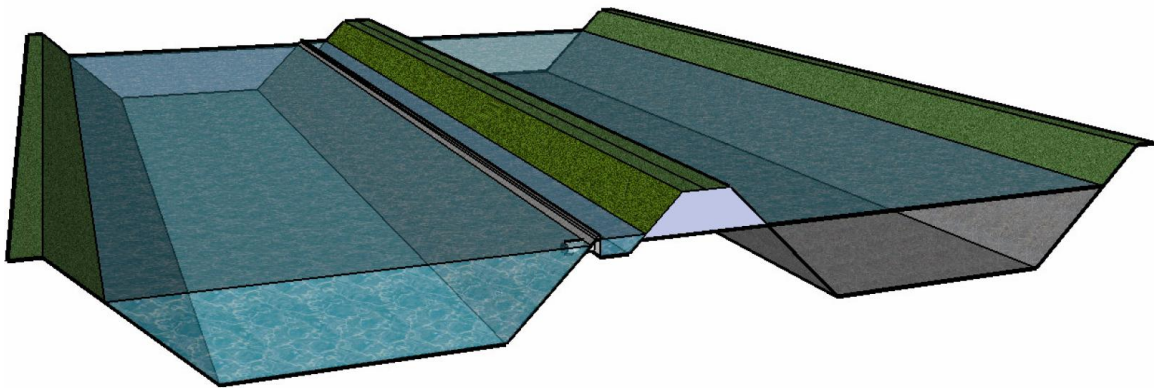
4.3.3 Golf overslag

Deze methode werkt gelijkwaardig aan het zwembad principe waarbij golven afgevlakt worden om de zogenaamde 'snelle zwembaden' te creëren. Dezelfde filosofie kan immers toegepast worden bij kanalen. Het systeem werkt als volgt: de aankomende golven lopen ter hoogte van de kanaalwand over in een soort brede bak met een welbepaalde diepte (zie Figuur 4.18). Hierdoor zal steeds de bovenste helft van de golf overstromen in de bak en niet meer kunnen reflecteren tegen de wand. Zodoende worden opeenvolgende golven optimaal gedempt. De bak zal langzamerhand gevuld worden. Het overgelopen water kan stroomafwaarts geleidigd worden via een turbine voor energiewinning (zie verder).

Een nadeel is dat slechts de helft van het vermogen van een golf benut wordt aangezien enkel de 'bovenste' helft ofwel een halve periode van de golf afgevlakt wordt. Energiewinning is hierdoor minder interessant dan voorgaand systeem.

Bovendien zullen ook de civiele werken / kosten hoger uitvallen dan bij andere systemen en zal er een sprake zijn van een grotere ruimte-inname.

De regeling van het peil van het water in het kanaal zal hier ook een belangrijke invloed hebben. Indien de bak enerzijds volledig overstroomd is, gaat het effect helemaal verloren. Anderzijds zullen, indien het peil onder de bak komt, de golven weerkaatsen tegen de wand van de bak.



Figuur 4.18 Visualisatie van het golfoverslag systeem.

Om energiewinning te realiseren zou kunnen gebeuren via een turbine. De bak zal immers vrij snel vollopen met water. Deze 'druk' kan stroomafwaarts benut worden voor energieopwekking via een stromingsturbine. Turbines op basis van verval (kleine propeller) zijn hier allicht niet rendabel. Het verval dat aanwezig is zal allicht te laag uitvallen. Er zou kunnen gedacht worden aan systemen die op basis van kinetische energie werken. Indien immers een bak met een diepte van 50 cm gevuld wordt, kan dit hoogteverschil stroomafwaarts benut worden voor omzetting in kinetische energie (vereenvoudigde wet van Bernoullie):

$$v \approx \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4)$$

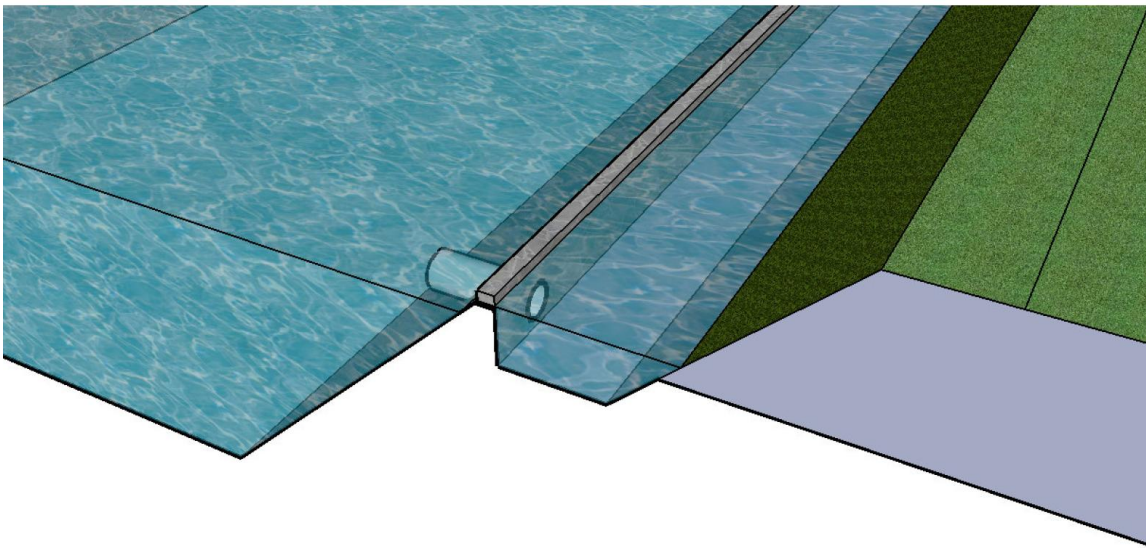
In formule 4 is v de snelheid van het water, h het hoogteverschil en g de gravitatie.

Een verval 50 cm zou ter hoogte van een turbine met diameter van 20 cm een vermogen kunnen opwekken van 200 W. Deze berekening volgt uit volgende vuistregel voor kinetische energiemachines (turbines):

$$P \approx 0.2 \cdot A \cdot v^3 \quad (5)$$

In formule 5 is P het opgewekte vermogen in kW, A de oppervlakte van de rotor van de turbine en v de snelheid gehaald uit formule 3.

Een visualisatie van een dergelijk systeem wordt getoond in onderstaande Figuur 4.19.



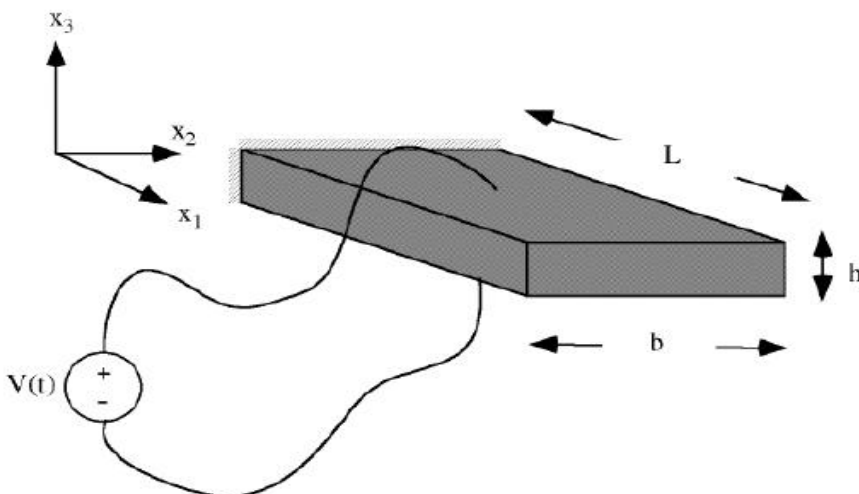
Figuur 4.19 Close-up van het golfenergiesysteem met golfdemping.

In de uitloop van het kanaal zou een eenvoudige turbine geplaatst kunnen worden. Een economisch kostenplaatje is nog niet duidelijk. Deze oplossing dient dan ook verder in detail uitgewerkt te worden.

4.3.4 Piëzo-elektrische energiesystemen

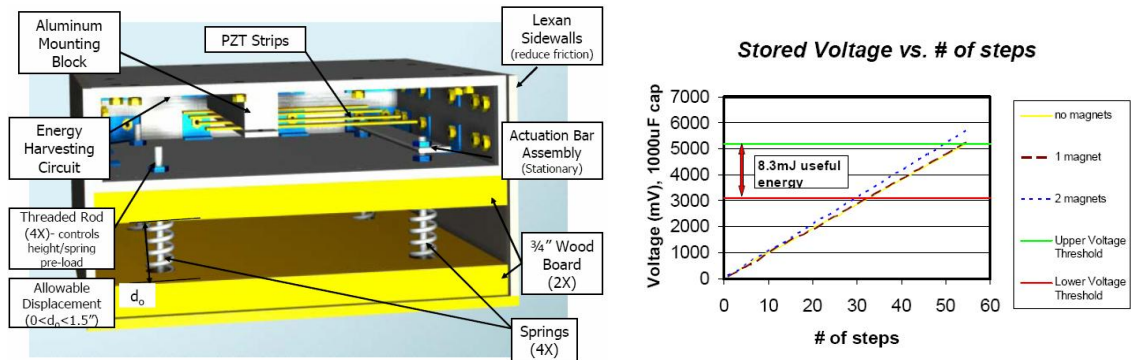
Golven veroorzaakt door scheepvaart of wind worden tegen kanaalwanden of dijken gereflecteerd. Dergelijke golven bevatten een belangrijke vorm van potentiële en kinetische energie die opgevangen zouden kunnen worden en waarbij de golven eveneens gedempt worden.

Een mogelijke manier is het gebruik van piëzo-elektrische materialen tegen de damwand die fungeren als demper en als energieconvector. Het piëzo-elektrisch effect is het verschijnsel dat kristallen van bepaalde materialen onder invloed van druk (bijvoorbeeld trek of buiging) een elektrische spanning produceren. Deze wet geldt ook andersom: de materialen vervormen als er een elektrische spanning op wordt aangelegd (zie Figuur 4.20).



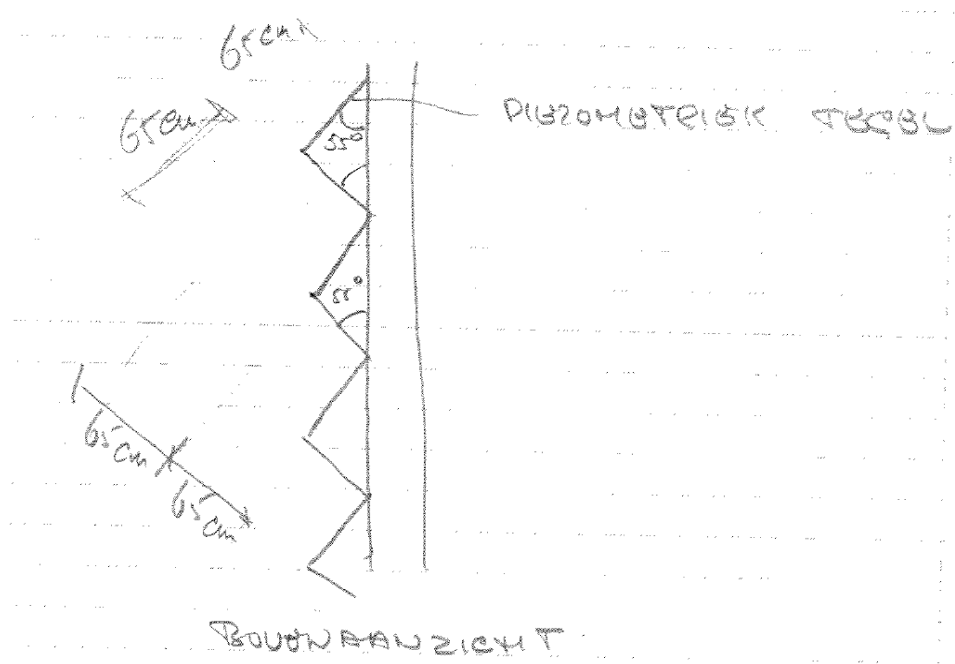
Figuur 4.20 Visualisatie van een piëzo-elektrisch element.

De techniek wordt vandaag reeds toegepast voor elektrische energieopwekking. Een voorbeeld zijn piëzo-elektrische tegels (zie Figuur 4.21) die in voetpaden of in dansvloeren van dancings verwerkt worden. Het idee hierbij is dat de 'stapenergie' van mensen gecapteerd en omgezet wordt naar elektrische energie om bijvoorbeeld verlichting te voorzien. Een dergelijke tegel wordt gevisualiseerd in onderstaande figuur.



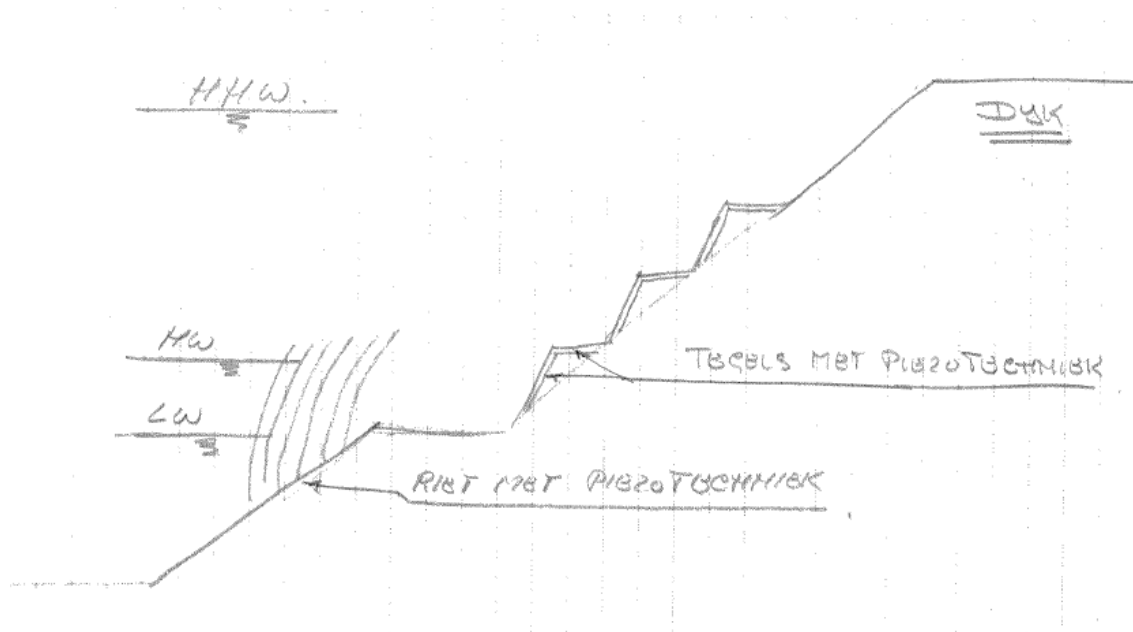
Figuur 4.21 Visualisatie van een piëzo-elektrische tegel.

Deze techniek kan geëxtrapoleerd worden naar golfenergie. Piëzo-elektrische materialen zouden hierbij langs de kanaal- of damwand geplaatst kunnen worden onder een bepaalde hoek in functie van de aankomende golven (zie Figuur 4.22). Het slaan van de golf tegen een dergelijk element zorgt voor een vervorming van het element en dus de opwekking van een spanningsverschil aan de klemmen. Het piëzo-elektrisch materiaal zal op zichzelf een weerstand bieden tegen de vervorming en dus fungeren als een demper voor de aankomende golf.



Figuur 4.22 Bovenaanzicht van een opstelling van piëzo-elektrische tegels tegen een kanaalwand.

Het systeem kan in kanalen bijvoorbeeld zo ontworpen worden dat golven in beide richtingen (scheepspassage in beide richtingen) gedempt worden (zie Figuur 4.22: driehoekopstelling). In het geval van een dijk kunnen dergelijke elementen boven elkaar gestapeld worden om zo aankomende golven te dempen (zie Figuur 4.23). Een optimalisatie al naargelang de bezettingsgraad enerzijds en het gemiddelde waterpeil anderzijds is een uitdaging.



Figuur 4.23 Zijaanzicht van een opstelling van piëzo-elektrische tegels en een strook kunstmatig riet tegen een dijkwand.

Precieze berekeningen van het vermogenspotentieel zijn echter nog niet doorgevoerd. Ter vergelijking kan wel geopperd worden dat een persoon in staat is om 1 tot 5 Wattuur elektrisch te produceren op een tegel van een vierkante voet (bijvoorbeeld dansvloeren met piëzo-elektrische tegels). Het vermogen is uiteraard afhankelijk van het gewicht en de activiteit op de tegel. Bij deze vermogenproductie komt de kostprijs neer op 50 tot 60 € per vierkante voet. Het is van belang om te mikken op een gelijkwaardige kostprijs voor golfenergie.

Het voordeel is dat golven op zich meer energie bevatten waardoor het potentieel uiteraard groter is. De vraag is maar of dit potentieel de meerkost aan materiaal en constructie kan drukken.

5 Conclusies en aanbevelingen

De mogelijkheden om energie te winnen uit scheepsgeïnduceerde golven zijn in twee case studies voor het Amsterdam-Rijnkanaal en het Prinses Margrietkanaal nader uitgewerkt. Op basis van deze case studies wordt verwacht dat voor het meest geschikte locaties langs oevers van kanalen de energie opbrengsten bescheiden zullen zijn, zodat naar een eenvoudige en goedkope vormgeving gezocht moet worden om op economische wijze energie te winnen uit scheepsgeïnduceerde golven. Dat betekent dat voor het Amsterdam-Rijnkanaal voor een grootschalige toepassing € 200 /m' wordt geïnvesteerd, de terugverdientijd korter zal zijn dan 15 jaar waarbij de verkregen golfdemping gratis is. Als aan de extra golfdemping ook een waarde wordt toegekend, dan wordt de terugverdientijd veel korter dan 15 jaar.

Energie winnen langs de oever van het Prinses Margrietkanaal is waarschijnlijk onrendabel als alleen gekeken wordt naar de golven die door de beroepsvaart worden opgewekt. De pleziervaart wekt ook golven langs de oever op, maar daarover zijn onvoldoende gegevens van bekend om een schatting te maken.

Golfenergie installaties bestaan uit twee delen: het omzetten van de golfbeweging in een andere beweging en het omzetten van die beweging in elektrische energie scheepsgolven omzetten in een beweging en het omzetten van die beweging in energie. De meest veelbelovende werkingsprincipes zijn:

Drijvers laten een verticale stang met een magneet op en neer bewegen. Deze stang beweegt in een spoel waar door inductie elektriciteit wordt opgewekt. Het is een eenvoudige en goedkope constructie die voor een damwand kan worden geplaatst. Als de drijver onder een gording of deksloof kan worden geplaatst dan is deze beschermd tegen aanvaringen en landschappelijk mooi ingepast.

Aftopping van de golven

De aankomende golven lopen ter hoogte van de kanaalwand over in een soort brede bak met een welbepaalde diepte. Hierdoor zal steeds de bovenste helft van de golf overstromen in de bak en niet meer kunnen reflecteren tegen de wand. Zodoende worden opeenvolgende golven aanzienlijk gedempt. De bak zal langzamerhand gevuld worden. Het overgelopen water kan stroomafwaarts geleidigd worden via een (vijzel)turbine voor energiewinning. Een vijzelturbine heeft een heel hoog rendement.

Piëzo-elektrische materialen

Piëzo-elektrische materialen zouden hierbij langs de kanaal- of damwand geplaatst kunnen worden onder een bepaalde hoek in functie van de aankomende golven. Het slaan van de golf tegen een dergelijk element zorgt voor een vervorming van het element en dus de opwekking van een spanningsverschil aan de klemmen. Het piëzo-elektrisch materiaal zal op zichzelf een weerstand bieden tegen de vervorming. Deze materialen kunnen voor een damwand en onder een gording worden geplaatst. Voor een talud verdediging zouden bijvoorbeeld Basalton blokken op hun kopse kant een plaatje piëzo elektrisch materiaal ingebouwd kunnen worden. Wellicht kunnen die plaatjes ook op een geotextiel worden geplaatst en dat een toplaag van breuksteen of zetsteen de golfkrachten overbrengt.

Het verdient aanbeveling:

- De waterbeweging langs de oever van het Amsterdam-Rijnkanaal gedurende enkele weken met een klein bemonsteringsinterval te meten, zodat het inzicht in de langs een oever optredende scheepsgolven en windgolven kan worden vergroot.
- Onderzoek te doen naar locaties met meer scheepsgolven dan het Amsterdam-Rijnkanaal, bijvoorbeeld langs de Waal, Boven Merwede en de Rotterdamse haven waar de uurgemiddelde waterstand echter een veel grotere variatie heeft dan in het Amsterdam-Rijnkanaal door getij en variatie in de rivierafvoer. Daar kunnen wellicht locaties worden gevonden met een hogere energie opbrengst dan de berekende opbrengst in het Amsterdam-Rijnkanaal. Tevens zouden die locaties geselecteerd kunnen worden op een kleine afstand tot het bestaande elektriciteitsnet of op de mogelijkheid de geproduceerde elektriciteit lokaal te verbruiken.
- De aannames in de voorgaande beschouwingen te verifiëren met een pilot langs het Amsterdam-Rijnkanaal. Deze pilot kan bestaan uit enkele proefsecties met drijvers van verschillende afmetingen.

6 Referenties

Brooke, J. chairman (2003), Wave energy conversion, Engineering committee on oceanic resources (ECOR), Working group on wave energy conversion.

Deltares (2008), *Water als bron van duurzame energie, inspiratieatlas van mogelijkheden*. Delft

WL-Delft Hydraulics (februari 2007) S. Groot en M. Yossef, Analyse invloed luwtedam in IJmeer, Q2457, Delft

Evens, D.V. en A.F. De O.Falcao edtrs. (1985), Hydrodynamics of ocean wave-energy utilisation, IUTAM Symposium, Lisbon, Portugal, 1985.

Kroonenberg, H.H. van en F.J. Siers(1992) Methodisch ontwerpen, Educaboek, Culemburg

PIANC (2003), *Guidelines for Managing Wake Wash from High-Speed Vessels*, MarCom, report of WG 41, 32 p.

Rijkswaterstaat Adviesdienst Verkeer en Vervoer en CBS (2003), Nederland en de scheepvaart op de binnenwateren 2002,

Sorensen, R.M. (1997), *Prediction of Vessel-generated waves with reference to vessels common to the upper Mississippi River system*, ENV Report 4, US Army Corps of Engineers.

Stichting Recreatietoervaart Nederland (SNR), 2009, *Varen doe je samen, knooppunten Amsterdam-Rijnkanaal*, rapport 1c, www.varendoejesamen.nl

Stoop, J., (april 2009) Golfenergie, een inventarisatie van octrooipublicaties, Octrooi Centrum Nederland

Waterloopkundig Laboratorium, Wal, M. van der Wal (1986) Translatiegolven door scheepvaart, R1350/Q257, Delft

WL | Delft Hydraulics (1996), *Manual DIPRO, design program for shore protection works along sailing channels*, 160 p.

WL | Delft Hydraulics (2007), Analyse invloed Luwtedam in IJmeer, planstudie IJburg 2e fase, Tech. Report Q4257 (Groot, S. en M.F.M. Yossef).