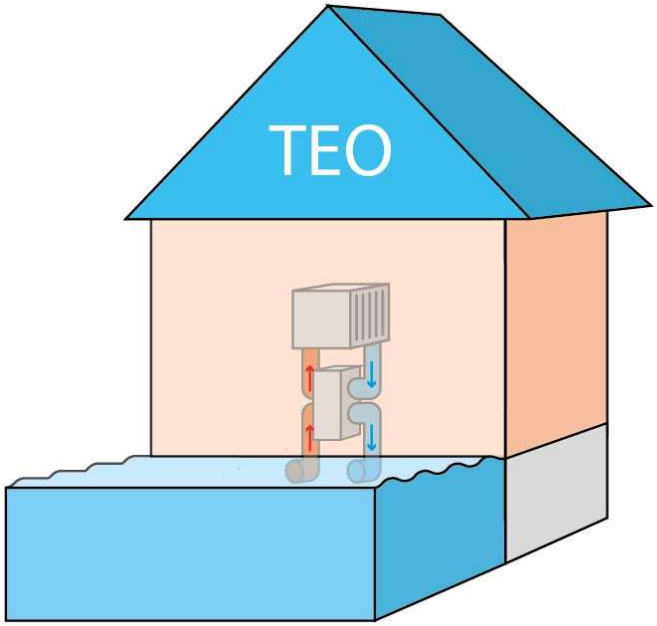
WARMINGUP
Innovatief Duurzaam Warmtecollectief



Ontwerphandreiking Aquathermie-TEO

WarmingUp werkpakket 3C

door
Anton de Fockert
24 november 2021

Ontwerphandreiking Aquathermie-TEO

Anton de Fockert, Valesca Harezlak
24 november 2021

review: Ivo Pothof, Pascal Boderie, Ronald 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 CO_2-vrije gebouwde omgeving in 2050.

Projectnummer
11205156

Keywords
Ontwerphandreiking, TEO installatie, ervaringen

Jaar van publicatie
2021

Meer informatie
Anton de Fockert
T 06 469 111 71
E anton.defockert@deltares.nl

11/2021 ©

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, 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 **6**

1 Inleiding **7**

1.1 Achtergrond 7
1.2 Deze handreiking 7
1.3 Samenstelling werkgroep 8

2 TEO aquathermiesysteem **9**

2.1 Aquathermiesysteem: van bron naar bruikbare thermische energie 9
2.2 Systeemkeuze: TEO met of zonder opslag 10
2.3 Basis model schema 11
2.4 Ontwerpfasen 12

3 Waterkwaliteit en vervuiling **14**

3.1 Introductie 14
3.2 Effecten vervuiling op aquathermiesysteem 15
3.2.1 Microfouling 16
3.2.2 Macrofouling 17
3.3 Watersysteem kenmerken 19
3.3.1 Type Watersysteem 19
3.3.1.1 Stromend 19
3.3.1.2 Stilstaand 20
3.3.2 Geometrie en oriëntatie 20
3.4 Bepaling waterkwaliteit ter plaatse 20
3.5 Effecten op de ecologie 21

4 Hydraulisch systeem **23**

4.1 Weerstandsberekening 24
4.2 Vervuiling 25
4.3 Minimum stroomsnelheid 26
4.4 Dynamisch gedrag 27

5 Systeemonderdelen aquathermie **28**

5.1 Open versus gesloten systeem 29
5.1.1 Open inname 29
5.1.2 Gesloten systeem 30
5.2 Waterinname 30
5.2.1 Positionering waterinname en uitlaat 30
5.2.1.1 Kortsluitstroming 30
5.2.1.2 Verticale positie 31

5.2.2 Inlaatconstructie 32
5.2.2.1 Aan de oever 32
5.2.2.2 Uit de oever 32
5.2.2.3 Koude onttrekking 33
5.2.2.4 Warmte onttrekking 33
5.2.2.5 Voorfiltering 33
5.2.2.6 Doorkruising van waterkering 34
5.2.3 Samenvatting waterinname 34
5.3 Pompen inname 35
5.3.1 Opvoerhoogte 36
5.3.2 Droog versus nat opgestelde pomp 37
5.3.3 Netto positieve zuighoogte (NPSH) 39
5.4 Filters 39
5.4.1 Filtermaaswijdte 40
5.4.1.1 Drukval 41
5.4.1.2 Vervuiling 41
5.4.2 Voorfiltering 41
5.4.3 Fijne filtering 42
5.4.3.1 Hydraulische filters 43
5.4.3.2 Mechanische filters 43
5.4.3.3 Terugspoeling 44
5.4.4 Samenvatting 44
5.5 Warmtewisselaars 45
5.5.1 Randvoorwaarden 46
5.5.1.1 Vereiste capaciteit 46
5.5.1.2 Bedrijfstemperaturen 47
5.5.1.3 Maximum drukval 47
5.5.2 Selectie warmtewisselaar 48
5.5.2.1 Type warmtewisselaar 48
5.5.2.2 Verdere selectie criteria 50
5.5.3 Vervuiling 50

6 Systeem onderhoud en reiniging 52

6.1 Onderhoud 53
6.2 Reiniging 53
6.2.1 Type vervuiling 53
6.2.2 Vervuilingsindicatie 54
6.2.3 Hydraulische reiniging 55
6.2.4 Mechanische reiniging 55
6.2.5 Thermische reiniging 56
6.2.6 Chemische en biologische reiniging 56
6.2.6.1 Reinigingsmiddelen 56
6.2.6.2 Reinigingsmethode 57
6.3 Bescherming filters en warmtewisselaars 57
6.3.1 Titanium 57
6.3.2 Polijsten of coaten 57
6.3.3 MOL katalyse 58

7 Literatuurlijst **59**

Bijlage 1 Uitwerking vervuilingsproblematiek **61**

1.1 Draadalgen 61
1.2 Mosselen 62
1.3 Microbiologisch geïnduceerde corrosie 62

Bijlage 2 Ervaringen met bestaande systemen **64**

Samenvatting

Er zijn verschillende bronnen om warmte uit water te onttrekken (aquathermie). Een methode is om warmte uit het oppervlaktewater te onttrekken. Deze methode staat beter bekend als TEO (thermische energie uit oppervlakte water). Daarnaast is het ook mogelijk om warmte uit drinkwater (TED) en afvalwater te onttrekken (TEA). Het potentieel van de verschillende bronnen om bij te dragen aan de warmtevraag in Nederland is voor TEO zo'n 43%, terwijl het voor TEA zo'n 16% is en voor TED zo'n 1%[1].

Tot op heden zijn er significant meer TEO systemen ontworpen dan TEA en TED systemen. Als aquathermie wordt opgeschaald, dan zal de focus naar alle waarschijnlijkheid in eerste instantie komen te liggen op de ontwikkeling van TEO systemen. Uit ervaringen van bestaande TEO systemen (Bijlage 2), blijkt dat het functioneren van aquathermie systemen op de lange termijn in belangrijke mate wordt bepaald door keuzes in het ontwerp. Om ervaringen uit het verleden mee te nemen in toekomstige installaties, is deze ontwerphandreiking opgesteld. De handreiking geeft achtergrondinformatie over het ontwerp en gangbare technieken. Daarnaast zijn de ervaringen van de verschillende bestaande systemen gebundeld in deze ontwerphandreiking. Met behulp van deze ontwerphandreiking kunnen ontwikkelaars van aquathermiesystemen vooraf beter de aandachtspunten en risico's inschatten die komen kijken bij de ontwikkeling van een TEO aquathermiesysteem.

Deze ontwerphandreiking is geschreven voor ontwikkelaars om te komen tot een betrouwbaar en goed functionerend aquathermiesysteem voor de lange termijn. Uit ervaringen met bestaande projecten is gebleken dat er voldoende kennis moet zijn van de waterkwaliteit en de ecologie van het onttrekkende water om te komen tot een goed ontwerp. Vandaar dat deze handleiding ook ingaat op de effecten van de waterkwaliteit op het aquathermiesysteem. De effecten van de lozingen van het effluent op het oppervlaktewater worden niet verder uitgewerkt. Er worden wel enkele bronnen genoemd die daar verder op in gaan.

Het is de verwachting dat de (praktijk)kennis over TEO systemen de komende jaren zal gaan groeien. Het is daarom ook raadzaam om deze handreiking periodiek te herzien, zodat de nieuwste kennis aan deze handreiking kan worden toegevoegd.

Deze ontwerphandreiking is in 2021 ontwikkeld binnen het WarmingUP kennisprogramma werkpakket 3C, waar gekeken wordt naar de techniek, het ontwerp en de kosten van bestaande aquathermiesystemen

[1] https://www.ce.nl/publicaties/2171/nationaal-potentieel-van-aquathermie

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Anno 2021 zijn er 81 aquathermiesystemen gerealiseerd[2], waarvan 59 thermische energiesystemen uit oppervlaktewater (TEO of EOW), 14 thermische energiesystemen uit afvalwater (TEA of riothermie) en 8 thermische energie uit drinkwater (TED) systemen. Veel systemen draaien zonder veel grote problemen, maar bij sommige systemen vormt het een uitdaging.

Om te leren van de ervaringen van bestaande aquathermiesystemen is deze ontwerphandreiking geschreven, die gebaseerd is op beschikbare kennis van hydraulica, waterkwaliteit en vervuiling/verstopping en op ervaringen met bestaande aquathermiesystemen.

De ontwerphandreiking dient inzichten te geven aan ontwikkelaars van aquathermiesystemen (projectontwikkelaars, technisch ontwerpers, adviesbureaus, warmtebedrijven, etc.). Door te ontwerpen aan de hand van de ontwerphandreiking kan een goed basisontwerp worden gedefinieerd waardoor operationele problemen door vervuiling beperkt blijven. Daarna kan in overleg met fabrikanten en ingenieursbureaus het ontwerp verder worden verfijnd en uitgediept.

1.2 Deze handreiking

Deze ontwerphandreiking is geschreven voor ontwikkelaars om te komen tot een betrouwbaar en goed functionerend aquathermiesysteem voor de lange termijn. Uit ervaringen met bestaande projecten is gebleken dat er voldoende kennis moet zijn van de waterkwaliteit en de ecologie van het onttrekkende water om te komen tot een goed ontwerp. Vandaar dat deze handleiding ook ingaat op de effecten van de waterkwaliteit op het aquathermiesysteem. De effecten van de lozingen van het effluent op het oppervlaktewater worden niet verder uitgewerkt. Er worden wel enkele bronnen genoemd die daar verder op in gaan.

Deze ontwerphandreiking beschouwt enkel TEO aquathermiesystemen. Voor het ontwerp van TED systemen is een andere ontwerprichtlijn beschikbaar[3]. Het ontwerp van TEA systemen is niet specifiek beschreven in deze handreiking, omdat een TEA systeem dat water inneemt vanuit het effluent van de waterzuivering vanuit technisch oogpunt kan worden gezien als een TEO systeem. Een TEA systeem wat toegepast wordt in en om de rioolbuis is vergelijkbaar met een gesloten systeem, omdat het water niet direct in aanraking komt met het rioolwater. Gesloten systemen worden verder beschreven in paragraaf 5.1.2

In de handreiking zijn de ervaringen van verschillende operationele TEO systemen meegenomen. Deze handreiking verondersteld bekendheid met aquathermiesystemen. Voor een breed overzicht van deze systemen wordt verwezen naar het rapport “overzicht aquathermieconfiguraties” (ref [10]) waar typische aquathermiesystemen voor zowel TEO, TEA als TED zijn beschreven aan de hand van factsheets.

[2] Netwerk aquathermie (NAT) - Overzicht Praktijk Projecten Aquathermie - versie d.d. 04-11-2021
[3] https://www.warmingup.info/project/19/3c-techniek-ontwerp-en-kosten

In het begin van ieder hoofdstuk is een stroomschema opgenomen met een globale beschrijving van de onderwerpen per paragraaf en de relaties tussen de verschillende onderwerpen.

Het is raadzaam om deze handreiking periodiek te herzien, naarmate er meer ervaring wordt opgedaan met TEO aquathermiesystemen.

1.3 Samenstelling werkgroep

Deze ontwerphandreiking is tot stand gekomen binnen het WarmingUp kennisprogramma. In werkpakket 3C van het programma is de ontwerphandreiking geschreven. Deltares heeft deze handreiking geschreven, waarbij input is geleverd door de begeleidingscommissie bestaande uit de volgende bedrijven:

Warmtebedrijven:	Vattenfall, Eneco, HVC, Ennatuurlijk, SVP, Eteck
Adviesbureaus:	IF Technology, Techniplan
Fabrikant:	Alfa Laval

2 TEO aquathermiesysteem

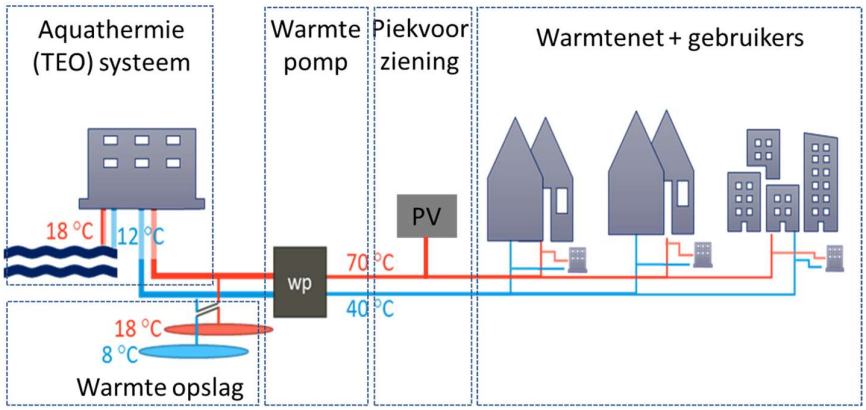
2.1 Aquathermiesysteem: van bron naar bruikbare thermische energie

De thermische energie die in het oppervlaktewater (TEO) aanwezig is, kan gewonnen worden en als warmtebron dienen voor gebouwen. De warmte uit het oppervlaktewater wordt via warmtewisselaars uit het water gehaald en al dan niet opgeslagen. Met behulp van warmtepompen wordt de temperatuur vervolgens verhoogd naar de vereiste temperatuur voor ofwel de woning of een warmtenet. Indien de geleverde warmte niet voldoende is dan kan er een piekvoorziening (denk aan gasketels) worden toegepast, die deze extra capaciteit kan leveren. Naast warmtewinning, kan er ook koude worden gewonnen uit aquathermie. In dit geval wordt de koude uit het oppervlaktewater direct gebruikt om gebouwen of woningen te koelen.

Om de warmte van aquathermie bruikbaar toe te passen, moeten een aantal componenten samen worden toegepast. Hieronder de vijf belangrijkste componenten (Figuur 1). Deze staan in volgorde van voorkomen in het geval van een systeem met een centrale warmteopwekking:

1. Het aquathermiesysteem. In het TEO systeem wordt warmte uit het oppervlaktewater gewonnen en onttrokken met behulp van een warmtewisselaar. Dit deelsysteem wordt verder uitgewerkt in deze handreiking.
2. de warmteopslag (bijvoorbeeld WKO) wordt gebruikt om warmte die in de zomer wordt gewonnen op te slaan voor gebruik in het winterseizoen.
3. een centrale warmtepomp of meerdere decentrale warmtepompen waarmee de warmte uit de bron (1) of opslag (2) op de gewenste temperatuur van het warmtenet respectievelijk het gebouw wordt gebracht.
4. een piekvoorziening voor de sporadische echt koude dagen.
5. de warmtedistributieleidingen (warmtenet), waarmee de warmte naar de gebruikers wordt gebracht.

Bij gebruik van een centrale warmtepomp ontstaat de configuratie, zoals weergegeven in Figuur 1. Bij gebruik van decentrale warmtepompen is er sprake van een zeer-lage-temperatuur (ZLT) warmte-koudenet, ook wel bronnet genoemd[4].



Figuur 1: Volgorde van componenten in een systeem met centrale warmteopwekking

[4] https://www.warmingup.info/documenten/definities-warmtebranche.pdf

In deze ontwerphandreiking wordt een TEO aquathermiesysteem beschreven van de bron tot en met de TEO-warmtewisselaar (component 1). Dat betekent dat alleen de warmtewinning wordt beschreven. De opwaardering van de gewonnen thermische energie door een warmtepomp en de piekvoorziening wordt buiten beschouwing wordt gelaten in deze handreiking. De opslag (component 2) ook, maar omdat de koppeling van het aquathermiesysteem en de opslag (WKO) bepalend is voor het ontwerp van het systeem wordt hier ook kort op ingegaan.

2.2 Systeemkeuze: TEO met of zonder opslag

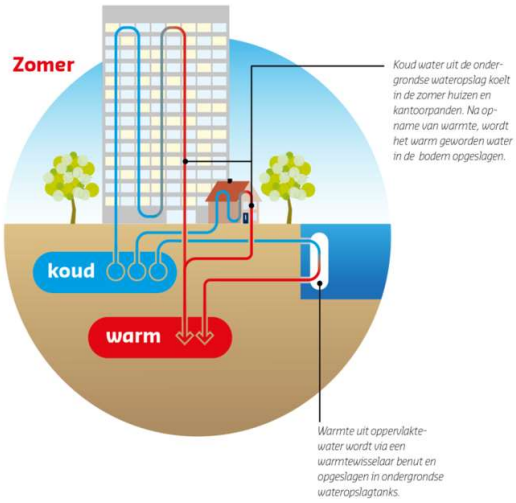
In een TEO aquathermiesysteem wordt warmte of koude onttrokken aan het oppervlaktewater met behulp van een warmtewisselaar. Deze warmte kan dan worden opgeslagen in een ondergrondse bron (WKO), maar de thermische energie kan ook direct geleverd worden aan de gebruiker, eventueel met behulp van een warmtepomp. Een warmte/koude opslag kan weer bestaan uit een gesloten bodemenergiesysteem (GBES) of een open bodemenergiesysteem (OBES)[5]. Het effluent met warmer of kouder water wordt weer teruggebracht naar de bron (zie Figuur 2 en Figuur 3). In het geval dat een TEO systeem gekoppeld is met een WKO systeem, wordt het TEO systeem vaak gebruikt om de WKO te voeden met thermische energie. Hiermee kan thermische energie worden gebufferd of de thermische onbalans in de WKO kan worden hersteld. Als de WKO voldoende thermische energie bevat, kan het TEO systeem worden uitgeschakeld. Hierdoor hoeft het systeem slechts een deel van het jaar gebruikt te worden. Als het TEO systeem wordt uitgeschakeld, dan kan het worden gereinigd, wat de levensduur van het systeem ten goede komt.

Er zijn verschillende mogelijkheden om TEO installaties in combinatie met WKO's toe te passen. Bij kleine systemen (enkele huizen) wordt het TEO systeem vrijwel nooit gekoppeld met de WKO, terwijl dit voor grotere systemen (wijken, grote gebouwen) veel gangbaarder is. Voor grote systemen langs rivieren is een configuratie zonder WKO wel weer praktisch haalbaar. Niet alle opties zijn even efficiënt, aangezien de temperatuur van het oppervlaktewater varieert gedurende het jaar. Naast technische redenen hebben kosten voor aanleg en onderhoud ook een grote invloed op deze keuze.

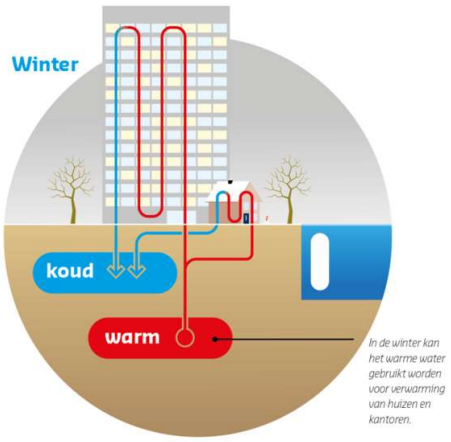
In verschillende perioden van het jaar kan de thermische energie direct uit de TEO bron worden gebruikt. Indien er ook gebruik wordt gemaakt van een opslag (b.v. WKO), dan kan de TEO bron worden toegepast om de opslag thermisch in balans te houden.

Om optimaal gebruik te maken van het TEO systeem dat gekoppeld is met een WKO, wordt de warmte/koude van het oppervlaktewater vaak direct gebruikt als dat mogelijk is. Als dit het geval is, dan wordt de TEO bron tegelijkertijd gebruikt voor zowel directe levering van thermische energie en voor regeneratie van de bron. De TEO installatie moet dus voldoende groot zijn om beide systemen van thermische energie te kunnen voorzien.

[5] https://basisregistratieondergrond.nl/inhoud-bro/registratieobjecten/grondwatergebruik/documentatie/bodemenergiesystemen-bro/



Figuur 2: Koudewinning in de zomer waarbij de TEO installatie gebruikt wordt als regeneratie voor de WKO bron



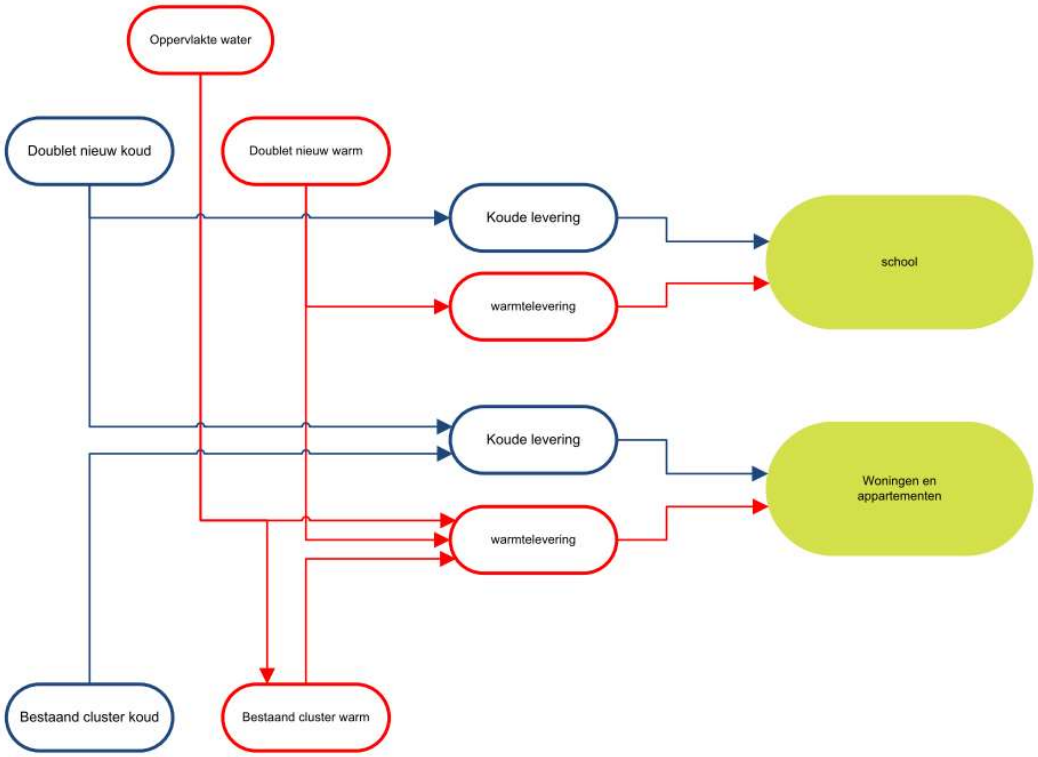
Figuur 3: Warmtewinning in de winter waarbij alleen de WKO bron wordt gebruikt.

Een andere mogelijkheid is om de thermische energie uit de TEO bron meteen te gebruiken en door een centrale of decentrale warmtepomp op te laten waarderen tot de benodigde temperatuur. In dit geval dient een TEO systeem continue warmte te kunnen leveren en is het systeem gedurende het hele jaar operationeel (indien de omgevingsfactoren dit toelaten). Bij lage temperaturen van het oppervlaktewater in de winterperiode kan er beperkte thermische energie beschikbaar zijn (de temperatuur van het geloosde water kan niet onder het vriespunt komen). Om dit op te vangen moeten back-up systemen beschikbaar zijn zodat de leveringszekerheid niet in het gedrang komt.

2.3 Basis model schema

Voorafgaand aan het ontwerp van een aquathermiesysteem is het van belang om alle debieten, het thermisch vermogen en het jaarverbruik goed in beeld te hebben. Ontwikkelaars van aquathermiesystemen gebruiken hier vaak een basis model schema voor waarin de uitgangspunten worden vastgelegd, waarop het ontwerp gemaakt kan worden [9]. Het maken en bespreken van een basis model schema zorgt ervoor dat de randvoorwaarden tussen alle partijen helder zijn, zodat er achteraf geen grote aanpassingen aan het aquathermiesysteem te hoeven worden gemaakt.

In het basis model schema is de warmte behoefte in zomer en winter seizoen vaak uitgewerkt in combinatie met de bronenergie van de verschillende bronnen en de eventuele aansluiting op een warmte koude opslag. Doordat de watertemperatuur over het jaar varieert is de toevoer van warmte of koude niet altijd constant. In het basis model schema moeten deze scenario's daarom ook worden meegenomen. In Figuur 4 is een voorbeeld te zien van een gesimplificeerd basis model schema, omdat een het volledige basis model schema ook de debieten en koude/warmte stromen beschrijft.

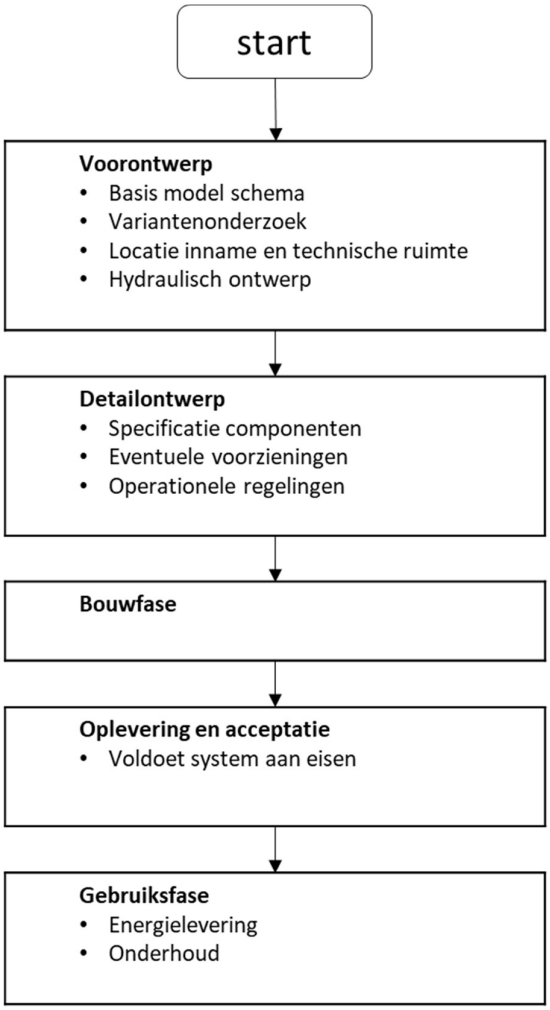


Figuur 4: Voorbeeld van een gesimplificeerd basis model schema (bron: Eteck 2020 [9]), waarin is te zien is hoe de bronnen/opslag aan elkaar gekoppeld zijn. Het volledige basis model schema bevat ook de debieten en de vermogens die geleverd moeten worden en dient als uitgangspunt voor het ontwerp.

2.4 Ontwerpfasen

Op basis van de randvoorwaarden die volgen uit het basis model schema worden ontwerpeisen opgesteld voor de aquathermie installatie. Deze ontwerpeisen volgen uit de uitgangspunten en randvoorwaarden die vooraf worden gedefinieerd. Om tot een aquathermiesysteem te komen, worden de ontwerpfasen gedefinieerd zoals te zien in Figuur 5.

In deze handreiking zijn de verschillende ontwerpfasen niet apart beschreven, maar wordt achtergrond gegeven ten behoeve van de ontwerpkeuzes voor het voorontwerp (o.a. hoofdstuk 2.3, hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4), het detail ontwerp (met name hoofdstuk 5) en de gebruiksfase (hoofdstuk 6). De ervaringen met reeds bestaande aquathermiesystemen zijn gegeven in bijlage 2. Deze zijn ook van toepassing tijdens de gebruiksfase.



Figuur 5: Ontwerpfasen aquathermiesysteem

3 Waterkwaliteit en vervuiling

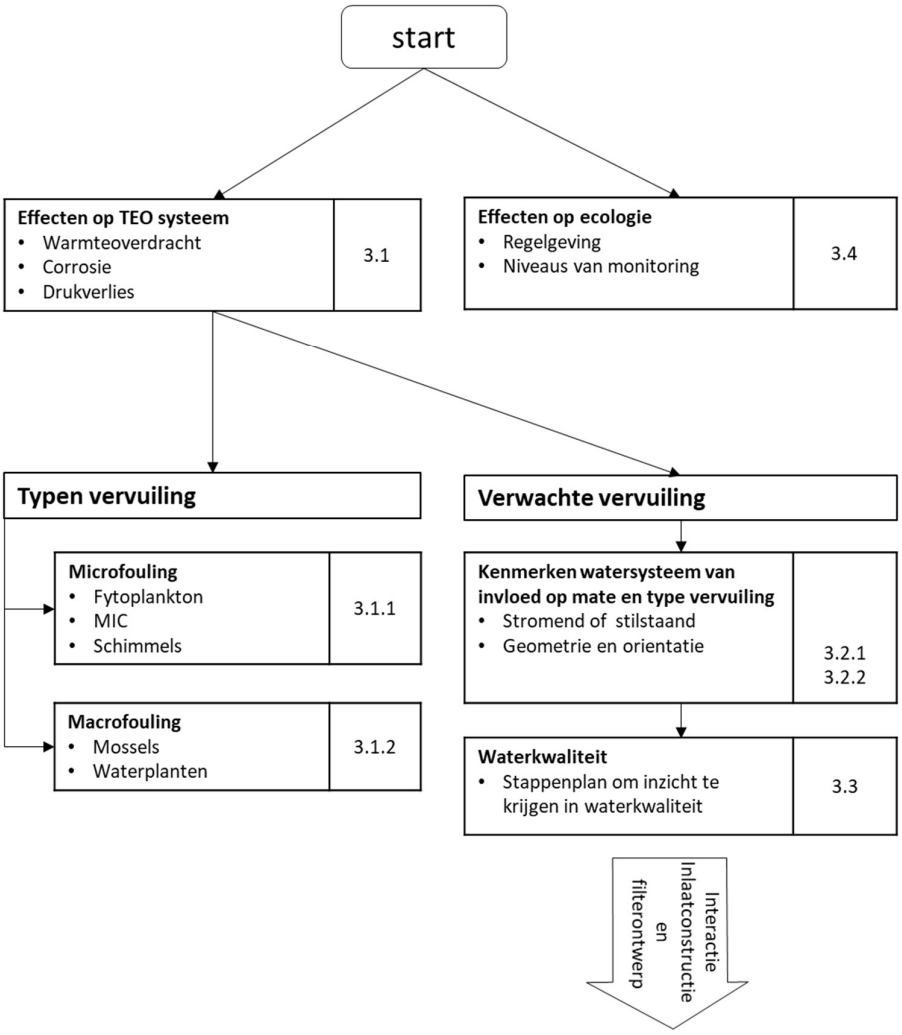
3.1 Introductie

Aquathermie installaties kunnen hinder ondervinden van biologische componenten in het water, zoals fytoplankton (algen en cyanobacteriën - in de volksmond blauwalgen), zoöplankton (zoals watervlooien, kleine kreeftachtigen), waterplanten, bacteriën, mosselen, zeepokken en andere neteldieren en door drijfvuil. Zowel de biologische componenten als drijfvuil worden in dit document 'vervuiling' genoemd. De overlast kan op verschillende manieren veroorzaakt worden. Zo kunnen micro-organismen zoals fytoplankton, schimmels en bacteriën filters verstoppen of materiaal aantasten [32]. Daarnaast kunnen organismen zich vestigen op of rondom de aquathermie installatie, zoals waterplanten, mosselen en zeepokken, waardoor de watertoevoer wordt gehinderd.

De mate en het type van hinder voor aquathermie installaties is deels afhankelijk van de installatie zelf, maar ook van het ecologisch functioneren van een watersysteem. Onderstaande tekst gaat in op de verschillende typen van hinder en hoe de hinder mogelijk verminderd kan worden. Belangrijk is te beseffen dat er wereldwijd al veel ervaring is met het innemen van water (tbv elektriciteitscentrales, drinkwater, koelwater voor olie- en gasindustrie). Kennis uit deze sectoren is meegenomen bij het opstellen van deze handreiking.

Vervuiling van aquathermiesystemen kan worden opgedeeld in 2 categorieën: microfouling en macrofouling. Bij microfouling gaat het om vervuiling die niet met het blote oog te zien is. Hierbij valt te denken aan bacteriën, die met het water worden ingenomen en achter blijven in het aquathermiesysteem. Macrofouling is vervuiling die wel met het blote oog te zien is, zoals vervuiling door algen, mosselen en waterplanten. Zowel micro als macro organismen kunnen zich hechten aan of ontwikkelen rondom aquathermiesystemen doordat deze systemen enerzijds hechtingsoppervlak bieden en anderzijds voor voeding zorgen door nutriënten mee te voeren in het stromende water. Op de harde oppervlakten van een aquathermie installatie kunnen daarom biofilms ontstaan [4] of ze kunnen dienen als vestigingssubstraat voor (grote) groepen van bijvoorbeeld mosselen of zeepokken kunnen zich er vestigen. Daarnaast kan de lozing van het aquathermie-water leiden tot veranderende omstandigheden. Dit kan de lokale ecologie zowel positief als negatief beïnvloeden. Zo kunnen er bijvoorbeeld waterplantvelden ontstaan.

In het stroomschema in Figuur 6 is de relatie tussen vervuiling en waterkwaliteit voor aquathermiesystemen uitgewerkt.



Figuur 6: stroomschema van effecten van vervuiling op een aquathermie installatie en het samenspel waterkwaliteit en vervuiling

3.2 Effecten vervuiling op aquathermiesysteem

Micro- en macrofouling kunnen op verschillende locaties in aquathermiesystemen (zie Figuur 7) overlast veroorzaken. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in vervuiling in de buurt van de inlaat van de installatie door bijvoorbeeld waterplanten en mosselen of in de leidingen van de aquathermie-installatie en op filters en warmtewisselaars (fytoplankton, zoöplankton, bacteriën).

Vervuiling bij inlaatwerken leiden tot:

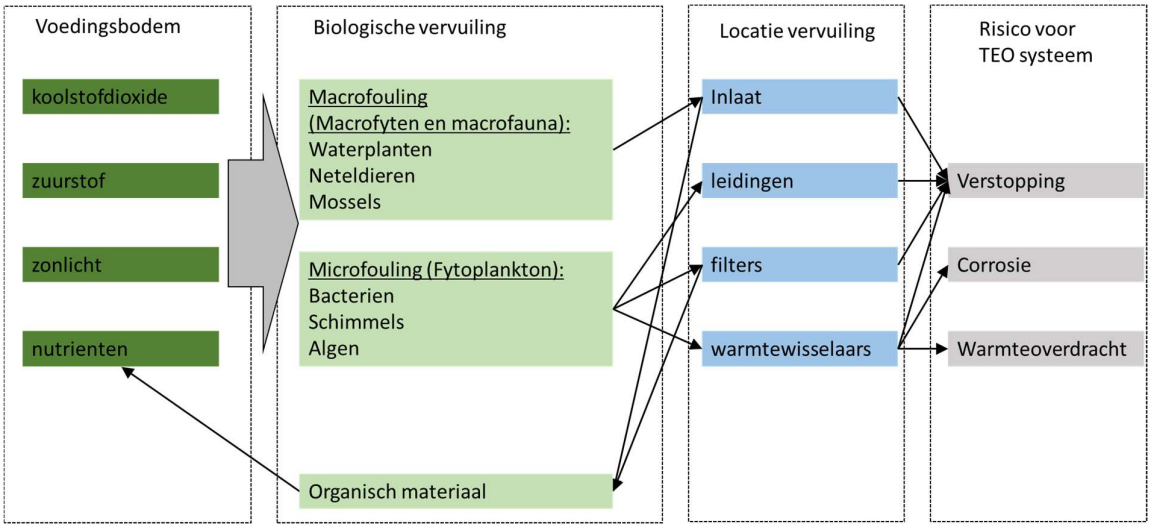
- Verstoppingen van de inlaatconstructie (b.v. door drijfvuil), het grove filter of de pomp, waardoor het water niet meer goed door het systeem heen kan stromen.
- Vervuiling van de inlaatroosters door aangroei waardoor drukverlies optreedt en er minder waterdekking is bij de pomp.

Vervuiling in het aquathermiesysteem kan het leiden tot:

- Drukverlies in het hydraulisch systeem, door verminderde doorstroomoppervlakken en verhoogde ruwheid

- Verstoppingen van fijne filters, waardoor het water niet meer goed de warmtewisselaar kan bereiken.
- Verminderde warmteoverdracht in de warmtewisselaar door vervuiling op de platen van de warmtewisselaar
- Lokale zuurstofloosheid waardoor vervolgens anaerobe micro-organismen zich kunnen ontwikkelen die het systeem kunnen aantasten. Dit kan leiden tot microbiologische corrosie

Deze risico's zijn schematisch weergegeven in Figuur 7, waar de relatie tussen de omgevingsvariabelen en de vervuiling zijn geschetst. De relatie tussen de voedingsbodem en de biologische vervuiling is in meer detail te vinden in de literatuurstudie over effecten van koudelozingen op het ecologisch functioneren van het oppervlaktewatersysteem [11].



Figuur 7: Stroomschema vervuiling van bron tot risico voor het TEO systeem.

De invloed van micro- en macrofouling op het opereren van aquathermie installaties is verder uitgewerkt in de onderstaande paragrafen. Voor alle typen van micro- en macrofouling geldt dat onderhoud van de installatie en het schoonmaken waarschijnlijk nodig blijft. Om deze reden moet de installatie op een bereikbare plaats gerealiseerd worden.

De invloed van organisch materiaal zoals slib, kan ook van invloed zijn op de werking van het aquathermiesysteem. Hier wordt verder op ingegaan in Hoofdstuk 5.2, waar de waterinname verder wordt beschreven.

3.2.1 Microfouling

Zowel fytoplankton, bacteriën en schimmels kunnen zorgen voor microfouling. De omstandigheden waaronder microfouling optreedt verschilt:

- Een belangrijk aspect om microfouling door fytoplankton te beperken is het gebruik van filters. Hoe effectief de filters zijn hangt af van de grote van de cellen en of fytoplankton voorkomt als cel of in de vorm van koloniën. In een onderzoek in de Baltische Zee bleek dat fytoplankton grootte varieerde van 17 tot 110 µm [13]. Dit is vaak kleiner dan de gangbare filtering die gebruikt wordt in aquathermie installaties.

  Verstopping van aquathermie installaties wordt naast de filtergrootte, ook beïnvloedt door de omvang van fytoplankton biomassa. Fytoplankton is afhankelijk van in water opgeloste nutriënten en energie (licht en temperatuur) voor hun groei. Lage nutriënt-concentraties en

weinig energie leiden tot lagere fytoplanktonconcentraties dan hogere nutriëntconcentraties in combinatie met voldoende energie. Hoge fytoplanktonconcentraties kunnen leiden tot een hoge toevoer van fytoplankton in aquathermie-installaties, wat weer kan leiden tot verstoppingen van filtersystemen.

In 2018 is door Deltares [23] een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de omstandigheden waaronder draadalgen voorkomen. Dit zijn filamenteuze (vezelachtige) macro-algen die onder water, gehecht aan hard oppervlak, groeien en die na groei los kunnen slaan en dan gaan drijven. Deze losgeslagen stukken (flab) worden door de wind verplaatst en kunnen daardoor voor problemen zorgen bij de waterinlaat. Draadalgen komen vooral voor bij hoge nutriëntconcentraties in stilstaande wateren. In permanent stromende wateren is de kans op flab klein. Daarnaast verkleint golfslag en turbulentie, veroorzaakt door wind en scheepvaart, de kans op de aanwezigheid van draadalgen.

- In water dat voor inname van aquathermie systemen wordt gebruikt, komt een scala aan micro-organismenbacteriën voor. Deze bacteriën kunnen biofilms vormen op verschillende onderdelen van het aquathermiesysteem. Eén van de mogelijke effecten hiervan is microbiële corrosie (engels: Microbiologically Influenced Corrosion, afgekort: MIC – zie ook Bijlage 1.3). Deze vorm van corrosie wordt veroorzaakt doordat micro-organismen een omgeving creëren waardoor staal (o.a. het veel gebruikte RVS-316 in warmtewisselaars) versneld corrodeert, of door directe interactie met het staal corrosie versnellen. MIC kan optreden via verschillende mechanismen en kan veroorzaakt worden door verschillende soorten bacteriën. Basisvoorwaarden zijn de beschikbaarheid van staaloppervlak om op te hechten en gunstige omstandigheden (juiste temperatuur en pH) voor groei en activiteit van de organismen.

  Microbiële corrosie treedt zeer snel en lokaal op in de vorm van putjes. Verschillende staalsoorten verschillen in de vatbaarheid voor MIC. In tegenstelling tot de suggestie die door de naam wordt gewekt, is MIC ook mogelijk bij roestvrijstaal, maar bij titanium veel minder. De juiste materiaalkeuze is dan ook van invloed op het risico op MIC.

  In andere sectoren is er veel ervaring met de het tegengaan en de monitoring van MIC. Voor het tegengaan van MIC worden bijvoorbeeld coatings en Kathodische Bescherming (KB) toegepast. Het gebruik van biociden (bestrijdingsmiddelen of chemische stoffen) in aquathermiesystemen is niet aan te raden, vanwege de beperkte effectiviteit op lange termijn (resistentie) en de mogelijkheid dat milieubelastende stoffen in het oppervlaktewatersysteem kunnen komen. Voor het monitoren van corrosie in het algemeen en MIC in het bijzonder zijn diverse methoden, zoals het gebruik van coupons (testplaatjes) om de corrosie te volgen en DNA-analyse om de groei en activiteit van micro-organismen te volgen.

- Schimmels worden vaak gevonden op houten oppervlakten in waterinnamesystemen, waar ze een slijmlaag kunnen vormen. Twee soorten schimmels die vaak worden gevonden in waterinname systemen zijn draadachtige schimmels en eencelligen. Hout wordt slechts beperkt toegepast in aquathermiesystemen, waardoor microfouling door schimmels vaak beperkt blijft.

3.2.2 Macrofouling

Macrofouling wordt veroorzaakt door verschillende soortgroepen zoals waterplanten, mosselen en neteldieren. De omstandigheden waaronder macrofouling optreedt en het type verschilt:

- Waterplanten kunnen de operatie van aquathermie hinderen enerzijds door obstructie of wanneer stukken (dood) plantmateriaal het systeem ingezogen worden. Waterplanten gedijen goed wanneer het water helder is, de diepte minder is dan 3 tot 4 meter, de stroming

of golfslag beperkt is en de bodem (zand, klei etc.) voldoende houvast biedt. Helder water komt voor bij systemen met lage nutriëntconcentraties (beperkte fytoplanktongroei), weinig opwerveling van bodemmateriaal (zwevend stof) en lage humuszuurconcentraties. Beperkte stroming en golfslag zorgen ervoor dat planten zich kunnen vestigen. Een te slappe (dikke, fluïde sliblaag) of een te harde bodem (beton) voorkomt vestiging van waterplanten.

De ontwikkeling van een waterplantenveld rondom een inlaatpunt van aquathermie gebeurt alleen wanneer door de installatie, of andere ingrepen in het watersysteem, de milieucondities voor de groei van waterplanten verbeteren. Voorbeelden kunnen zijn verbetering van waterkwaliteit en creatie van luwe gebieden. Voor de aanleg van een aquathermie installatie is op basis van de bestaande situatie een inschatting te maken of de ontwikkeling van een waterplantenveld überhaupt aan de orde is. Daarnaast kan ook ingeschat worden of veel plantmateriaal van elders bij de aquathermie installatie belandt door na te gaan wat de dominante windrichting en waterstroming in het watersysteem is.

- Mosselen, zeepokken en de poliepen van weekdieren hechten zich aan harde oppervlakten bij de inlaat van het aquathermie systeem. Wanneer deze soorten zich gaan ontwikkelen bij een inlaat, kunnen larven makkelijk doordringen in het aquathermiesysteem. In 2018 is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de milieucondities voor het voorkomen van mosselen (*Dreissena*) in zoete wateren [17] (zie Tabel 3.1). De milieucondities voor brakke (*Mytilopsis leucophaeata)* en zout water mosselen (*Mytilus edulis*) en de steeds frequenter voorkomende Japanse Oesters (*Crassostrea gigas)* zullen (deels) afwijken van de hieronder gepresenteerde waarden. Deze soorten kunnen mogelijk beter bestand zijn tegen droogval.

Tabel 3.1: Grenswaarden voor enkele relevante milieucondities waarin Driehoeks (*Dreissena polymorpha*) en Quagga (*Dreissena bugensis) [17] voorkomen.*

Milieucondities	Ondergrens	Bovengrens
Temperatuur	Nvt*	25-34 °C
Stroomsnelheid	Nvt**	0.09-0.2 m/s
Diepte	1.5 m	Nvt
Droogval	Nvt	5 dagen
Zuurstof	4-6 mg/l	Nvt
Saliniteit	Nvt	4-5‰
Zuurgraad	6.9-7.4	9.3-9.6
Calcium	8-12 mg/l	Nvt
Fosfaat	<0.1 mg/l	0.25 mg/l

* Bij lage waarden tragere groei

** Bij een lage stroomsnelheid is de aanvoer van voedsel kleiner wat leidt tot een lagere groei.

Voor het bestrijden of verwijderen van aangroei van mosselen geniet vanuit milieuoogpunt een combinatie van een mechanische en thermische aanpak de voorkeur [17]. Mechanische verwijdering door middel van filtering is verder beschreven in hoofdstuk 5.4. Voor thermische bestrijding is het van belang om het water gedurende een half uur op te warmen tot 38-40°C ([17]). Dit doodt de aangroei. Verder kan de aangroei van mosselen in open aquathermie systemen worden tegengegaan door:

- De stroomsnelheid in de leidingen hoog te houden en de stroomsnelheid bij de inname laag te houden.
- Specifiek materiaal toe te passen (mosselen zitten niet graag op koper en aluminium, maar wel op pvc-achtige materialen en RVS)
- De binnenkant van de buizen zeer glad te maken d.m.v. coatings
- Hoeken in de leidingen te vermijden

- De aanvoer van mossellarven te verminderen door middel van filtering (maaswijdte < 100 µm)
- Chemische bestrijdingsmethoden.

3.3 Watersysteem kenmerken

Er zijn een aantal algemene watersysteem- en waterkwaliteitskenmerken te benoemen die kunnen helpen de mate van vervuiling en het type vervuiling in te schatten. Het raadplegen van waterkwaliteitsdata van of onderzoek doen in het watersysteem voorafgaand aan het ontwerp van een aquathermie installatie (zie paragraaf 3.4) biedt daarbij extra inzicht en helpt bij het nadenken over de noodzakelijk maatregelen tijdens de operatie van de aquathermie-installatie om zo optimaal mogelijk te blijven functioneren. Belangrijke aspecten zijn het type watersysteem (stromend of stilstaand), geometrie en oriëntatie van het watersysteem. Daarnaast kunnen ook de mate van golfslag door scheepvaart, nutriëntconcentraties door interne (bodem) en externe bronnen (landbouw, RWZI), lichtklimaat, hoeveelheid kalk in het water (pH waarde) en zoutconcentraties (zoet, brak en zout) van invloed zijn. De aspecten voor de belangrijkste aspecten: het type watersysteem en de geometrie en oriëntatie van het water systeem is hieronder verder uitgewerkt.

3.3.1 Type Watersysteem

3.3.1.1 Stromend

Stromende wateren omvatten rivieren, beken, en estuaria. In deze systemen zijn de stroomsnelheid en het debiet belangrijke sturende variabelen voor het ecologisch karakter van het systeem. Hogere stroomsnelheden zorgen voor beperkte vestiging van waterplanten en beperken bij voldoende hoge stroming (> 0.2 m/s) de aangroei van mosselen en andere 'hechtings'-soorten. Innamelocaties liggen echter vaak wat beschutter, waardoor de aangroei groter kan zijn dan verwacht op basis van het watertype. De aanvoer van biologisch materiaal (fytoplankton, waterplantresten) zal in de grotere systemen beperkt zijn, omdat groeiomstandigheden weinig geschikt zijn voor waterplanten en fytoplankton. Bacteriën en schimmels zullen zich wel kunnen ontwikkelen: deze komen als sporen algemeen voor in water en zullen, onafhankelijk van het type watersysteem, zich vestigen daar waar de juiste condities zijn, zoals in een aquathermie-installatie.

Beken zijn vaak meer divers in soorten en daarom is de aanvoer van biologisch materiaal, door bijvoorbeeld natuurlijkvriendelijke oevers, hoger dan in rivieren. Hierdoor kan een aquathermie installatie eerder verstopt raken door plantresten of door draadwier, dat met name in langzamer stromende beken goed groeit. Daarnaast heeft ook hier de stroomsnelheid invloed op hoe goed mosselen en andere 'hechtings'-soorten zich ontwikkelen: lagere stroomsnelheden zorgen voor minder snelle ontwikkeling, doordat er minder nutriënten worden aangevoerd en doordat de afvalstoffen niet goed worden ververst.

In estuaria is de factor droogval een extra milieuconditie. Echter, de soorten die hier voorkomen, zijn ook aangepast aan droogval, wat betekent dat aangroei van mosselen en andere organismen waarschijnlijk niet beperkt wordt. De zoutgradiënt kan mogelijk wel een effect hebben op de plantengroei, omdat bij zoute wateren (M31 type volgens de KaderRichtlijn Water) er geen helofytenkragen ontstaan, waardoor minder plantmateriaal in het water komt.

3.3.1.2 Stilstaand

Omdat de stroomsnelheid in stilstaande wateren, zoals meren, kanalen, sloten, singels en grachten, beperkt is, spelen nutriëntconcentraties en lichtklimaat een grote rol in het ecologisch functioneren van de watersystemen. Een gevolg hiervan is het kunnen ontstaan van waterplantvelden, hoge fytoplanktonconcentraties en het makkelijker vestigen van mosselen. Er geldt in principe dat hoe hoger de nutriëntconcentraties, des te meer het watersysteem gedomineerd zal zijn door fytoplankton (blauwalgen) dan door waterplanten. En, hoe nutriënt armer het systeem, hoe meer waterplanten zich kunnen ontwikkelen. Echter, ook het type stilstaand water maakt uit. In weinig glooiende systemen met vanaf de oever gelijk een behoorlijke diepte (kanalen, stadsgrachten), is de ontwikkeling van waterplanten zeer beperkt: er is te weinig lichtenergie voor groei en mogelijk is ook de bodem ongeschikt voor vestiging (beton, steen).

Hoewel een voedselarmer systeem kan leiden tot een lagere biomassa van soorten, is het onwaarschijnlijk dat in voedselarmere systemen dusdanig minder mossels en andere 'hechtings'-soorten zich op een aquathermie-installatie zullen vestigen dan in een voedselrijksysteem. Echter, specifiek onderzoek hierover ontbreekt.

3.3.2 Geometrie en oriëntatie

Geometrie en oriëntatie (windrichting) van een watersysteem zijn van belang voor het productieniveau van fytoplankton en de ontwikkeling van waterplanten. In diepe systemen is de productie van fytoplankton lager en komen er minder waterplanten voor dan in ondiepe systemen: energie (instraling) is beperkend voor de groei. Dat betekent niet dat er geen fytoplankton is, maar het betekent dat de concentratie lager is. Datzelfde geldt voor waterplanten. In deze systemen hoeven waterplanten niet afwezig te zijn, maar deze komen dan enkel voor in kleine delen van het meer: langs de oever. Potentieel kan er dus minder overlast zijn in een dieper meer.

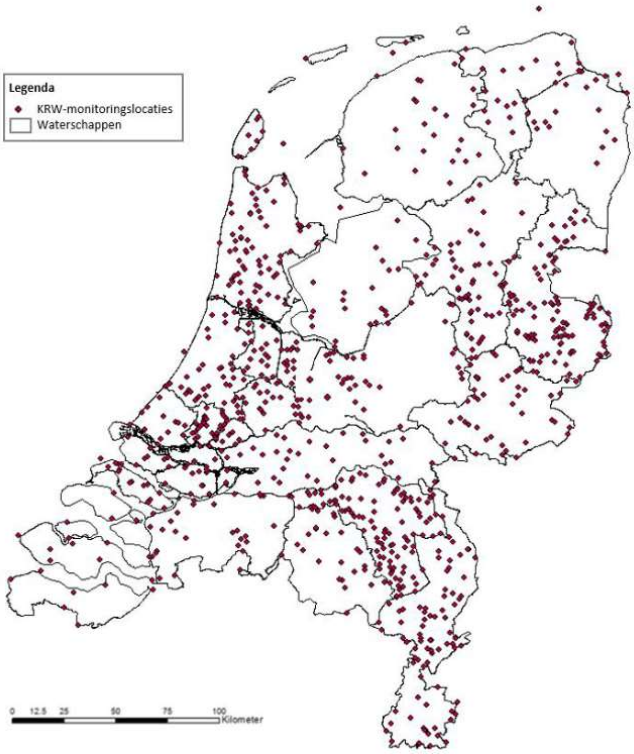
Fytoplankton, (dood) afgebroken plant materiaal en drijfvuil kan in een watersysteem rond gaan drijven. Waar het zich uiteindelijk ophoopt, hangt mede af van de stroming en wind. In meren is daarbij de oriëntatie van het systeem ten opzichte van de dominante windrichting van belang: op basis daarvan kan vaak bepaald worden waar drijvend materiaal zich regelmatig ophoopt. Waterinname op deze locaties zorgt dan mogelijk voor meer onderhoudsinspanningen (zie ook paragraaf 5.2.1).

3.4 Bepaling waterkwaliteit ter plaatse

Om vooraf te kunnen beoordelen of de waterkwaliteit aanleiding geeft voor vervuiling in van het aquathermiesysteem, is het belangrijk om inzicht te krijgen in de waterkwaliteit ter plaatse. Belangrijk is te weten of een watersysteem voedselrijk of voedselarm is in verband met fytoplanktonconcentratie en waterplantengroei. De voedselrijkdom bepaald daarom mede de onderhoudsinspanning die nodig is om het aquathermiesysteem te gebruiken. De nutriëntstatus van een watersysteem is op de volgende manier na te gaan:

1. Veldbezoek. Door een aantal keer per jaar een veldbezoek te brengen voorafgaand aan de bouw van een aquathermiesysteem kan een globale inschatting gemaakt worden of het water waaruit onttrokken wordt hoge concentraties fytoplankton herbergt (voedselrijk) en waar waterplanten groeien. Tevens is te zien waar het materiaal zich in het watersysteem zich ophoopt door lokale stromingsomstandigheden en windcondities.

2. Contact met waterschap. Het waterschap heeft vaak goed inzicht in de kwaliteit van lokale wateren en beschikken over waterkwaliteitsmetingen zoals nutriënt- en fytoplanktonconcentraties. Daarnaast hebben kunnen ze ook data beschikbaar hebben van temperatuurvariaties gedurende het jaar.
3. KRW-nutrend. Op de website https://www.krw-nutrend.nl/ is een overzicht te vinden van de nutriëntmetingen (stikstof en fosfor) in Nederland die worden gemeten in verband met kader richtlijn water monitoring (zie Figuur 8)
4. Nabijgelegen industrieën. Nabijgelegen industrieën die al water innemen ten behoeve van hun processen hebben vaak een goed en langjarig inzicht in de invloed van de desbetreffende waterkwaliteit op de operatie van hun systeem. Het opvragen van deze informatie kan voorkomen dat het wiel opnieuw moet worden uitgevonden.
5. Metingen ter plaatse. Door waterkwaliteitsmetingen uit te voeren is inzicht te verkrijgen in de mate van macrofouling of algengroei ter plaatse.
6. Metingen in laboratoria. Door verschillende keren per jaar monsters te nemen van het water en deze te laten analyseren in een laboratorium kan een goed inzicht in de waterkwaliteit worden verkregen. Deze optie is echter wel kostbaar en wordt daarom tot op heden nog niet vaak ingezet.



Figuur 8: Monitoringslocaties KRW in 2019 [24]

3.5 Effecten op de ecologie

Doordat een TEO installatie het geloosde water opwarmt dan wel afkoelt, moeten de effecten van een lozing op de omgeving worden geanalyseerd. Naast het geloosde water wat terugstroomt via het aquathermiesysteem wordt het vuil wat wordt tegen gehouden door het filter ook vaak teruggevoerd naar het oppervlaktewater, wat de waterkwaliteit bij de uitstroom kan beïnvloeden.

Om de effecten te kwantificeren is er een beoordelingskader voor koudelozingen [20] beschikbaar op de STOWA website. Dit beoordelingskader geeft verdere inzichten in de regelgeving voor koudelozingen op het oppervlaktewater. In het geval er chemicaliën worden gebruikt als anti-fouling middel en deze op het oppervlaktewater worden geloosd, dan moet de invloed hiervan op het lokale milieu worden onderzocht. Bij kleine aquathermiesystemen bij grote wateren kan het effect anders zijn dan bij grote aquathermiesystemen waar veel water wordt ingenomen en geloosd. Bij beide systemen dient de invloed op het oppervlaktewater te worden gekwantificeerd. Hiervoor dienen twee toetsen te worden uitgevoerd met ABM-toets[6] en de Immissietoets (ref [16]). De toepassing van chemicaliën dient ten eerste te voldoen aan de Algemene Beoordelingstoets. De toets beoordeelt aan de hand van specifieke producteigenschappen de toelaatbaarheid van het lozen van (afbraakproducten van) chemicaliën in oppervlaktewater en bepaalt zo nodig welke saneringsinspanningen nodig zijn. Door filtering in aquathermiesystemen worden ook kleine organismen zoals zoöplankton ingenomen in het aquathermiesysteem. Deze organismen kunnen beschadigd raken in het aquathermiesysteem wat nadelige effecten kan hebben op het ecologisch functioneren van het watersysteem. Voor meer informatie zie Harezlak 2021b (ref [12]). Hier wordt anno 2021 verder onderzoek naar gedaan door een drietal waterschappen.

Lokale regelgeving opgesteld door waterschappen of gemeenten, kan extra eisen stellen aan de kwaliteit van het te lozen water. Om de ecologische impact op het lokale watersysteem te bepalen kan lokale monitoring worden uitgevoerd. Het “Monitoringsplan Ecologische Effecten Thermische Energie Oppervlaktewater” [7] geeft handvatten voor verschillende manieren en niveaus van monitoring om de effecten te kunnen bepalen. Drie niveaus van monitoring worden onderscheiden:

1. Basismonitoring waarbij de fysische-chemische-biologische toestand van het watersysteem en de bedrijfsgegevens wordt gemonitord. Voor installaties die groot zijn ten opzichte van het watersysteem wordt de monitoring uitgebreid met onderstaande monitoring:
2. Basismonitoring met ecologische monitoring volgens de KRW plus methode, waarbij de ecologische toestand van het watersysteem wordt geanalyseerd
3. Basismonitoring met ecologische monitoring volgens de KRW plus methode met daarbij monitoring van effecten op soorten en hun ontwikkeling.

Aan de hand van de verwachte invloed kan een niveau van monitoring worden toegepast dan wel worden geëist van beleidsbepalende instanties. Waterschappen en Rijkswaterstaat hebben vaak inzicht in de waterkwaliteit vóór aanleg van een TEO systeem. Het is daarom van belang om in een vroeg stadium afstemming te vinden zodat de juiste monitoring plaats vindt om de effecten op de ecologie te kwantificeren.

De effecten op de ecologie worden niet verder in deze handreiking beschreven; zie hiervoor [11] en WarmingUP 3B publicaties[7]. Deze handreiking focust zich vooral op impact van het watersysteem op het aquathermiesysteem.

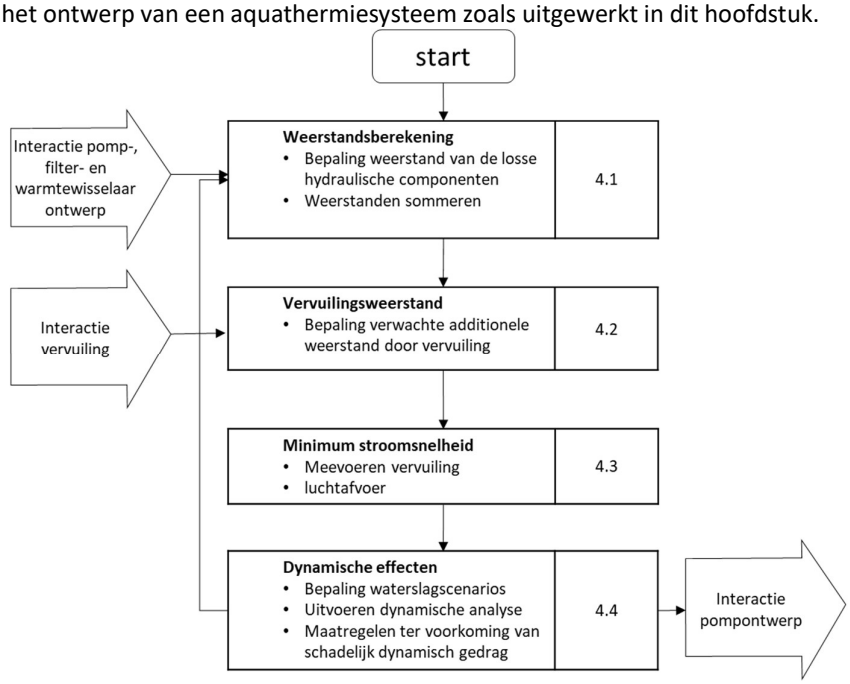
[6] https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water/thema-s/zzs/uitleg-werkwijze-abm/
[7] https://www.warmingup.info/project/18/3b-effecten-rol-en-regelgeving

4 Hydraulisch systeem

Het hydraulisch systeem van een aquathermieinstallatie loopt van de waterinname via de pompen, kleppen, filters en warmtewisselaar naar de uitlaatconstructie waar het effluent wordt geloosd op het oppervlaktewater. Om het hydraulisch systeem van een TEO aquathermiesysteem goed te ontwerpen is het raadzaam om een hydraulische analyse te doen waarbij de grootste risico's in kaart worden gebracht. Het kan hierbij gaan om de dimensionering van het systeem, waarvoor een stationaire analyse nodig is, of een risicoanalyse waarvoor een niet-stationaire analyse (waterslag) nodig is. Zowel stationaire als niet-stationaire analyses worden vaak toegepast in het ontwerp en hier zijn dan ook handleidingen op verschillende detail niveau voor beschikbaar. In de onderstaande paragrafen gaan we verder in op de typische onderdelen die van toepassing zijn op hydraulische systemen van TEO systemen.

De primaire loop van het aquathermiesysteem bevat slechts enkele componenten, zoals inlaatconstructie, pomp, leidingsysteem met kleppen en, het fijne filter en de warmtewisselaar. Al deze componenten zorgen voor weerstand van het systeem. Om het aquathermiesysteem goed te kunnen laten functioneren is het van belang dat de pomp voldoende capaciteit kan leveren om het water door het systeem heen te pompen. Hierbij dient in het ontwerp rekening te worden gehouden met een eventuele vervuiling van het systeem, wat voor extra weerstand kan zorgen. In de literatuur zijn er al meerdere handboeken te vinden die hier verder op in gaan. Een van de handboeken die veel wordt gebruikt in de afvalwaterwereld is het CAPWAT handboek [26], waar veel informatie te vinden is over dimensioneren van het hydraulisch systeem, rekening houdend met biofouling. In de onderstaande paragrafen staat een samenvatting welke van toepassing is voor aquathermiesystemen.

In het onderstaande schema staat beschreven met welke zaken rekening moet worden gehouden bij het ontwerp van een aquathermiesysteem zoals uitgewerkt in dit hoofdstuk.



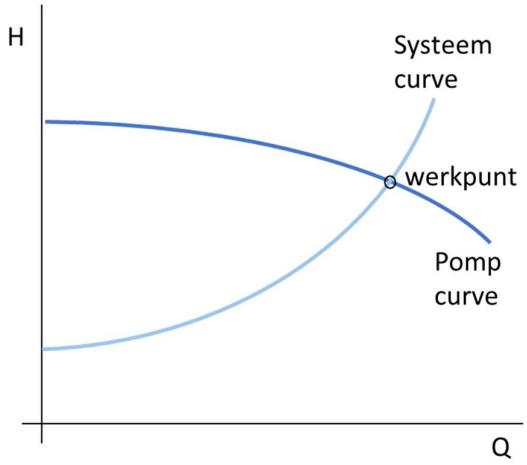
Figuur 9: Schema hydraulisch ontwerp TEO systeem met bijbehorende paragraafnummers.

4.1 Weerstandsberekening

Om een hydraulisch ontwerp van een systeem te kunnen maken moet de weerstand van het systeem worden bepaald. Op basis hiervan wordt een pomp worden geselecteerd die zijn hoogste efficiëntie heeft bij dit werkpunt. Door de keuze van de pomp af te stemmen op de hydraulische weerstand van het systeem kan het systeem zijn capaciteit halen en opereren met minimale problemen.

Het werkpunt van de pomp ligt op het snijpunt van de systeemcurve en de pompcurve, zoals te zien is in Figuur 10. De pompcurve wordt bepaald door de pompleverancier, die deze curve bepaald in een pompafnametest. Bij toerengeregelde pompen zijn er meerdere pompcurves beschikbaar. De systeemcurve wordt bepaald door de weerstand van het systeem. In een aquathermiesysteem, wordt deze onder andere bepaald door weerstanden in:

- Leidingen,
- Kleppen,
- Bochten,
- Filters,
- Warmtewisselaars,



Figuur 10: Werkpunt van een pomp door kruising van de systeemcurve met de pompcurve

De weerstanden van de verschillende componenten zoals hierboven zijn aangegeven moeten worden gesommeerd, zodat de totale weerstand van het systeem kan worden bepaald. Om de weerstand van een systeem te kunnen bepalen wordt de weerstand per component bepaald met behulp van de onderstaande formule:

$$\Delta H = \xi \frac{v^2}{2g}$$

Waarbij ΔH (m) het drukverschil is, ξ (-) is de weerstandscoëfficiënt, v (m/s) is de stroomsnelheid en g (m/s^2) is de zwaartekrachtsversnelling. Deze formule is voor bijna iedere hydraulische component toepasbaar.

De leidingen vormen vaak een belangrijke component in de weerstandsberekening. Om de leidingweerstand te kunnen bepalen, wordt vaak de Darcy-Weisbach formule gehanteerd, welke een directe link heeft met de algemene weerstandsformule zoals hierboven beschreven:

$$\xi = \frac{\lambda L}{D} \quad \text{waaruit volgt dat:} \quad \Delta H = \frac{\lambda L}{D}\frac{v^2}{2g}$$

Waarbij λ (-) de wrijvingscoëfficiënt is, L de buislengte en D, de buisdiameter. De wrijvingscoëfficiënt λ voor commercieel beschikbare buizen is bepaald door Colebrook-White (1937), waarbij een directe link te vinden is tussen de wrijvingscoëfficiënt en de wandruwheid van de leiding zoals geïntroduceerd door Nikuradse.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left(\frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3.71D}\right)$$

Hierbij is k (mm) de wandruwheid en Re (-) het Reynoldsgetal.

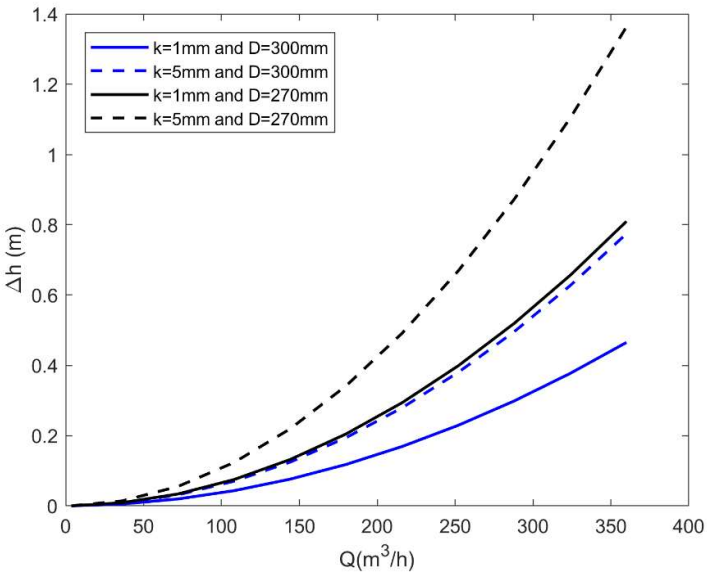
De weerstandscoëfficiënt (ξ), van alle andere componenten, zoals bochten, vernauwingen, roosters, etc., in het aquathermiesysteem dienen onafhankelijk te worden bepaald. Veel van deze weerstandscoëfficiënten zijn te vinden in de handboeken van Idelchik [28] en Miller [31] . De weerstand van het filter en van de warmtewisselaar zijn vaak moeilijker te bepalen, door de complexe geometrie van deze componenten. De weerstandskarakteristieken van deze componenten worden dan vaak ook meegeleverd door de fabrikant die deze door middel van een meting heeft bepaald.

4.2 Vervuiling

Vervuiling van het systeem kan zorgen voor extra hydraulische en thermische weerstand, waar in het ontwerp van het systeem rekening mee moet worden gehouden. In het ontwerp van het systeem moet rekening worden gehouden met 3 aspecten welke door vervuiling van het systeem kunnen optreden:

- Extra weerstand door verkleind doorstroomoppervlak
- Extra weerstand door een hogere wandruwheid
- Verminderde warmteoverdracht

Vervuiling van een systeem kan dus zorgen voor een extra weerstand door middel van een verkleind doorstroomoppervlak en door middel van een hogere wandruwheid. Het effect van een verminderde doorstroomopening kan significante gevolgen hebben voor de ruwheid van een systeem. In Figuur 11 is de invloed van vervuiling op het drukverlies berekend voor een rechte leiding van 50m. In deze figuur is te zien dat een reductie van 10% in leidingdiameter al snel een verdubbeling van de weerstand betekent. Hetzelfde geldt voor een vergroting van de ruwheid met een factor 5 zoals te zien in de onderstaande grafiek. Doordat aangroei vaak zorgt voor beide fenomenen (een diameter reductie en een verruwing van het wandoppervlak), kan de hydraulische weerstand snel toenemen.



Figuur 11: Q-Δh weerstandscurve voor een leidinglengte van 50m voor verschillende ruwheden en leidingdiameters.

Naast hydraulische analyse kan vervuiling ook zorgen voor een afname van de warmteoverdracht. Dit is met name een belangrijk aandachtspunt in de warmtewisselaar. Een verhoogde stroomsnelheid kan ervoor zorgen dat de warmte uitwisseling niet meer optimaal is. Dit aspect is verder beschreven in hoofdstuk 5.5.

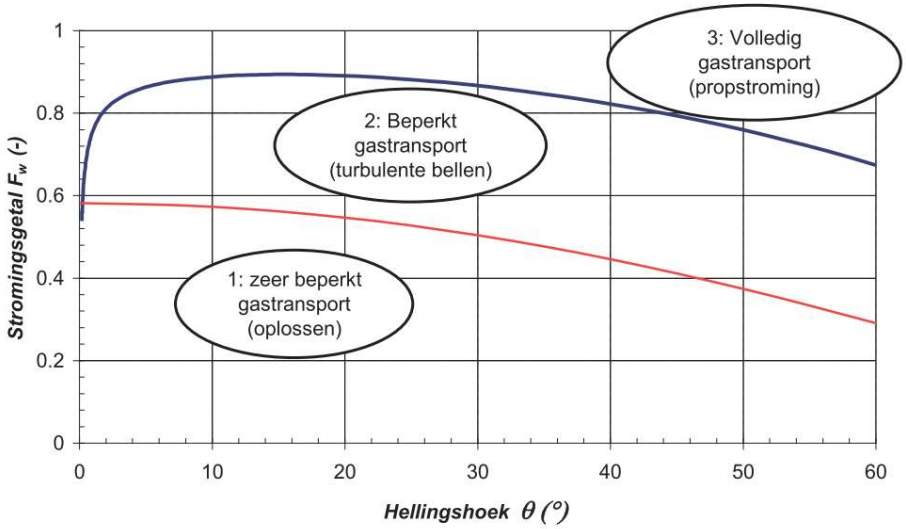
4.3 Minimum stroomsnelheid

Om te zorgen dat er weinig vuil zich ophoopt in het aquathermiesysteem is er wel een minimum stroomsnelheid waar rekening mee gehouden dient te worden. Een verhoogde stroomsnelheid zorgt er voor dat de deeltjes die eventueel mee gekomen zijn in het systeem, weer kunnen worden afgevoerd. Uit ervaringen met aquathermiesystemen is gebleken dat een stroomsnelheid van minimaal 1m/s zorgt voor een beperkte bezinking in de leidingen.

In principe moet het innamepunt zodanig gedimensioneerd worden dat luchtinname niet optreedt; zie ook secties 5.2.2 en 5.3.2. Een verhoogde stroomsnelheid kan ook worden gebruikt om eventuele luchtbellen in het systeem af te kunnen voeren. In het CAPWAT onderzoek [26] is uitgebreid onderzoek gedaan naar afvoer van luchtbellen in leidingsystemen. In dit onderzoek is een minimaal stromingsgetal afgeleid, waarbij het lucht volledig wordt afgevoerd, bij een bepaalde hellingshoek van de leiding. Het stromingsgetal voor het afvoeren van lucht is gedefinieerd als:

$$F_w = \frac{u}{\sqrt{gD}}$$

Waarbij F_w (-) het stromingsgetal is, u (m/s) de gemiddelde stroomsnelheid zonder lucht is, g (m/s^2) de zwaartekrachtsversnelling en D (m) de buisdiameter. Indien de TEO-installatie hoofdzakelijk horizontale en verticale leidingen bevat wordt aanbevolen om het leidingwerk te ontwerpen op een stromingsgetal F_w van minimaal 0.6 à 0.7 om luchtophopingen te voorkomen (zie Figuur 12).



Figuur 12: Vereiste stromingsgetal voor afvoer van luchtbellen voor verschillende hellingshoeken van leidingen [26] (0° representeert een vlak liggende leiding)

4.4 Dynamisch gedrag

Pompuitval of dichtslaande kleppen in een systeem kunnen zorgen voor drukgolven welke zich door het systeem kunnen voortplanten: beter bekend als waterslag. Bij grote leidingsystemen kan waterslag zorgen voor problemen in het leidingsysteem, de filters en de pomp. Om te bepalen in hoeverre dynamisch gedrag voor grote onder of overdrukken kan zorgen in een leidingsysteem, kan een dynamische systeemanalyse worden uitgevoerd. Vaak worden hiervoor computerprogramma's gebruikt. Echter kan met de Joukowsky vuistregel al vaak een eerste indruk worden gekregen of dynamisch gedrag problematisch kan zijn voor het systeem [26]. De wet van Joukowsky geeft het verband tussen de snelheidsverandering en de verandering van de drukhoogte, indien de verandering optreedt binnen de looptijd:

$$\Delta H = \pm \frac{c}{g} \Delta v$$

Waarbij c de voortplantingssnelheid is van de drukgolf in de leiding, g de zwaartekrachtsversnelling, Δv de snelheidsverandering en ΔH de verandering in drukhoogte. De golfsnelheid is daarbij weer afhankelijk van de diameter van de leiding, de wanddikte, het materiaal van de leiding en de vloeistof die er door heen stroomt, maar is voor HDPE en PVC leidingen in de orde van enkele honderden meters per seconde. Uit deze formule volgt bijvoorbeeld, dat bij een snelle klepsluiting (binnen de looptijd) waarbij de vloeistofsnelheid abrupt naar nul gaat (Δv), er een grote drukstoot (ΔH) kan optreden. De bepalende looptijd T voor een leidingsysteem met lengte L is hierbij gedefinieerd als:

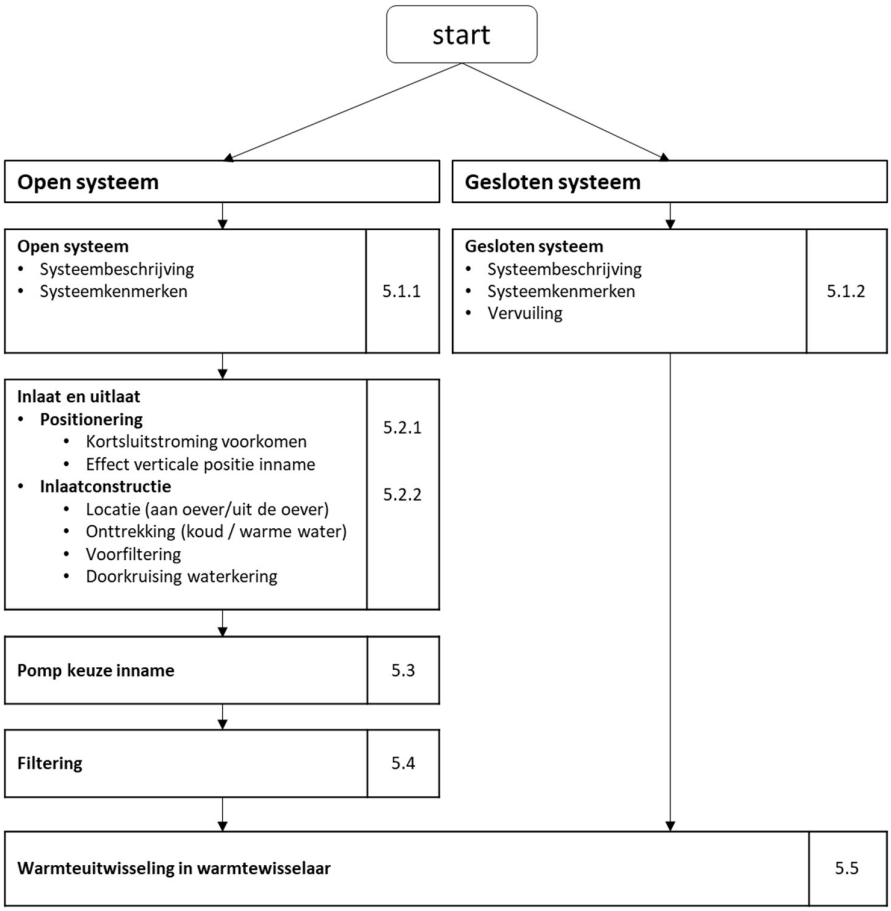
$$T = \frac{2L}{c}$$

Dynamisch gedrag door zowel overdrukken (bijvoorbeeld door klepsluitingen) als onderdrukken (bijvoorbeeld door pompuitval) kan zorgen voor onacceptabele drukken in de leidingen. Hier dient bij het ontwerp van de leiding rekening mee gehouden te worden. Indien dynamisch gedrag een probleem is, dan kunnen er in het ontwerp maatregelen genomen worden om de effecten van dynamisch gedrag te verminderen. Hierbij valt onder andere te denken aan het aanpassen van klepsluitertijden (bij de pomp, maar ook in het filter), leidingen van een hogere drukklasse voorzien, of het toepassingen van voorzieningen zoals, ventielen, bypass leidingen, windketels of buffervaten. Meer informatie over dit onderwerp is te vinden in de CAPWAT handleiding [26].

5 Systeemonderdelen aquathermie

In TEO systemen wordt het oppervlaktewater vaak ingenomen en gefilterd, langs een warmtewisselaar gevoerd waar de warmte wordt onttrokken en weer geloosd op het omgevingswater. Dit soort systemen worden open aquathermie systemen genoemd. Naast open systemen bestaan er ook gesloten systemen. Bij een gesloten systeem vindt er alleen uitwisseling van warmte plaats en geen wateruitwisseling met het oppervlaktewater. Tot op heden worden vooral open systemen toegepast, vanwege de maximale temperatuur die hiermee gewonnen kan worden, maar in dit hoofdstuk komen beide systemen aan de orde.

In het onderstaande stroomschema is de positionering van de inlaat en uitlaat en de inlaat constructie beschreven met daarbij aandachtspunten voor het ontwerp. De bijbehorende paragraafnummers zijn weergegeven in het schema.

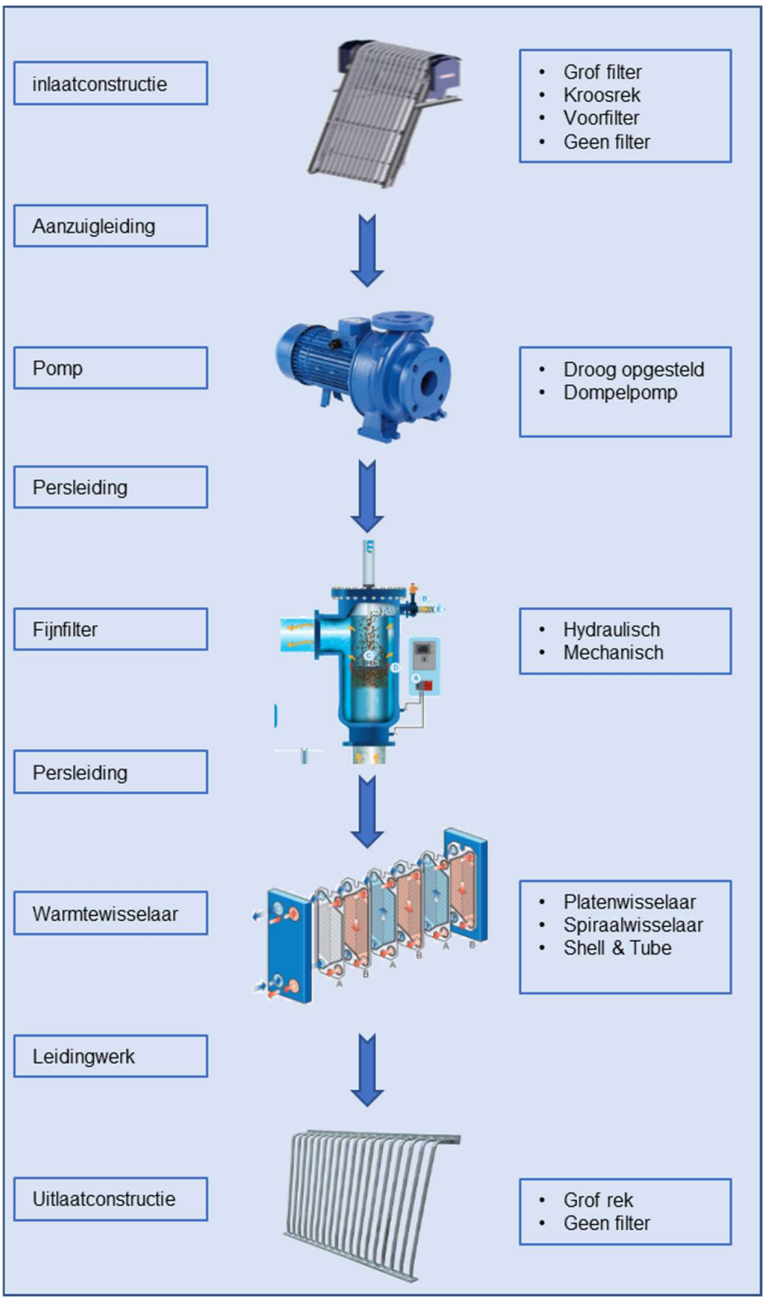


Figuur 13: Stroomschema ontwerp en positionering inlaatconstructie

5.1 Open versus gesloten systeem

5.1.1 Open inname

Een typisch TEO aquathermie systeem ziet er als volgt uit. Het water wordt ingenomen vanuit het oppervlaktewater. Dit kan gebeuren met een grof filter om verstoppingen tegen te gaan, of zelfs zonder filter als de inlaatconstructie zo ontworpen is dat er weinig vuil mee naar binnen komt. Na het grove filter wordt het water met een pomp het systeem in gepompt naar de fijne filters. In de fijne filters wordt het water gefilterd waarna het water door de warmtewisselaar wordt geleidt. In de tegenstroomwarmtewisselaars warmt het water op of koelt waarna het weer geloosd wordt in het oppervlaktewater.



Figuur 14: Stroomschema TEO aquathermieconstructie met open inname

5.1.2 Gesloten systeem

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 in het oppervlaktewater gelegd. De leiding fungeert dan als warmtewisselaar waardoor het water in de leiding niet in aanraking komt met het omgevingswater. Hierdoor treedt geen vervuiling van de installatie op. Het nadeel van deze systemen is dat het leidingmateriaal de warmteoverdracht bepaalt en een extra weerstand vormt waardoor de warmteoverdracht verminderd. 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 o.a. glycol) toe te passen in de buis. Als dit het geval is, dan moet het risico op lekkage worden beheerst, zodat de werkvloeistof niet in het omgevingswater kan komen.

Bij dit soort gesloten TEO systemen is het van belang dat er voldoende achtergrondstroming aanwezig is, zodat het water rondom de leiding voldoende ververst. Indien er onvoldoende achtergrondstroming beschikbaar is, dan 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.

5.2 Waterinname

5.2.1 Positionering waterinname en uitlaat

Het waterinname en uitlaatpunt zijn belangrijke onderdelen van het TEO aquathermiesysteem. In deze paragraaf worden een aantal aandachtspunten gegeven die van belang zijn bij het bepalen van een goede inname- en uitlaatlocatie . Het gaat hierbij enerzijds om de locaties in het horizontale vlak om kortsluitstroming tegen te gaan en anderzijds om de positie in de verticaal om vervuiling en verstopping te minimaliseren.

5.2.1.1 Kortsluitstroming

Om te voorkomen dat het water wat geloosd wordt weer direct wordt ingenomen bij het inname punt is het van belang om de positionering van de inname en uitlaat constructie goed te onderzoeken. Hierbij moeten de stroming nabij de inlaat en uitlaat locaties ook goed in beeld worden gebracht. Uit ervaringen is gebleken dat kortsluitstromingen er in het verleden voor hebben gezorgd dat TEO systemen uiteindelijk niet rendabel waren.

Bij simpele systemen kan er met behulp van handberekeningen worden onderzocht of er een risico bestaat op korstluitstroming. Echter worden de parameters die een mogelijke kortsluitstroming beïnvloeden al snel complex. Zo dient er bijvoorbeeld rekening te worden gehouden met:

- Stromingsrichting. Bij rivieren en kanalen met een vaste stroomrichting is het logisch om de uitlaat benedenstrooms van de inlaat te positioneren, maar bij meren zonder vaste stroomrichting of bij getijdensystemen waar de stroomrichting iedere getijdecyclus omkeert is dit minder eenvoudig te bepalen. Bij kanalen of doorstroomd stedelijk water moet rekening gehouden worden met een seizoensgebonden patroon in het stromingsregime; vooral indien het water s' zomers vaak stilstaat. Het verdient aanbeveling om bij deze locatiekeuze afstemming te zoeken met de waterbeheerder om synergiekansen te benutten; zo kan bijvoorbeeld een stedelijk doorspoelregime in de zomer benut wordt voor warmtewinning.
- Interferentie met bestaande lozingen. Aquathermiesystemen kunnen hun voordeel doen door gebruik te maken van temperatuur verhoging/verlaging van bestaande lozingen van bijvoorbeeld industrieën, maar het kan een aquathermiesysteem ook ernstig tegenwerken. Het is dus belangrijk om mogelijke interferentie met bestaande lozingen goed te onderzoeken.
- Menging. De menging met het omringende water wordt onder andere bepaald door de gelaagdheid, het temperatuurverschil, de stroming en turbulentie van het water. Dit laatste kan weer worden versterkt door de wind of door schepen die dichtbij de inlaat en uitlaat komen.
- Type lozing. Wanneer het geloosde water kouder is dan het omgevingswater, dan zal het koude water geneigd zijn om naar de bodem te zinken, terwijl geloosd warm water eerder aan het oppervlak zal blijven. Voor een warmwaterlozing is de invloed van wind dus bijvoorbeeld veel belangrijker dan voor een koudwaterlozing.

Om de punten die hierboven genoemd zijn goed te kunnen onderzoeken, is het aan te raden om bij grotere systemen of systemen in een complexe stromingssituatie numerieke modellen te gebruiken. Hierbij valt te denken aan het open-source softwarepakket: Delft3D-FLOW is uitgebreid gevalideerd voor het modelleren van thermische processen in het oppervlaktewater [6].

5.2.1.2 Verticale positie

Vanuit thermisch oogpunt is het wenselijk om bij een warm water winning, water uit de bovenlaag te onttrekken en bij een koud water winning, water uit diepere lagen te onttrekken. Hieronder zijn wat aandachtspunten gegeven voor een inname van koud water en een inname van warm water

- Inname warm water: Indien het TEO systeem warmte aan het oppervlaktewater wil onttrekken, dan is het logisch om water uit de bovenste oppervlaktelaag te onttrekken wat door zoninstraling net een paar graden warmer kan zijn dan de diepere waterlagen. Bij een onttrekking dicht bij het oppervlak bestaan echter wel risico's:
    - In het geval van een waterstandsdaling in drogere seizoenen of door de invloed van getijden kan de waterstand onder het innamepunt komen, waardoor het aquathermiesysteem droog kan komen te staan. Het is daarom belangrijk om met de waterschappen en gemeenten af te stemmen wat de minimale waterstand is, waardoor een voldoende waterdekking altijd gegarandeerd is.
    - Daarnaast kan er risico zijn op luchtaanzuiging. Indien het innamepunt te dicht onder het oppervlak ligt en de stroomsnelheid in de innameconstructie te hoog is ten opzichte van de omgevingsstroming, dan is de kans op luchtaanzuiging aanwezig, wat schadelijk is voor de pomp. De innameconstructie kan hiervoor worden geoptimaliseerd, maar hiervoor is ervaring en inzicht in het stromingsgedrag essentieel.
    - Indien de innamelocatie gevoelig is voor ophoping van waterplanten of drijvend en zwevend materiaal, dan zou hier in het ontwerp rekening mee gehouden moeten worden door de verticale positie van het innamepunt voldoende ver onder het

wateroppervlak te plaatsen. Hierbij is het belangrijk om de balans tussen de hoogste temperatuur en het verstoppingsrisico te beschouwen.

Om het warme oppervlaktewater in te kunnen nemen bij een variërende waterspiegel is het mogelijk om de innamelocatie onder een drijvend lichaam (b.v. pontons) te plaatsen. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met flexibiliteit in het leidingsysteem.

- Inname van koud water: Indien het TEO systeem koud water wil onttrekken, is het wenselijk om het water zo diep mogelijk te onttrekken. Bij een diepe onttrekking is het mogelijk dat sediment of plantenmateriaal wat zich dicht bij de bodem bevind in het systeem wordt ingezogen. Het is daarom raadzaam om de stroomsnelheden bij de inlaat klein te houden door het toepassen van een inlaatconstructie en om de onttrekking niet te dicht bij de oever te doen, waardoor de kans op aanzuiging van vuil beperkt blijft. Ten aanzien van visaanzuiging worden verschillende stroomsnelheden gehanteerd ter voorkoming van visaanzuiging. In een onderzoek van de STOWA ([15]) wordt aangegeven dat vissen in staat zijn om bij stroomsnelheden onder de 0.5 m/s de roosters voor de pompen te ontwijken. De EPRI ([8]) beveelt echter een veel lagere stroomsnelheid van 0.15m/s aan.

5.2.2 Inlaatconstructie

De inlaatconstructie is een van de belangrijkste factoren voor het ontwerp van een aquathermiesysteem. Bij de waterinname is een van de belangrijkste factoren om zo schoon mogelijk warm of koud water in te winnen. Hoe beter dit lukt, hoe kleiner eventuele vervuilingsproblematiek en onderhoud zullen zijn.

5.2.2.1 Aan de oever

Het voordeel van inname constructies aan de oever is de bereikbaarheid. Het water wordt ter plaatse ingenomen en in geval van onderhoud is het vaak eenvoudig om de constructie aan de oever te plaatsen. Een nadeel van de een constructie aan de oever kan het ophopen van vuil zijn. Afhankelijk van de bepalende stroming in de watergang en de windrichting kunnen er situaties optreden waardoor er veel vuil kan ophopen bij een inname constructie. Doordat de bepalende windrichting in Nederland zuid west is (zie windrozen KNMI in ref [1]), is het aan te raden om goed te onderzoeken of er bij deze locaties veel drijfvuil te verwachten is.

Het grove drijfvuil wat zich bij het innamepunt ophoopt wordt vaak tegengehouden door een kroosrek. Afhankelijk van de mate van drijfvuil kan er in het ontwerp rekening gehouden worden met een automatisch vuilverwijderingssysteem door middel van grijparmen of borstels.

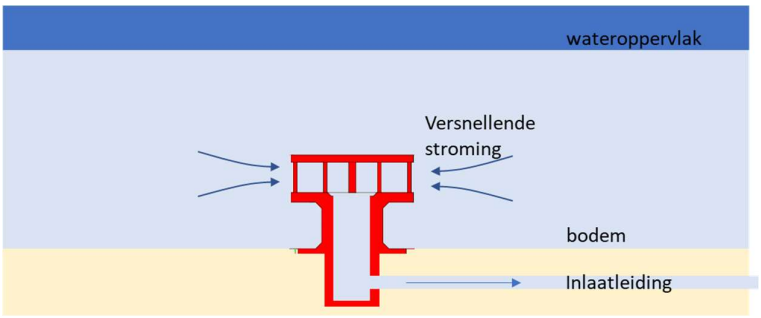
Naast drijfvuil kan er bij een oeverinname ook bodemmateriaal zoals sediment of slibdeeltjes worden ingezogen. Om dit te voorkomen, moet de inname voldoende ver uit de oever of voldoende ver van de bodem worden geplaatst, zodat het bodemmateriaal niet direct de inlaat in kan komen.

5.2.2.2 Uit de oever

De keuze van een inlaatconstructie wordt bepaald door het watersysteem waaruit wordt onttrokken en de regelgeving waarbinnen de inlaatconstructie moet passen. Zo kan het bijvoorbeeld onwenselijk zijn om uitstekende constructies te hebben in bevaarbare rivieren, wat problemen op kan leveren voor de scheepvaart.

5.2.2.3 Koude onttrekking

Om zoveel mogelijk koude in te nemen is het van belang om het water op een zo diep mogelijk punt te onttrekken waar het water wordt ververst. Voor veel watergangen is dit in het midden van de watergang nabij de bodem. Om dit te bewerkstelligen is een onderwaterconstructie nodige waarbij weinig bodemmateriaal mee naar binnen wordt gezogen. Bij innameconstructies van elektriciteitscentrales worden hier vaak velocity caps gebruikt, waarbij het water radiaal naar het innamepunt stroomt. Hierdoor is de stroomsnelheid bij het innamepunt laag, waardoor er weinig zand of bodemmateriaal mee naar binnen wordt gezogen.



Figuur 15: Velocity cap als innameconstructie

Aan de velocity cap zit een leidingsysteem die het water naar het aquathermiesysteem brengt. Bij lange inlaatleidingen kan dit zorgen voor een aanzienlijke drukval, wat door de pompen moet worden overwonnen. Daarnaast kan aangroei plaats vinden in deze leidingsystemen, wat kan zorgen voor een extra drukval. In het ontwerp moeten deze verschillende factoren opwegen tegen de extra koude die kan worden ingewonnen met dit soort constructies.

5.2.2.4 Warmte onttrekking

Indien er warmte gewonnen moet worden in het aquathermiesysteem, is het van belang om het warme oppervlakte water in te winnen wat door zoninstraling de hoogste te winnen temperatuur heeft. Afhankelijk van het verticale temperatuurprofiel kan de temperatuur aan het oppervlak enkele graden warmer zijn dan het water in diepere lagen. Om het warme oppervlaktewater in te kunnen winnen zijn er 2 opties: 1) het oppervlakte water wordt ingewonnen met een vaste inlaat constructie en 2) het oppervlakte water wordt ingewonnen met een drijvende constructie. Bij de eerste optie is het van belang om goed te onderzoeken wat de jaarlijkse variaties in waterstand zijn, zodat er altijd voldoende waterdekking is om het water in te kunnen nemen. Als deze variaties groot zijn, zoals in een getijdengebied, dan moet de innamelocatie hier voldoende ver onder liggen. Bij de 2^{e} optie, kan de innameconstructie onder een drijvend lichaam (b.v. ponton) worden gemonteerd. Deze optie heeft als voordeel dat altijd de warme toplaag van het oppervlaktewater wordt ingewonnen. Het nadeel hiervan kan zijn dat de leidingsystemen die naar het aquathermiesysteem op land liggen flexibel moeten zijn. Deze 2^{e} optie wordt onder andere toegepast onder het ponton van de watertaxi in Rotterdam.

5.2.2.5 Voorfiltering

Voordat het water door de pomp naar het aquathermiesysteem wordt gepompt, wordt het vaak gefilterd, zodat grof drijfvuil de pomp niet verstopt.

In een aquathermiesysteem vind vaak filtering van grof naar fijn plaats, om ervoor te zorgen dat het vuil wordt afgevangen voordat het bij de warmtewisselaar komt. Het voorfilter bij de innameconstructie is vaak de eerste filterstap.

Een gangbare methode hiervoor is een grofrek. Dit grofrek kan worden uitgevoerd met een grijparm of een borstel om het vuil van tijd tot tijd voor het grofrek te verwijderen. Soms worden er ook fijnere filters gebruikt met eventuele terugspoeling. Dit zijn vaak filterkorven die aan een leiding bevestigd zijn. Hierbij spuit het terugspoelmechanisme van binnen in de korf het vuil van de korf af. Deze opties zijn verder uitgewerkt in paragraaf 5.4.

Omdat vervuiling en verstopping een risico is bij alle type filtering, kan het wenselijk zijn om het inname systeem zo te ontwerpen dat er helemaal geen voorfiltering nodig is. Dit is bijvoorbeeld een optie bij innamesystemen waarbij het water verder uit de oever wordt ingenomen.

5.2.2.6 Doorkruising van waterkering

Indien een aquathermiesysteem achter een bestaande waterkering wordt geplaatst, dan moet de inlaatleiding en de retourleiding deze waterkering passeren. Dit kan door leidingen over de desbetreffende waterkering heen te leggen, maar dit is niet in alle gevallen mogelijk. Indien dit wel tot de mogelijkheden behoort, dan moet het pompontwerp afgestemd worden op de hoogte die overwonnen dient te worden bij de waterkering. Vaak is het echter praktischer om de waterkering te doorkruisen. Hierbij passeren de leidingen de veiligheidszones van de waterkering. Daarom moeten alle kruisende leidingen zijn ontworpen en berekend aan de hand van de NEN 3650 – reeks over transportleidingen. Naast eisen met betrekking tot de sterkte van de leiding zijn hierin ook eisen opgenomen met betrekking tot de noodzaak van een vervangende waterkering en de beoordeling van de geotechnische stabiliteit en piping. Tevens dienen alle kruisende leidingen te voldoen aan de regels in paragraaf B7.2 van de Leidraad Kunstwerken (TAW, 2003 [21]). Dit betreft aanvullende voorzieningen, met name ten aanzien van de afsluitmiddelen.

5.2.3 Samenvatting waterinname

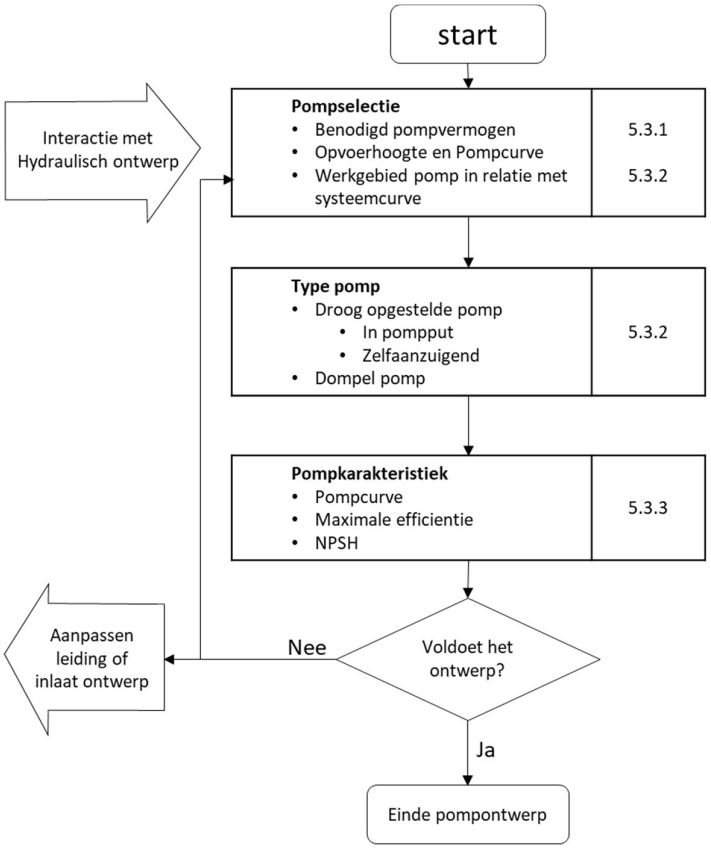
In de tabel hieronder is een samenvatting gegeven van de waterinname zoals beschreven in de paragrafen 5.1 en 5.2.

	aan de oever	uit de oever	gesloten systeem
temperatuur inname	door beperkte waterdiepte weinig temperatuurverschil over diepte aanwezig	optimalisatie mogelijk door koud water uit de diepere lagen te onttrekken en warm water bij het oppervlak te onttrekken	de temperatuur hangt af van de verticale positie van het gesloten systeem. Verlies van warmteoverdracht mogelijk door vervuiling leidingwerk
drijfvuil inzuiging	indien het innamepunt tegenover de bepalende windrichting ligt kan dit een probleem opleveren	Het drijfvuil gaat vaak om de constructie heen	n.v.t.
constructie	constructie is vaak eenvoudig en simpel en makkelijk bereikbaar	Door extra leidingwerk en innameconstructies zijn deze	constructie in het water. De warmteoverdracht

	aan de oever	uit de oever	gesloten systeem
		innamesystemen iets complexer	bepaald de lengte van de constructie
leidingkruisingen	volgens richtlijnen NEN 3650,3651,3652 en TAW 2003	volgens richtlijnen NEN 3650,3651,3652 en TAW 2003	volgens richtlijnen NEN 3650,3651,3652 en TAW 2003
bereikbaarheid voor onderhoud	goed	lastig	kan lastig zijn
impact scheepvaart	vaak klein tenzij de draaicirkel van de schepen dichtbij de inname ligt	1) de stroming bij de inname constructie kan invloed hebben van schepen. 2) Schepen kunnen de constructie kapot varen bij lage waterstanden	beperkt. Systeem moet wel goed afgeschermd worden
stroomsnelheid	zo laag mogelijk om inzuiging van vuil, zand en ecologie te beperken	zo laag mogelijk om inzuiging van vuil, zand en ecologie te beperken	n.v.t.
waterfiltering	kroosrek	varieert	n.v.t.

5.3 Pompen inname

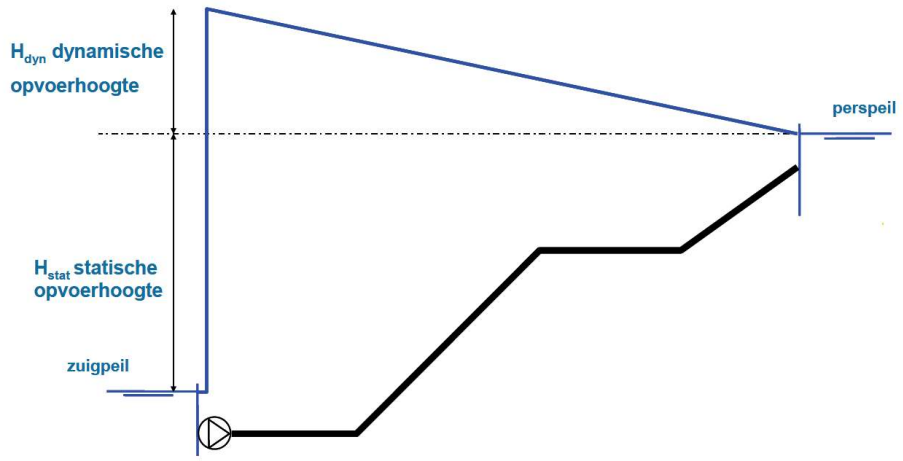
Om het water door de pompinstallatie heen te krijgen, is de capaciteit van de pomp bepalend. Hierbij is het van belang dat er een pomp wordt geselecteerd waarbij de capaciteit van de pomp in overeenstemming is met de weerstand van het systeem: de systeemcurve (zie Hoofdstuk 3.4). In de onderstaande paragrafen wordt verder in gegaan op de selectie van een pomp voor het systeem en de belangrijkste zaken waarmee rekening gehouden moet worden..



Figuur 16: Stroomschema pompontwerp

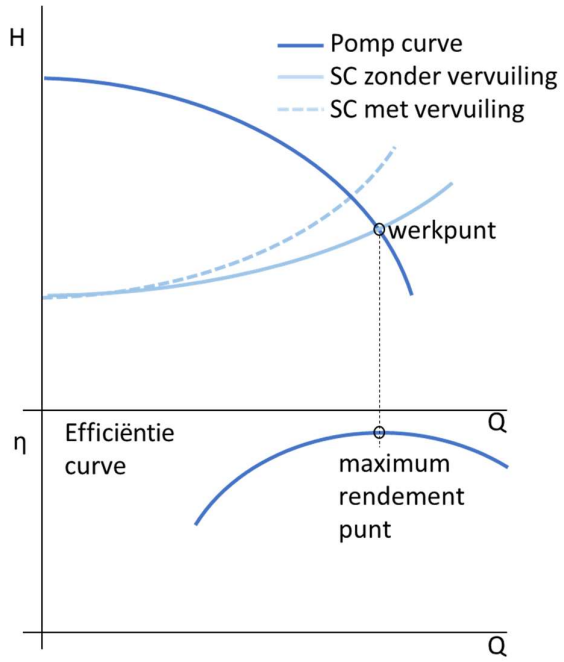
5.3.1 Opvoerhoogte

De opvoerhoogte van een pomp is maatgevend voor een systeem. Deze opvoerhoogte bestaat uit 2 componenten, de statische en de dynamische opvoerhoogte [26]. De statische opvoerhoogte is in het algemeen de hoogte die moet worden overwonnen door niveauverschil tussen 2 locaties (het zuigpeil en het perspeil) en de dynamische opvoerhoogte is de opvoerhoogte die bepaald wordt door het wrijvingsverlies in de leiding. In Figuur 17 staat schematisch weergegeven hoe deze opvoerhoogten zijn gedefinieerd. De totale opvoerhoogte die de pomp moet overwinnen is dus: $H_{totaal} = H_{stat} + H_{dyn}$. In een TEO-installatie is het perspeil veelal gelijk aan het zuigpeil, waarmee de statische opvoerhoogte wegvalt.



Figuur 17: Definitie van het zuigpeil, het perspeil, statische en dynamische opvoerhoogte van een pomp [26].

De opvoerhoogte van een pomp is een functie van het debiet van een pomp, beter bekend als de Q-H kromme van een pomp. In Hoofdstuk 3.4 is verder beschreven dat het werkpunt van de pomp bepaald wordt door het snijpunt van de pompcurve en de systeemcurve. Als de weerstand van een systeem toeneemt door vervuiling, zal het werkpunt naar links verschuiven, wat zal leiden tot een lager debiet, en een lager pomprendement. Dit is geïllustreerd in Figuur 18, waar 2 systeemcurves zijn gegeven voor een pomp. Hierbij zorgt de vervuiling dus voor een nieuw werkpunt van de pomp en een lager pomprendement.



Figuur 18: Pompcurve (Q-H) en Efficientie curve (Q-η) voor systeemcurves (SC) met en zonder vervuiling.

5.3.2 Droog versus nat opgestelde pomp

Bij het ontwerp van aquathermiesystemen kan worden gekozen voor droog of voor nat opgestelde pompen. Vanuit technisch oogpunt is er geen voorkeur voor een bepaalde pompsoort [26]. De keuze wordt dus veelal gemaakt vanuit bedrijfs- en onderhoudsoogpunt. Hierbij kan het onderhoud van

een pomp belangrijk zijn, waardoor de pomp goed toegankelijk moet zijn. In dit soort situaties kan een droog opgestelde pomp de voorkeur hebben, aangezien er voor een nat opgestelde pomp vaak een hijsopstelling nodig is, waar rekening mee moet worden gehouden in de civiele constructie.

Figuur 19: Dompelpomp (links) en een droog opgestelde pomp (bron: www.landustrie.nl*)*

Het verschil tussen droog opgestelde pompen en nat opgestelde pompen (dompelpompen) is dat de motor bij droog opgestelde pompen door lucht wordt gekoeld, terwijl dit bij dompelpompen door het omringende water is. Om te zorgen dat het water in de pompput niet te veel opwarmt en daardoor de motor niet meer kan koelen is het van belang dat de pompput voldoende groot is ten opzichte van de capaciteit van de pomp. Bij droog opgestelde pompen in een pompput is dit geen probleem. Echter is het bij dit soort systemen van belang dat er een waterdichte afsluiter tussen de pomp en de inlaat van de pomp bestaat.

Bij droog opgestelde pompen is het mogelijk om de pomp boven het water te plaatsen. Hierdoor moet de pomp het water aanzuigen. Om water aan te kunnen zuigen, moet de pomp de lucht in de leiding weg kunnen pompen om het water aan te kunnen zuigen. Hier wordt in praktijk ook wel eens vacuümpomp voor gebruikt. Een andere manier is om de leiding voor het starten van de pomp vol met water te gieten, zodat de pomp geen lucht hoeft weg te pompen. Indien de pomp buiten gebruik wordt gesteld, dan voorkomen ingebouwde kleppen dat de leiding niet meer leeg loopt. Uit ervaring bij bestaande systemen blijkt het echter dat leidingen wel leeg kunnen lopen, hetgeen extra onderhoud vergt.

	Voordeel	**Nadeel**
Zelfaanzuigende droog opgestelde pomp	Pompmotor kan onafhankelijk van de pompwaaier worden gepositioneerd, zodat deze goed toegankelijk is	Indien de aanzuigleiding vol lucht zit, moet de pomp voldoende zuigkracht hebben om de zuigleiding te kunnen vullen
Droog opgestelde pomp in pompput	De pompwaaier en motor zijn onafhankelijk van elkaar gepositioneerd	waterdichte constructie nodig in de pompput
Dompelpomp in pompput	Makkelijk toepasbaar, doordat er geen speciale constructie nodig is in de pompput	Bij kleine pompput kan het leiden tot beperkte koeling.

5.3.3 Netto positieve zuighoogte (NPSH)

Om te voorkomen dat een pomp gaat caviteren is het belangrijk dat de beschikbare NPSH groter is dan de benodigde NPSH van een pomp. NPSH staat voor netto positieve zuighoogte (Net Positive Suction Head, NPSH), wat eigenlijk staat voor de beschikbare druk bij de inlaat van de pomp t.o.v. de dampspanning. De NPSH geeft dus kortweg aan hoeveel het waterpeil mag zakken voordat het water de dampspanning bereikt bij de inlaat van de pomp en zal gaan koken waardoor cavitatie ontstaat. Bij cavitatie worden de gevormde dampbellen de pomp ingezogen, waar ze weer imploderen als de druk toeneemt (dit is dus bij de waaier). Het gevolg hiervan is schade aan de waaier, waardoor de pomp zijn capaciteit uiteindelijk niet meer zal kunnen leveren. Cavitatie van een pomp kan echter wel opgemerkt worden door bijvoorbeeld overmatig pompgeluid (wat klinkt als rollend grind), trillingen of overmatige drukschommelingen.

Om de beschikbare NPSH te berekenen moet de dampspanning van het absolute energieniveau worden afgetrokken:

$$NPSH_{beschikbaa} = E_{z,abs} - h_v = {}^{P_{abs}}/_{\rho g} - h_v$$

waarbij E_z de absolute energiehoogte is ter plaatse van de waaier van de pomp en h_v het niveau van de dampspanning (voor water van 18°C ongeveer 0.21 m).

De NPSH benodigd wordt bepaald door de pompleverancier tijdens de pompafnametest. Voor een veilige pompoperatie wordt vaak een veiligheidsmarge van een halve meter aangehouden. Dat betekent dat voor een veilige pompoperatie: $NPSH_{beschikbaar} > NPSH_{pomp} + 0.5$ m

Indien de NPSH niet voldoende is, zijn er een aantal oplossingen die kunnen zorgen dat de NPSH wel voldoet [14]: 1) De druk bij de inname van de pomp worden verhoogd (verhogen peil in ontvangstkelder, de pomp dieper plaatsen of verminderen van leidingweerstand), 2) het debiet kan worden verlaagd, waardoor de benodigde NPSH verkleind of 3) een andere pomp kiezen.

5.4 Filters

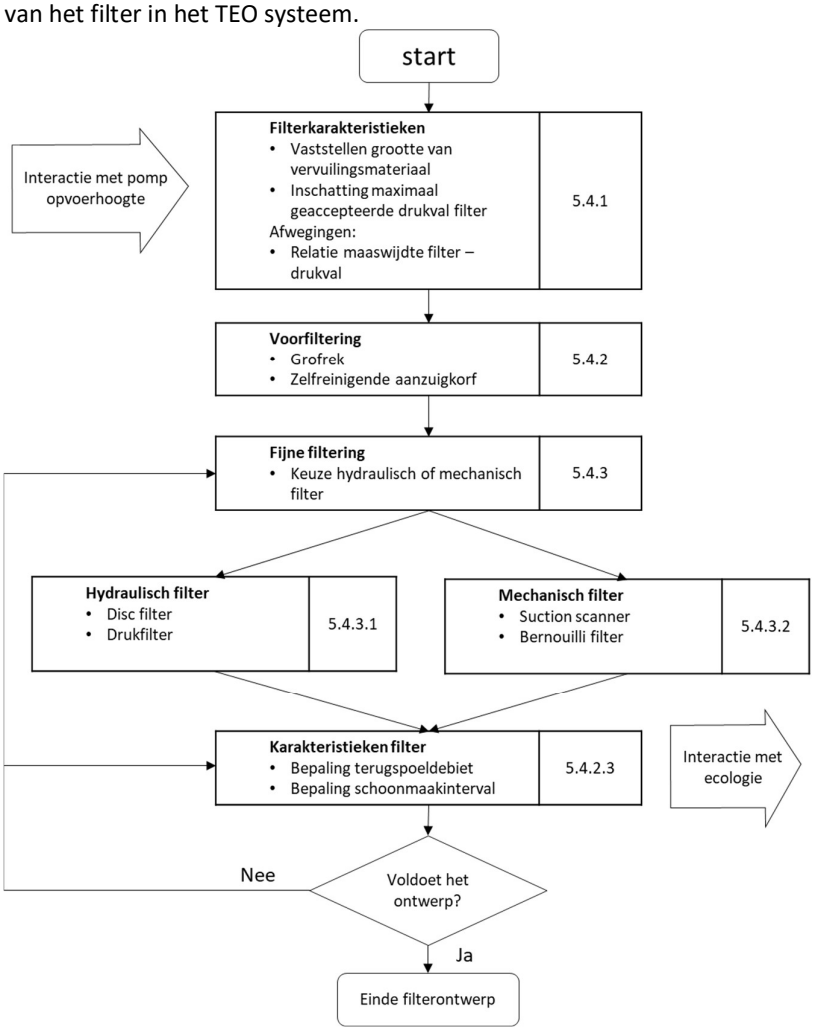
Het doel van de filters is om vuil af te vangen en eventueel terug te voeren naar het oppervlaktewater. Om het vuil af te vangen voordat het bij de kritieke onderdelen van het aquathermiesysteem komt, wordt vaak van grof naar fijn gefilterd. Dit gebeurt vaak op verschillende locaties in het aquathermiesysteem. De eerste filterstap is de voorfiltering door middel van een grofrek of door middel van een voorfilter met terugspoeling (zie paragraaf 5.4.2) en deze vind plaats bij de inlaatconstructie zoals beschreven in paragraaf 5.2.2.5. Na deze eerste filterstap komt het water bij de pomp en wordt het water naar de fijne filters gepompt voor een 2^{e} filterstap. In deze filterstap moet voldoende vuil worden afgevangen zodat de warmtewisselaar niet verstopt. De mate van filtering hangt dus af van het ontwerp van de warmtewisselaar (denk aan plaatafstand, leidingdiameters, bochten, etc.)

Afhankelijk van de kwaliteit van het ingenomen water en het type warmtewisselaar wat wordt gebruikt kan extra filtering worden toegepast. In deze paragraaf wordt verder beschreven welke filteropties gangbaar zijn in de aquathermie. De filters beschreven in deze paragraaf werken met automatische terugspoelmechanismen, waardoor deze beter bestand zijn tegen vervuiling.

Fijne filter technieken worden vaker gebruikt in de voedsel industrie, drinkwater industrie, afvalwaterindustrie, scheepvaart, offshore industrie etc. In deze industrieën worden meerdere

technieken toegepast die ook van waarde zijn in de aquathermie. In deze paragraaf wordt het deel van de technieken belicht die ook in de aquathermie van toepassing zijn.

In het onderstaande stroomdiagram staan de verschillende afwegingen weergegeven voor de keuze van het filter in het TEO systeem.



Figuur 20: Ontwerpschema filterontwerp

5.4.1 Filtermaaswijdte

De verwachtte vervuiling bepaald uiteindelijk de maaswijdte van het filter. Deze vervuiling hangt voor een groot deel af van het oppervlaktewater waaruit het water wordt onttrokken. In Tabel 5.1 zijn typische groottes gegeven voor vervuiling die voorkomt bij aquathermie installaties. Om alle deeltjes uit het oppervlaktewater af te vangen is zeer kostbaar en vrijwel onmogelijk. Bovendien zou dit een ander type filtering vereisen, zoals vaker wordt toegepast in de drinkwaterindustrie.

Tabel 5.1: typische grootte van fijn materiaal in het oppervlakte water

	grootte
waterplant	>1 cm
macrofouling (zie Hoofdstuk 3.2.2)	~50 µm
plastics (micro/macro)	50 µm – 5 mm / > 5 mm

	grootte
zand	63 µm – 2 mm
slibdeeltjes	2 µm – 63 µm
bacteriën	1 µm – 5 µm
algen	18 µm –120 µm
zoöplankton	20 µm – 200 µm

5.4.1.1 Drukval

De drukval over een filter hangt voornamelijk af van het debiet door het filter en de maaswijdte van het filter. Een lagere stroomsnelheid en een grote doorstroomopening zorgt voor een minimaal drukverlies. De drukval over een filter kan worden berekend met behulp van handboeken van Idelchik [28] of Miller [31]. Doordat de stroming in het filter vaak van richting veranderd, moet de weerstand over deze bochten ook mee worden genomen in de weerstandsberekening. Filterfabrikanten hebben vaak weerstandscurves beschikbaar, waaruit de drukval over het filter bepaald kan worden. Deze weerstandscurves gaan vaak wel uit van schone filterkorven. Hierbij dient rekening te worden gehouden dat door de kwadratische relatie tussen druk en stroomsnelheid, een kleine verhoging in stroomsnelheid door het filter als gevolg van vervuiling resulteert in een veel grotere weerstand.

5.4.1.2 Vervuiling

Zoals in de paragraaf hierboven aangegeven zorgt vervuiling voor een grotere drukval over het filter. Bij de meeste automatische filtersystemen wordt het terugspoelregime hierop aangepast, zodat er wordt teruggespoeld wanneer de drukval te groot wordt. Hierdoor blijft de drukval over het filter beperkt blijft.

Het kan voorkomen dat het automatische reinigingsprincipe het filter niet volledig schoon maakt. In dit geval moet er onderhoud aan het filter worden gedaan, wat er vaak in resulteert dat het filter handmatig gereinigd moet worden. Als er een risico is op sterke vervuiling, is het belangrijk dat het filter goed toegankelijk is, zodat het af en toe schoongemaakt kan worden. Uit ervaring blijkt dat het vervuiling zoals draadalgen (seizoensafhankelijk) ervoor kunnen zorgen dat filtervervuiling soms niet volledig verwijderd wordt door het terugspoelmechanisme.

Daarnaast kan de filtermaaswijdte van invloed zijn op de mate van vervuiling. Uit ervaring bij bestaande aquathermieprojecten blijkt dat indien de maaswijdte van de filterkorf heel klein is, dat het schoonmaakmechanisme ervoor kan zorgen dat het vuil door het schoonmaakmechanisme de filteropeningen juist kan verstoppen (dit is met name een risico bij mechanische filters – zie paragraaf 5.4.3.2). Indien er heel fijn gefilterd moet worden, dan is het raadzaam om meerdere filterstappen toe te passen, waarbij de grovere deeltjes in een voorfilter worden verwijderd en de fijnere deeltjes in het fijne filter.

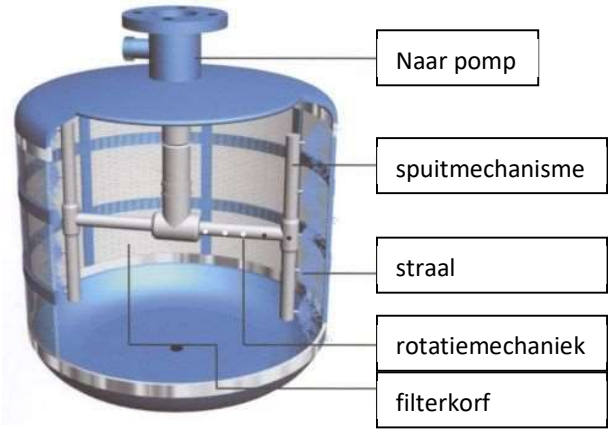
De mate van filtering hangt natuurlijk helemaal af van de verwachte vervuiling en de eisen die de warmtewisselaar aan het gefilterde water stelt.

5.4.2 Voorfiltering

Zoals beschreven in paragraaf 5.2.2.5, vind de voorfiltering vaak plaats bij de waterinname. Bij de voorfiltering wordt vaak een grove maaswijdte toegepast om de eerste grote delen tegen te kunnen

houden zodat ze de pomp niet kunnen bereiken. Dit gebeurt vaak door middel van een grofrek voor de inlaat om grof vuil tegen te houden.

Naast een grofrek, wordt bij aquathermiesystemen ook vaak gebruik gemaakt van zelfreinigende aanzuigkorven (Figuur 21). Deze aanzuigkorven zorgen voor een eerst voorzuivering van het water. Doordat deze korven na enige tijd vervuilen, is er in deze aanzuigkorven een terugspoelmechanisme ingebouwd wat bij een te groot drukverlies over de korf met een harde straal het filter van binnenuit schoonspuit. Hierbij dient echter rekening te worden gehouden met de stroming ter plaatse van de aanzuigkorf. Als de filterkorf bijvoorbeeld in stilstaand water wordt geplaatst, dan is de terugspoeling niet altijd effectief, omdat het vuil na de terugspoelcyclus weer wordt aangezogen. Om dit te voorkomen wordt in dit soort situaties permanente terugspoeling toegepast.



Figuur 21: intake filter met automatische zelfreiniging (bron: www.twinfilter.nl)

5.4.3 Fijne filtering

Na de pomp en voor de warmtewisselaar vindt dan vaak de 2e filterstap plaats om vuil wat in de warmtewisselaar achter zou kunnen blijven eruit te fitleren. Bij deze fijne filtering worden daarom ook kleinere maaswijdtes gebruikt voor het filter ten opzichte van de voorfilteringssytemen.

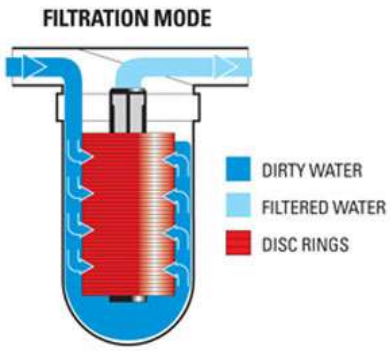
Er worden verschillende typen fijne filters toegepast in de aquathermie, welke te categoriseren zijn als 1) hydraulische filters en 2) mechanische filters. Bij hydraulische filters stroomt het water door het filter en wordt het filter door middel van terugspoeling schoongespoeld. Bij mechanische filters wordt bij het schoonmaakproces een mechanisch onderdeel gebruikt om het vuil samen te brengen en af te voeren. Om het vuil van het filter af te kunnen spoelen is de spoeldruk en het watervolume dat bij hydraulische filters wordt gebruikt om het filter te reinigen significant groter dan bij mechanische filters.

In andere industrieën worden soms andere filtertechnieken toegepast die ook vuil verwijderen. Hierbij valt onder andere te denken aan vuilafscheider en zandfilters. Deze filter principes worden echter nog niet vaak toegepast in de aquathermie door onder andere het ruimtebeslag en het maximum haalbare debiet van de filterprincipes. Hieronder een verdere uitleg van de gangbare hydraulische en mechanische filterprincipes.

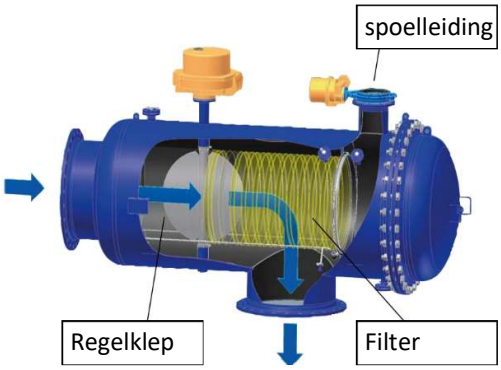
5.4.3.1 Hydraulische filters

Gangbare hydraulische filters zijn aanzuigkorven (zie paragraaf 5.4.2), drukfilters en diskfilters. De filterprincipes staan hieronder verder uitgewerkt.

Bij de discfilters (Figuur 22) stroomt het water van buiten door tussen de verschillende schijfjes (discs) naar de schone zijde. De discs bevatten een specifieke filteropening, waardoor alleen het grove vuil wordt afgevangen. Na vervuiling wordt er teruggespoeld. Hierbij wordt het water van de schone zijde teruggepompt door het filter. Hierdoor worden de discs van elkaar worden geblazen en het vuil kan worden afgevoerd.



Figuur 22: Filter principe disc filter



Figuur 23: ALF drukfilter (www.alfalaval.nl). De pijlen in de tekening geven de stroomrichting aan tijdens filtering.

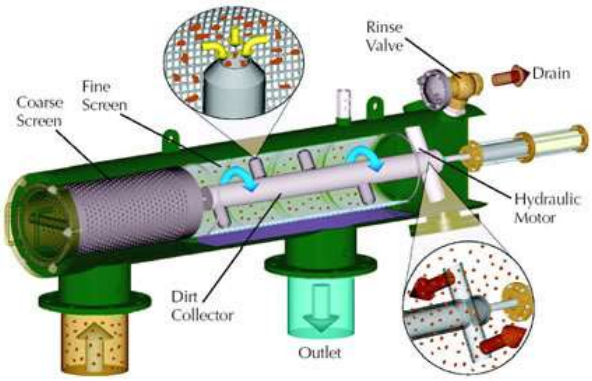
Een ander hydraulisch filter is het drukfilter. Bij dit filter stroomt het water tijdens het normale filtratieproces van binnen naar buiten door het filter. Bij een te grote weerstand over het filter, is het mogelijk om door middel van kleppen in het filter, de stroming om te draaien, zodat het vuil van buiten naar binnen wordt weggespoeld (zie Figuur 23).

5.4.3.2 Mechanische filters

Bernoulli filters en suctions scanners zijn mechanische filters die veel op elkaar lijken. Bij een Bernoulli filter (Figuur 24) stroomt het water van binnen naar buiten door het filter. Indien het filter vuil wordt en de weerstand over het filter toeneemt, wordt het schoonmaaksysteem geactiveerd. Het filter wordt dan mechanisch gereinigd met behulp van een zuiger zie het filter van binnenuit schoonmaakt en het vuil afvoert naar het aftappunt.

Bij een suction scanner (Figuur 25) stroomt het water net als bij een Bernoulli filter van binnen naar buiten door het filter. Als het drukverschil over het filter te groot wordt, dan wordt het filter schoongemaakt met behulp van de suction scanner (soort draaiende rasp), waarmee het vuil wordt losgemaakt en afgevoerd.

Figuur 24: Filter principe bernoulli filter



Figuur 25: filter principe suction scanner

5.4.3.3 Terugspoeling

Om vervuiling bij filters tegen te gaan wordt er vaak terugspoeling toegepast. Hierbij wordt het schone water benedenstrooms van het fijne filter gebruikt om in tegengestelde richting door het filter heen te spoelen. Het vuile water wordt vaak afgevoerd via een aparte terugspoelleiding en komt weer terug in het oppervlaktewater. Omdat deze terugspoelleiding werkt op basis van drukverschil, is het van belang dat deze retourleiding niet te klein is. Daarnaast moet er in het ontwerp rekening wordt gehouden met de verwachte grootte van de vervuiling, zodat het afgevangen vuil deze leiding niet zal verstoppen.

5.4.4 Samenvatting

In de onderstaande tabel zijn de verschillende typen filtering samengevoegd die worden toegepast in de aquathermie.

	voorfilter	**fijne filters**			
		hydraulische filtering		**mechanische filtering**	
	Zelfreinigende aanzuigkorf	Druk filter	Disc filter	Bernoulli filter	Suction scanner
filterprincipe	filterkorf	filterkorf	filterschijven	filterkorf	filterkorf
debiet	50-2500 m^3/h	45 – 8500 m^3/h	1 – 25 m^3/h	20-8000 m^3/h	50-1100 m^3/h
filtergrootte	1200-2500 µm	100 – 2500 µm	20-400 µm	100-5000 µm	10-3000 µm
reiniging	terugspoeling door jets	omkering stroomrichting	omkering stroomrichting	zuiger-mechanisme	roterende schraper met terugspoeling
materiaal	PVC / RVS 316	RVS 316 / 254 SMO	PVC / RVS316	RVS 316 / Superduplex	PVC / RVS 316
ervaringen in projecten	- wordt veel gebruikt in inlaatwerken	- wordt veel in zeewater toegepast	- toegepast in meerdere industrieën	- wordt regelmatig toegepast in aquathermie	- toegepast in meerdere industrieën

	voorfilter	fijne filters			
		hydraulische filtering		mechanische filtering	
	Zelfreinigende aanzuigkorf	Druk filter	Disc filter	Bernoulli filter	Suction scanner
	- hierna wordt vaak een extra fijne filterstap toegepast	- goede ervaring met chloride reiniging	(o.a. ontzilting)		

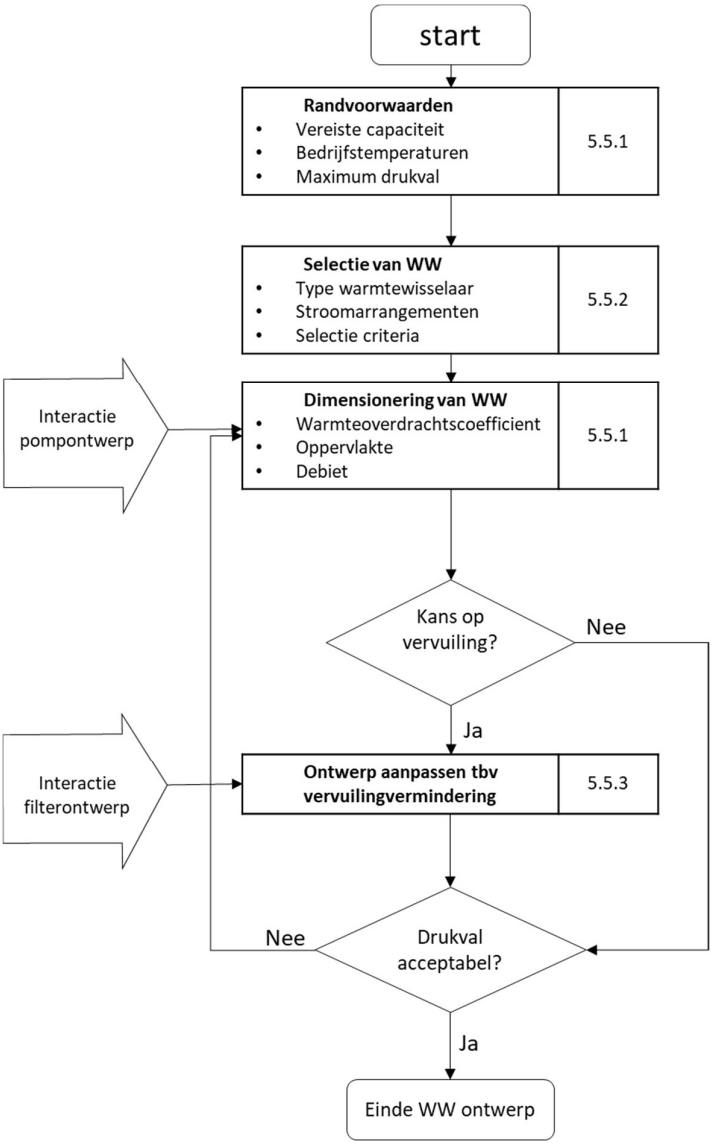
5.5 Warmtewisselaars

Na de filtering wordt de warmte uitgewisseld in de warmtewisselaar. Bij een gesloten systeem (zie paragraaf 5.1.2), werkt de mantel van de buis al als warmtewisselaar. Indien er in het systeem gewerkt wordt met een andere werkvloeistof dan water, dan kan het wenselijk zijn om een extra warmtewisselaar tussen het gesloten systeem en de warmtepomp te plaatsen, zodat er bij lekkage geen uitwisseling plaatsvindt tussen de werkvloeistof en het omgevingswater.

De warmtewisselaar faciliteert de warmteoverdracht tussen verschillende vloeistoffen. De warmteoverdracht gaat door een plaat of wand die tussen de verschillende vloeistoffen ligt. Daarnaast faciliteren warmtewisselaars hydraulische scheiding tussen twee hydraulische circuits. Voor de ontwerpenrichtlijnen van de warmtewisselaar van het aquathermie systeem beperken we ons tot de overdracht van het water naar een andere vloeistof. Dit kan ook water zijn, maar in een warmtepomp worden andere vloeistoffen gebruikt, waardoor het bijvoorbeeld een koudemiddel of ammoniak kan zijn.

Voor de toepassing van warmtewisselaars in aquathermie gelden specifieke aandachtspunten en richtlijnen. Omdat aquathermie warmte levert op een relatief lage temperatuur, is de warmteoverdracht en de minimalisatie van temperatuursprong over de warmtewisselaar een belangrijk aandachtspunt bij het ontwerp.

De onderstaande schematische weergave ondersteunt het doorlopen van belangrijke aandachtspunten van het ontwerpproces.



Figuur 26: Stroomschema ontwerp warmtewisselaars

5.5.1 Randvoorwaarden

5.5.1.1 Vereiste capaciteit

Hoeveel warmte de warmtewisselaar moet kunnen overzetten, wordt gedicteerd door het maximum gevraagde warmte- danwel koude vermogen uit de bron. Daarnaast dient rekening gehouden te worden met de bijbehorende in- en uitstroom temperaturen. In aquathermie systemen met lage temperaturen is het gunstig om de temperatuursprongen over de warmtewisselaar(s) (het verschil tussen de primaire warme instroomtemperatuur en de warme secundaire uitstroomtemperatuur) zo klein mogelijk te houden. Dit waarborgt o.a. een zo hoog mogelijke instroomtemperatuur in de warmtepomp en daarmee een acceptabel thermisch rendement van de warmtepomp en het gehele aquathermiesysteem. Een kleinere temperatuursprong in de warmtewisselaar betekent wel dat de warmtewisselaar groter moet zijn (meer platen) wat meeweegt in het onderhoud en de CAPEX van het systeem. .

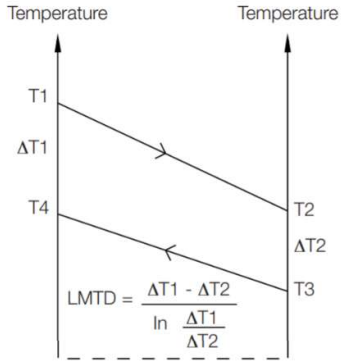
De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt bepaald door warmteweerstanden van onder andere het plaatmateriaal, de hoeveelheid vervuiling, de aard van de vloeistoffen, de stroomsnelheden en het type wisselaar dat wordt gebruikt. Om de warmteoverdracht te kunnen bepalen geldt de volgende formule:

$$Q = k * A * LMTD, \text{ met } LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\left({}^{\Delta T_1}/_{\Delta T_2}\right)}$$

waarin Q (W) de warmtestroom is, A (m^2) het uitwisselend oppervlak en LMTD het (log-gemiddelde) temperatuurverschil tussen de vloeistoffen aan beide zijden van de warmtewisselaar, k ($W/m^2 \cdot °C$) is de warmteoverdrachtscoëfficiënt [3]. Om dezelfde warmtestroom over te kunnen dragen bij een kleiner temperatuurverschil is dus een groter contactoppervlak nodig. Vervuiling heeft invloed op de warmteoverdrachtscoëfficiënt (h) en dus ook op de warmteoverdracht. Om de ΔT klein te houden, moet de stroomrichting aan beide zijden tegengesteld zijn (zie Figuur 27). Daar komt ook de veelgebruikte term TegenStroomApparaat (TSA) vandaan voor een warmtewisselaar. Omdat de efficiëntie van warmteoverdracht van tegenstroom warmtewisselaars veel groter dan voor meestroom warmtewisselaars (±90% voor tegenstroom principe tot ±50% voor meestroom principe), wordt er in de aquathermie vaker gekozen wordt voor het tegenstroom principe.

5.5.1.2 Bedrijfstemperaturen

De relevante bedrijfstemperaturen zijn de inlaat- en uitlaattemperaturen van de beide vloeistoffen in de warmtewisselaar. Het overzicht van deze temperaturen wordt weergegeven in Figuur 27 in het schema, waarbij:



T1 = Inlaattemperatuur – warme zijde
T2 = Uitlaattemperatuur - warme zijde
T3 = Inlaattemperatuur - koude zijde
T4 = Uitlaattemperatuur - koude zijde

Figuur 27: Conceptschets LMTD warmtewisselaar [3]

Een maat voor de effectieve drijvende kracht in een warmtewisselaar is het logaritmisch gemiddeld temperatuurverschil, *logaritmic mean temperature difference (LMTD).* Dit is een essentiële factor in het ontwerp, want hoe groter het logaritmisch gemiddelde temperatuurverschil tussen de vloeistoffen, hoe kleiner de warmtewisselaar kan zijn. Zoals te zien in Figuur 27 bevat de formule voor de LMTD een combinatie van het temperatuurverschil aan de koude kant en aan de warme kant van de warmtewisselaar. Al deze temperaturen zijn dus van invloed [3]. De LMTD waarde bepaalt dus de efficiëntie van de warmteoverdracht van de warmtewisselaar.

5.5.1.3 Maximum drukval

De maximaal toegestane drukval over de warmtewisselaar(s) dient bepaald en gehandhaafd te worden omdat deze de pompenergie en dus pompkosten bepaalt. De drukval staat in directe relatie tot de grootte van de platenwarmtewisselaar. Als de ontwerper ervoor kiest om de maximaal

toelaatbare drukval te vergroten en daarmee (incidenteel) hogere pompkosten te accepteert, kan de warmtewisselaar kleiner en goedkoper worden [3].

Naast de afmeting van de warmtewisselaar dient deze zodanig te worden ontworpen dat niet productieve drukval zoveel mogelijk voorkomen wordt. Niet productieve drukval kan optreden in onderdelen zoals inlaat- en uitlaatbochten, mondstukken en verdeelstukken [30].

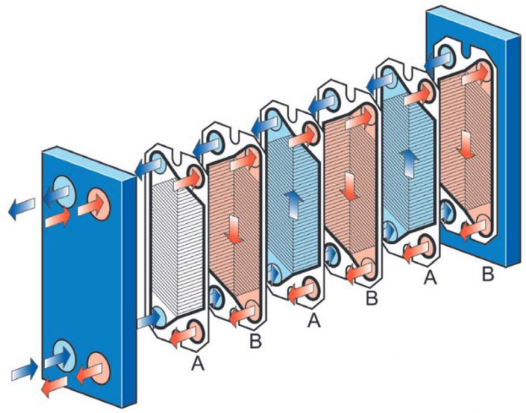
De stroomsnelheid van het water tussen de platen bepaald 1) de warmteoverdracht en 2) de vervuiling van de platen. Een lage stroomsnelheid zorgt namelijk voor een goede warmteuitwisseling, maar ook voor een verhoogde kans op vervuiling op de platen. Fabrikanten van warmtewisselaars raden daarom ook een minimale afschuifspanning aan de wand aan van 50-70 N/m^2 [18]). Deze schuifspanning is direct gerelateerd aan de snelheid van het water tussen de platen ($\tau \sim v^2$). Een grotere stroomsnelheid zorgt daarmee voor een kleinere kans op vervuiling, maar ook op een kleinere warmteoverdracht, wat moet worden gecompenseerd met bijvoorbeeld een groter plaatoppervlak. Voor shell and tube (buizenwisselaars) warmtewisselaars wordt er als vuistregel voor de minimale stroomsnelheid 0.5 m/s in de rompzijde en 1m/s in de buizen gebruikt [18].

5.5.2 Selectie warmtewisselaar

5.5.2.1 Type warmtewisselaar

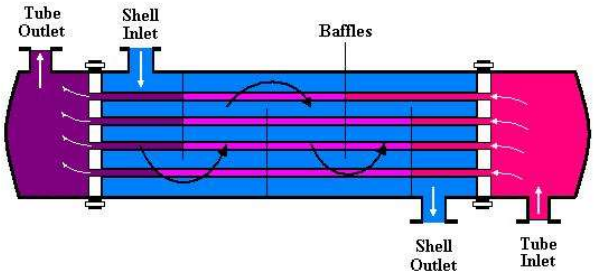
Er zijn verschillende typen warmtewisselaars te onderscheiden, elk met specifieke toepassingen en aandachtspunten. In de aquathermie worden verschillende typen warmtewisselaars gebruikt. Op dit moment worden voornamelijk platenwisselaars gebruikt, deze hebben onder andere een hoge energie efficiëntie vergeleken met andere typen. Daarnaast is het vloeroppervlak van dit type warmtewisselaar beperkt en worden ze vaak vanwege prijstechnische redenen geselecteerd. In aquathermie systemen met lage temperaturen is het gunstig om de temperatuursprong over de warmtewisselaar(s) te minimaliseren. Voor lage temperatuursprongen is een hoog thermisch rendement belangrijk om de benodigde debieten niet te hoog te maken. Naast platenwisselaars worden ook pijpbundel (shell & tube) warmtewisselaar gebruikt in de aquathermie, dit type heeft o.a. een groot oppervlakte in een relatief klein volume. Plaat-spiraal warmtewisselaars worden het minst van de 3 typen toegepast. Dit type wordt vaak toegepast in systemen waar slibdeeltjes in het water zitten.

Platenwisselaars (Figuur 28) bestaan uit dunne platen, vaak met een dikte van minder dan 1mm die om en om geplaatst zijn. In dit voorbeeld horen de “A” platen bij de leveringskant en de “B” platen bij de gebruikerskant. Het warme water stroomt aan de leveringskant de platenwisselaar in en geeft warmte af aan de platen van de gebruikerskant. Zonder rekening te houden met warmteverliezen naar de atmosfeer, die zijn vaak verwaarloosbaar, is de warmte die aan de ene kant van een platenwarmtewisselaar wordt onttrokken, gelijk aan de hoeveelheid warmte die aan de andere wordt opgenomen [3].



Figuur 28: Principe waterstroming door de warmtewisselaar (bron: Alfa Laval)

Figuur 29: Principe waterstroming door de plaat spiraal warmtewisselaar (bron: Alfa Laval)



Figuur 30: Principe waterstroming door een shell and tube warmtewisselaar (bron: www.pipingdesign.nl)

In de onderstaande lijst [19], [30] zijn verschillende typen warmtewisselaars naast elkaar beschouwd

Classificatie	Omschrijving	Kenmerken
Plaat warmtewisselaars	Afgedichte platen (zie Figuur 28): Platenwisselaar met pakkingen, gesoldeerd of gelast.	Lage en gemiddelde druk. Vloeistof-vloeistof overdracht. Door compactheid en efficiënte warmteoverdracht vaak toegepast in aquathermie Kostenefficiënt
	Plaat spiraal (Figuur 29): twee platte, lange opgerolde platen die aan elkaar zijn gelast om vloeistofstroom-kanalen te vormen.	Laag in onderhoud. Dit type warmtewisselaar wordt ook gebruikt voor slurries met vuildeeltjes tot 50%. Minder gebruikt in aquathermietoepassingen
Buisvormige warmtewisselaars	Pijpbundel (Shell & Tube - Figuur 30): Meerdere pijpen gebundeld in een vast patroon in een mantel	Vaak toegepast in industriële toepassing door robuustheid Bij vergelijkbaar vermogen veel groter dan een platenwarmtewisselaar

In de TEO aquathermie wordt vaak gebruik gemaakt van RVS-316 warmtewisselaars. In meerdere aquathermieprojecten is echter gebleken dat bij dit type warmtewisselaars lekkages op treden door microbiologisch geïnduceerde corrosie (MIC corrosie). De MIC corrosie begint vaak in de hoekjes en onder de rubbers van bestaande warmtewisselaars. In deze zogenoemde “dode zones” kunnen bacteriën een microklimaat bouwen waardoor MIC corrosie kan optreden, wat uiteindelijk leidt tot lekkage van de warmtewisselaar (voor meer uitleg zie Bijlage 1.3). Bij systemen waar MIC corrosie leidt tot lekkages, wordt vaak over gestapt op een titanium warmtewisselaar, wat meer resistent is tegen MIC corrosie (zie paragraaf 6.3.1).

Buiten lekkages in de warmtewisselaars blijkt uit ervaring dat appendages zoals afsluiters, ventielen en kranen ook een risico kunnen vormen voor lekkages. Hier dient in het ontwerp rekening mee gehouden te worden.

5.5.2.2 Verdere selectie criteria

In de bovenstaande paragrafen is een aantal belangrijke selectiecriteria benoemd voor het ontwerp van een warmtewisselaar. Er zijn er echter nog meer, het verschilt per project en toepassing welke selectiecriteria belangrijk zijn en welke de hoogste prioriteit hebben.

De onderstaande opsomming is een overzicht gebaseerd op [30] en ervaringen van consortiumpartners

parameters	variabelen en opmerkingen
type	platenwisselaar, shell and tube, spiraalwisselaar
stroomarrangementen	meestroom, tegenstroom of kruisstroom. Tegenstroom wordt normaal gesproken toegepast in de aquathermie
constructiematerialen platen en koppelingen	RVS316, titanium, koper
werkdruk en temperatuur	hangt af van warmteuitwisseling en variatie gedurende het jaar en operatie
stroomsnelheid	dit heeft tegengestelde relatie met de warmteoverdracht (meer warmteoverdracht bij lagere stroomsnelheid). Maar voldoende hoog zodat schuifspanning voldoende hoog is en aangroei beperkt blijft
vervuiling	monitoring door temperatuuroverdracht of drukverschil te monitoren
soorten vloeistof	indien de 2^{e} loop een andere vloeistof bevat, moet de kans op lekkages worden onderzocht
onderhoud, inspectie, etc	moet eenvoudig te bereiken zijn en te demonteren

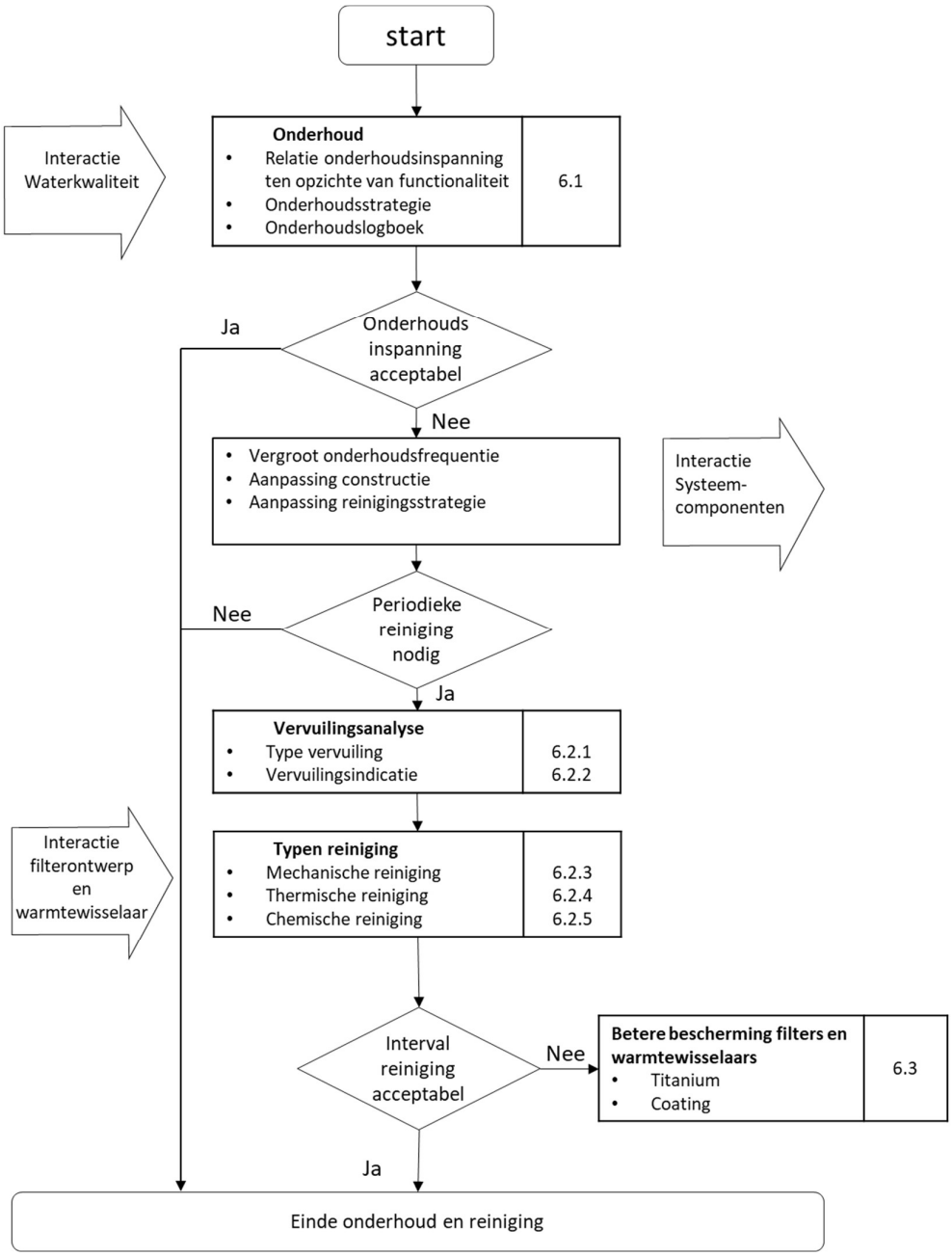
5.5.3 Vervuiling

Een degelijk ontwerp van de warmtewisselaar maakt de kans op vervuiling zo klein mogelijk. Ontwerpparameters zoals plaatafstand, materiaal en het debiet dat door de warmtewisselaar stroomt bepalen of er vervuiling zal optreden in de warmtewisselaar of niet. Als een warmtewisselaar niet goed functioneert, is vervuiling een mogelijke oorzaak. De warmteoverdracht kan lager zijn dan verwacht of de drukval kan hoger zijn dan verwacht.

Om vervuiling in een warmtewisselaar te onderzoeken worden inspecties aan de warmtewisselaar gedaan. Hierbij wordt de temperatuuroverdracht in de warmtewisselaar gemeten. De temperatuur wordt hierbij aan de 4 zijden van de warmtewisselaar gemeten, waarna eventuele reiniging plaats vindt. Een tweede methode om de snelheid van vervuiling te onderzoeken is het plaatsen van vervuilingssensoren op de warmtewisselaar. Dit zijn kleine stukjes metaal die als eerste worden aangetast als de waterkwaliteit te agressief is voor de warmtewisselaar [18].

6 Systeem onderhoud en reiniging

In het onderstaande stroomschema staat schematisch weergegeven welke processen een rol spelen bij het onderhoud van een aquathermiesysteem. Daarnaast is schematisch weergegeven welk type reiniging toegepast kan worden en wat mogelijkheden zijn om de filters en warmtewisselaars beter bestand te maken tegen vervuiling.



Figuur 31: Ontwerpschema reiniging en onderhoud

6.1 Onderhoud

Het onderhoud van een aquathermiesysteem moet afgestemd zijn op de functionaliteit van de installatie. Hierbij is het van belang dat het onderhoud beheersbaar is. Afhankelijk van de grootte van het aquathermiesysteem kan een onderhoudsstrategie worden gevolgd. Voor grote TEO aquathermiesystemen zou het bijvoorbeeld zo kunnen zijn dat onderhoud minder een probleem is als er beheerders in de buurt zijn, terwijl dit voor kleinere onbemande systemen een groter probleem kan zijn. Afhankelijk van de grootte en functionaliteit van het systeem is het dus belangrijk om een goede afweging tussen de aanlegkosten (CAPEX) en de operationele en onderhoudskosten (OPEX) te maken.

Bij de onderhoudswerkzaamheden is het wenselijk om een onderhoudsstrategie toe te passen door middel van het opstellen van een onderhoudsplan en een onderhoudslogboek. Door het consequent bijhouden van het onderhoudslogboek kan worden onderzocht wat het beste onderhoudsinterval is dat toegepast kan worden. Op basis hiervan kan het onderhoudsplan worden afgeregeld, zodat de installatie voldoende onderhouden zonder dat er onnodige stilstand van het systeem nodig is (bijvoorbeeld door regulier onderhoud). Bovendien garandeert een duidelijk onderhoudsplan en onderhoudslogboek continuïteit in de bedrijfsvoering.

Systeemonderhoud wordt vaak toegepast bij de kritische componenten in het ontwerp, zoals de filters en de warmtewisselaars. Het is van belang dat deze componenten goed bereikbaar zijn voor onderhoud. In de onderstaande paragrafen zijn een aantal reinigingsmethoden verder uitgewerkt. .

6.2 Reiniging

Er bestaan meerdere mogelijkheden voor reiniging van aquathermiesystemen. In de TEO aquathermie worden de volgende methoden van reiniging onderscheiden: 1) mechanische reiniging, 2) thermisch reiniging en 3) chemische reiniging. Wat de best mogelijke reinigingsmethode is, hangt af van het type vervuiling en de locatie van de vervuiling. Om vervuiling op het grof rooster bij de inlaat te verwijderen is een ander reinigingsmethode nodig dan om vervuiling in een warmtewisselaar te reinigen.

Naast het type vervuiling hangt de mate van vervuiling ook samen met de operatie van het systeem. Indien het TEO aquathermiesysteem wordt gebruikt als regeneratiebron voor het WKO systeem, dan draait het TEO systeem slechts een beperkt deel van het jaar. Na deze periode wordt het dan vaak uit bedrijf genomen, waarna onderhoud mogelijk is. Indien een TEO systeem het hele jaar door als bron wordt gebruikt voor bijvoorbeeld een zeer lage temperatuur (ZLT) warmte-/koudenet , dan moet de reiniging periodiek worden toegepast. In dit laatste geval is het wenselijk om een back-up systeem te hebben, zodat de warmte/koudelevering niet wordt beïnvloed door eventuele vervuiling van het systeem.

6.2.1 Type vervuiling

Omdat vervuiling door opgeloste stoffen in het water en bacteriën (microfouling) vaak niet worden tegen gehouden door het filtersysteem, stromen deze deeltjes mee door de warmtewisselaar, wat kan zorgen voor vervuiling. Ophoping van het vuil kan zorgen voor aantasting van een warmtewisselaar en aanslag kan zorgen voor een verminderde warmteoverdracht. Daarom moet er van tijd tot tijd onderhoud worden gepleegd.

Vervuiling in het filter of in de warmtewisselaar kan bestaan uit

1) Blokkade door grof vuil (dit treedt alleen op als de filtering niet voldoet)
2) Afzetting van fijne deeltjes, denk aan kleideeltjes die meespoelen met het water
3) Neerslag door kalkafzetting (ketelsteen)
4) Biofouling door algengroei

blokkade | Deeltjes afzetting | Kalk afzetting | Biofouling

Figuur 32: Vervuiling in de warmtewisselaar (bron: Alfa Laval)

Naast de bovenstaande vervuilingsopties zijn er nog andere vervuilingsopties bij TEO systemen zoals draadalgen (verder beschreven in Bijlage 1.1), mossels (Bijlage 1.2) of MIC (Bijlage 1.3).

6.2.2 Vervuilingsindicatie

Drukverlies is vaak een eerste indicatie voor vervuiling. Bij de waterinname is dit vaak te zien, door ophoping van vuil. In leidingen, filters en warmtewisselaars is dit vaak moeilijker te identificeren. Vervuiling in het leidingsysteem kan zorgen voor een veranderende pompoperatie. Door meer weerstand in het hydraulisch systeem zal de pomp op een ander werkpunt komen te liggen (zie ook Hoofdstuk 5.3).

Drukmetingen worden vaak toegepast om vervuiling te kunnen detecteren. In het ontwerp kan er bijvoorbeeld een alarmmelding worden gegeven bij een overschrijding van een bepaalde drukval tussen 2 druksensoren, waarna een reinigingsactie kan worden toegepast. Het is dus van belang om de drukverloop tussen inname en uitstroompunt te bewaken.

Bij een gelijkblijvende energievraag zou het voor kunnen komen dat de druk en het debiet verminderd. In dit geval zou een veranderende temperatuur van het oppervlaktewater er ook voor zorgen dat de pomp minder druk en debiet hoeft te leveren voor een gelijkblijvende warmteoverdracht. Dit kan worden bepaald met behulp van temperatuurmetingen in het oppervlaktewater.

Vervuiling in filtersystemen wordt duidelijk door een grotere drukval over het filter, en vervuiling in de warmtewisselaar zorgt voor een grotere drukval en een verminderde warmteoverdracht. Om vervuiling in de warmtewisselaar te kunnen monitoren worden ook wel eens testplaatjes toegepast om vervuiling te identificeren. Dit zijn kleine stukjes metaal waaraan kan worden gezien hoe ver de aangroei is (zie ook hoofdstuk 3.2.1).

In de onderstaande paragrafen staan de verschillende reinigingsmethoden beschreven die toe worden gepast in de aquathermie.

6.2.3 Hydraulische reiniging

Soms wordt hydraulische reiniging van warmtewisselaars toegepast. Hierbij wordt de warmtewisselaar dan aangesloten op een schoonwateraansluiting. Indien dit gebeurt, dan is het van belang dat het debiet en de druk, die tijdens het terugspoelen gehanteerd wordt, voldoende groot zijn. Indien er met een beperkte druk en debiet wordt teruggespoeld ten opzichte van de nominale stroming, dan wordt er vaak weinig schoon gespoeld.

Indien het oppervlaktewater wordt gebruikt voor de terugspoeling (met een extra pomp of een pomp met een omkeerinrichting), dan kan er vaak wel een hoger debiet worden gehaald. Deze manier van terugspoeling is echter niet altijd effectief, om dat het water wat gebruikt wordt voor terugspoeling dezelfde temperatuur heeft als tijdens de normale operatie. De biofilm die ontstaan is bij een langdurige stroming met een vergelijkbare temperatuur wordt dan vaak niet verwijderd. Om deze te kunnen verwijderen moet worden overgestapt op mechanisch, thermische of chemische en biologische reiniging.

Effectieve hydraulische reiniging door middel van een hoge druk spuit kan wel worden toegepast als de warmtewisselaar wordt ontmanteld en de platen worden schoongespoeld en droog worden teruggeplaatst. Dit is echter een tijdsintensieve activiteit en het is ook niet altijd mogelijk om de warmtewisselaar voor een langere periode buiten bedrijf te stellen.

6.2.4 Mechanische reiniging

Mechanische reiniging wordt het vaakst toegepast in de aquathermie. In filtersystemen vindt vaak automatische reiniging plaats door middel van terugspoeling. Dit staat verder beschreven in paragraaf 5.4.3.3. Hierbij wordt het vuil van het filter af geschraapt, waarna het vuil wordt geloosd, of wordt gebruik gemaakt door van terugspoeling om het vuil via een bypass terug te brengen in het oppervlakte water. De organismen die worden teruggespoeld kunnen dood en levend materiaal bevatten. Deze manier van reinigen duurt vaak kort, zodat de operatie door kan gaan.

Bij grote verstoppingen kan mechanische reiniging niet meer afdoende zijn, waardoor over gestapt moet worden op handmatige reiniging van filters en warmtewisselaars. De consequentie hiervan is dat het aquathermiesysteem vaak moet worden stopgezet waarna de reiniging plaats kan vinden. In het geval van filters en warmtewisselaars kan het voorkomen dat deze systemen uit elkaar moeten worden gehaald om de vervuiling te verwijderen. Voor warmtewisselaars kan dit een intensief proces zijn waarbij de platen verwijderd moeten worden. Dit zorgt voor downtime van de installatie, wat afhankelijk van de grootte van de warmtewisselaar en vervuiling een significante tijdsinspanning kan zijn. Daarnaast blijkt uit ervaring dat dit vaak een vies klusje is waar veel stank mee gepaard gaat.

Voor shell and tube warmtewisselaars bestaat een ander mechanisch reinigingssysteem, genaamd Taprogge (Figuur 33). Bij dit reinigingssysteem worden rubber balletjes door de buizen van de warmtewisselaars geblazen om deze buizen schoon te maken.

Figuur 33: Taprogge ballen die door de tubes worden geblazen om deze schoon te maken.

Om aangroei in leidingen te verwijderen, wordt pigging (ook wel proppen genoemd) vaak toegepast. Hierbij wordt er een prop met ongeveer de binnendiameter van de leiding door de leiding meegetransporteerd, waardoor al het vuil aan de buiswand wordt meegenomen. Zo'n prop kent verschillende uitvoeringsvormen: meer of minder flexibel en met of zonder borstels.

6.2.5 Thermische reiniging

Naast mechanische filtering, is ook thermische reiniging mogelijk. In dit geval worden macro-organismen gedood door er heet water langs te laten stromen. Een 15-60 minuten blootstelling van mosselen aan 40°C kan bijvoorbeeld een effectieve manier van reiniging zijn [33]. Omdat deze temperaturen in aquathermiesystemen niet altijd voorhanden zijn, zou voor deze manier van reiniging rekening gehouden moeten worden in het ontwerp van het systeem.

Indien afsluiters worden toegepast om bepaalde onderdelen in het aquathermiesysteem te isoleren, dan is het mogelijk om een beperkt deel thermisch te reiniging. Hiervoor kan een klein elektrisch verwarmingselement met een pompje worden toegepast.

6.2.6 Chemische en biologische reiniging

6.2.6.1 Reinigingsmiddelen

Bij grootschalige waterinnamesystemen voor elektriciteitsproductie wordt vaak chloor gebruikt als chemisch reinigingsmiddel, omdat chloor giftig is voor alle levende organismen. Continue chloordosering is echter in het geval van sommige mosselen niet afdoende, omdat sommige mosselen en schaaldieren receptoren hebben voor toxische middelen in het water. Als deze middelen in het water zitten, hebben zij de mogelijkheid om zich voor perioden van dagen en soms weken terug te trekken in hun schaal zodat ze deze dosering kunnen weerstaan. Dit is een van de belangrijkste redenen waarom continue dosering vaak niet werkt en puls chlorinering vaak veel effectiever is.

Een andere stof die wel gebruikt wordt om bijvoorbeeld blauwalgen tegen te gaan in het oppervlaktewater is waterstofperoxide. Dit lost goed op met water en kan in beperkte hoeveelheden de algengroei tegen gaan.

In drinkwaterindustrie en bij zwembaden wordt ozon gebruikt om het water te zuiveren. Deze methode wordt nog niet toegepast in de aquathermie.

Een alternatief wat soms wordt toegepast in de drinkwaterindustrie is ionisatie. Ionisatie is het proces waarbij een atoom een elektron kwijt raakt, waardoor het elektrisch geladen wordt. Koper-

zilver ionisatie wordt soms gebruikt in leidingen, door een elektrische stroom te zetten op koperzilver in de leiding. Het langsstromende water wordt hierdoor gereinigd. Het voordeel van koperzilverionisatie[8] is dat het effectief tegen legionella, biofilm en het verbetert de totale waterkwaliteit. Hierdoor zijn uiteindelijk minder andere reinigingsmiddelen zoals chloor nodig.
Deze techniek wordt tot op heden nog niet vaak toegepast in de aquathermie.

6.2.6.2 Reinigingsmethode

Voor chemische reiniging van warmtewisselaars is het mogelijk om de warmtewisselaar door te spoelen met een chemisch of biologisch reinigingsmiddel. Het CIP (Cleaning In Place) systeem wordt dan aangesloten op de warmtewisselaar waarna het systeem wordt gereinigd met behulp van chemische of biologische reinigingsmiddelen (o.a. citroenzuur, fosforzuur, sulfaminezuur en alkalische reiniging zoals groene zeep of soda). In Figuur 34 is een Cleaning In Place systeem te zien. Hierbij wordt het CIP systeem gekoppeld aan de warmtewisselaar. Het reinigingsmiddel wordt de warmtewisselaar in gepompt, waarna het vuil wordt opgevangen in een opvangtank. Een risico van dit systeem is dat na schoonmaken er toch nog reinigingsmiddel achterblijft dat mee het milieu in kan spoelen.

Figuur 34: Cleaning in place systeem voor een warmtewisselaar. Het schoonmaakmiddel wordt de warmtewisselaar in gepompt, waarna het vuil wordt opgevangen in een opvangtank (bron: Alfa Laval)

6.3 Bescherming filters en warmtewisselaars

6.3.1 Titanium

Omdat roestvorming als gevolg van vervuiling (zie Bijlage 1.3) grote gevolgen heeft voor filters en warmtewisselaars, kan het wenselijk zijn om een resistenter materiaal toe te passen. Een van de opties die vaak wordt toegepast is het vervangen van de platen van de warmtewisselaar van RVS-316 naar Titanium, wat resistenter is tegen bijvoorbeeld corrosie. Hierbij wordt echter wel opgemerkt, dat de toepassing van titanium vaak een CAPEX/OPEX afweging is, doordat de prijs van titanium significant hoger is dan de prijs van RVS-316.

6.3.2 Polijsten of coaten

Naast reiniging is het ook mogelijk om de materiaaleigenschappen van een voorwerp te veranderen. Door hardere metalen te gebruiken, of metalen met een gladder oppervlak, is de kans op aangroei minder. Dit kan bijvoorbeeld door coaten of polijsten. Coaten van bijvoorbeeld platen in de warmtewisselaar kan weer zorgen voor een verminderde warmteoverdracht, waardoor deze optie

[8] https://www.lenntech.nl/processen/desinfectie/chemisch/desinfectiemiddelen-koperzilverionisatie.htm

met zorg onderzocht dient te worden indien het wordt toegepast. Daarnaast kan er door slijtage of uitloging ongewenste stoffen (bijvoorbeeld toxische) in het milieu terecht komen [27].

6.3.3 MOL katalyse

Een nieuwe techniek die soms wordt toegepast om water te desinfecteren. Hierbij worden hoogwaardige katalysatoren gebruikt die elektrostatisch worden geladen. Deze katalysatoren trekken micro-organismen aan waar biotensides worden gevormd die zorgen voor de verwijderingen en afsterven van biofilms. Deze techniek [25] wordt soms toegepast in TEO aquathermiesystemen na het fijne filter en voor de warmtewisselaar. Verder wordt de techniek vaker toegepast voor waterhandeling in onder andere koelcircuits, bij zwembaden, in ventilatiesystemen, sprinklerinstallaties etc

7 Literatuurlijst

Artikelen

[1] KNMI (2020), Langjarige Windrozen Nederland De Bilt: https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/grafieken/maand/windrozen

[2] Maal-Bared R., Simpson D. A Craik S., 2016, "Using Biological activity reaction tests (BART) to monitor Microbially-Influenced Corrosion in Cast Iron pipes", Conference on National Drinking Water and Wastewater, Toronto, Canada, DOI: 10.13140/RG.2.2.30545.74080

Rapporten

[3] Alfa Laval (2004), *The theory behind heat exchangers,* Technisch rapport, ref: ECF00250EN 1009

[4] Bijkerk, R., Beers M. (2010), *Handboek hydrobiologie: biologisch onderzoek voor de ecologische beoordeling van Nederlandse zoete en brakke oppervlaktewateren*. Rapport STOWA 2010-18

[5] Clusta Corrosie fiche 4

[6] Deltares (2008), *Validation document Delft3D-FLOW – a software system for 3D flow simulations*, Deltares reference: X0356, M3470

[7] Deltares (2020), *Monitoringsplan Ecologische Effecten Thermische Energie Oppervlaktewater*, WarmingUp thema 3B, ref: 11205155-001-BGS-0001

[8] Dixon D.A. (2000), Technical Evaluation of the Utility of Intake Approach Velocity as an Indicator of Potential Adverse Environmental Impact under Clean Water Act Section 316(b), EPRI report 1000731

[9] Eteck (2020), *Ontwerpaspecten TEO installaties*, memo ten behoeve van ontwerphandreiking, 26 oktober 2020

[10] De Fockert A, Cardose R, Molenaar R, van der Werff B, de Vlieger H, Godschalk B, Meddeler B, Bos S, Oesterholt F, Moerman A, (2021), *Aquathermie configuraties – overzicht van TEO, TED en TEA door middel van factsheets, kostenkentallen en beslisbomen*, WarmingUP thema 3C, ref: 11205156

[11] Harezlak V. (2021a), *Effecten van koudelozingen op het ecologisch functioneren van het oppervlaktewatersysteem,* WarmingUP thema 3B, ref: 11205155

[12] Harezlak V. (2021b), *Opzet landelijk monitoringsprogramma-Ecologische effecten thermische energie uit oppervlaktewater*, Deltares rapport, kenmerk: 11206845-000-BGS-0005

[13] Helcom (2006). *Biovolumes and size-classes of phytoplankton in the Baltic Sea*. Baltic Sea Environment Proceedings No. 106, ISBN 0357-2994.

[14] KSB (2021), *De 10 voornaamste pompkillers – en hoe ze te voorkomen*, KSB Suppreme services

[15] Kunst, J.M., Spaargaren B., Vriese T., Kroes M., Rutjes C., van der Pauw Kraan E., Joker R.R., (2010), *Gemalen of vermalen worden*, STOWA rapport 2010-W03

[16] Ministerie van Infrastructuur en Milieu (2016), *Handboek Immissietoets 2016*, https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water/thema-s/zzs/uitleg-werkwijze-abm/

[17] Noordhuis R., Wortelboer R. (2018), *Kans op aangroei van mosselen in TEO-installaties*, Deltares memo, kenmerk: 11202197-008-BGS-0002

[18] Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (2015), *Best Practice Selectie en conditiebewaking warmtewisselaars*, rijkspublicatie, Publicatienummer: RVO-122/1501/RP-DUZA

[19] Smeding S.F., (2001), *Overzicht commercieel verkrijgbare warmtewisselaars – technische en economische kentallen*, ref: ECN-I-01-009 rev A.
[20] STOWA, (2021), *Kader voor vergunningverlening koudelozingen 1.0 – handreiking voor beoordeling van aanvragen voor TEO systemen*, STOWA rapport 2021-30, ISBN 978.90.5773.946.0
[21] Technische Advies Commissie voor de waterkeringen (2003), *Leidraad kunstwerken*, https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_57188_31/
[22] Techniplan Adviseurs BV (2018), *Thermische energie uit oppervlaktewater (TEO) - De potentie van TEO voor verduurzaming van de gebouwen van het Rijksvastgoedbedrijf en Rijkswaterstaat (kosten en baten)*, Technisch rapport, ref: RVD-102X1-E-SAA002D
[23] Van Geest G., Wortelboer R., (2018), *Draadalgen als mogelijke belemmering voor TEO installaties*, Deltares memo, ref: 11202197-008-BGS-0003
[24] Van Duijnhoven N., van der Linden A, Ouwekerk K., (2019), KRW - toestand en trendanalyse voor nutriënten, Deltares rapport ref: 11203728-006-BGS-0002
[25] Veolia (2021), *Natuurlijke desinfectie door BerkeMOL® technologie* – duurzame en doeltreffende water behandeling, brochure

Boeken

[26] Deltares (2012), Hydraulisch ontwerp en beheer afvalwatertransportsystemen, CAPWAT Handboek, Stowa rapport 48, ISBN: 978.90.5773.586.8, https://www.stowa.nl/publicaties/handboek-hydraulisch-ontwerp-en-beheer-van-afvalwatertransportsystemen
[27] Ferrari G.M., Willemsen P.R. (1992), *Speuren naar milieuvriendelijke aangroeiwering*, Nederlands, TNO-Industrie, Centrum TNO Coatings, Delft, 1992
[28] Idelchik, I.E. (2008), *Handbook of Hydraulic Resistance*, 4th edition, Begell House Inc., New York. ISBN: 978-1-56700-251-5
[29] Jansen S., van Burgel M., Slim B., Gerritse J., (2017), *Microbiologically Influenced Corrosion in the Upstream Oil and Gas Industry - A Laboratory and Field Study Using Electrical Resistance Bioprobes,* Chapter 21, New York, USA: CRC Press, p.p. 413-434
[30] T. Kuppan (2000), *Heat Exchanger Design Handbook*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, ISBN: 0-8247-9787-6
[31] Miller, D.S. (1990), *Internal Flow Systems*, 2nd edition, British Hydromechanics Research Association, ISBN-13: 978-0947711771
[32] Reg. Bott, T.(2011), *Industrial Biofouling,* Elsevier B.V., Oxford, Great Brittain, ISBN: 978-0-444-53224-4
[33] SUEZ (2020), *Handbook of Industrial Water Treatment,* https://www.suezwatertechnologies.com/handbook/handbook-industrial-water-treatment

Bijlage 1 Uitwerking vervuilingsproblematiek

1.1 Draadalgen

Macroalgen die zich onder het wateroppervlak leven en losraken van de bodem kunnen voor problemen zorgen bij water inname systemen. Deze drijvende algen worden ingezogen door inname punten van onder andere aquathermiesystemen. In het aquathermiesysteem komen deze draadalgen uiteindelijk vast te zitten in de filtersystemen en pompwaaiers, die hierdoor verstopt raken. Terugspoeling van fijne filters zijn vaak niet voldoende om de draadalgen uit het systeem te verwijderen, waardoor er vaak handmatige reiniging nodig is.

Wat zijn draadalgen

Draadalgen zijn draadvormige macroalgen die zich onder water hebben vastgehecht aan een vast oppervlak. De soortensamenstelling van draadalgen wordt sterk gestuurd door nutriënten, temperatuur, blootstelling aan wind, koolstof en PH waarde. Draadalgen treden vaak op in hard alkalisch water (PH 7-9), wat in Nederland vaak optreedt, doordat veel oppervlaktewater afkomstig is uit rivierwater.

Figuur 35: Draadalgen in een vijver (www. Schonevijver.nl)

Er zijn verschillende sturende factoren voor de ontwikkeling van draadalgen. Licht en temperatuur zijn van groot belang voor fotosynthese en de groei van draadalgen. Per algensoort kunnen de ideale omstandigheden behoorlijk verschillen. Sommige algensoorten gedijen goed bij 15°C en kunnen dus in het voorjaar snel groeien, terwijl andere soorten pas bij 25°C goed gedijen. In de winter komt draadalg niet of nauwelijks tot ontwikkeling. Naast temperatuur en lichtinval is de toevoer van nutriënten ook belangrijk voor draadalgen. Een grote toevoer van nutriënten zorgt normaal gesproken voor een snellere ontwikkeling van draadalgen. Drempelwaarden zijn hierbij niet bekend.

Aanwezigheid van draadalgen

Draadalgen gedijen goed bij wateren met geringe turbulentie (stilstaande wateren) en hoge nutriëntengehalten. In stromend water worden de algen snel meegenomen door de stroming, waardoor de ontwikkeling van grote hoeveelheden draadalgen beperkt is. Indien het water voor langere tijd stilstaat (hierbij valt te denken aan gestuwde wateren), is het juist weer goed mogelijk dat draadalgen zich verder ontwikkelen.

Golfslag zorgt voor een verminderde biomassa. In meren waar aquathermie wordt toegepast kan golfslag wel degelijk een rol spelen, maar voor aquathermiesystemen die gebruik maken van slootwater is dit effect beperkt. Naast Golfslag zorgt graas door vogels, slakken en andere soorten ook voor een vermindering van draadalgen in het water.

1.2 Mosselen

De aangroei van mosselen in leidingen en filters kan de werking van een TEO aquathermiesysteem hinderen.

Mosselontwikkeling

Zowel in zoet als zout water komen mosselen voor. Mosselen hechten zich graag op harde ondergrond. De mosselgroei kan worden geremd door grote temperatuurfluctuaties, maar de groei kan optreden bij een grote range in temperatuur. Hoge stroomsnelheden voorkomen de ontwikkeling van mosselgroei. Beschutte locaties waar de doorstroming voldoende is zijn ideale omstandigheden voor de mosselen vanwege de doorgaande aangroei van voedingsstoffen. In het IJsselmeergebied is de aangroei van mosselen het hoogst.

In ondiep water (tot een diepte van 1.5m) kunnen schommelingen in watertemperatuur als gevolg van het dag-nacht ritme nadelig zijn voor mosselen, waardoor ze zicht minder zullen ontwikkelen. Een pH waarde hoger dan 9.6 is dodelijk voor mosselen. Zulke waarden kunnen voorkomen in voedselrijk water met een hoge productie van waterplanten en algen.

Bestrijden van Mosselaangroei

Voor de bestrijding van mosselaangroei wordt vaak chemische reinigingsmiddelen toegepast (hierbij valt te denken aan chloordosering, antifouling coatings, ozon en UV-behandeling). Maar ook mechanische reiniging bij filters en thermische reiniging kan worden toegepast. Bij een verwarming van het water tot 38-40 °C gedurende een half uur wordt de aangroei gestopt.

Bij een hoge stroomsnelheid kan de aangroei van mosselen beperkt worden gehouden. Zeer gladde anti-fouling coatings kunnen hierbij ook werken, maar deze zijn lastig toe te passen in warmtewisselaars.

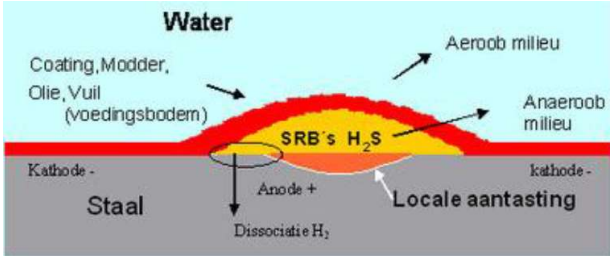
Het tijdelijk droogzetten van leidingsystemen zorgt ervoor dat de aangroei stopt en dat de mosselaangroei thermisch/mechanisch verwijderd kan worden. Hierbij zou in het ontwerp al rekening gehouden moeten worden.

1.3 Microbiologisch geïnduceerde corrosie

Aquathermiesystemen die gebruik maken van oppervlakte water kunnen te maken krijgen met Microbiologisch geïnduceerde corrosie (MIC). Uit ervaringen van bestaande aquathermiesystemen in verschillende delen van Nederland bleek dat de roestvrijstale warmtewisselaar niet bestand was tegen MIC, waardoor er na korte tijd lekkages optraden in de warmtewisselaar. Veel van deze systemen zijn uiteindelijk overgestapt op titanium warmtewisselaars welke beter bestand zijn tegen dit soort corrosie.

Wat is MIC

MIC wordt veroorzaakt door een versnelde microbiologische activiteit. Het corrosieprocess vindt vaak plaats onder een beschermende biofilmlaag die dun, dik, hard, slijmerig of taai kan zijn. Onder de biofilmlaag leven anaerobe bacteriën samen met aerobe bacteriën. De aerobe bacteriën bevinden zich vaak in de biofilmlaag, terwijl de anaerobe bacteriën eronder zitten en voor de corrosie zorgen (Figuur 36). Voorbeelden van deze bacteriën zijn onder andere Sulfaatreducerende bacteriën, Zwaveloxiderende bacteriën, IJzerreducerende bacteriën, IJzeroxiderende bacteriën, Methaanproducerende micro-organisme zorgen.



Figuur 36: voorbeeld van ontstaan van MIC corrosie door sulfaat reducerende bacterien (bron: www.corrosie.info [4])

Bij een gunstig microklimaat vermenigvuldigen de bacteriën zich snel en ontstaat de corrosie. Onder de juiste toevoer van nutriënten (bv. sulfaat) en onder de juiste temperatuur daalt de pH sterk, waardoor het materiaal plaatselijk op gaat lossen. Zo kan er op plaatsen met stilstaand water al binnen enkele maanden een lekkage ontstaan in leidingen, koppelingen of warmtewisselaars.

Dit microklimaat treedt vaak op in warmtewisselaars, waar onder de rubbers vaak stilstaand water achterblijft. Tezamen met de temperatuurwisselingen in de warmtewisselaar ontstaan er plaatsten waar MIC zich goed kan ontwikkelen.
Er zijn weinig metalen echt resistent voor de MIC bacterie, maar sommige metalen zijn gevoeliger dan andere metalen. Roestvast staal wat veel gebruikt wordt in de aquathermie is niet bestand tegen deze bacterie, maar ook koolstofstaal en koper kunnen hier niet tegen.

Herkennen van MIC

MIC treedt op door de aanwezigheid van een biofilmlaag. Daarnaast kunnen de zwaveloxiderende bacteriën een “rotte eieren” lucht achterlaten en er kan sprake zijn van “pitting” in het metaaloppervlak. De eerste locatie waar MIC optreedt is vaak in gebieden met lasnaden of onder rubbers, waar een beschutte ruimte is. Omdat MIC het gevolg is van de complexe interactie tussen micro-organismen, is het belangrijk dat MIC ook echt wordt vastgesteld door chemische en microbiologische analyses (DNA en RNA analyse of Biological Activity Reaction Tests - BART analyse).

Voorkomen van MIC

Om MIC te reduceren of te voorkomen moet de vorming van de biofilm laag worden tegengegaan. Dit kan bijvoorbeeld door chemische reiniging door het doseren van biocides zoals natriumhypochloriet, perazijnzuur of het plaatsen van een UV-unit in combinatie met een filterunit. In de aquathermie wordt vaak gekozen om titanium toe te passen, wat meer corrosiebestendig (maar ook duurder) is. Andere meer corrosiebestendige materialen zijn: elektrolytisch gepolijst RVS, 254 SMO of titanium grade 2. Ook (super-) duplex is in dit geval geschikt. Echter moet ook bij deze materialen regelmatig onderhoud worden gepleegd om aantasting door MIC te voorkomen. De bovenstaande materialen of methoden om MIC te voorkomen zijn nog niet getest.

Bijlage 2 Ervaringen met bestaande systemen

Voorafgaand aan het schrijven van deze ontwerphandreiking is een inventarisatie gemaakt van de ervaringen die zijn opgedaan bij de verschillende aquathermiesystemen. Deze ervaringen zijn aangereikt door de volgende partijen: Vattenfall, Eneco, Ennatuurlijk, HVC, ETP, Eteck, IF|Technology en Techniplan. De ervaringen zoals aangeleverd zijn gebruikt voor de richtlijnen zoals beschreven in deze ontwerphandreiking.

In de onderstaande lijst zijn de ervaringen van bestaande TEO aquathermie projecten beschreven. Bij de oplossing/redenatie zijn soms meerdere oplossingen gegeven. In dit geval gaat het vaak om verschillende projecten waarbij verschillende oplossingen zijn toegepast. Het doel van de onderstaande tabel is niet om de problemen in detail te beschrijven, maar om een indruk te geven wat ervaringen zijn met bestaande systemen en hoe deze zijn opgelost. Niet alle onderstaande oplossingen zijn generiek en sommige zijn ook project specifiek. Daarom dient er een goede probleemanalyse te worden uitgevoerd voordat er een oplossing kan worden toegepast. De ervaringen zijn gebundeld naar onderwerp:

locatie	probleem / oorzaak	oplossing / redenatie
Inlaat	Algengroei door te hoge concentratie nutriënten in het water	- Bij stilstaand water is dit een groot risico. Veel verwijdering bij inlaat nodig. - Systeem droogzetten indien het niet wordt gebruikt. - Inlaat verder van de waterkant plaatsen
	Opwervelend slib door scheepvaart	Inname te dicht bij de bodem geplaatst
	Veel kalk in het water	Vaak reinigen met zuur schoonmaakmiddel (o.a. azijn)
	Roestvorming in leidingmateriaal	ander leidingmateriaal toepassen
	Maaigras verzamelt zich bij inlaat	locatie inlaat op noordwest oever zorgt voor accumulatie vuil (grotere onderhoudskosten).
	Kortsluitstroming	verborgen duikerbuis zorgde voor kortsluitstroming. Aanpassing innamelocatie
	Bereikbaarheid innamelocatie	hijsarmen mogen niet op ponton geplaatst worden. Als oplossing wegneembare davits toegepast
	Aanvaringsrisico	Bescherming inlaat / uitlaatconstructie
	Aanzuigen grof vuil	Gaaskooi om inlaatconstructie
	Vervuiling inlaatrooster bij specifieke windrichting	aanpassing inlaatrooster en vaker controle bij drukverandering

	Waterstandsfluctuatie	zorgt voor beperkte waterdekking bij inname. Innamelocatie dieper aanleggen (±1-2m onder laagste waterstand)
	Vuilaantrekking door te hoge instroomsnelheid	inlaatconstructie en uitlaatconstructie aanpassen zodat de stroomsnelheid <0.3m/s is.
Pomp	grote variatie rivierwaterstand	inname via vacuümconstructie
	lege zuigleiding	- kleppen niet voldoende dicht - pakkingen lekken
	pomp zuigt lucht aan	- aanstroming veranderen - onderdompelingsdiepte vergroten
	schuim in tank tijdens CIP	de CIP retourpomp moet een grotere capaciteit hebben dan de CIP steekpomp
	verpompen van hete vloeistoffen	cavitatie treedt eerder op
	magnetiet vervuiling	doseerapparatuur voor waterbehandeling toegepast
	versnelde slijtage pomp door geen goede uitlijning van de pomp	de kanalen voor en achter de waaier moeten recht tegenover elkaar worden geplaatst.
Leidingen	RVS leidingen aangetast door MIC corrosie	leidingen vervangen door HDPE
	Cavitatie	- zuigleiding te lang, waardoor beschikbare NPSH kleiner is dan de benodigde NPSH - zuigleiding te smal waardoor teveel weerstand ontstaat
	Lucht in de leiding	- ontluchters plaatsen - stroomsnelheid verhogen zodat lucht wordt afgevoerd
Appendages	lekkage koperen condensor pijpen	verhoogd schoonmaakinterval
	lekkage koppelingen	- koppelingen vervangen door harder materiaal - koperionen toepassen
Filter	Filter slaat vaak in een keer dicht	Filter te fijnmazig. Uiteindelijk gekozen voor het toepassen van een ander filtertype
	Verstopping filters	- automatische filtering toepassen - robuuster filter toepassen
Warmtewisselaar	lekkende platen warmtewisselaar	MIC corrosie, platen warmtewisselaar vervangen van RVS316 naar Titanium
	vervuiling platen warmtewisselaar	- Cleaning in place met citroenzuur en vaker doorspoelen - Warmtewisselaar uit elkaar gehaald om schoon te maken
	vervuiling warmte tijdens niet actieve periode	conserveren met demi-water

	te veel kalk bij bestrijding biofouling	chloride apparaat verwijderd bij koudewinning. Onder de 10°C bijna geen biologische activiteit
WKO	veel pompvermogen nodig om water met klein temperatuurverschil in de WKO bron te krijgen	geen WKO bron toepassen (daling rendement warmtepomp compenseert ruimschoots kosten pompenergie voor WKO bron)
	veel storing door complex aansturingssysteem van TEO systeem	aansturing simpel en robuust maken.
	onvoldoende koelvermogen door opwarming in zomer	extra koelmachine
	onvoldoende warmtevermogen in winterperiode	tijdelijke noodketel geplaatst

WARMINGUP
Innovatief Duurzaam Warmtecollectief

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

v1 24 november 2021