

Duurzame energie uit onze waterwegen

Energiedamwanden – theorie en praktijkresultaten

wetenschappelijke studie & onderzoek + testopstelling + praktijk

R. Janssen¹, F.K. de Jong², J.K. Haasnoot², P. Stoelhorst¹

¹Gooimeer B.V., Almere

²CRUX Engineering BV, Amsterdam

Samenvatting

Nederland kent, net als vele andere waterrijke landen in de wereld, een groot aantal kanalen en rivieren waarvan de oevers zijn gebouwd als kademuur. Een groot deel van deze kademuren, in de (vaak) historische binnensteden, zijn inmiddels in meer of minder mate toe aan vernieuwing, een bekend voorbeeld zijn de ca. 200 km aan kademuren die in de komende 20 jaar in Amsterdam vervangen moet worden. Bij deze vervangingsopgave ontstaat een unieke kans om meteen bij te dragen aan de duurzame warmtetransitie door in de waardevolle ondergrondse ruimte warmtewisselaars te plaatsen, waarmee de gebouwen en huizen in de omgeving kunnen worden verwarmd en gekoeld. De kademuur zelf wordt zo een thermisch geactiveerde grondkering waarmee op basis van aqua/- en geothermische energie de omgeving duurzaam verwarmd en gekoeld kan worden. Eén van de meest gebruikte technieken bij het realiseren van kademuren in Nederland is de stalen damwand. Deze stalen damwanden zijn als gevolg van de hoge thermische geleiding uitermate geschikt om te dienen als warmtewisselaar, een zogenaamde Energiedamwand. Om de werking van de Energiedamwand proefondervindelijk te kunnen vaststellen is in de Delftse Schie nabij Delft een praktijkproef met een energiedamwand gerealiseerd. In deze paper wordt verder ingegaan op de theorie van de energiedamwand en wordt ingegaan op de verkregen resultaten uit de praktijkproef. Daarnaast komen een aantal gerealiseerde projecten aan bod, waar de energiedamwand reeds in de praktijk is toegepast.

KERNWOORDEN

Aquathermie, damwand, energietransitie, kademuren, duurzaam, Energiedamwand, CO2-vrij

1. Introductie

Nederland moet door de verbinding aan het Klimaatverdrag van Parijs binnen een afzienbare tijd overstappen op meer duurzame energie bronnen voor de verwarming van onze gebouwde omgeving. Een veelvuldig toegepaste bron voor deze duurzame warmte is de ondergrond, middels de welbekende open en gesloten WKO bronnen maar ook door thermische activatie van constructieve elementen in de ondergrond. Denk daarbij aan

bijvoorbeeld activatie van funderingspalen, tunnels en diepwanden. Bij deze laatste groep wordt de thermische energie aan de ondergrond onttrokken en opgeslagen door gebruik te maken van elementen die voor de constructieve toepassing al in de ondergrond worden geplaatst. De potentie van open water als energiebron wordt in Nederland echter helaas nog niet of nauwelijks benut, ondanks dat deze ruim voorhanden is.

Ons land heeft veel namelijk veel waterwegen (rivieren, kanalen, grachten, sloten, meren, plassen) en een hoog grondwaterpeil. Dit maakt aquathermie als bron van thermische energie extra interessant. Tegelijkertijd hebben wij als typische waterbouwers een sterke voorkeur voor stalen damwandprofielen als bouw materiaal voor onze grond- en waterkerende constructies. Wij zijn zelfs wereldkampioen als het gaat om damwandgebruik per vierkante kilometer. Het materiaal staal is een uitstekende transporteur van warmte. De combinatie van enerzijds veel waterwegen en anderzijds een voorkeur van stalen damwand, met geweldige eigenschappen ten aanzien van thermische geleiding, stonden aan de basis van de ontwikkeling van de Energiedamwand.

De Energiedamwand is een nieuw gepatenteerd systeem waarbij de stalen damwandconstructie naast grond- en waterkering een extra functie krijgt: warmtewisselaar voor het onttrekken van thermische energie aan het oppervlaktewater (aquathermie) en de ondiepe ondergrond.

Door de enorme hoeveelheid waterwegen in Nederland, van sloot, of gracht tot kanaal, rivieren en meren en de Noordzee waar veelvuldig stalen damwanden worden gebruikt is het toepassingsgebied voor dit systeem enorm. Een uitstekend voorbeeld is Amsterdam met ca. 600 kilometer aan kadeconstructies waarvan circa 200 kilometer aan renovatie toe is en stalen damwanden veelvuldig worden gebruikt.

Als wij als grootverbruiker in stalen damwand diezelfde stalen damwanden de functie van warmtewisselaar geven, kunnen wij voldoende energie uit het water en de bodem onttrekken om een groot deel van onze huizen en kantoren in koude perioden te verwarmen, én in warme perioden te koelen.



Figuur 1 thermisch geactiveerde damwand.

Als waterrijk land kan aquathermie zelfs één van de belangrijke pijlers in de duurzame warmtetransitie voor Nederland worden. Uit onderzoek van het onderzoeksinstituut Deltares en CE Delft is gebleken dat het toekomstig economisch winbare potentieel uit aquathermie geschat kan worden op circa 150 Petajoule wat overeenkomt met ruim 40% van de totale warmtevraag in de stedelijke omgeving.

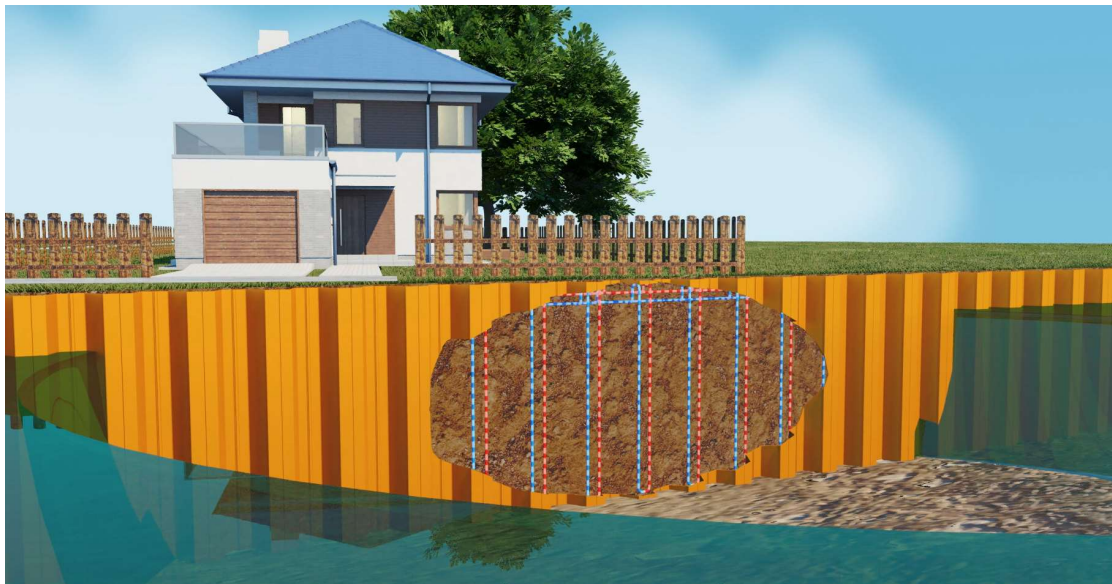
Om de energiedamwand verder te ontwikkelen en deze op grote schaal toepasbaar te maken voor gebruik in de civiele techniek is een praktijkproef opgezet in de Delftse Schie in het buurtschap De Zweth (nabij Delft). Hier wordt in nauwe samenwerking tussen Gooimeer (leverancier stalen damwand en licentiehouder patent), CRUX Engineering BV (geotechnisch adviesbureau), Groep Duurzame Opgewekt (advies- en installatiebedrijf duurzame energie), de Technische universiteit Eindhoven en de Technische universiteit Delft de Energiedamwand sinds eind 2020 op ware grootte beproefd.

2. Werking Energiedamwand

De Energiedamwand is een gepatenteerd systeem van SPS Energy in Duitsland, waarvan Gooimeer als licentiehouder van dit patent in de Benelux optreedt. Het systeem bestaat uit activeringslussen die direct aan een stalen damwand worden bevestigd (Figuur 1). Afhankelijk van de lengte kan de damwandplank over elke gewenste hoogte thermisch geactiveerd worden. Er wordt een vloeistof (koudemiddel, glycol) door deze activeringslussen gepompt die de damwand tot warmtewisselaar maakt. De vloeistof in deze activatielussen onttrekt daarbij warmte aan zowel het oppervlaktewater als de

bodem(Figuur 2). Dit betreft een gesloten systeem; er wordt géén water aan het kanaal onttrokken maar alleen de thermische energie die zich rond de damwand bevindt. Omdat het water in waterwegen altijd licht in beweging is, wordt een zeer efficiënte warmteoverdracht bereikt. De warmtebron wordt als het ware continu ververst. Door deze stroming is de thermische gradiënt met de warmtewisselaar relatief hoog, wat leidt tot een zeer hoge warmteoverdracht tussen het water en de activatie-lus. Recente laboratorium studies (Ziegler et al, 2019) komen daarbij tot rendementen van 200-400 W per meter geactiveerde damwand. Ter vergelijking: dit is 5 tot 10 keer hoger dan wordt bereikt met andere thermisch geactiveerde geotechnische systemen die alleen uitgaan van warmte-onttrekking aan de ondiepe ondergrond.

Een warmtepomp brengt de onttrokken energie op een hogere gebruikstemperatuur (doorgaans ca. 35°-40° Celsius) om bijvoorbeeld gebouwen te verwarmen. Een ander gebruiksdoel kan zijn om de gewonnen thermische energie op te slaan in een WKO-installatie voor gebruik op de langere termijn, of met behulp van Phase Change Materials in een warmtebatterij voor gebruik bij piekbelastingen op korte termijn.



Figuur 2. Impressie van een Energiedamwand in een kadeconstructie die fungeert als warmtebron voor de nabijgelegen woning (Gooimeer 2021).

Het systeem kan daarnaast in de zomermaanden worden omgedraaid om gebouwen te koelen. Dat betekent dus dat het systeem verwarmt en koelt op een duurzame manier.

3. Proefopzet De Zweth – Delftse Schie

Momenteel draait dit systeem als een full-scale proefopstelling in een oeverbeschermingsconstructie aan de Delftse Schie bij het buurtschap De Zweth (Figuur 3).

Deze proef is deels financieel mogelijk gemaakt door een subsidie van het SBIR project van de Provincie Zuid-Holland om de CO₂ uitstoot van de waterwegen te reduceren. Het doel van deze proef is enerzijds het verifiëren van het warmte-onttrekking-/ en opslag potentieel van de Energiedamwand zelf en anderzijds het kwantificeren van de invloed op de civieltechnische functie van de Energiedamwand als gevolg van de opwarmings- en afkoelingscycli.



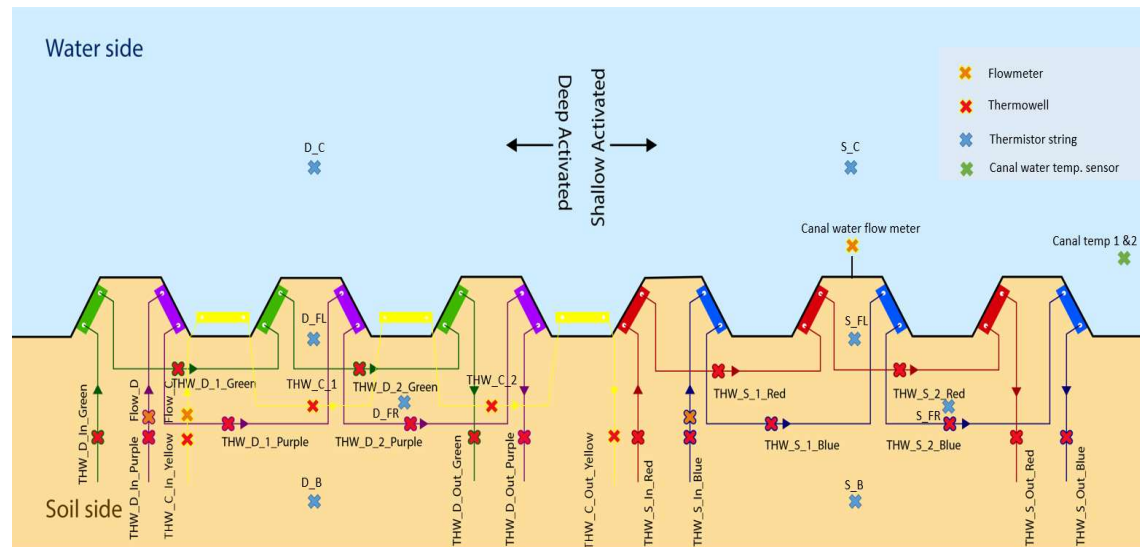
Figuur 3. Impressie van de proeflocatie bij De Zweth.

In september 2020 is de proef gestart, hierbij wordt gedurende een periode van twee jaar verschillende damwandconfiguraties en onttrekking scenario's getest. In Figuur 4 is een schematisch bovenaanzicht van de opstelling gegeven met daarin de aangebrachte meetapparatuur en activatieconfiguraties. Er zijn in totaal zes dubbele ZZ17-700 damwandprofielen van 16 m lengte geïnstalleerd, in een ondergrond bestaande uit afwisselend klei- en veenlagen. Het totaal ontwikkeld staaloppervlak dat als warmtewisselaar functioneert bedraagt circa 190 m². Gedurende de proefperiode worden diverse configuraties van activatie getest:

- enkele en dubbele activatie van de dubbele damwandprofielen;
- activatie over de volledige planklengte, en enkel tot de waterbodem;
- activatie van speciale voorhang panelen aan de waterzijde van de damwand, die toepassing van het systeem mogelijk maken bij bestaande damwandconstructies.

Bij de pilot worden niet alleen de prestaties van de Energiedamwand zelf gemeten, maar ook de mogelijke invloed van de activatie op de damwand zelf en de directe omgeving. De

resultaten van de thermische prestaties zijn vooral van belang voor de toepassingsmogelijkheden: Hoeveel energie kan er maximaal onttrokken worden en komt dit overeen met de theoretische ontwerpmodellen. De hoofdvraag bij het meten van de invloed op de omgeving is of het verwarmen dan wel afkoelen van de damwanden en directe ondergrond, een nadelige invloed heeft op de primaire functie van de kadeconstructie zelf. De primaire functie van de kade is immers die van grond- en waterkering en deze functie mag niet nadelig beïnvloed worden door het toevoegen van een extra functie.



Figuur 4. Schematisch bovenaanzicht van de proeflocatie bij De Zweth, inclusief proefopstelling, temperatuur en geotechnische monitoringsopstelling.

De metingen worden uitgevoerd middels een uitgebreid monitoringsprogramma waarmee alle relevante parameters op en rondom de damwand en de daarop aangesloten warmtepomp nauwkeurig worden geregistreerd. De metingen bestaan uit temperatuur en stromingssnelheid van het kanaalwater, de temperatuur in de ondergrond over de volledige hoogte en op verschillende afstanden, de damwandverplaatsing, en de stromingssnelheid en onttrokken energie in de leidingen. De uitgebreide meetopzet en verschillende testconfiguraties geven daarbij de mogelijkheid om de individuele in- en uitgaande temperatuur per activatie-variant te registreren zodat de individuele bijdrage per lus bepaald kan worden. De hiermee verkregen data wordt vervolgens gebruikt om de theoretische modellen te valideren.

4. Thermische prestaties tot nu toe

De proefopstelling draait op het moment van schrijven nog steeds en alle beoogde configuraties zijn inmiddels (december 2021) getest. Het systeem functioneerde hierbij 24/7

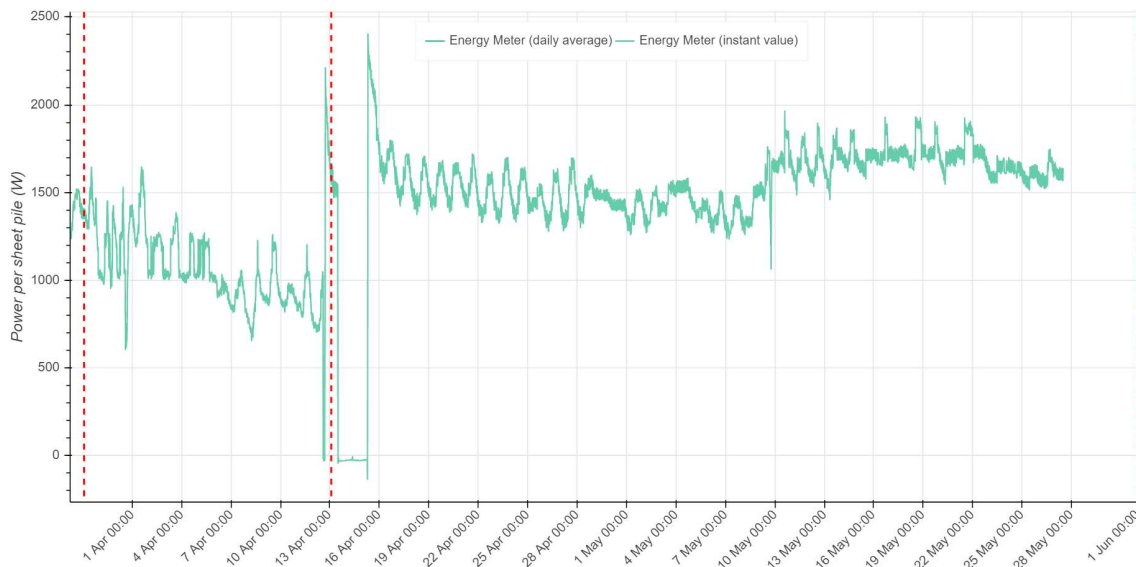
op vol vermogen om zo de grenzen van de activatie op te zoeken. Dit komt vanzelfsprekend niet overeen met een praktijkopstelling waarbij het systeem in intervallen wordt belast met het verwarmen en koelen van een gebouw, maar geeft een duidelijk inzicht in de grenzen van de te onttrekken energie.

De tot nog toe verzamelde resultaten tonen aan dat het systeem functioneert conform de theoretische verwachting. Het hoogste rendement van ca. 1,5 kW/ damwandplank wordt daarbij gehaald bij de dubbel geactiveerde damwand (2 lussen op één dubbele plank) waarbij de activeringslussen over de volledige lengte van de plank zijn aangebracht. Bij de dubbel geactiveerde ondiepe activatie (lussen tot aan de waterbodem, $\pm 2,50$ meter water) ontbreekt de potentiële energie uit de diepere grondlagen zodat dit logischerwijs tot een lager vermogen leidt van ca. 1 kW/plank (Figuur 5).

De resultaten van de ondiepe activatie laten echter duidelijk zien dat het aquathermische deel een aanzienlijke component is van het totale thermisch vermogen. Hierdoor is duidelijk dat het vermogen afhankelijk is van de temperatuur van het water die tijdens de beproeving van de eerder genoemde configuraties tussen de 8°C en 12 °Celsius varieerde.

Om het systeem qua effectiviteit goed te kunnen beoordelen is het ook van belang te weten wat het vermogen is bij lagere temperaturen in de winter, zoals dit het geval was tijdens de extreem koude periode in februari 2021. Toen daalde de luchttemperatuur tot -10 °C en de watertemperatuur tot ca.+1 °C.

In deze koude periode werd toevallig de configuratie met de voorhangpanelen getest (in figuur 4 geel aangeduid op het schematische bovenaanzicht). De invloed van het aquathermische deel, dat wil zeggen zonder de invloed van de ondergrond, werd hierin direct zichtbaar omdat alleen het bronvermogen van het water werd aangesproken. Het bronvermogen vanuit enkel het water was in die week nog altijd 0,4 kW, waardoor in de opgestelde configuratie meer elektrische energie nodig was om tot een opgewerkte temperatuur van 35 °C te komen. In de weken na de koude periode herstelde de watertemperatuur zich relatief snel en ook het bronvermogen steeg weer fors. De verwachting is dat dit effect minder sterk optreedt als er ook warmte onttrokken wordt aan de ondergrond middels de diepe lussen, aangezien de relatief constante hogere temperatuur in de ondergrond bij extreme (koude) perioden de brontemperatuur zal stabiliseren .



Figuur 5. Vermogen per damwand, dubbele activering ondiep, (links) en diep (rechts).

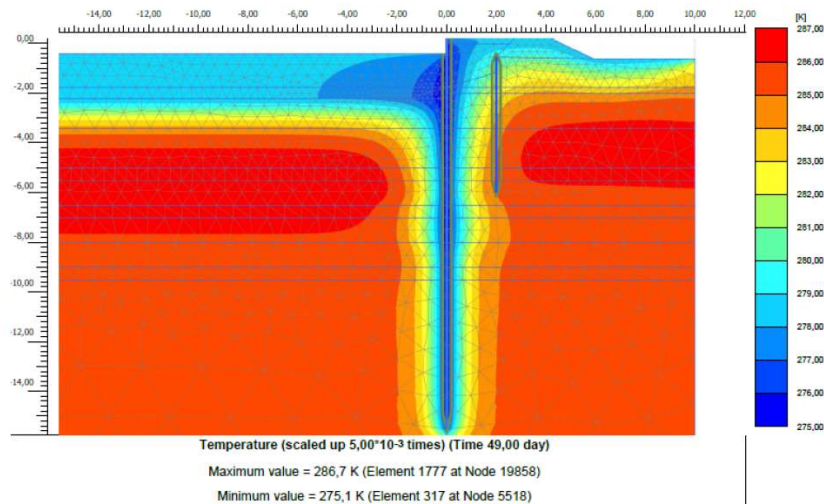
In alle configuraties die tot nog toe (van september 2020 tot december 2021) zijn beproefd, is het systeem continu d.w.z. dag en nacht 24/7, op vol vermogen is getest. Op basis van de resultaten verkregen in deze periode is de meest efficiënte opzet gekozen voor verdere beproeving met realistischere testscenario's. Bij een warmtevraag die overeenkomt met de praktijk draait het systeem niet continu 24 uur per dag, 7 dagen in de week. In de tussenliggende perioden dat het systeem niet draait, krijgt de ondergrond de tijd en de gelegenheid thermisch te herstellen. Het is dan ook de verwachting dat het rendement van de Energiedamwand die over de gehele lengte is geactiveerd in het realistische scenario nog hoger zal zijn.

5. Invloed op de primaire geotechnische functie van de stalen damwand

Naast het onderzoek naar de hoeveelheid energie die met behulp van de Energiedamwand aan het water en ondergrond onttrokken kan worden, is tevens de invloed op de primaire functie van de stalen damwand als grond- en waterkering onderzocht. De hiervoor verzamelde monitoringsgegevens over het verplaatsingsgedrag van de damwand zijn de basis geweest voor een afstudeeronderzoek (De vries, 2021 TU Delft) bij CRUX Engineering. In dit onderzoek is de thermische werking van het systeem gemodelleerd met behulp van COMSOL, de daaruit volgende geotechnische invloed (uitzetting grond en staal) is vervolgens rekenkundig gekwantificeerd middels PLAXIS 2D (figuur 6).

De belangrijkste conclusie uit dit onderzoek is dat de daadwerkelijke thermische invloed op de beweging van de damwand en ondergrond beperkter is dan op basis van de theoretische modellen wordt verwacht. Dat de daadwerkelijke thermische invloed op de

damwandconstructie kleiner is dan de al beperkte theoretische invloed betekent dat de activatie voorsnog geen negatieve invloed heeft op de civieltechnische functie van de stalen damwand. Op basis van de analyse is daarbij gebleken dat de verplaatsing onder invloed van de activatie ruim onder invloed van natuurlijke temperatuurschommelingen door bijv. zoninval blijft.



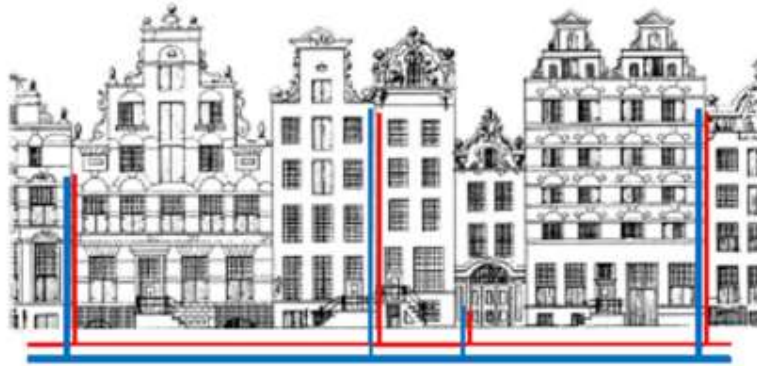
Figuur 6. Impressie van het temperatuurveld rond een Energiedamwand.

6. Haalbaarheid Energiedamwand in een praktijkcase

In een separaat afstudeeronderzoek bij CRUX engineering (Scharff, 2021 TU Eindhoven) is de economische haalbaarheid van de thermisch geactiveerde damwand beschouwd. Basis van deze beschouwing betrof een case studie uitgevoerd in opdracht van de gemeente Amsterdam aangevuld met de proefresultaten uit de pilot opstelling in de Zweth. In dit onderzoek is met behulp van het door de TU Eindhoven ontwikkelde programma Modelica een koppeling gemaakt tussen de warmtevraag aan de ene kant en het vermogen van de energiedamwand aan de andere kant. Doel van de beschouwing was inpassing van het systeem bij een vervanging van de kademuur en de aansluiting ervan op de aangrenzende monumentale panden.

De historische en monumentale panden in de binnenstad van Amsterdam staan bekend als doorgaans slecht geïsoleerde gebouwen. De mogelijkheid tot verdere isolatie wordt daarbij ingeperkt door de monumentale status. Omdat daarnaast de appartementen een beperkt vloeroppervlak kennen met hoge prijs per vierkante meter, is gekozen voor basisleverantie van warmte middels een centrale opwekking van de energie. Door gebruik te maken van een

centrale warmtepomp en lokaal warmtenet is voor de aflevering van warmte in de huizen slechts een afleverset noodzakelijk. (Figuur 7).

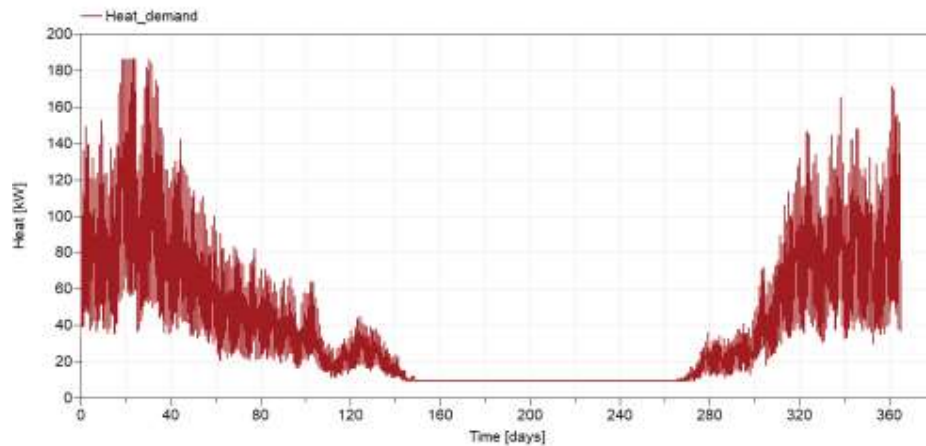


Figuur 7. Impressie van warmtelevering in de historische Amsterdamse binnenstad.

Vanwege de relatief hoge warmtevraag en matig tot slechte isolatie wordt de Energiedamwand enkel gebruikt als basis warmteleverantie, de piekwarmtevraag wordt afgedekt door hoog rendement gasketels die t.z.t. uitgefaseerd kunnen worden als er schonere alternatieven beschikbaar en inzetbaar zijn. Het doel hierbij is niet om een energie-neutraal systeem te creëren, maar een verduurzaming van de monumentale en lastig te isoleren panden te bewerkstelligen in combinatie met noodzakelijke kadevernieuwing in de Amsterdamse grachten.

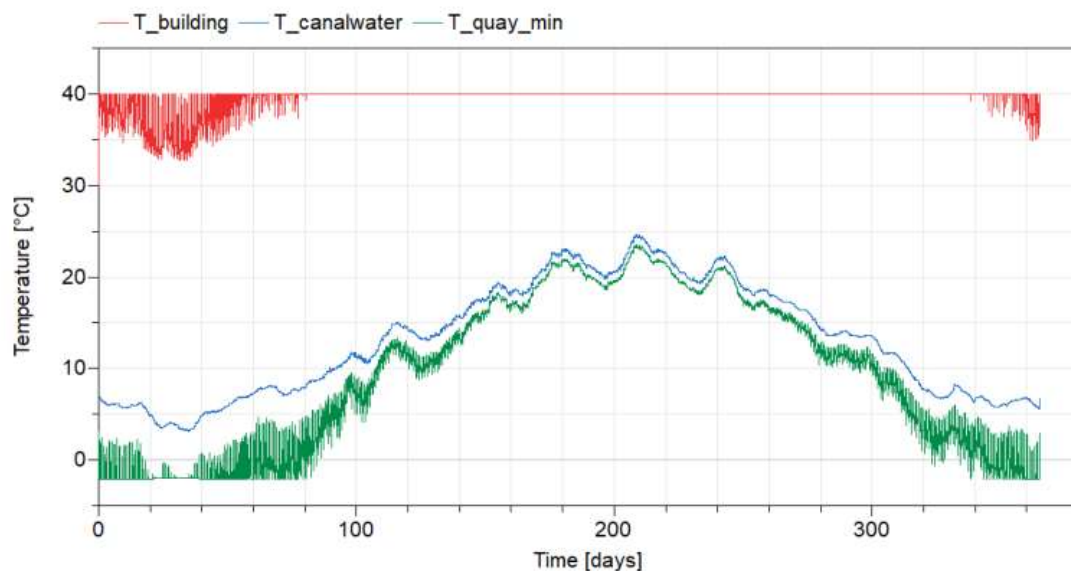
In de studie zijn twee opstellingen beoordeeld; een met alleen de Energiedamwand als warmtebron, een ander met een WKO als warmtebuffer waarbij de Energiedamwand wordt gebruikt om de onbalans in de bron op te heffen.

Door een realistisch warmte-belastingsprofiel van een gemiddeld huishouden om te slaan naar de warmtevraag gedurende het jaar, is een op seizoen gebaseerde warmtevraag gemodelleerd (Figuur 8).



Figuur 8 Warmtevraag gedurende het jaar voor 25 appartementen.

Als de warmtelevering alleen is gebaseerd op de Energiedamwand, dan levert het systeem voldoende warmte om de gevraagde leveringstemperatuur van 40°C te realiseren in een periode waarin de watertemperatuur circa 8°C of hoger is. Indien de watertemperatuur lager is, is bij de gekozen opstelling en warmtepomp-instelling, bijverwarming nodig (Figuur 9).



Figuur 9 temperatuur levering gedurende het jaar.

Bij de opstelling met een WKO wordt de onbalans in de WKO beperkt door deze in de winter minder uit te putten en in de zomer op te laden met de Energiedamwand. Scharff

ontwikkelde hiervoor een model dat voldoende flexibiliteit verschaft om na de afronding van zijn onderzoek ook nog andere potentiële combinaties te onderzoeken. Bijvoorbeeld een combinatie waarbij de Energiedamwand nog steeds de hoofdleverantie voor zijn rekening neemt, en de WKO de functie heeft van batterij in periodes met verhoogde vraag naar warmte. Of een systeem waarbij de Energiedamwand een overschot aan warmte creëert met hogere temperaturen in de WKO opslag.

7. Conclusie

De tot nog toe verzamelde proefresultaten en de technische analyse van het systeem zijn overtuigend genoeg om te concluderen dat de Energiedamwand een haalbaar energieconcept is dat gereed is om als duurzame warmtebron te worden geïmplementeerd. Zeker in situaties waar de damwand in contact staat met water, is het vermogen dusdanig hoog dat dit een reële optie is in de verduurzaming van de gebouwde omgeving. Het ontwerp van de stalen damwand constructie vraagt daarbij om een relatief eenvoudige aanpassing, en krijgt hiermee een tweede en duurzame functie.

Naast de praktijkproef in De Zweth zijn in Nederland ook al enkele projecten gerealiseerd:

- Compagnies jachthaven in Enkhuizen
- Provinciehuis Swettehûs in Leeuwarden
- Haven Quartier in Potsdam (Duitsland)
- Hotel aan de Feldberger Haussee, Mecklenburg-Vorpommern
- Vrijstaand privéhuis in Bergfelde (Brandenburg - Berlijn)
-

De ontwikkeling van de energiedamwand is een samenwerking tussen Technische universiteit Eindhoven, Technische universiteit Delft, Groep Duurzaam Opgewekt, CRUX Engineering en Gooimeer. De auteurs van deze paper willen daarom specifiek professor David Smeulders van TU Eindhoven, professor Phil Vardon van TU Delft en Bob Bloemers van Groep Duurzaam Opgewekt bedanken voor hun bijdragen aan de proef en verdere ontwikkeling van het systeem.

Referenties

CE Delft, Deltares, 2018 'National potential of aquathermal Energy'

Gooimeer, 2021, Energie damwanden, <https://www.energie-damwanden.nl/>

Haasnoot J.K., Vardon, P, Pantev I., Bersan S., Bloemers B., Smeulders D., 2020, Energy Quay Walls, Conf. Proc. 2nd Int. Conf. on Energy Geotechnics, San Diego USA

Vries J.P. de, 2021, Quays Rather Than Boilers. Extracting Energy From Water and Soil Through Energy Sheet Piles., thesis TU Delft <http://resolver.tudelft.nl/uuid:2da05b2a-db22-4cfb-9a3d-fd8f33c5dcca>

Scharff T., 2021, Model development on thermal heat storage in a renewable heating system using heat absorption from the canals of Amsterdam, thesis TU Eindhoven

Ziegler M., Koppmann D., Pechinig R., Knapp D., 2019, Energy sheet pile walls - Experimental and numerical investigation of innovative energy geostructures, Conf. Proc. XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering-Reykjavík, Iceland