



Eindverslag TSE-haalbaarheidsstudie

Bijlage bij Aanvraag Vaststelling subsidie

1. Algemene gegevens

- referentienummer; TESN118103
- projecttitel; Energiekademuur
- penvoerder en contactpersoon; Crux Engineering BV, Jacco Haasnoot
- Medeaanvragers; TU Delft, TU Eindhoven, Groep Duurzame Energie BV
- begin- en einddatum van het project; 01-12-2018 – 31-05-2019
- datum van inzending. 19-6-2020

2. Samenvatting

3. Inleiding

Beschrijf kort de achtergrond, aanleiding en aansluiting bij de topsector, doelstelling en probleemstelling van het project.

Het idee voor het project is ontstaan uit een gesprek met Frans de Heij Kwartiermaker energietransitie van Ingenieursbureau Amsterdam. De gemeente Amsterdam is een programma aan het opstarten voor het grootschalig vervangen, te weten 200 km, van de binnenstedelijke kademuren (Innovatiepartnerschap Kademuren). Belangrijk thema bij deze werkzaamheden is duurzaamheid. Is het mogelijk om het vervangen van de kademuren te combineren met de energietransitie. Kademuren hebben een aantal kansrijke kenmerken die een dergelijke combinatie mogelijk maken. Naast binnenstedelijke kademuren zijn waterkeringen (dijken) objecten voor toepassing van het concept. De dijken worden de komende jaren in Nederland op grote schaal versterkt. De waterkering moet gedurende de levensduur doorgaans slechts in een (zeer) beperkte deel van de tijd daadwerkelijk de waterkerende functie vervullen en is dus een deel van de tijd een "nutteloos" object. Het nuttig gebruik van een dijk als energieopslag medium is een zeer interessante toevoeging van de functie van een dergelijke object. Deze haalbaarheidsstudie richt zich primair op kademuren. In Amsterdam moet een groot deel van alle kademuren worden gerenoveerd. Doel van dit project is om te onderzoeken of het mogelijk is om de vernieuwde kademuren nuttig te gebruiken de energiehuishouding van de stad. Door in de kademuren buffercapaciteit van energie te creëren, in de vorm van elektriciteit en/of warmte, kunnen duurzame energiebronnen maximaal worden ingezet bij de verlaging van CO₂ emissies. Daarnaast kunnen de maatschappelijke kosten voor de opslag en infrastructuur van duurzame energiebronnen worden geminimaliseerd door deze faciliteiten slim te combineren met binnenstedelijke opgaven waardoor investeringen in de energie infrastructuur kunnen worden geminimaliseerd vanwege het decentrale karakter van de faciliteit.

4. Doelstelling

Doel van dit project was de mogelijkheden te onderzoeken om damwanden in kadeconstructies nuttig te gebruiken in de energiehuishouding van de bebouwde omgeving. Door in de kades opwek- en buffercapaciteit van energie (warmte) te creëren, kunnen duurzame energiebronnen maximaal worden ingezet bij de verlaging van CO₂ emissies. Allereerst richt het onderzoek zich op de combinatie van de warmtebronnen:

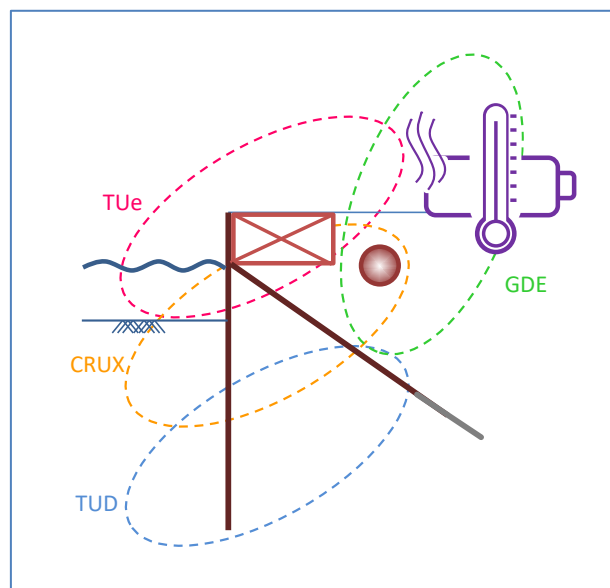
- Energie uit damwand (energie damwand)
- Energie uit oppervlaktewater (Aquathermie)

Heeft u alle aspecten, die per onderdeel genoemd worden in het model eindverslag, behandeld?

Samen met de partners TU Delft, TU Eindhoven en de Groep Duurzame Energie B.V. heeft CRUX Engineering B.V. de mogelijkheid onderzocht om energie (warmte) op te wekken en op te slaan in kades langs de kades in de gemeente Amsterdam; thermisch actieve kades. De meest gebruikelijke kadeconstructie langs vaarwegen is de (verankerde) stalen damwand: "de energie damwand". Hiermee kunnen duurzame energiebronnen maximaal worden ingezet bij de verlaging van CO₂ emissies.

Om thermisch actieve kades te ontwikkelen is onderzoek nodig naar de karakteristieken van een verankerde stalen damwand bij energieopslag en -opwekking. De volgende probleemstellingen zijn geformuleerd:

- Is een verankerde stalen damwand geschikt als middel voor het duurzaam opslaan en opwekken van warmte? Met als subvragen:
 - Wat is de verhouding tussen warmtelevering vanuit de ondergrond (geothermie) en het oppervlaktewater (aquathermie)?
 - Wat zijn de te verwachten energetische prestaties?
- Wat zijn de grondmechanische effecten op de kerende functie van de damwand?
- Schetsontwerp systeem.
- Economische haalbaarheid van het systeem.



Figuur 1 Visuele weergave van de taakverdeling

5. Werkwijze

Het project bestond in deze fase met name uit deskstudies. Daarnaast is er veelvuldig overleg geweest tussen de partijen. Ieder was verantwoordelijk voor het eigen deel zoals in afbeelding 1 is uitgebeeld. De resultaten van de verschillende werkpakketten zullen hieronder worden uitgewerkt.

6. Resultaten van het project en spin-off

Het project heeft geleid tot een proef met energie damwanden ten zuiden van Delft die op het moment van schrijven wordt opgestart. De energie damwand zijn inmiddels in de Schie nabij buurtschap De Zweth geplaatst en zullen in de komende periode worden beproefd. Deze proef wordt uitgevoerd in het kader van een SBIR project dat door de provincie Zuid-Holland is uitgeschreven.



Energie damwanden klaar voor de beproeving, locatie ten zuiden van Delft

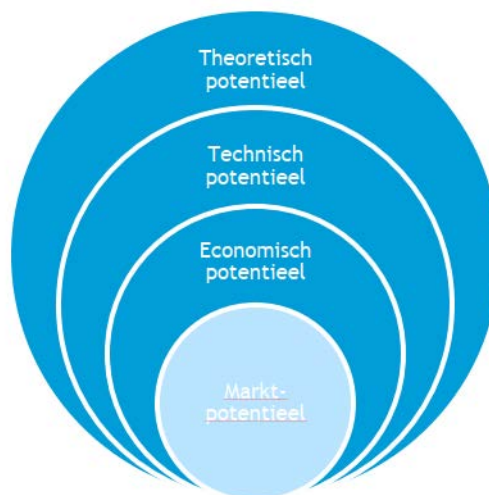
Voor de gemeente Amsterdam wordt tevens gewerkt aan de potentie van “Kademuren als Energiefabriek”. Voor twee kenmerkende cases wordt door CRUX en de partners uitgewerkt hoe de kademuur kan functioneren binnen het energiesysteem van een waterrijk energiesysteem als dat van Amsterdam. Hiermee kan de gemeente pro-actief inspringen op kansen die zich voordoen bij te vervangen kademuuren.

6.1. Theoretisch potentieel vaarwegen

Definitie potentiëlen

In navolging van het rapport ‘Nationaal potentieel van aquathermie’ (CE Delft, Deltares, september 2018) maken we onderscheid tussen theoretisch, technisch, economisch en marktpotentieel (zie Figuur 2). In deze paragraaf beperken we ons initieel tot het theoretisch potentieel dat de maximale hoeveelheid energie omvat die in theorie kan worden opgewekt zonder rekening te houden met technische en maatschappelijke beperkingen zoals omzettingsverliezen, onderhoud en veiligheid. Concurrentie met andere vormen van gebruik zoals uitsluiting van natuurgebieden en afstandsbeperkingen worden

in dit potentieel wel meegenomen, alsmede voor de hand liggende beperkingen zoals bijvoorbeeld een maximaal aanvaardbare afkoeling van oppervlaktewateren door warmteonttrekking. De business case laat nog het economisch potentieel zien, het marktpotentieel wordt in deze rapportage niet besproken.



Figuur 2 definitie potentieel (bron: rapport 'Nationaal potentieel van aquathermie' (CE Delft, Deltares, september 2018)

Bruikbare warmte wordt onttrokken in de zomer wanneer het oppervlaktewater voldoende is opgewarmd. In de zomer is veelal echter geen vraag naar ruimteverwarming voor woningen of utiliteitsbouw. De onttrokken warmte moet daarom worden opgeslagen totdat de vraag naar warmte in de herfst of winter weer toeneemt. Hiervoor ligt een koppeling met grondopslagsystemen voor de hand (WKO systemen, thermische actieve damwanden). Opslag zal onvermijdelijk gepaard gaan met verliezen, zodat het technische potentieel van oppervlaktewater lager zal zijn dan het theoretisch potentieel. Deze verliezen zijn over het algemeen bekend en kunnen worden beperkt door systeemoptimalisatie. Binnen het economisch potentieel wordt een afweging gemaakt vanuit het perspectief van de investeerder waarbij de kosteneffectiviteit van de technologie doorslaggevend is. Het marktpotentieel tenslotte is dat deel van het economisch potentieel dat naar verwachting gerealiseerd zal worden onder de huidige wet- en regelgeving, eventueel met behulp van bestaande subsidieregelingen. In dit rapport zullen we verder niet ingaan op het marktpotentieel.

Theoretisch potentieel vaarwegen

De hoeveelheid warmte die onder gegeven omstandigheden onttrokken kan worden aan vaarwegen is de zogenaamde warmte-onttrekkingscapaciteit (WOC). Deze wordt uitgedrukt in J/s (Watt) en is simpelweg afhankelijk van het stromingsdebiet Q [m^3/s] van de vaarweg, de temperatuurverlaging van het water ΔT [$^{\circ}C$], en de volumetrische warmtecapaciteit van het water ρc [$J/m^3/^{\circ}C$]:

$$WOC_0 = Q \times \Delta T \times \rho c$$

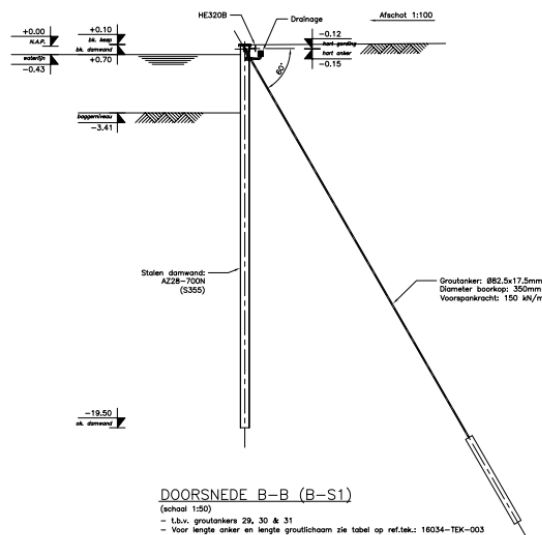
Aan de Rijn bij Lobith met een debiet van 2000 m³/s zou op deze manier een warmtecentrale van 8,4 GW ontstaan waarbij het water slechts 1 °C afkoelt. Dit is meer dan een kwart van het totale geïnstalleerde elektrisch vermogen in Nederland en schetst het enorme theoretisch potentieel van de vaarwegen in Nederland. Het zou echter ook betekenen dat uit stilstaande wateren geen warmte kan worden onttrokken (Q is hierbij immers nul). Dat is niet realistisch omdat wateroppervlakken (zowel stromend als stilstaand) ook direct worden opgewarmd door de lucht (aannemende dat de temperatuur van de lucht hoger is dan die van het water). We hebben dus te maken met een additionele warmte-onttrekkingscapaciteit WOC_{opp} :

$$WOC_{opp} = h \times A \times \Delta T,$$

waarbij h de warmte-overdrachtscoëfficiënt is [W/m²/°C], en A het wateroppervlak. De totale WOC is dan de som van WOC_Q en WOC_{opp} . Deltares heeft op basis van bovenstaande formules een verdeling van de totale warmte-onttrekkingscapaciteit gemaakt voor elk rekenelement van het Nationaal Water Model op basis van de uitgangspunten dat

- i) warmte pas kan worden onttrokken als de oppervlaktewatertemperatuur hoger is dan 15 °C,
- ii) het water niet verder afgekoeld mag worden dan tot 12 °C en
- iii) het water maximaal 6 °C mag worden afgekoeld. Als het water bijvoorbeeld 19 °C is, mag het maar tot 13 °C worden afgekoeld.

In het vervolg van deze rapportage worden de data van Deltares gebruikt voor het maken van de case studie.



Figuur 3 Damwandconstructie

6.2. Technische haalbaarheid

6.2.1. Thermisch actieve damwand

Inleiding

De technische haalbaarheid van een energie damwand wordt bepaald door de mogelijkheden van de damwand om energie op te wekken en op te slaan. Om het systeem goed te begrijpen en dus in de toekomst effectief te kunnen ontwerpen is een COMSOL® rekenmodel opgesteld en zijn verschillende scenario's doorgerekend. Dit rapport geeft een samenvatting van de belangrijkste bevindingen van deze simulaties.

Beschrijving systeem

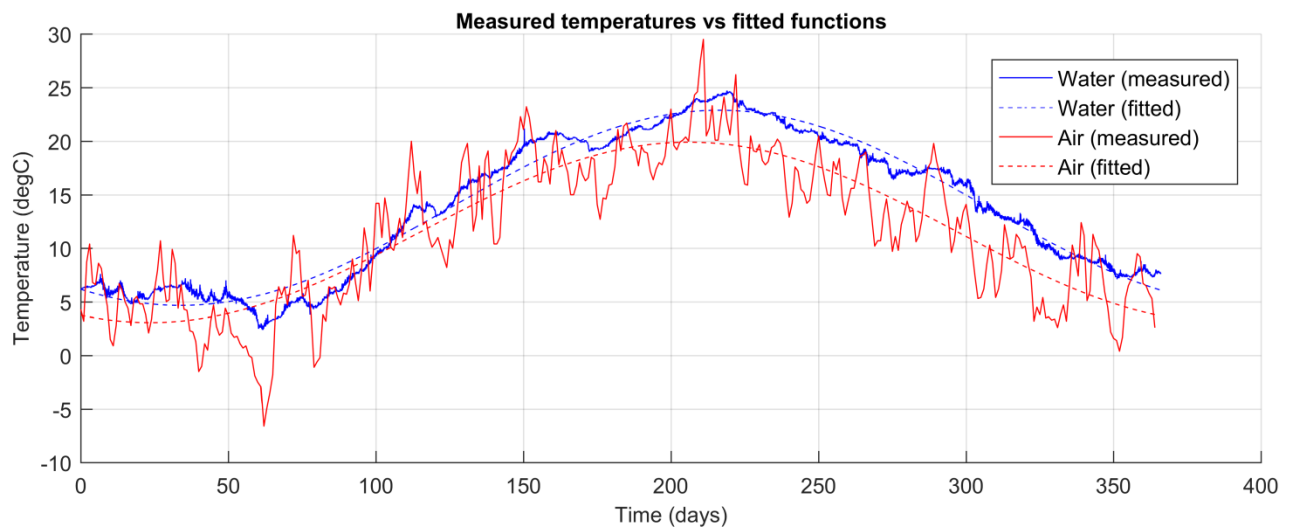
De energie damwand bestaat de warmtewisselaar uit een in- en uitgaande buis die in iedere damwandkas aangebracht kan worden. Bij nieuwe damwand kan deze tegelijk met het inbrengen van de damwand worden aangebracht. Bij bestaande damwand is het mogelijk om deze achteraf aan te brengen met een techniek die vergelijkbaar is met het aanbrengen van klapankers. Deze buizen vormen een bodem / water warmte wisselaar dat via een warmtepomp warmte (of koude door passieve koeling) kan leveren aan woningen. In Hoofdstuk 4 wordt de mogelijkheid voor warmte distributie geschetst.

De warmte-uitwisseling met de omgeving vindt dan plaats over twee verschillende gebieden, één in contact met het water (vrije convectie) en één onder de bodem van de waterweg, in contact met de bodem. De stroming in de waterweg zorgt voor convectie dat een belangrijk bijdrage levert aan de efficiëntie van warmte uitwisseling tussen de warmtewisselaar en de waterweg.

Temperatuurgegevens

Temperatuurmetingen voor de waterweg, de omgevingslucht en de grond zijn belangrijk voor de betrouwbaarheid van de numerieke modelresultaten. Deze waren niet beschikbaar voor het exacte aandachtsgebied, vandaar dat gebruik is gemaakt van metingen die zo dicht mogelijk bij elkaar zijn geregistreerd. De metingen van de watertemperatuur die zijn verzameld bij de NDSM Amsterdam (gelegen in het IJ) waren beschikbaar via de Rijkswaterstraat (waterinfo.rws.nl) en zijn daarom gebruikt in de analyse. Het is belangrijk te vermelden dat dit geen directe metingen van de temperatuur in de vaarwegen zijn. De om de 6 uur geregistreerde luchttemperaturen zijn afkomstig van het weerstation op de luchthaven Schiphol.

Uit de metingen in Figuur 4 blijkt dat de watertemperatuur aanzienlijk minder kortstondige schommelingen vertoont dan die van de lucht. Daarnaast is de gemiddelde watertemperatuur over het algemeen hoger dan de gemiddelde luchttemperatuur. Dezelfde trends worden behouden in de ingebouwde sinusfuncties die in de analyse worden gebruikt. Temperatuurschommelingen op korte termijn kunnen van cruciaal belang zijn voor de piekvermogen van het systeem, daarom moeten deze in een gedetailleerd ontwerp stadium worden onderzocht. Een extra vereiste is een geschikt model (voor de ontwerpruimte en het gebouwen) voor het voorspellen van de warmtevraag op basis van de omgevingstemperatuur.

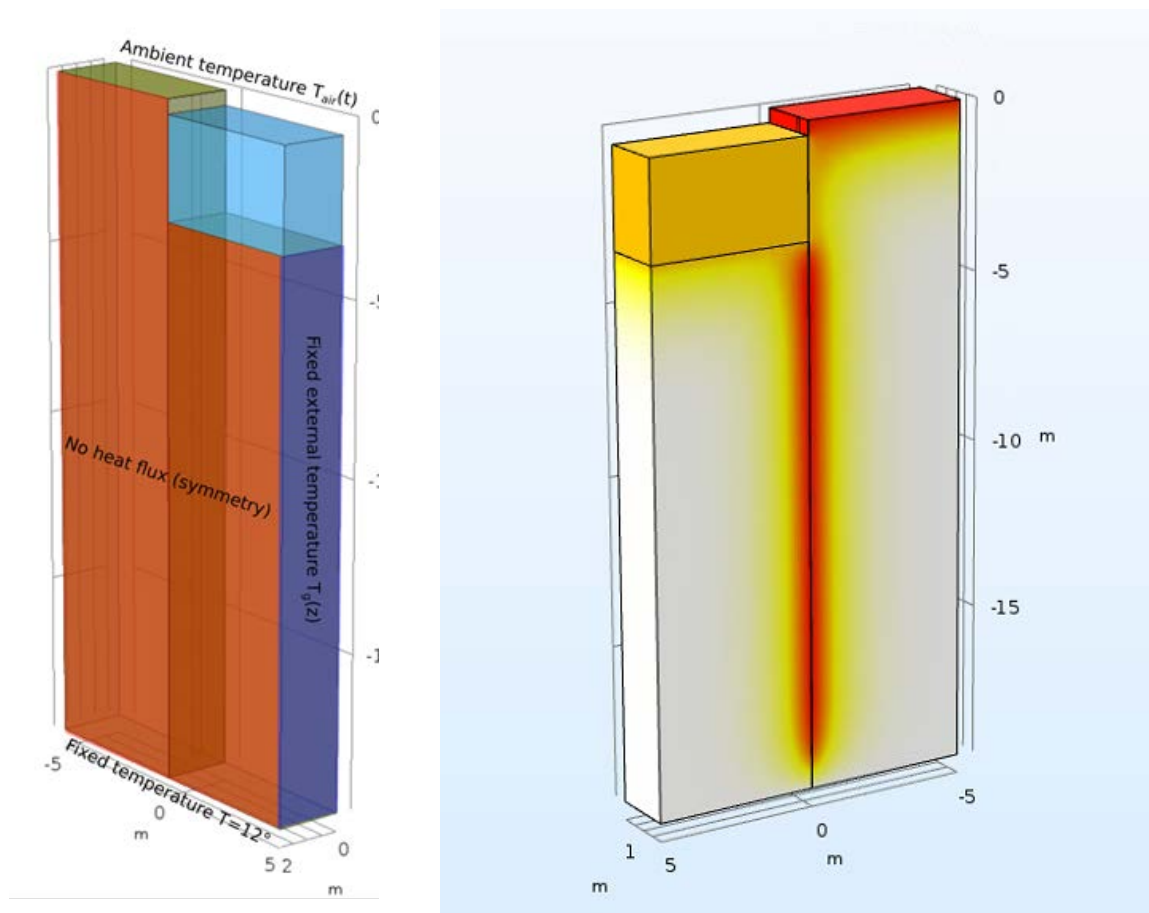


Figuur 4 Water (NDSM Amsterdam) en lucht (Schiphol) hebben voor 2018 temperaturen gemeten en gefitte functies

De bodemtemperatuur in de ondiepe ondergrond wordt beïnvloed door de schommelingen van de omgevingsluchttemperatuur. Metingen, uitgevoerd met behulp van een thermische CPT-test in 2018, hebben een relatief constante temperatuur onder een diepte van ca. 12 m aangetoond, maar lokale temperatuurmetingen zijn nodig om dit voor de studiegebieden te kwantificeren. De hier gepresenteerde analyses houden rekening met de extra invloed van een waterlichaam (waterweg) op de variatie in bodemtemperatuur. Bij vergelijking van de verschillende opties kan scenario A worden beschouwd als de slechtst denkbare oplossing, waarbij de warmte aan de ondergrond wordt onttrokken en de terugwinning aan natuurlijke processen wordt overgelaten. Dit kan leiden tot een verdere verlaging van de energieopbrengst. Scenario B daarentegen beschouwt de "beste oplossing", waarbij de gewonnen warmte tijdens de zomerperiode actief wordt teruggewonnen.

Numerieke modellering

Met COMSOL Multiphysics® zijn warmte-uitwisselingsmodellen opgesteld om het warmte-uitwisselingspotentieel van de opgestelde scenario's te bepalen. Een belangrijke vraag die in de haalbaarheidsstudie moet worden beantwoord, betreft het haalbare potentieel voor warmtewinning uit het water en de bodem voor de verschillende ontwerp oplossingen. Daarom is de voorkeur gegeven aan het opvangen van de geforceerde convectie in de verwarmingsbuizen. Hiervoor werd de module "Warmte-uitwisseling in buizen" van COMSOL® gebruikt. De warmtebuizen zijn dus expliciet gemodelleerd in het model. Voor de onderlinge afstand tussen de inlaat- en uitlaatbuizen is 0,3 m aangehouden, hetgeen een gangbare maat is voor standaard damwandprofielen. Een impressie van het model is gegeven in Figuur 5. Water in de waterweg wordt als goed gemengd (d.w.z. uniforme temperatuur), waardoor de waterweg als een warmtebron met een oneindige capaciteit fungeert. Deze aanname is terecht indien er voldoende stroming aanwezig is.



Figuur 5 Impressie van het COMSOL® rekenmodel

Scenario's

Er zijn twee scenario's gedefinieerd voor de evaluatie van het warmtewisselingspotentieel. Deze omvatten verschillende werkwijzen van het warmtewisselaarsysteem en zijn weergegeven in Tabel 1.

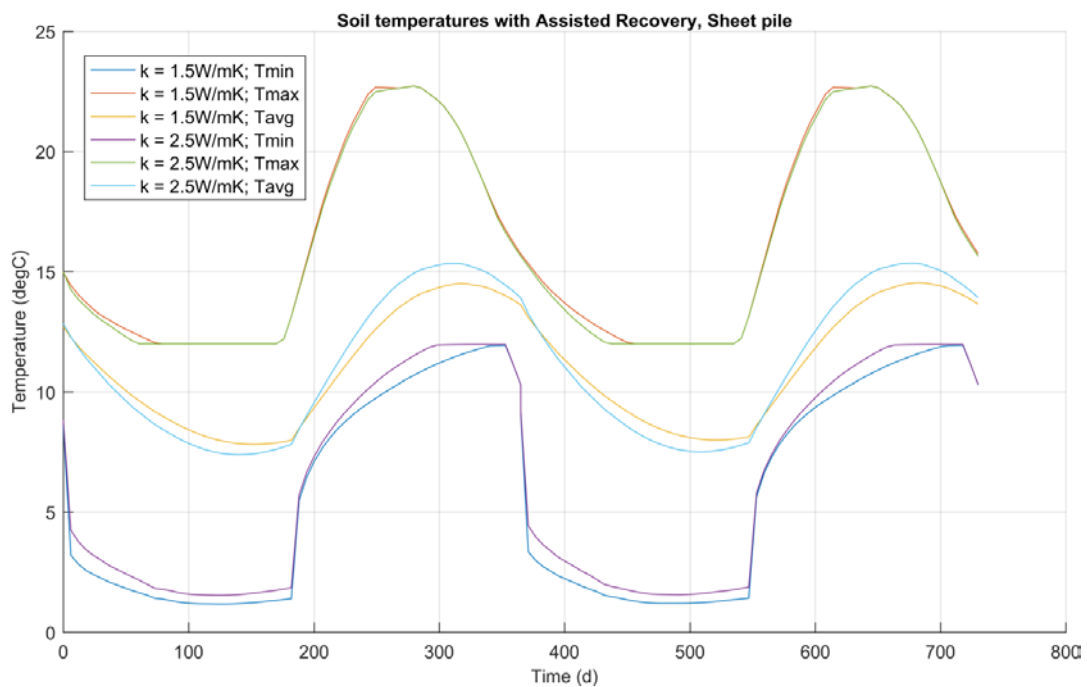
Tabel 1 Scenario's

Scenario	Periode	Conditie
Scenario A	15 Nov – 15 Mar	Warmte onttrekking uit de bodem
	15 Mar – 15 Nov	Natuurlijk herstel (geen warmte stroming in buizen)
Scenario B	15 Nov – 15 Mar	Warmte onttrekking uit de bodem
	15 Mar – 15 Nov	Herstel door warmtewinning uit vaarweg

Analyse resultaten

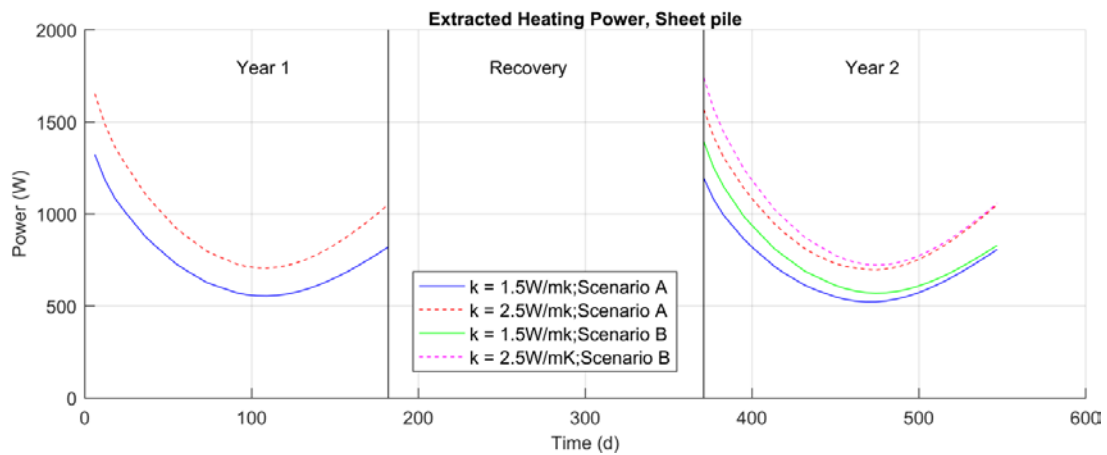
Zoals te verwachten valt leidt scenario A tot uitputting van de bodemtemperatuur door de constante warmteafvoer tijdens het stookseizoen. Om een duurzaam systeem te ontwerpen moet een mogelijkheid van geforceerd herstel plaats kunnen vinden door

middel van warmtetoevoer en opslag. In scenario B wordt gekeken naar het rondpompen van water bij een temperatuur die gelijk is aan die van het kanaal buiten het stookseizoen om de in de winter verbruikte energie terug te winnen. De bodemtemperatuur kan zich herstellen tot boven het initiële niveau, wat wijst op energieopslag (Figuur 6). In een gedetailleerde ontwerpsituatie moet de piekbehoefte verder worden onderzocht, waarbij een korte termijn model nodig is om de dagelijkse schommelingen van de lucht-, bodem- en watertemperatuur op te vangen.



Figuur 6 Grond temperatuur bij een energie damwand in scenario B bij gebruiksduur van 2 jaar

De metalen damwand maakt het mogelijk om de warmte terug te winnen, zelfs zonder pompen, wat vergelijkbare resultaten oplevert voor de warmteafvoer in het tweede jaar (Figuur 7). Dit is een netto voordeel, omdat er minder extra pompen nodig zijn om het thermische potentieel te herstellen. De berekeningsresultaten zijn in Tabel 2 gegeven.



Figuur 7 Warmte onttrekking met de Energie damwand

Tabel 2 Berekeningsresultaten

Scenario	Warmte geleidbaarheid grond (W/mK)	Totaal onttrokken energie per meter damwand (kWh/m)	
A	1.5	1718	(Jaar 1)
		1619	(Jaar 2)
	2.5	2143	(Jaar 1)
		2092	(Jaar 2)
B	1.5	1718	(Jaar 1)
		1828	(Jaar 2)
	2.5	2143	(Jaar 1)
		2265	(Jaar 2)

Conclusies

Uit de uitgevoerde numerieke analyses, waarbij scenario's met een duur van 2 jaar zijn beschouwd, blijkt dat een energie damwand met actief herstel in de zomerperiode een duurzaam onderdeel is van een bodemenergie systeem, dat wil zeggen dat de ondergrond energetisch niet wordt uitgeput. De jaarlijkse totaal onttrokken energie per meter damwand voor de beschouwde case ligt tussen de 1718 en 2265 kWh/m damwand.

6.2.2. Geotechnische risico's

De geotechnische risico's worden als zeer gering beschouwd. Hieronder zijn de mogelijke risico's nader beschreven. De mogelijke nadelige gevolgen zijn toe te schrijven aan de volgende mechanismen: (i) thermische uitzetting of krimp van de grond en (ii) thermische uitzetting of krimp van de paal of damwand. De grond zet uit als verwarmd en krimpt als afkoelt. De orde grootte van deze deformatie is enkele millimeters. De uitzetting en krimp is cyclisch: de grond zet in de zomer uit en krimpt in de winter. In de bovenste meters grond gebeurt dit al op natuurlijke wijze als reactie naar de variaties van de buitentemperatuur en van de temperatuur van de gracht. Door de warmtewisselaar zal dit fenomeen ook in de diepere grondlagen worden geïntroduceerd. De grootte en snelheid van de optredende thermische variaties is relatief hoog, maar treedt op in een zeer beperkte zone naast de paal/damwand.

Krimp van de grond kan elastisch (herstelbaar) of plastisch zijn. In het tweede geval spreekt men over thermische consolidatie. Thermische consolidatie kan alleen gebeuren in slappe, niet voorbelaste grond of bij lage grondspanningen (ondiepe grondlagen). Thermische consolidatie gebeurt wanneer de temperatuur relatief snel varieert. Daarom zal het mechanisme alleen in een beperkte gebied rond de paal/damwand op kunnen treden. Door consolidatie wordt de grond dichter en sterker en nemen de deformaties in de loop van de tijd af. Bij paalfunderingen is de warmtewisselaar in de beton ingebed. De temperatuur in de grond varieert dan minder snel en thermische consolidatie is minder waarschijnlijk.

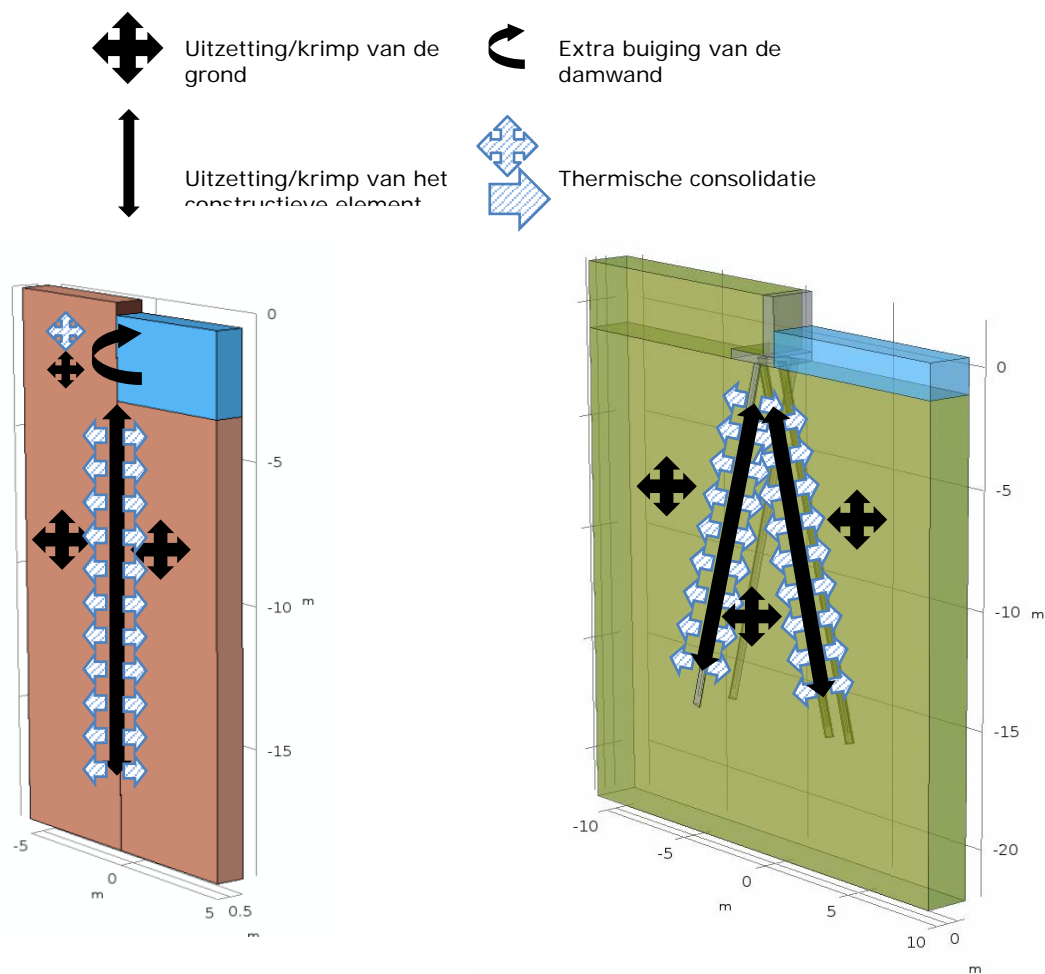
Effecten van zettingen/heffing

Als de grond naast de damwand/paal meer dan de damwand/paal zelf zakt, ontwikkelt zich negatieve kleef, dat vervolgens leidt tot een beperkte zetting van het constructieve element. Moderne paal en damwandconstructies zijn zo ontworpen dat er voldoende draagvermogen aanwezig is om de negatieve kleef belasting op te kunnen nemen, ook wanneer de damwand zelf een verticale belasting uit de bovenbouw of verankering op moet kunnen nemen. Thermische uitzetting en krimp van de damwand/paal zelf is elastisch. In proeven is het waargenomen dat cyclische thermische deformaties, door interactie met de grond, bij paalfunderingen tot zettingen leiden die in de jaren accumuleren (*ratcheting*). Dit gebeurt met name als de palen worden verticaal belast tot een waarde die dicht bij het draagvermogen ligt. Het is de verwachting dat bij nieuw ontworpen palen er voldoende marge is tussen de belasting en draagvermogen. Zettingen van de grond achter een damwand en van de damwand zelf kunnen tot een (beperkte) zakking van het maaiveld achter de damwand geven, zoals dat nu door uitbuiging van de damwand ook al gebeurt. Het is de verwachting dat de bijdrage van het thermisch activeren van de damwand op deze zetting binnen de bandbreedte ligt van de gangbare maaiveldzettingen. Thermische uitzetting van de damwand is verhinderd aan de punt. Dit kan gering buiging veroorzaken binnen de staalprofiel. Echter valt de omvang van de temperatuurvariatie binnen de waarden van een gewone kadeconstructie.

Effecten van deformatie in de horizontale richting

Uitzetting of krimp van de grond naast een damwand kan ook naar een variatie van de actieve en passieve gronddruk leiden. Dit kan – theoretisch tot een toename van het buigend moment en een vermindering van stabiliteit leiden. In het onderste gedeelte van de damwand zullen de gronddeformaties symmetrisch zijn zodat geen nadelige effect te verwachten is. Omdat in het bovenste gedeelte de grond slechts aan één zijde aanwezig is, wordt een toename van het buigend moment verwacht. Dit is doorgaans ook de zone waar in de huidige (natuurlijke) situatie een temperatuurvariatie in de grond optreedt. Dit extra moment, indien meer dan nu van nature al optreedt, moet in het damwandontwerp worden meegenomen.

In Figuur 5 in een overzicht gegeven van de geotechnische mechanismen die van belang zijn bij een thermisch actieve damwand of paalfundering. Concluderend kan worden gesteld dat de potentiële geotechnische risico's als gevolg van het benutten van een damwand als bodem energie systeem minimaal zijn.



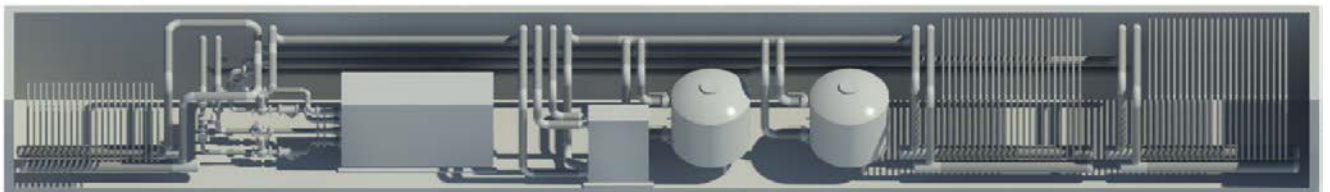
Figuur 8 schema van twee typen energie kademuren met aanduiding van de thermisch – hydro – mechanische processen die een positieve of negatieve invloed op de constructie kan hebben, links de energie damwand, rechts de energie kademuur

6.2.3. Van Energie damwand naar Energie kademuur

Uit de analyses is gebleken dat de energie die aan de damwand onttrokken kan worden een bovengrens kent. In gebieden met een grote warmtevraag ten opzichte van de beschikbare strekkende lengte kade is het dus goed mogelijk dat een energie damwand niet voldoende capaciteit kan leveren. Daarnaast is een damwand niet de enige bouwwijze voor het realiseren van kadeconstructies. Een zeer gangbare bouwmethode, met name binnenstedelijk, is een L-muur op een paalfundering (zie ook Figuur 8). In onze analyses hebben we nadere beschouwingen uitgevoerd naar de mogelijkheden om meer capaciteit te kunnen leveren door andere componenten aan het systeem toe te voegen.

De L-muur op palen is vergelijkbaar met de energie damwand, waarbij de L-muur de warmte uitwisseling met de waterweg verzorgt en de paalfundering als energiepaal geactiveerd kan worden. De prestaties van deze constructie liggen enigszins lager dan die van een energie damwand, maar zijn wel van een vergelijkbare orde. Voordeel van een L-

muur is dat (tijdelijk) een ondergrondse ruimte wordt gecreëerd waarbinnen installatie technische voorzieningen kunnen worden gerealiseerd, hetgeen met name in stedelijk gebied interessant kan zijn omdat hier de bovengrondse ruimte schaars is (zie Figuur 9). De technische ruimte kan uiteraard ook bovengronds of inpandig gerealiseerd worden.



Figuur 9 Voorbeeld van Inpassing van de technische ruimte in een langgerekte ondergrondse kadeconstructie

Indien meer capaciteit nodig is die niet uit de damwand geleverd kan worden, kan het warmte systeem worden uitgebreid met conventionele WKO installaties voor een constante verhoging van de capaciteit. Voor piekbelastingen kunnen warmte batterijen gebaseerd op PCM's (Phase Change Materials) worden toegepast in een kadeconstructie om piekbelastingen beter op te kunnen vangen. Het energie kademuur concept is dus modulair af te stemmen op de warmte vraag en de mogelijkheden in de omgeving, de energie damwand is een belangrijke component in dit concept.



Figuur 10 locatie fictieve case Delft

6.3. Economische haalbaarheid

Om de economische haalbaarheid van de thermisch actieve damwand te kunnen bepalen is een fictief gebouw in Delft als uitgangspunt genomen. Hierbij zijn de volgende kenmerken aan het gebouw gegeven:

- woonfunctie
- 100 appartementen met een BVO van gemiddeld 80m²/appartement

- Totaal BVO bedraagt dus 8.000m²
- Warmtevraag per m²: 0,15 GJ/m²
- Warmtapwatervraag per m² : 0,139 GJ/m²
- Koelvraag per m²: 0,05 GJ/m²

Het technische concept bestaat uit thermische actieve damwanden die de energie uit het naastgelegen oppervlaktewater kan halen. Middels een warmtepomp wordt de energie gegenereerd uit het oppervlaktewater opgewaardeerd naar hogere temperaturen. In de onderstaande berekeningen is een gemiddeld rendement (COP) van de warmtepompen van 3,6 meegenomen.

Op jaarbasis ontstaat de onderstaande energievraag:

verwarming: 1.200 GJ

warm tapwater: 1.112 GJ

koeling: 400 GJ

Uit de energievraag is te berekenen wat de energiehoeveelheid uit de thermisch actieve damwand dient te zijn. Dit zal overeenkomen met ca. 290 MWh per jaar. Hiervoor heb je ca. 148 meter thermisch actieve damwand nodig. In Figuur 10 staat het fictieve gebouw in Delft weergegeven met daarbij de benodigde strekkende lengte damwand.

Vanuit de Warmtewet worden de leveringstarieven gemaximeerd en hierdoor staan de inkomsten vast voor een energieleverancier. Voor 2019 gelden de volgende energietarieven, vastgesteld door de ACM:

Variabel kosten	Tarief levering BTW	Totaal	Indexatie
Verwarming (€ per GJ)	€ 23,53 €	4,94 €	28,47 ACM
Warm tapwater (€ per GJ)	€ 23,53 €	4,94 €	28,47 ACM
Koeling	€ - €	- €	- nvt
Vaste kosten (€ per jaar)			
Vastrecht warmte	€ 250,59 €	52,62 €	303,21 ACM
Meetkosten	€ 21,40 €	4,49 €	25,89 ACM
Vaste kosten afleverset	€ 144,31 €	30,31 €	174,62 CPI
Enmalige aansluitbijdrage	€ 858,59 €	180,30 €	1.038,89 ACM
Vastrecht koude	€ 164,23 €	34,49 €	198,72 CPI
Administratie			
Betaling per automatisch incasso			gratis per jaar
Betaling per factuur	€ 13,18 €	2,77 €	15,95 per jaar
Herinnering	€ - €	- €	- per brief
Sommatie	€ - €	- €	- per brief
Incassokosten			≥ € 40,00 per behandeling
Aan-/Afmelden	€ 13,18 €	2,77 €	15,95 per behandeling

Middels bovenstaande verbruiken en inkomsten is er een businesscase naar de financiële haalbaarheid opgesteld (zie Bijlage 2). Uit de businesscase is een financiële haalbaarheid te destilleren dat een meerinvestering t.o.v. een conventionele energievoorziening

maximaal € 539.829 mag bedragen om het systeem financiële rendabel te kunnen exploiteren door een Energy Service Company (ESCO). Het is de verwachting dat het budget van deze meerinvestering voldoende moet zijn om de additionele voorzieningen te bekostigen die nodig zijn om een conventionele damwand tot een energie damwand op te waarderen. Uit deze financiële haalbaarheidsanalyse wordt derhalve geconcludeerd dat het toepassen van een energie damwand in deze case kansrijk is en dat de business case voor een energie damwand sluit.

7. Discussie, conclusie en vervolg

Op basis van de technische en financiële analyses die in Hoofdstuk 7 van dit haalbaarheidsonderzoek zijn beschreven, wordt geconcludeerd dat de energie damwand een haalbaar concept is. De geavanceerde numerieke simulaties die uitgevoerd zijn met tijdsafhankelijke modellen die alle belangrijke aspecten van het energie systeem bevatten, laten zien dat warmte niet significant "weglekt" door de aanwezigheid van een (goed warmte geleidende) stalen damwand, maar zelfs een enigszins positieve bijdrage levert. Daarnaast heeft de analyse uitgewezen dat de geotechnische risico's voor de primaire functie van de damwand minimaal zijn én dat de business case positief is. Op basis van deze conclusie zouden wij graag dit systeem verder willen ontwikkelen.

Wel zijn er enkele knelpunten geïdentificeerd die ontwikkeling mogelijk in de weg staan:

7.1. Technische Risico's

In een vervolgfase worden de volgende technische risico's nader beschouwd:

- **Stroming en temperatuur in de waterweg**

Uit de analyses is gebleken dat de stroming en de temperatuur karakteristieken van de waterweg een belangrijke component is in de energetische prestaties van de energie damwand. Waterstroming heeft een grote invloed op de energetische prestaties van de energie damwand. In beheerste (laboratorium) omstandigheden zijn de belangrijkste invloedsfactoren te simuleren en vervolgens de beschikbare rekenregels goed te valideren (fase 2a). Ten aanzien van de temperatuur in de waterwegen zijn weinig gegevens (openbaar?) beschikbaar. Hier zal nader onderzoek naar moeten worden gedaan, met name op de beoogde pilot locatie (fase 2b).

- **Definitief ontwerp van de warmtewisselaar**

De warmtewisselaar in de bodem, voor toepassing bij nieuwe en bestaande damwand, zal definitief vorm moeten krijgen. Alvorens deze in een pilot toe te passen (fase 2b), zal deze in beheerste omstandigheden en in veldomstandigheden moeten worden getest op uitvoerbaarheid, duurzaamheid en robuustheid (fase 2a).

- **Aansturing stroming door bodem en waterweg warmtewisselaar**

De meet- en regeltechniek voor de aansturing van de stroming door de warmtewisselaars en de beslissingen die moeten worden genomen om te schakelen tussen onttrekken van warmte en toevoer van warmte moet nader worden ontworpen en geïmplementeerd. In fase 2a kunnen scenario's worden getest, zodat bij de start van de in de pilot (fase 2b) voldoende robuustheid in aansturing van het systeem voorhanden is.

7.2. Economische Risico's

Een nieuw te ontwikkelen bodem en water energiesysteem heeft vanwege het gebrek aan ervaring en voorbeeldcases per definitie een achterstand op reeds toegepaste producten

en diensten. Een belangrijk voordeel van de energie damwand is dat de "hoofddraagstructuur", zijnde de damwandconstructie, reeds gefinancierd is omdat de kade moet worden vervangen danwel al aanwezig is. Dit is vanuit economisch financieel perspectief een prettig uitgangspunt. Zoals in de business case al is aangegeven, volgt uit de begroting een budget dat beschikbaar is om het "substelsysteem", zijnde de infrastructuur voor de warmte uitwisseling, te financieren. Het technisch ontwerp van het substelsysteem moet derhalve zo goedkoop en daarmee waarschijnlijk zo eenvoudig mogelijk zijn om de kosten hiervan laag te houden. Alle betrokken partners hebben voldoende contacten met uitvoerende partijen (bijvoorbeeld specialistisch geotechnisch aannemer High 5 Solution BV) om de praktische kennis te mobiliseren die de aan te brengen systemen eenvoudig en robuust te houden.

Daarnaast zijn energie economische gerelateerde factoren waar wij geen of minimale invloed op hebben. Deze zijn in de knelpunten benoemd.

7.3.Organisatorische Onzekerheden

De vier partners in het project zijn er van overtuigd dat alle kennis en kunde in het huidige team beschikbaar is die noodzakelijk is om fase 2 succesvol te maken. Dit zelfvertrouwen is gestoeld op de uitstekende samenwerking in Fase 1, waarvan wij hopen dat dit ook spreekt uit de voorliggende rapportage.

De enige kennis die niet direct vertegenwoordigd is in het team, is uitvoeringskennis. Echter, 50% van de omzet van CRUX komt bij de aannemerij vandaan. CRUX, en ook GDE, heeft dus goede contacten met uitvoerende partijen om ook deze specifieke uitvoeringstechnische kennis en kunde te mobiliseren. Bij het opstellen van de offerte voor fase 2 zullen wij ook uitvoerende partijen raadplegen om de budgetraming goed te onderbouwen.

7.4.Vervolg

7.4.1. Aanpak

We beogen om de verdere ontwikkeling in twee delen uit te voeren:

1. Proefopstelling in het laboratorium
2. Pilot in het veld.

In eerdere innovatie trajecten hebben we ondervonden dat het essentieel is om een concept dat met numerieke modellen is uitgedacht eerst in een beheerste omgeving te testen alvorens een pilot in het veld uit te voeren. Omdat in het team twee technische universiteiten actief zijn, zijn voldoende laboratorium faciliteiten beschikbaar. In een laboratorium kunnen omstandigheden die nader beschouwd moeten worden of die (rekentechnisch) een relatief grote onzekerheidsmarge hebben, specifiek aan de opstelling worden opgelegd zodat het risico verminderd. Een proef in het laboratorium kan ook sneller gestart worden omdat geen tijd verloren gaat aan verkrijgen van vergunningen en overleg (en/of overtuigen) van derden en andere stakeholders.

Indien de proef in het laboratorium succesvol wordt afgesloten, kan de pilot in het veld worden uitgevoerd. De locatie en omstandigheden voor deze pilot moeten in overleg met de Provincie worden bepaald, maar zal zo dicht mogelijk, of zelfs volledig, bij de realiteit moeten aansluiten.

7.5. Vooruitblik op de commercialisatie fase

Fase 3 van het project is de commercialisering van de energie damwand. De beoogde eindgebruikers zijn gebruikers van woningen en utiliteitsbouw nabij de vaarwegen. In Figuur 11 is een schema gegeven van de opwekking en distributie van energie van de energie damwand naar de eindgebruiker. Dit systeem wordt geëxploiteerd door een ESCO (Energy Service Company).

Figuur 11 heeft een energie damwand als uitgangspunt, maar zoals aangegeven in paragraaf 3.5.3 kan in de commercialisatie fase ook sprake zijn van een Energie Kademuur, waarin verschillende componenten voor warmte (en koude) opwekking en opslag zijn samengevoegd om voor de omgeving tot een optimale duurzame energievoorziening te komen. Hiermee levert de Provincie Zuid-Holland een belangrijke bijdrage aan de reductie van CO₂ uitstoot voor de Nederlandse maatschappij in het algemeen en de provinciale vaarwegen in het bijzonder.

8. Uitvoering van het project

8.1. De problemen (technisch en organisatorisch) die zich tijdens het project hebben voorgedaan en de wijze waarop deze problemen zijn opgelost

Er hebben zich geen organisatorische of technische problemen voorgedaan tijdens het project.

8.2. Toelichting op wijzigingen ten opzichte van het projectplan

Het project is uitgevoerd conform de in het projectplan omschreven werkpakketten;

WP 1. Inventarisatie fase

In een tweetal werksessies worden randvoorwaarden van de verschillende energietechnieken en de energievraag. In de inventarisatie fase worden een aantal cases gedefinieerd die in het volgende werkpakket nader door de verschillende partijen worden uitgewerkt.

WP 2. Technische uitwerking cases

De gedefinieerde cases (uitgangspunt is 2 cases) worden nader technisch uitgewerkt om de beschikbare energie (capaciteit, vermogen) te bepalen van (een combinatie van) technieken en deze af te kunnen zetten tegen de energievraag van verschillende omgevingen bij de kademuur (monumentale bebouwing, nieuwbouw, etc.). Dit werkpakket sluit af met de technische haalbaarheid van de cases en een werksessie

WP 3. Financiële uitwerking cases

De cases die technisch kansrijk zijn worden financieel uitgewerkt om de haalbaarheid van de business case te kunnen bepalen. Dit werkpakket sluit af met de financiële haalbaarheid van de cases en een werksessie.

WP 4. Conclusies, definitie pilot projecten

Het project sluit af met een afrondende rapportage waarin de conclusies worden samengevat en mogelijke pilot projecten worden gedefinieerd. Deze pilot projecten worden schetsmatig uitgewerkt, zowel technisch inhoudelijk als in een kostenraming.

De wijziging die zich heeft voorgedaan had niet zozeer invloed op de uitvoering van het project, als wel op de vervolgstappen. Nadat dit project van start is gegaan is men in contact gekomen met de provincie Zuid-Holland om ook daar eventueel een proef te doen.

De uitvoering van het haalbaarheidsonderzoek bleef daarmee ongewijzigd, want de bovenstaande numerieke studie is bruikbaar in beide situaties, waarbij de energetische prestaties van beide typen kademuren in beeld zijn gebracht. Dit gebeurt op het moment van schrijven ook voor de 2 cases die in opdracht van de gemeente Amsterdam wordt uitgewerkt. Het vervolgtraject richt zich in eerste instantie alleen dus meer op de binnenvaartwegen dan de kades in de gemeente Amsterdam. Het product heeft dan ook de meer algemene titel energie kademuur gekregen in de loop van deze haalbaarheidsstudie.

8.3.Toelichting op de verschillen tussen de begroting en de werkelijk gemaakte kosten.

Er hebben zich geen wijzigingen voorgedaan in de begroting.

8.4.Toelichting wijze van kennisverspreiding en toelichting PR project en verdere PR-mogelijkheden

Er is op dit moment contact met de TSE om een promotievideo op te nemen van de huidige status van het project. Dit materiaal mag door de TSE worden gebruikt voor promotiedoeleinden. Verder heeft de deelname van de beide TU's gezorgd voor kennisvergaring die op de universiteit zal worden gebruikt.