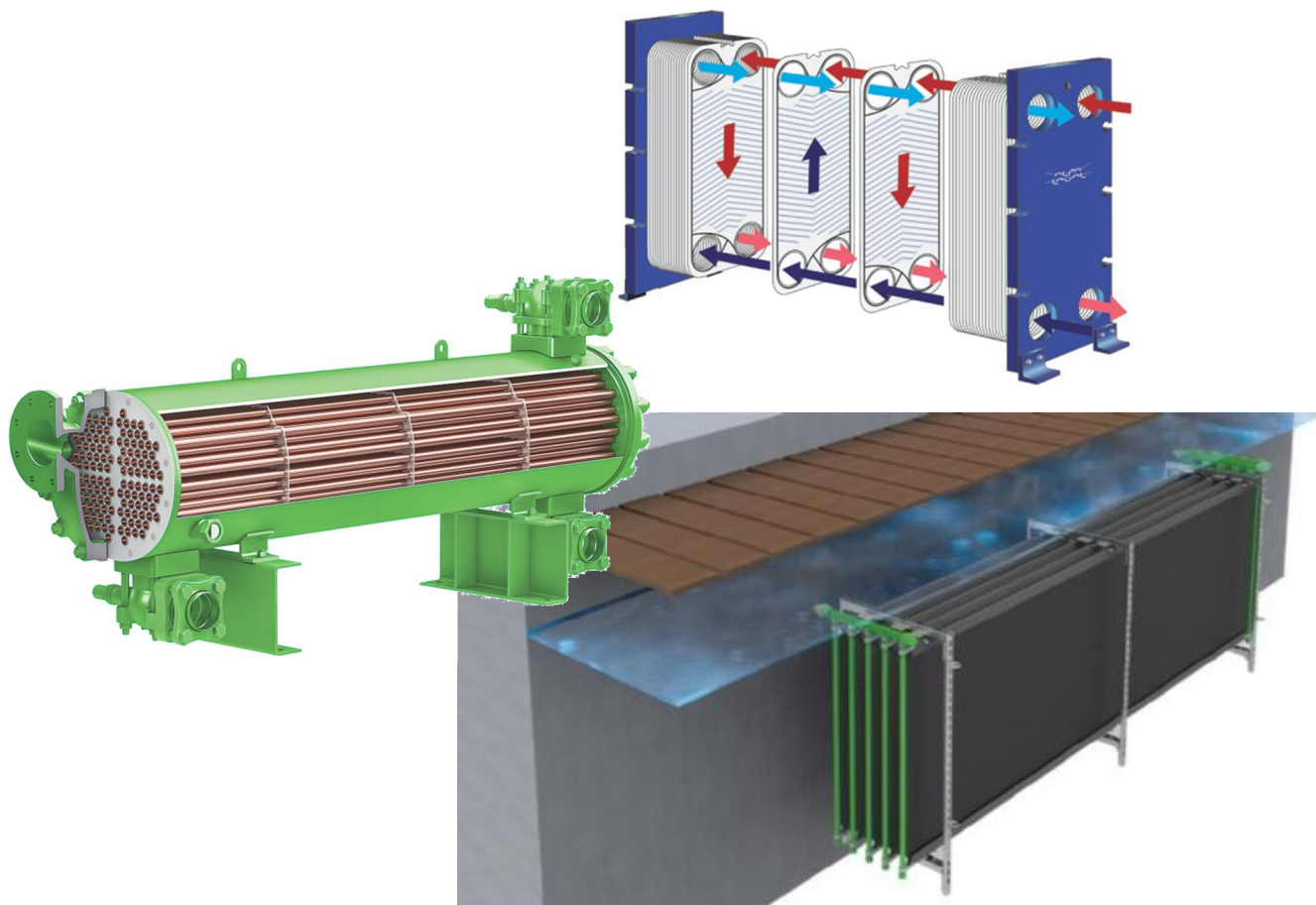


WARMINGUP

Innovatief Duurzaam Warmtecollectief



**Warmtewisselaars voor
aquathermie:
warmteoverdracht en
benodigde filtering**

Deltares

auteurs: M. van Meerkerk, A. de Fockert

2 december 2022

review: R. Roosjen

Dit project is uitgevoerd als onderdeel van het Innovatieplan WarmingUP. Dit is mede mogelijk gemaakt door subsidie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) in het kader van de subsidieregeling Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma's (MMIP), bij RVO bekend onder projectnummer TEUE819001. WarmingUP geeft invulling aan MMIP-4 – Duurzame warmte en koude in gebouwde omgeving en levert daarmee een bijdrage aan Missie B – Een CO₂-vrije gebouwde omgeving in 2050.

Projectnummer

11205156

Keywords

aquathermie, warmtewisselaars, gesloten, potentie

Jaar van publicatie

2022

Meer informatie

Anton de Fockert

T 06 – 469 111 71

E Anton.deFockert@deltares.nl

12/2022 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevens bestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding	5
1.1 Achtergrond	5
1.1.1 Open systemen warmtewisseling in aquathermie	5
1.1.2 Gesloten warmtewisselaars in aquathermie	7
1.1.3 Vervuiling	8
1.1.4 Ecologie	9
1.2 Doelstelling	9
2 Warmteoverdracht	10
2.1 Warmteoverdracht warmtewisselaar	10
2.1.1 Logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil	10
2.1.2 Warmteoverdrachtscoëfficiënt	11
2.2 Effecten stroomsnelheid en turbulentiegraad	12
2.3 Effecten van vervuiling	14
2.4 Validatie	15
3 Kansen voor aquathermie	17
4 Conclusies	20
Referenties	21
Bijlage 1 Warmteoverdracht	22
1.1 Aannames warmteoverdracht	22
1.2 Warmteoverdrachtcoëfficiënten	22
Warmteoverdrachtscoëfficiënt binnenzijde	22
Warmtegeleiding door de buiswand	23
Warmteoverdrachtscoëfficiënt buitenzijde	23

Samenvatting

Aquathermie kan gewonnen worden met gesloten en open systemen. Bij open systemen wordt het water ingenomen met een pomp, waarna het wordt gefilterd en de warmte wordt gewonnen in een warmtewisselaar. Bij een gesloten systeem komt er geen filtering en pomp aan te pas en wordt de warmtewisselaar direct in het water gelegd. In deze studie is gekeken naar de potentie van gesloten systemen voor aquathermie en de potentie om dit soort systemen op grotere schaal toe te passen. Daarbij is een vergelijking gemaakt tussen gesloten systemen en open systemen waar gebruik wordt gemaakt van platen warmtewisselaars met fijne filtering en buizenwarmtewisselaar (shell and tube) waar grovere filtering wordt toegepast.

Gesloten systemen hebben als voordeel dat het water niet gefilterd hoeft te worden en dat alleen de warmte uit het water wordt gewonnen. Hierdoor is het effect van dit soort systemen op de ecologie kleiner dan bij open systemen. De potentiële warmtewinning voor gesloten systemen is echter vele malen kleiner dan bij open systemen. Dat komt doordat het materiaal van gesloten systemen ook bestand moet zijn tegen de omstandigheden van het water, waardoor het systeem robuust moet worden ontworpen met materialen die minder efficiënt zijn in warmteoverdracht dan open systemen. Zo wordt er bij gesloten systemen vaak plastics gebruikt terwijl bij open systemen metalen worden toegepast met een veel hogere warmteoverdracht. Een ander type gesloten systeem is de warmtewisselaar die geïntegreerd is in een damwand. Daarnaast zijn gesloten systemen afhankelijk van de stroomsnelheid en de turbulentiegraad in het omringende water. Deze is vaak beperkt, waardoor niet alle warmte efficiënt wordt gewonnen. Bij open systemen wordt het water onttrokken aan het oppervlaktewater en wordt de warmte gewonnen in een technische ruimte op land. Bij open systemen is deze efficiëntie vaak hoger, omdat het water tussen de platen van de platenwarmtewisselaar of door de buizen van de shell and tube warmtewisselaar wordt geperst. Hierdoor wordt de turbulentiegraad geoptimaliseerd voor een efficiënte warmteoverdracht.

Bij open systemen wordt vaak fijne filtering toegepast, om de warmtewisselaars schoon te houden. Afhankelijk van het ontwerp van de warmtewisselaar is een bepaalde maaswijdte van filtering nodig, wat invloed heeft op de ecologie en het onderhoud van de installatie. Indien vanuit de ecologie een beperkte mate van filtering wordt toegestaan, dan kan het ontwerp van de warmtewisselaar hierop worden aangepast (denk aan shell and tube warmtewisselaars of grotere tussenruimte bij platenwarmtewisselaars). Dit heeft vaak wel financiële consequenties omdat de warmtewisselaar daarmee groter en duurder wordt.

Tot nu toe worden gesloten systemen vaak toegepast voor enkele woningen (1-5 huizen), terwijl open systemen worden toegepast voor hele woonwijken (>50 woningen). Om met gesloten systemen grote vermogens op te wekken voor hele woonwijken, is veel ruimte in een waterlichaam nodig, wat vaak niet beschikbaar is. Om de warmteoverdracht van gesloten systemen te verhogen kunnen gesloten systemen (platen of buizensysteem) in een goot worden geplaatst waar het omgevingswater met een pomp langs wordt geforceerd. Hiermee ontstaat geforceerde convectie waardoor de warmteoverdracht toeneemt. Hierbij dient echter wel te worden opgemerkt, dat door het ruimtebeslag, het vrijwel onmogelijk gaat zijn om met gesloten systemen hele woonwijken van thermische energie uit oppervlaktewater te voorzien, zoals met open systemen wel mogelijk is.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Om warmte uit het water te kunnen winnen worden warmtewisselaars toegepast. Er zijn meerdere typen warmtewisselaars beschikbaar op de markt maar de warmtewisselaars kunnen hoofdzakelijk worden onderverdeeld in 2 typen: systemen waar het water langs de warmtewisselaar wordt geforceerd (open systeem warmtewisseling) en systemen waar het water vrij langs de warmtewisselaar (gesloten systeem warmtewisseling) kan stromen. De warmteoverdracht is voor beide typen anders. Dat wordt in dit rapport verder uitgewerkt.

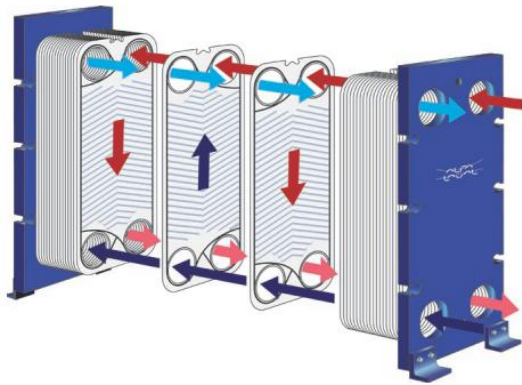
Bij open systemen wordt vaak fijne filtering toegepast, om de warmtewisselaars schoon te houden. Afhankelijk van het ontwerp van de warmtewisselaar is een bepaalde maaswijdte van filtering nodig, wat invloed heeft op de ecologie en het onderhoud van de installatie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen fijne filtering die vaak wordt toegepast bij platenwarmtewisselaars (micrometers) en iets grover filtering (orde millimeters/centimeters) die vaak worden toegepast bij buizenwarmtewisselaars. Omdat filtering een invloed heeft op de ecologie nabij het innamepunt van het aquathermiesysteem, wordt er verder onderzocht of het mogelijk is om op grote schaal warmte uit het water te winnen zonder, of met alleen grove filtering.

In de verschillende vormen van aquathermie (TEO, TEA en TED) worden beide typen van warmteuitwisseling toegepast. Dit staat verder beschreven in de paragrafen 1.1.1 en 1.1.2.

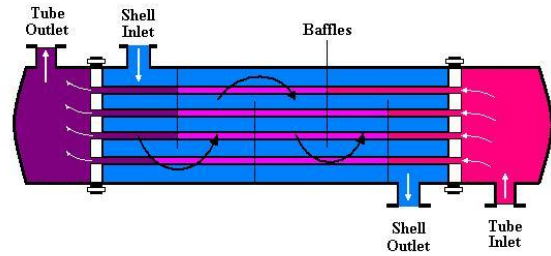
1.1.1 Open systeem warmtewisseling in aquathermie

In een open warmtewisseling systeem wordt het water waar de warmte uit wordt onttrokken door een pomp, via een filter langs de warmtewisselaar geleid. Nadat de warmte is onttrokken bij de warmtewisselaar wordt het water weer geloosd op de bron waar de warmte aan onttrokken is. De gewonnen warmte wordt via een secundair circuit afgegeven aan de warmtepomp waarmee de gewenste warmte kan worden opgeleverd.

Dit type warmtewisseling wordt vaak toegepast in aquathermie bij de winning van thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) en thermische energie uit drinkwater (TED). Veel gebruikte typen warmtewisselaars die hierbij worden toegepast zijn platenwisselaars (Figuur 1 en Figuur 3) en buizenwarmtewisselaars (Figuur 2, Figuur 4 en Figuur 5). Deze typen warmtewisselaars zijn er in veel verschillende groottes te verkrijgen. Beide typen warmtewisselaars worden ook vaak toegepast in industriële toepassingen zoals bij koelsystemen in energiecentrales. De beunkoelers (buisenwarmtewisselaars) zoals te zien in Figuur 5, worden vaak toegepast in schepen om de motoren te kunnen koelen met oppervlaktewater.



Figuur 1: Principe waterstroming door een platenwarmtewisselaar [8]



Figuur 2: Principe waterstroming door een buizenwarmtewisselaar (bron: www.pipingdesign.nl)

Vanwege de efficiëntie van een platenwarmtewisselaar is het benodigde vloeroppervlak van dit type warmtewisselaars beperkt. Doordat de platen erg dicht op elkaar zitten, zit er namelijk veel uitwisselingsoppervlak in een klein volume. Hierdoor worden platenwarmtewisselaars vaak toegepast in aquathermiesystemen. Buizenwarmtewisselaars zijn vaak iets groter, maar daarmee ook robuuster. Dit type warmtewisselaar wordt dan ook vaak toegepast in industriële toepassingen.



Figuur 3: Foto van een platenwarmtewisselaar in een aquathermiesysteem in Pijnacker



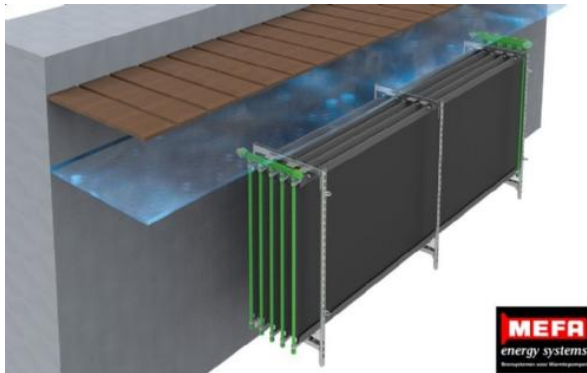
Figuur 4: Foto van een shell and tube warmtewisselaar (bron: www.tricormetals.com)



Figuur 5: Foto van een beunkoeler die vaak worden toegepast in schepen (www.nrf.eu)

1.1.2 Gesloten warmtewisselaars in aquathermie

Naast open systemen, kan er ook warmte uit het water worden gewonnen door middel van een gesloten systeem. Bij dit soort systemen wordt er een leiding of een plaat in het water gelegd. De leiding fungeert dan als warmtewisselaar waardoor het water in de leiding niet in aanraking komt met het omgevingswater. Hierdoor treedt geen vervuiling in de installatie op. Dit type warmtewisselaars wordt vaak toegepast bij de winning van thermische energie uit afvalwater, om daarmee wel de warmte uit het afvalwater te winnen, maar het afvalwater niet door de warmtewisselaar heen te laten stromen.



Figuur 6: Gesloten warmtewisselaar met platen naast een kademuur voor een TEO installatie (bron: MEFA systems)



Figuur 7: Gesloten warmtewisselaar met slangen voor een TEO installatie (bron: Ynergy)



Figuur 8: Gesloten warmtewisseling in een damwand (bron: energie-damwanden)



Figuur 9: Gesloten warmtewisselaar die worden toegepast bij TEA. a) schaaldelen in riool (bron: Uhrig), b) buis om rioolbuis (bron: Frank GHMB), c) rioolbuis met interne warmtewisselaar (bron: KD International B.V. - Rabtherm Energy Systems)

Voor een goede warmteoverdracht is het geleidingmateriaal van belang. In de foto's van de gesloten systemen (Figuur 6 tot Figuur 9) is te zien dat overdrachtsmateriaal per toepassing verschilt. Omdat het leidingmateriaal van invloed is op de warmteoverdracht, wordt de warmteoverdracht hier vaak door gelimiteerd. Bij de kleine temperatuurverschillen waar aquathermie mee werkt (orde 5°C)

kunnen verliezen in warmte de efficiëntie van het systeem ernstig beïnvloeden. Hoewel er geen vervuiling optreedt in de leidingsystemen, de leiding werkt immers als warmtewisselaar, kan enige vervuiling / aangroei op de leiding zorgen voor verminderde warmteoverdracht. In het ontwerp moet hiervoor gecompenseerd worden door de lengte van de leiding voldoende lang te maken.

Doordat er geen uitwisseling van water is met de omgeving kan er voor worden gekozen om een andere werkvloeistof (denk aan water-glycol mengsel) toe te passen in de warmtewisselaar. Hiermee kan de werkvloeistof meteen aan de warmtepomp worden geleverd. Als dit het geval is, dan moet het risico op lekkage worden beheerst, zodat de werkvloeistof niet in het omringende water kan komen.

Omdat het water bij dit gesloten systemen voor TEO toepassingen niet langs de warmtewisselaar wordt geforceerd, is het van belang dat deze systemen in stromend water worden geplaatst, zodat er continue voldoende vers water wordt aangevoerd om warmte uit te oogsten. Bij stilstaande watersystemen kan het water rondom het gesloten TEO systeem in het slechtste geval dezelfde temperatuur aannemen als de temperatuur in de buis, waardoor warmte uitwisseling onmogelijk wordt.

Een voordeel van gesloten systemen is dat deze systemen vaak energiezuiniger zijn, omdat alleen de interne vloeistof rond gepompt hoeft te worden. Dit kost normaliter weinig energie.

1.1.3 Vervuiling

Vervuiling is een van de grootste uitdagingen voor warmtewisselaars. Bij open systemen kan het vuil in de warmtewisselaar achterblijven, waardoor een warmtewisselaar kan verstoppert. Bij gesloten systemen kan er een laagje vuil achterblijven op de warmtewisselaar wat de warmteoverdracht kan beperken.

Als vervuiling de (geautomatiseerde) filtering weet te passeren, dan kan het de warmtewisselaars verstoppert. In Figuur 10 en Figuur 11 zijn vervuiling te zien in een platenwarmtewisselaar en in een buizenwarmtewisselaar van een industriële toepassing. Om dit soort vervuiling te verwijderen moet de warmtewisselaar vaak worden gereinigd. Als dit niet automatisch kan (bijvoorbeeld door vastzittend vuil), dan moet de warmtewisselaar worden ontmanteld.



Figuur 10: Foto van vervuiling in een platenwarmtewisselaar in een industriële toepassing



Figuur 11: Foto van vervuiling in een buizenwarmtewisselaar van een industriële toepassing

Om vervuiling van open systeem warmtewisselaar, zoals platenwisselaars en buizenwisselaars te voorkomen wordt er vaak filtering toegepast. Deze filtering moet afgestemd zijn op de

doorstroomopeningen in de warmtewisselaar. Dat betekent dat de filtermaaswijdte kleiner moet zijn dan de narrowste doorstroomopening in de warmtewisselaar. Voor een efficiënte warmteoverdracht is een minimale doorstroomopening tussen de uitwisselende oppervlakten gewenst. Dit bepaalt maximale filtermaat.. Bij platenwisselaars worden vaak filters toegepast met een filtermaaswijdte tussen de 50-500 μm , terwijl dit bij buizenwisselaars vaak een orde groter (millimeters tot centimeters) is. De warmteoverdracht van een platenwisselaar is daarmee ook efficiënter dan van een shell and tube buizenwisselaar, terwijl een buizenwisselaar vaak weer robuuster (verstopt minder snel bij grotere deeltjes in het water) is dan een platenwisselaar.

1.1.4 Ecologie

Het belangrijkste verschil voor de ecologie tussen gesloten systemen en open systemen is de filtering. Bij beide systemen wordt er warmte uit het water gewonnen wat een ecologisch effect kan hebben. Maar bij open systemen wordt het water gefilterd en hierbij worden organismen uit het water gehaald. Een deel van de organismen die bij open systemen worden ingezogen zal de filtercyclus niet overleven, hetgeen een ecologische impact zal hebben. De mate van filtering bepaalt hierbij welk deel van de organismen wordt afgevangen in het filter. Indien er alleen grove filtering (>1 mm) nodig is om de warmtewisselaar te beschermen, dan is de ecologische impact kleiner dan wanneer fijne filtering wordt toegepast (<100 μm)

Omdat bij gesloten systemen alleen de warmte wordt uitgewisseld, maar het water verder ongemoeid wordt gelaten, is de ecologische impact bij gesloten systemen alleen gelinkt aan de temperatuurverandering.

1.2 Doelstelling

In dit rapport wordt verder ingegaan op de potentie van aquathermie door warmtewinnen met gesloten systemen. De belangrijkste onderzoeksvraag luidt:

Kan aquathermie worden toegepast op grote schaal met warmtewisselaars zonder benodigde fijnfiltering?

Dit rapport beschrijft de drijvende krachten voor warmteoverdracht. Daarnaast wordt er onderzocht wat de warmtewinning per volume eenheid en per oppervlakte-eenheid is om een vergelijking te kunnen maken tussen gesloten en open systemen voor thermische energie uit oppervlaktewater.

2 Warmteoverdracht

Warmteoverdracht in aquathermie vindt plaats door convectie waarbij warmte wordt overgedragen tussen water en een wand. Bij geforceerde convectie wordt de stroming langs de warmtewisselaar veroorzaakt door een pomp. Dit zorgt voor een hoge stroomsnelheid en hoge turbulentiegraad wat de warmteoverdracht bevordert. Bij vrije convectie wordt de stroming veroorzaakt door omgevingsvariabelen. Hierbij is de stroomsnelheid en de turbulentiegraad vaak lager, waardoor de warmteoverdracht vaak minder effectief is dan bij geforceerde convectie.

In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste formules voor warmteoverdracht langs een verticale plaat gegeven. Met deze formules wordt verder uitgerekend wat de potentie is voor gesloten systemen in aquathermie. In paragraaf 2.1 (en Bijlage 1) wordt de theoretische achtergrond van warmteoverdracht beschreven. De ontwerpformules worden getoetst aan de hand van de warmteoverdracht van een gesloten warmtewisselaar van MEFA (paragraaf 2.4).

2.1 Warmteoverdracht warmtewisselaar

Een gesloten systeem onttrekt warmte uit zijn omgeving door middel van uitwisseling over een warmtewisselaar. De warmteoverdracht door de warmtewisselaar (Q) kan, onder versimpelde omstandigheden, worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$Q = UA\Delta T_{LMTD}$$

met U als de (totale) warmteoverdracht coëfficiënt in $W/(m^2 K)$, A als het warmteoverdracht oppervlak in m^2 en ΔT_{LMTD} als het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil over de warmtewisselaar in K . De warmteoverdracht door de warmtewisselaar kan verhoogd worden door het aanpassen van één van de bovengenoemde variabelen.

Het warmteoverdracht oppervlak (A) kan gemakkelijk worden aangepast door gebruik te maken van onderdelen met een groter oppervlak. Er kunnen ook meerdere systemen naast elkaar worden geplaatst om zo het effectieve oppervlak van het gehele systeem te vergroten.

Het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil en de warmteoverdracht coëfficiënt worden in de volgende twee paragrafen uitgewerkt.

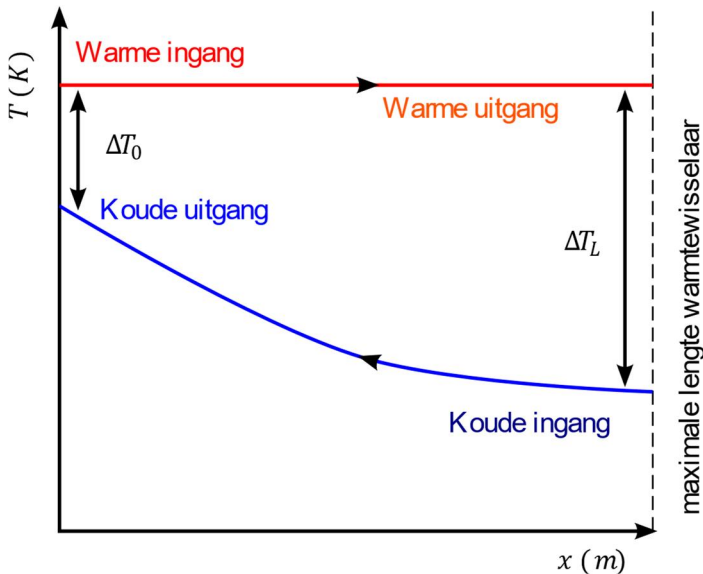
2.1.1 Logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil

De warmteoverdracht over een warmtewisselaar wordt onder andere bepaald door het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil. Het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil wordt bepaald door het temperatuurverschil aan de in- en uitgang van de warmtewisselaar. De vergelijking voor het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil is als volgt:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_l}{\ln \Delta T_0 - \ln \Delta T_l}$$

met daarbij het temperatuurverschil over de ingang als ΔT_0 en het temperatuurverschil over de uitgang als ΔT_L beide uitgedrukt in de eenheid kelvin (K).

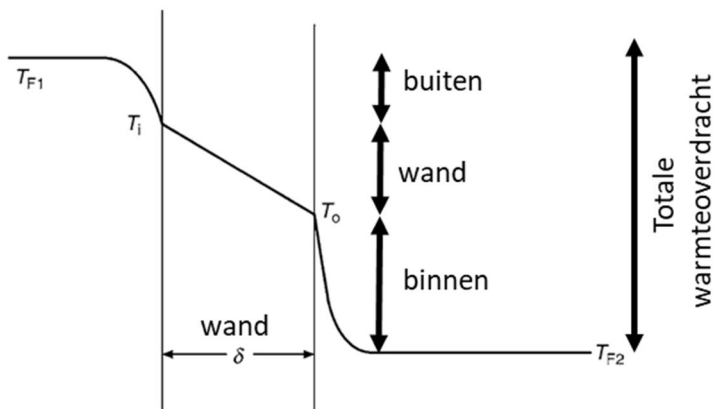
Het logaritmisches gemiddelde temperatuurverschil is afhankelijk van de richting waarover warmte wordt uitgewisseld. Figuur 12 toont een warmtewisselaar in een optimale configuratie waarbij de stroomrichting van de warme en koude kant tegenovergesteld aan elkaar is. In deze figuur wordt er van uitgegaan dat de warmtetoevoer voldoende groot is voor de onttrekking, waardoor de temperatuur aan de warme zijde (oppervlaktewater) niet afneemt. Er kan minder warmte worden overgedragen als de stroomrichting van de warme en koude kant in een warmtewisselaar gelijk is.



Figuur 12: Logaritmisches gemiddelde temperatuurverschil voor een warmtewisselaar met tegengestelde stroming. Het temperatuurverschil over de inlaat (ΔT_0) en de uitlaat (ΔT_L) bepaald het logaritmisches gemiddelde temperatuurverschil. De temperatuur aan de warme zijde blijft constant als het waterlichaam voldoende groot is en dus niet afkoelt door de warmteonttrekking.

2.1.2 Warmteoverdrachtscoëfficiënt

De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt door een wand wordt bepaald door 3 factoren: de warmteoverdracht aan de binnenzijde, de warmteoverdracht door de wand en de warmteoverdracht aan de buitenzijde. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 13.



Figuur 13: Elementen van warmteoverdracht door een vlakke wand zonder vervuiling

De warmteoverdracht door een plaat (zonder vervuiling) kan worden bepaald met behulp van de volgende vergelijking, die opgebouwd is uit de 3 componenten zoals te zien in Figuur 13:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{A_i R_w} + \frac{1}{h_o A_o}$$

binnen
wand
buiten

met daarbij het warmteoverdracht oppervlak aan de binnenzijde van de warmtewisselaar als A_i en aan de buitenzijde van de warmtewisselaar als A_o , de warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de binnenzijde h_i en aan de buitenzijde h_o van de warmtewisselaar, en de warmteoverdrachtscoëfficiënt door geleiding over de wand van de warmtewisselaar als R_w . Indien er vervuiling aan de binnenwand of aan de buitenwand zit, dan komen er nog 2 componenten in de bovenstaande vergelijking bij om het verlies door vervuiling aan de wand te beschrijven.

Tabel 2.1 toont typische waarde voor de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt (U) [3]. De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt is sterk afhankelijk van de omgeving waarin de warmtewisselaar wordt geplaatst. Een warmtewisselaar die vrij in het water hangt en alleen warmte overdraagt door stroming langs de warmtewisselaar (vrije convectie) zal een lagere totale warmteoverdrachtscoëfficiënt hebben dan een buis waar warm water door gepompt wordt (geforceerde convectie). Ter referentie, is in Tabel 2.1 ook de warmteoverdracht van een plaatwarmtewisselaar weergegeven. Door het gebruik van dunne metalen platen van minder dan 1mm dik en smalle doorstroomopeningen met een hoge stroomsnelheid/turbulentiegraad is de warmteoverdracht bij platenwisselaars hoog.

Tabel 2.1 Typische waarde van de warmteoverdrachtscoëfficiënt

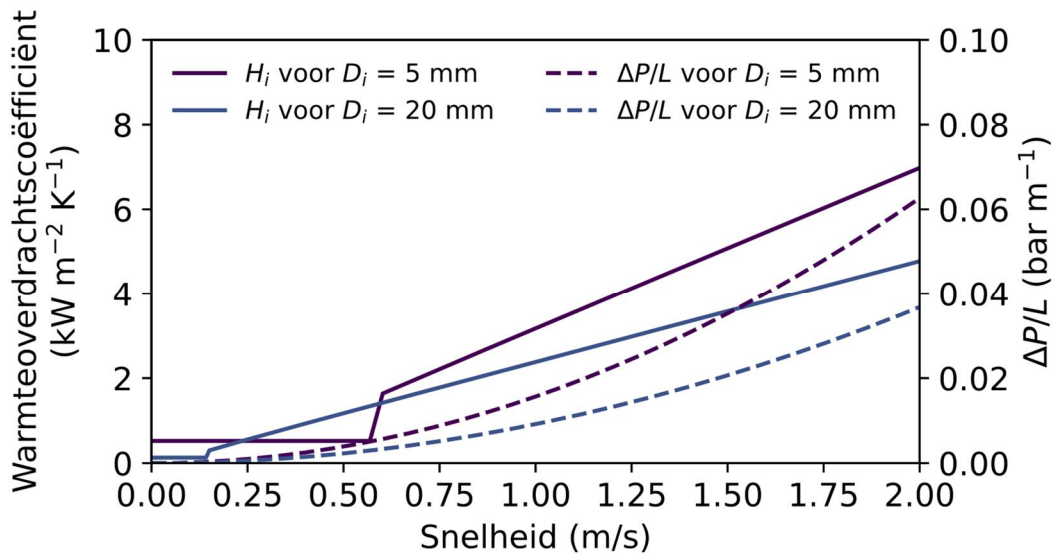
Type	Warmteoverdrachtscoëfficiënt (W m ⁻² K ⁻¹)
Vrije convectie in water	100 – 1200
Water in buizen	500 – 1200
Platenwarmtewisselaar	1000 – 4000

De range in totale warmteoverdrachtscoëfficiënten is nog aanzienlijk. De warmteoverdrachtscoëfficiënten voor de binnenzijde, de wand en de buitenzijde zijn verder beschreven in Bijlage 1. Deze coëfficiënten zijn gebruikt in een theoretisch model om de warmteoverdracht van een plaat te bepalen.

2.2 Effecten stroomsnelheid en turbulentiegraad

Figuur 14 toont de warmteoverdrachtscoëfficiënt op basis van stroomsnelheid en diameter. Het vlakke deel in deze grafiek is de warmteoverdracht voor een laminaire buisstroming. Als de stroomsnelheid omhoog gaat, dan wordt de stroming turbulent wat de warmteoverdracht verhoogt. Een turbulente stroming in de buis is gewenst om een hoge warmteoverdracht vanuit de buitenwand naar de vloeistof te krijgen. Het transitiepunt voor laminaire naar turbulente stroming is te zien in de sprongen in de figuren op respectievelijk 0.1 en 0.55 m/s. Andere manieren om de turbulentiegraad te verhogen zijn: de diameter van de buis verkleinen, de eigenschappen van de werkvloeistof aan te passen (viscositeit te verlagen en de thermische geleidbaarheid te verhogen) of de stroomsnelheid van de vloeistof verhogen. Daarnaast is duidelijk te zien dat de diameter van een buis een significante

invloed heeft op de warmteoverdrachtscoëfficiënt (zie Figuur 14), maar daarnaast heeft een kleinere buisdiameter ook een grotere drukval zoals te zien is in de gestippelde lijn.



Figuur 14 De warmteoverdrachtscoëfficiënt (U) voor een buis gevuld met water, een variabele binnen diameter en een oppervlakte ratio (A_o/A_i) gelijk aan 1. De warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt weergegeven door de punten en de drukverlies per meter lengte door de onderbroken lijnen.

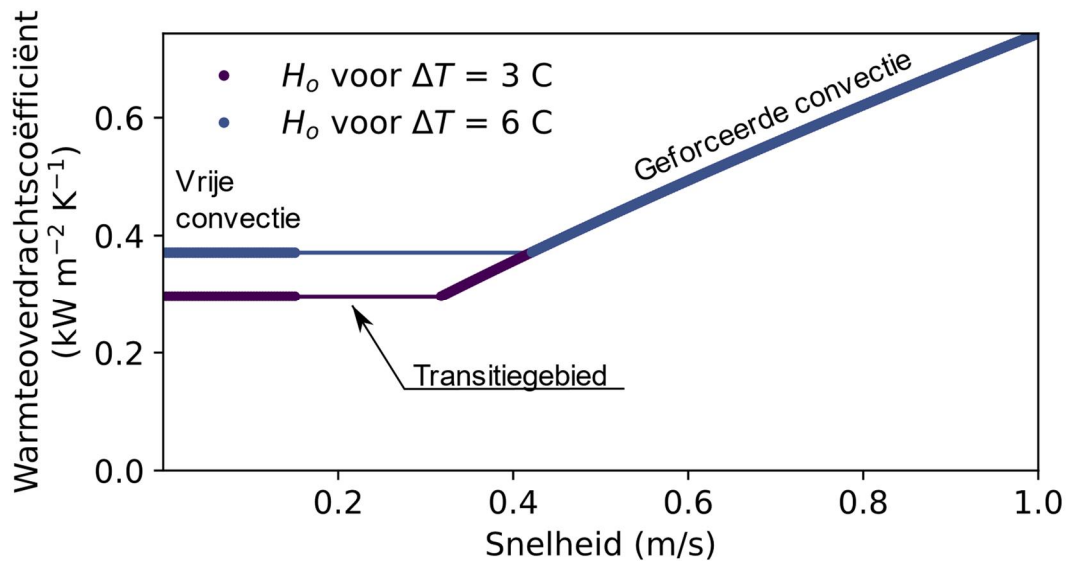
Het vermogen dat kan worden onttrokken met behulp van een gesloten systeem is afhankelijk van een beperkt aantal parameters. De werkvloeistof in de warmtewisselaar kan worden vervangen door een alternatief, zoals een water-glycol mengsel. Een aanpassing van de werkvloeistof vereist extra maatregelen omdat de werkvloeistof niet uit de warmtewisselaar mag lekken [2]. Omdat dit voor systemen die in het water liggen vaak geen optie is, blijven er twee belangrijke parameters over als er voornamelijk wordt gefocust op de verhoging van de warmteoverdrachtscoëfficiënt. Namelijk de turbulentiegraad (Reynolds getal) aan de binnenkant en de buitenkant van het systeem.

Het Reynolds getal aan de binnenzijde van de warmtewisselaar kan worden verhoogd door de interne diameter van systeem te verkleinen. Er zal in dit geval een balans moeten worden gevonden tussen het drukverlies over de warmtewisselaar en de gerealiseerde verhoging van de warmtegeleidingscoëfficiënt (zie Figuur 14), omdat beide toenemen bij een hogere stroomsnelheid (en dus een hogere turbulentiegraad).

Het Reynolds getal aan de buitenzijde van de warmtewisselaar is lastiger te veranderen, omdat het afhankelijk is van de stroomsnelheid om de warmtewisselaar. Een verhoging van de stroomsnelheid totdat er geforceerde convectie optreedt is gunstig voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de warmtewisselaar. Er kan eventueel een stroming worden opgewekt door een pomp om zo de warmteoverdracht te forceren. Er zal opnieuw een afweging moeten worden gemaakt tussen de energie benodigd voor het rondpompen van het water en de bereikte verhoging van de warmteoverdrachtscoëfficiënt.

Figuur 15 toont het verschil in warmteoverdrachtscoëfficiënt voor de convectie langs een verticale plaat als de stroomsnelheid langs de verticale plaat toeneemt. In deze figuur is een lengte van 1m aangehouden als uitwisselingsoppervlak. De warmteoverdracht in het geval van vrije convectie is gelimiteerd en kan alleen toenemen met een verandering van het temperatuurverschil tussen de

omgeving en de warmtewisselaar. Door middel van geforceerde convectie kan de warmteoverdrachtcoëfficiënt stijgen.



Figuur 15 Rekenvoorbeeld voor convectie langs een verticale warmtewisselaar voor een variatie in stroomsnelheid op basis van een warmtewisselaar lengte van 1m. De figuur toont daarnaast de invloed van temperatuur op de vrije convectie (d.w.z., lage Reynolds getallen) en de hogere warmteoverdracht bij geforceerde convectie.

2.3 Effecten van vervuiling

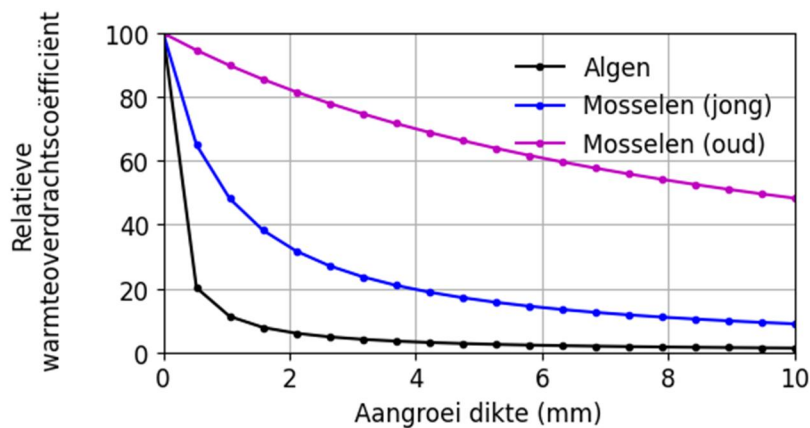
Vervuiling vermindert de warmteoverdracht. Bij open systemen wordt het water ingenomen en gefilterd om de vervuiling te beperken. Bij een gesloten systeem is er minder risico op vervuiling de leiding, maar wel op de leiding. Het systeem kan alleen vervuilen door aangroei op de warmtewisselaar. Daarnaast is het systeem minder gevoelig voor vervuiling door (groot) organisch materiaal. Er is alleen vervuiling door macro- en microfouling aan de buitenzijde van de warmtewisselaar. Een gesloten systeem moet, net als een open systeem, regelmatig schoongemaakt worden. Het schoonmaken van een gesloten systeem is vaak eenvoudiger dan een open systeem, omdat het warmteoverdracht oppervlak vaak meteen schoongemaakt kan worden. Echter, doordat gesloten systemen direct in het water hangen en niet in een technische ruimte zijn installeert moet in het ontwerp met de onderhoudsinspanning rekening gehouden worden.

De vervuiling door macro- en microfouling heeft een negatieve invloed op de prestaties van de warmtewisselaar, omdat de thermische geleidbaarheid door de wand van de warmtewisselaar afneemt. De biologische aangroei heeft een isolerende werking ten opzichte van materialen die typisch worden gebruikt voor warmtewisselaars. Tabel 2.2 presenteert een overzicht van de thermische geleidbaarheid van twee type biologische aangroei ten opzichte van de thermische geleidbaarheid van een referentie materiaal. Tabel 2.2 laat zien dat de thermische geleidbaarheid van biologische aangroei vele malen lager is dan de thermische geleidbaarheid van het referentie materiaal (staal) waardoor de totale warmteoverdracht significant kan afnemen door aangroei.

Tabel 2.2 Thermische geleidbaarheid van (biologische) vervuiling door algen en mosselen.

Vervuilingstype	Thermische geleidbaarheid (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Algen ¹ (vergelijkbaar met de thermische geleidbaarheid van water)	0,6
Mosselen (jong) ²	4,4
Mosselen (volwassen)	12,8
Referentie materiaal (staal)	42,0

De thermische geleidbaarheid voor een selectie van biologische aangroei wordt gegeven in Tabel 2.2. Figuur 16 toont de procentuele afname van de warmteoverdrachtscoëfficiënt ten opzichte van een referentie situatie zonder biologische aangroei. Er is een snelle afname van de warmteoverdrachtscoëfficiënt bij een kleine toename van de biologische aangroei van algen, dan bij aangroei van mosselen, waar een dikkere laag nodig is voor een vergelijkbare afname van de warmteoverdracht.



Figuur 16 Relatieve afname van de warmteoverdrachtscoëfficiënt met toenemende aangroei dikte.

De vervuiling door macro- en microfouling resulteert in een afname van de thermische geleidbaarheid van het systeem, waardoor de warmteoverdrachtscoëfficiënt vermindert. De afname van de thermische geleidbaarheid wordt bepaald door de laagdikte. De aangroeisnelheid van het biologische materiaal bepaald daardoor het vereiste tijdsinterval tussen schoonmaak procedures. De aangroeisnelheid van het biologisch materiaal hangt samen met de milieucondities op de locatie van de warmtewisselaar. Een hoge stroomsnelheid werkt bevorderend voor soorten die afhankelijk zijn van hechting, zoals mosselen en algen, doordat deze soorten afhankelijk zijn van stromend water voor hun voedselvoorziening [2].

2.4 Validatie

De effecten zoals in de bovenstaande paragrafen beschreven zijn gevalideerd aan de hand van beschikbare specificaties van een gesloten MEFA warmtewisselaar (MEFA water – 1235 [6] – Figuur 6). Deze warmtewisselaars worden gemaakt van een combinatie van roestvast staal (RVS) en polypropyleen (PP). De wisselaars kunnen worden gecombineerd tot grotere systemen. In de

¹ Fu et al. *Investigation on effective thermal conductivity of microalgae suspension in a shear flow* 2021

² Maksassi et al. *Thermal characterization of biofouling around dynamic submarine electrical cable*, 2021

huidige analyse wordt een systeem vergeleken met twee gekoppelde warmtewisselaars (MEFA water 2x1235 art. nr. E8019794) de specificaties zijn weergegeven in Tabel 2.3. Er heeft op de warmtewisselaar nog geen biologische aangroei plaats gevonden. Daarnaast wordt er aangenomen dat de warmtewisselaar is gevuld met water. In realiteit zijn de systemen van MEFA gevuld met een water-glycerol oplossing om een hogere warmte overdracht te realiseren.

Tabel 2.3 Specificaties van het MEFA water systeem [6].

Naam	Variabele	Waarde	Eenheid
Opgewekt vermogen	Q	5,0	kW
Lengte van het systeem	L	3,6	m
Hoogte van het systeem	H	1,55	m
Breedte van het systeem	B	0,5	m
Aantal platen	N	2	-
Volumestroom	Q_{in}	1,5	m ³ h ⁻¹
Warmte overdracht oppervlak per plaat (2-zijdig)	A_o	11,16	m ²
Dikte materiaal (aangenomen)	t	1	mm
Plaatbreedte	D	6	mm
Thermische geleidbaarheid PP	k	0,17	W m ⁻¹ K ⁻¹

Er wordt aangenomen dat het systeem geplaatst wordt in oppervlaktewater met een minimale stroomsnelheid ($U < 0.1$ m/s). Daarnaast wordt aangenomen dat het oppervlaktewater een temperatuur heeft van 20 °C en is er tussen de warmtewisselaar en het oppervlakte water een temperatuurverschil van ongeveer $\Delta T = 3$ K.

Het is belangrijk om op te merken dat er voldoende warmte en aanvulling van warmte aanwezig dient te zijn als er nauwelijks stroming is rondom de warmtewisselaar [2]. Het kleine temperatuurverschil in combinatie met een gelimiteerde achtergrondstroming kan resulteren in een isolerende waterlaag rondom de warmtewisselaar, waardoor de warmteoverdrachtscoëfficiënt afneemt. Deze situatie is te vergelijken met de aangroei van algen waarbij de warmte geleidingscoëfficiënt gelijk is aan die van water.

De rekenmethode zoals gepresenteerd in de voorgaande paragrafen resulteert in een warmteoverdrachtscoëfficiënt van ongeveer 76 W m⁻² K⁻¹, waar MEFA zelf een warmteoverdrachtscoëfficiënt van ongeveer 75 W m⁻² K⁻¹ bepaald [6].

3 Kansen voor aquathermie

Het benodigde vermogen uit de warmtewisselaar voor een gemiddelde woning is zo'n 5 kW [4], [5]. Dit betekent dat een MEFA systeem met 2 platen in open water geschikt is voor warmtelevering voor een woning. Dit vereist een installatie met een lengte van 3,6 meter, een hoogte van 1,55 meter en een breedte van 0,5 meter (zie Tabel 2.3). Om het vermogen op te wekken is respectievelijk een volume en oppervlak van ongeveer 2,8 m³ en 1,83 m² nodig in het watersysteem. Hier moet de waterdiepte wel voldoende zijn voor de warmtewisselaar.

Als we dit vergelijken met een open systeem, dan moet het water worden verpompt en gefilterd voordat de warmte-uitwisseling plaats kan vinden. Hiervoor is een pompput nodig en een technische ruimte waar deze systemen gecombineerd kunnen worden. Ter referentie, Callic bouwt dit soort oplossingen in Hoofddorp, waar 2.3MW wordt gewonnen met een technische ruimte ter grootte van 70m³ en 26.5m².

Open versus gesloten systeem

In Tabel 3.1 is de ratio tussen de vermogens per volume eenheid en per oppervlakte-eenheid weergegeven. Hierbij moet worden opgemerkt, dat een gesloten systeem deze ruimte nodig heeft in een watersysteem waarbij het warmte-uitwisselingsoppervlak volledig onder water moet zitten en bij een open systeem staat deze ruimte op land. Hoewel open systemen vaak worden toegepast bij grotere systemen voor woonwijken (> 300 kW) en gesloten systemen zich meer richten op enkele huizen / gebouwen (< 30 kW), blijkt uit deze tabel dat het vermogen dat per volume en oppervlakte-eenheid veel groter is voor open systemen dan voor gesloten systemen. Omdat gesloten systemen meer volume in beslag nemen is er vaak ook meer materiaal voor nodig. Dit heeft grote invloed op de materiaalkosten per kW en daarmee de prijs per kW en de CO₂ uitstoot per kW voor het construeren van het systeem.

Tabel 3.1: vergelijking tussen warmtewisseling met een open systeem (Hyde Park Hoofddorp – Callic) en met een gesloten systeem (MEFA systems)

	vermogen (kW)	vermogen t.o.v. volume (kW/m ³)	vermogen t.o.v. oppervlak (kW/m ²)
gesloten	5	1.8	2.7
open	2300	32.6	86.7

Ruimtegebruik

Zowel open als gesloten systemen hebben ruimte nodig in het oppervlaktewater. Het gesloten systeem van MEFA zoals beschreven in deze studie is 1.55m hoog, wat voor een waterlichaam al een aanzienlijke diepte is. Deze systemen kunnen ook kleiner worden uitgevoerd, maar dan zal de lengte moeten toenemen bij een vergelijkbare warmteoverdracht. Open systemen daarentegen hebben ook een waterdiepte nodig van een halve tot één meter om te voorkomen dat er lucht van het oppervlak wordt aangezogen en om te voorkomen dat er slib van de bodem wordt ingezogen.

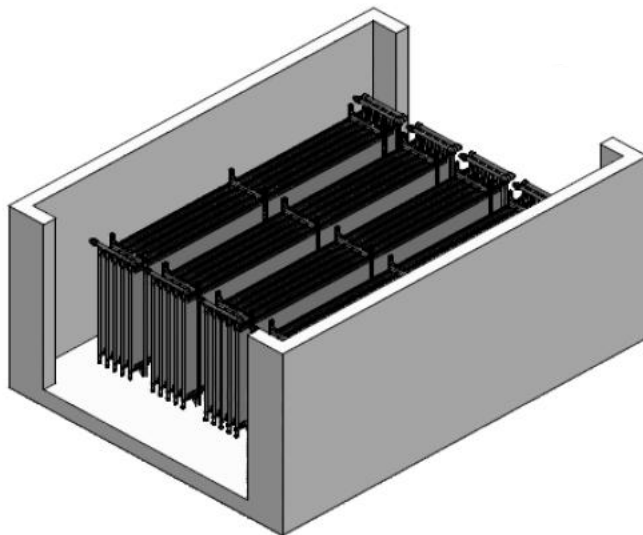
Vervuiling

Vervuiling speelt een groter rol bij open systemen dan bij gesloten systemen. Zo zorgt een dun laagje vervuiling op een titaniumplaat in een warmtewisselaar meteen voor een significante afname in warmteoverdracht, terwijl dit bij een gesloten warmtewisselaar minder zwaar doorwerkt in vermogensafname. Om deze redenen is filtering en onderhoud bij open systemen essentieel en belangrijker bij open systemen dan bij gesloten systemen.

Vergroten potentie gesloten systemen

Om het vermogen van gesloten systemen te verhogen moet de stroomsnelheid worden verhoogd of moet het materiaal worden aangepast. Omdat het systeem in oppervlaktewater wordt toegepast is robuustheid belangrijk voor gesloten systemen. Om deze reden wordt er vaak plastics gebruikt voor de plaatwanden ten opzichte van metalen bij open systemen.

De stroomsnelheid kan ook worden verhoogd door de platen in een bak te plaatsen waar langs water wordt gepompt (Figuur 17). Deze warmteoverdracht is uitgerekend voor een MEFA systeem in een gootconstructie. Door het verhogen van de stroomsnelheid van 0.1m/s naar 1,0 m/s, kan de warmteoverdracht met 25% worden verhoogd. Na gebruik zal het ingenomen water ook weer teruggespoeld moeten worden in het oppervlaktewater, waardoor eventueel hoge snelheden rond het uitlaatpunt kunnen ontstaan.



Figuur 17: Voorbeeld van meerdere gesloten systemen in een gezamenlijke bak ([6])

Shell and tube warmtewisselaars in gesloten buizen

Omdat de buizen in een shell and tube warmtewisselaar vaak grotere diameters (1-5cm) hebben, is het voor shell and tube warmtewisselaars niet nodig om op sub-millimeter niveau te filteren. Dit soort warmtewisselaars zijn er in grote variaties te vinden. Shell and tube warmtewisselaars worden vaak in industriële toepassingen ingezet om de warmte over te dragen [7]. Dit soort warmtewisselaars zijn iets groter dan platenwarmtewisselaars, maar vaak ook iets robuuster. Een shell and tube warmtewisselaar zou in een gesloten systeem kunnen worden ingepast door de tubes in een buis na de inlaatconstructie in te bouwen. Ook voor dit type warmtewisselaars moet er gefilterd worden om de tubes niet te laten verstopen, maar dan met een grotere maaswijdte. Dit betekent minder impact op de ecologie, doordat er minder aquatisch leven uitgefilterd wordt en dood zal gaan in het fijne filter. Vissen zullen niet door het filter en de warmtewisselaar heen komen.

Wat betreft oppervlakte en vermogens zijn dit soort warmtewisselaars vergelijkbaar met platenwarmtewisselaar.

Open versus gesloten systemen

In de Tabel 3.2 staat in hoofdlijnen uitgelegd wat de verschillen zijn tussen warmtewisseling in aquathermie voor gesloten en open systemen. Hierbij hebben beide systemen een andere rol als toepassing voor aquathermie.

Tabel 3.2: Vergelijking warmtewinning met behulp van gesloten systemen en open systemen

	gesloten systemen		open systemen	
			platenwisselaar	shell and tube
potentie	enkele huizen (<30kW)		woonwijken (>300kW)	woonwijken (>300kW)
warmteoverdracht	laag door vrije convectie		hoog door geforceerde convectie	hoog door geforceerde convectie
is de warmteoverdracht beïnvloedbaar	beperkt.		tot op zekere hoogte: balans tussen warmteoverdracht - drukval	tot op zekere hoogte: balans tussen warmteoverdracht - drukval
materiaalgebruik	plastic - slechte warmteoverdracht		dun metaal (RVS/titanium) - goede warmteoverdracht	dun metaal (RVS/titanium) - goede warmteoverdracht
filtering	niet nodig		automatische fijne filtering: 50-500 μ m	automatische fijne filtering: 1mm-5cm
aangroei	klein effect		groot effect	groot effect
onderhoud	Eenvoudig, De reiniging vind plaats in het water		Chemische / Thermische reiniging. Mechanische reiniging lastig. De reiniging vind plaats in de technische ruimte	Mechanische reiniging vaak door balletjes door de tubes te blazen De reiniging vind plaats in de technische ruimte
positionering systeem	in het water		in technische ruimte op land. alleen waterinname nodig met pompsysteem	in technische ruimte op land. alleen waterinname nodig met pompsysteem
impact op ecologie	klein doordat er geen filtering nodig is, maar alleen warmteonttrekking		ecologische impact hangt af van mate van filtering, type filtering en warmteonttrekking	ecologische impact hangt af van mate van filtering, type filtering en warmteonttrekking
kosten	hoge prijs/kW door benodigde hoeveelheid materiaal		lage prijs/kW door beperkte hoeveelheid materiaal en vloeroppervlak	lage prijs/kW door beperkte hoeveelheid materiaal en vloeroppervlak. vaak iets duurder dan platenwisselaars

De kosten voor shell and tube warmtewisselaars zijn vaak iets hoger dan voor een platenwarmtewisselaars. Dit komt onder andere door de grotere hoeveelheid materiaal die nodig is om de verminderde warmteoverdracht te compenseren. Echter hierbij dient te worden opgemerkt dat de kosten voor aanschaf van een warmtewisselaar ondergeschikt zijn aan de totale kosten van het aquathermiesysteem (inclusief technische ruimte, leidingwerk, WKO en energiecentrale) [9].

4 Conclusies

Aquathermie kan gewonnen worden met gesloten en open systemen. Bij open systemen wordt het water ingenomen met een pomp, waarna het wordt gefilterd en de warmte wordt gewonnen in een warmtewisselaar. Bij een gesloten systeem komt er geen filtering en pomp aan te pas en wordt de warmtewisselaar direct in het water gelegd. In deze studie is gekeken naar de potentie van gesloten systemen voor aquathermie en de potentie om dit soort systemen op grotere schaal toe te passen. Daarbij is een vergelijking gemaakt tussen gesloten systemen en open systemen waar gebruik wordt gemaakt van platen warmtewisselaars met fijne filtering en buizenwarmtewisselaar (shell and tube) waar grovere filtering wordt toegepast.

Gesloten systemen hebben als voordeel dat het water niet gefilterd hoeft te worden en dat alleen de warmte uit het water wordt gewonnen. Hierdoor is het effect van dit soort systemen op de ecologie kleiner dan bij open water systemen. De potentiële warmtewinning voor gesloten systemen is echter vele malen kleiner dan bij open systemen. Dat komt doordat het materiaal van gesloten systemen ook bestand moet zijn tegen de omstandigheden van het water, waardoor het systeem robuust moet worden ontworpen met materialen die minder efficiënt zijn in warmteoverdracht dan open systemen. Zo wordt er bij gesloten systemen vaak plastics gebruikt terwijl bij open systemen metalen worden toegepast met een veel hogere warmteoverdracht. Daarnaast zijn gesloten systemen afhankelijk van de stroomsnelheid en de turbulentiegraad in het omringende water. Deze is vaak beperkt, waardoor niet alle warmte efficiënt wordt gewonnen. Bij open systemen wordt het water onttrokken aan het oppervlaktewater en wordt de warmte gewonnen in een technische ruimte op land. Bij open systemen is deze efficiëntie vaak hoger, omdat het water tussen de platen van de platenwarmtewisselaar of door de buizen van de shell and tube warmtewisselaar wordt geperst. Hierdoor wordt de turbulentiegraad geoptimaliseerd voor een efficiënte warmteoverdracht.

Bij platenwisselaars wordt vaak fijne filtering toegepast, om de warmtewisselaars schoon te houden. Afhankelijk van het ontwerp van de warmtewisselaar is een bepaalde maaswijdte van filtering nodig, wat invloed heeft op de ecologie en het onderhoud van de installatie. Indien vanuit de ecologie een beperkte mate van filtering wordt toegestaan, dan kan het ontwerp van de warmtewisselaar hierop worden aangepast (denk aan shell and tube warmtewisselaars of grotere tussenruimte bij platenwarmtewisselaars). Dit heeft vaak wel financiële consequenties omdat de warmtewisselaar daarmee groter en duurder wordt.

Tot nu toe worden gesloten systemen vaak toegepast voor enkele woningen (1-5 huizen), terwijl open systemen worden toegepast voor hele woonwijken (>50 woningen). Om met gesloten systemen grote vermogens op te wekken voor hele woonwijken, is veel ruimte in een waterlichaam nodig, wat vaak niet beschikbaar is. Om de warmteoverdracht van gesloten systemen te verhogen kunnen gesloten systemen (platen of buizensysteem) in een goot worden geplaatst waar het omgevingswater met een pomp langs wordt geforceerd. Hiermee ontstaat geforceerde convectie waardoor de warmteoverdracht toeneemt. Hierbij dient echter wel te worden opgemerkt, dat door het ruimtebeslag, het vrijwel onmogelijk gaat zijn om met gesloten systemen hele woonwijken van thermische energie uit oppervlaktewater te voorzien, zoals met open systemen wel mogelijk is.

Referenties

- [1] Favre-Marinet, M., & Tardu, S. (2009). *Convective heat transfer*. John Wiley & Sons.
- [2] De Fockert, A. & Harezlak, V. (2021). *Ontwerphandleiding Aquathermie-TEO*. WarmingUP rapport.
- [3] Incropera, F. P., Wlitt, D. P., Bergman, T., & Lavine, A. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- [4] Roosjen, R., van der Brugge, R., de Fockert, A. & van der Veen, B. (2021). *Grootschalige aquathermie: realistische warmteoptie?*, WarmingUP rapport
- [5] RVO (2022, 5 24). Standaard en streefwaarden voor woningisolatie. Opgehaald van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/wetten-regels/standaard-streefwaarden-woningisolatie>
- [6] MEFA (2021). Datenblatt MEFA water 1235 – Registerbauform, Blatt: E-50-0112-20
- [7] Bitzer (2022), Water Cooled Shell and Tube condensers, ref DP-200-6-EN
- [8] Alfa Laval (2004), The theory behind heat transfer – plate heat exchangers
- [9] Cardose, R. van der Velden, T. Westerweel, J. Niewold, F. Molenaar R., Gedetailleerde kostenberekening aquathermie - Varianten onderzoek en gedetailleerde kostenberekeningen. WarmingUP rapport – werkpakket 3C

Bijlage 1 Warmteoverdracht

1.1 Aannames warmteoverdracht

De warmteoverdracht met behulp van het logaritmisches gemiddelde temperatuurverschil kan alleen worden gebruikt als de volgende aannames geldig zijn:

- De vloeistof eigenschappen veranderen niet binnen het temperatuurbereik van de analyse. Een faseovergang door de overdracht van warmte is niet mogelijk
- De (totale) warmteoverdracht coëfficiënt verandert niet binnen het temperatuurbereik van de analyse.
- De analyse is alleen geldig voor problemen in een stabiele toestand (d.w.z. steady state).
- Een verandering in kinetische en potentiële energie wordt verwaarloosd.

1.2 Warmteoverdrachtcoëfficiënten

De warmteoverdrachtscoëfficiënten voor deze toepassing zijn overgenomen uit ref [3].

Warmteoverdrachtscoëfficiënt binnenzijde

De warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de binnenzijde wordt bepaald op basis van empirische relaties voor (turbulente) convectie in een ronde buis. Er kan ook met niet ronde buizen worden gerekend met behulp van de hydraulische diameter. Het warmteoverdracht oppervlak van de ronde buis wordt bepaald door de lengte en de diameter. De lengte van de ronde buis is gelijk aan:

$$L_D = \frac{W}{D} L_p$$

met de lengte en de breedte van de warmtewisselaar als L_p en W , en de diameter van de buis als D . Het warmteoverdracht oppervlak van de ronde buis is daardoor gelijk aan $A_i = \pi D L_D$.

De stroming in een ronde buis wordt gekenmerkt door het Reynolds getal,

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

met de stroomsnelheid in de buis als U in m/s en de kinematische viscositeit van de vloeistof als ν in m^2/s . Een stroming is laminair als het Reynolds getal kleiner is dan 2000 en turbulent als het Reynolds getal groter is dan 4000. Een stroming is kritisch als deze een Reynolds getal tussen 2000 en 4000 heeft. In de huidige analyse maken we onderscheid tussen het turbulente regime en het laminaire regime.

De warmteoverdracht aan de binnenzijde van de buis wordt bepaald door de mate van turbulentie van de stroming. Als de stroming laminair is en bij een constant warmtetransport door de wand, kan worden gesteld dat de warmteoverdrachtscoëfficiënt gelijk is aan:

$$h_i = 4.36 \frac{k}{D}$$

met de thermische geleidbaarheid van de vloeistof als k in $\text{W}/(\text{m K})$. Met andere woorden een laminaire buisstroming heeft een constant Nusselt getal (dimensieloze temperatuurgradiënt bij het oppervlak) van 4.36 bij een constant warmtetransport.

Als de stroming in de buis turbulent is ($Re > 3000$) dan is de wandwrijving in de buis relevant voor het warmtetransport. Het Nusselt getal zal dan niet langer constant zijn, maar afhankelijk van de weerstand van de buis (f), het Reynolds getal en een zogenoemd Prandtl getal. Het Prandtl getal (Pr) is ongeveer 6.97 voor water van 20 °C. Het warmtetransport op de volgende manier kan worden beschreven [3]:

$$h_i = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_d - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \frac{k}{D}$$

met de frictiewaarde als f die afhankelijk is van de wandruwheid en het Reynolds getal. De waarde kan worden bepaald met behulp van de Colebrook-White relatie of een Moody-diagram.

Warmtegeleiding door de buiswand

De warmtegeleiding door de wand van de warmtewisselaar wordt gegeven door:

$$R_w = \frac{\Delta x}{k_w A}$$

met de wanddikte als Δx in m en de thermische geleidbaarheid van het materiaal als k in W/(m K). De warmteoverdracht vindt alleen plaats aan de binnenwand, daarom is het oppervlak gelijk gesteld aan het oppervlak van de binnenwand.

Warmteoverdrachtscoëfficiënt buitenzijde

De warmteoverdrachtscoëfficiënt aan de buitenzijde wordt bepaald op basis van empirische relaties voor vrije en geforceerde convectie langs een vlakke plaat. Als een warmtewisselaar het water afkoelt door warmte te onttrekken kan er vrije convectie optreden. Deze vrije convectie langs een vlakke plaat ontstaat door een dichtheidsverschil van de vloeistof door het aanwezige temperatuurverschil langs de vlakke plaat. Er zijn verschillende empirische relaties voor het Nusselt getal [3]. In de huidige analyse is onderstaande empirische relatie gebruikt voor vrije convectie langs een verticale plaat:

$$h_o = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_w^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \frac{k}{W}$$

met daarbij het Rayleigh getal over de lengte van de warmtewisselaar als Ra_w

$$Ra_w = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

Met ν : kinematische viscositeit (m^2/s), β : kubieke uitzettingscoëfficiënt ($1/K$), g : zwaartekrachtsversnelling (m/s^2), L : lengte van de warmtewisselaar (m), T_s : temperatuur oppervlak en T_∞ : temperatuur omgevingswater.

Er kan ook warmte worden getransporteerd door een stroming langs de warmtewisselaar. In zo'n geval spreken we van geforceerde convectie, waarvoor de volgende relatie wordt toegepast:

$$h_o = 0.037 Re_L^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}} \frac{k}{L}$$

met het Reynolds getal gedefinieerd over de lengte van de warmtewisselaar.

Adres

Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht

Postadres

Postbus 80015
3508 TA Utrecht

Telefoon

088 866 42 56

E-mail

contact@warmingup.info

Website

www.warmingup.info